

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES DE TERRASSA**

**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO
RADIANTE POR CABLE ELECTRICO EN LA
CALEFACCION DE LOS EDIFICIOS
INDUSTRIALES**

Tesis Doctoral presentada por:
MONTSE SANCHEZ ROMERO
Ingeniero Industrial
por la E.T.S.I.I de Terrassa

Dirigida por:

PERE ALAVEDRA RIBOT
Dr. Ingeniero Industrial (U.P.C.)

Terrassa, Septiembre 1994

5.18 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCION

Descomponiendo la superficie del suelo en una medida longitudinal (LR) y en una transversal (LT) (figura 5.14).

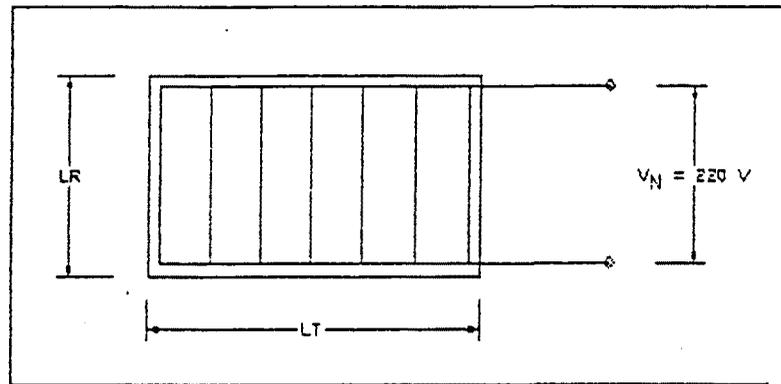


fig 5.14

y realizando la conexión de las resistencias mediante un montaje en paralelo sometido a una tensión nominal común de 220V. La disposición de estas será paralela a la pared exterior de mayor superficie (figura 5.15).

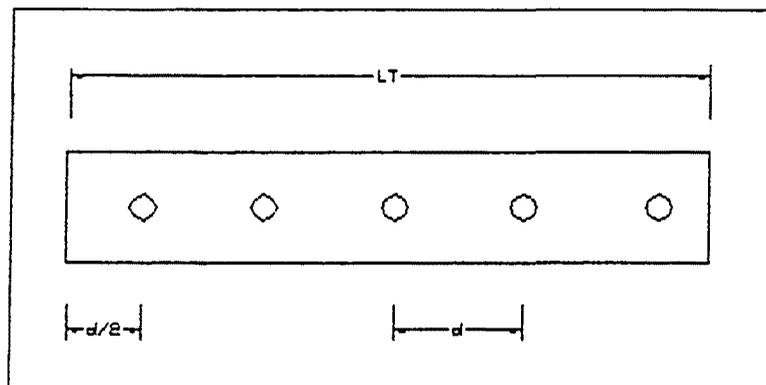


fig 5.15

A partir de estos datos estamos en condiciones de calcular el número de resistencias y la distancia entre estas:

- Demanda de calor DC
- Potencia disipada por cada resistencia

$$P = [VN^2/R] = [VN^2/(LR)(Rm)]$$

donde: Rm es la resistencia por metro lineal ohmios/m
 LR es la longitud del local según resistencia. Según este montaje LR es la longitud del cable.
 VN es la tensión nominal de la red

- Potencia disipada por n resistencias

$$PT = (VN^2)(NR) / (LR)(Rm)$$

siendo: NR el número de resistencias a instalar

De acuerdo con lo visto debe ser:

Demanda total de calor = Potencia disipada por n resistencias

$$\begin{aligned} DC &= PT \\ DC &= (VN^2)(NR) / (LR)(Rm) \end{aligned}$$

De donde despejando NR:

$$NR = (DC)(LR)(Rm) / (VN^2)$$

Para un local standar de 2000 m² (40m x 50m), con LR=47m, con una demanda de calor DC=224.000W y para el montaje indicado, eligiendo un cable calefactor de las siguientes características (tablas 5.3a, 5.3b, 5.4a, 5.4b)

Resistencia por metro lineal	Rm	= 0,682 ohmios/m
Potencia lineal	Pl	= 31,9 W/m
Longitud del cable	B	= 47 m
Tensión nominal	VN	= 220 V
Potencia trama (P=PlxB)	P	= 1500 W

Sustituyendo valores:

$$\begin{aligned} NR &= (224.000 \times 50 \times 0,682) / (220)(220) \\ NR &= 158 \end{aligned}$$

Cada uno de estos cables proporciona 1500W, por tanto en total tendremos 158x1500 = 237.000 W, con lo cual cubrimos la demanda de calor de 224.000 W.

Una vez calculado el número de resistencias necesario, se puede hallar la distancia (PASO) a que deben estar. Para conseguir una simetría total de discretización del suelo, la distancia entre las resistencias extremas y la pared será la mitad de la distancia entre dos resistencias.

La distancia entre resistencias vendrá determinada por:

$$DR = LT / NR$$

donde LT es la longitud en sentido transversal a la resistencia
NR es el número de resistencias

Siendo la distancia máxima permitible de separación entre los cables calefactores de 30 cm.

Sustituyendo los valores:

$$\begin{aligned} LT &= 40 \text{ m} \\ NR &= 158 \\ DR &= 40/158 = 0,253 \text{ m} = 25,3 \text{ cm} \end{aligned}$$

siendo menor que la distancia máxima permitible de separación entre cables calefactores.

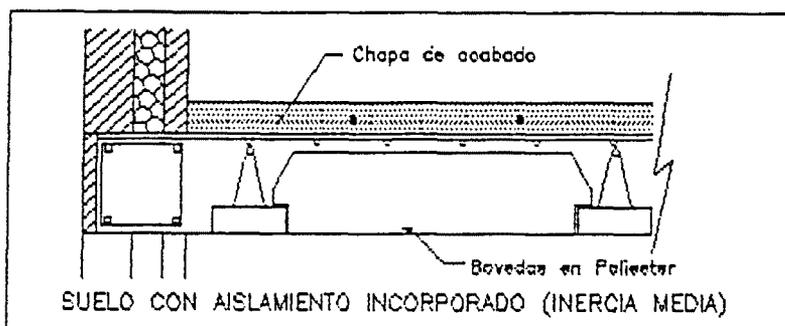
5.18.1 ELECCION DEL CABLE CALEFACTOR

En función de la inercia del suelo, se elige la potencia lineal del cable calefactor:

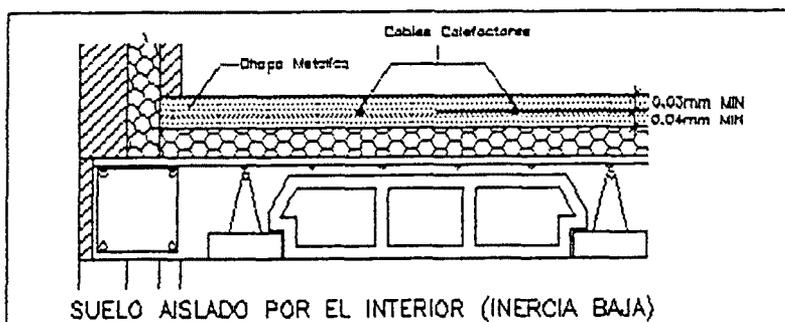
suelos de baja inercia : 25 w

suelos de alta inercia : 33 w

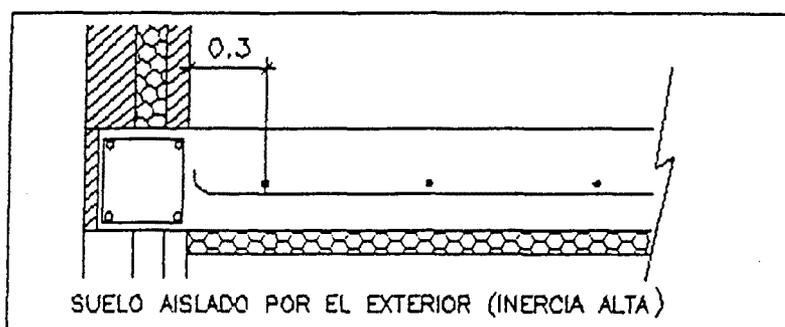
SUELOS CON AISLAMIENTO INCORPORADO (INERCIA MEDIA)



SUELO AISLADO POR EL INTERIOR (INERCIA BAJA)



SUELO AISLADO POR EL EXTERIOR (INERCIA ALTA)



5.18.2 DISEÑO DE LA TRAMA CALEFACTORA

La trama calefactora es el elemento calefactor dispuesto en una serie de ida y retorno denominado "semi-espira", simbolizado en la figura 5.16 por "dS" (su longitud "L" una vez definida es constante sea cual sea el paso)

El espacio "d" entre dos "dS" se denomina paso (68).

Se calcula en primera aproximación por la formula :

$$d = 100. S / B \text{ (cm)}$$

siendo:

S ; superficie equipable en m²

B ; longitud del elemento calefactor en m

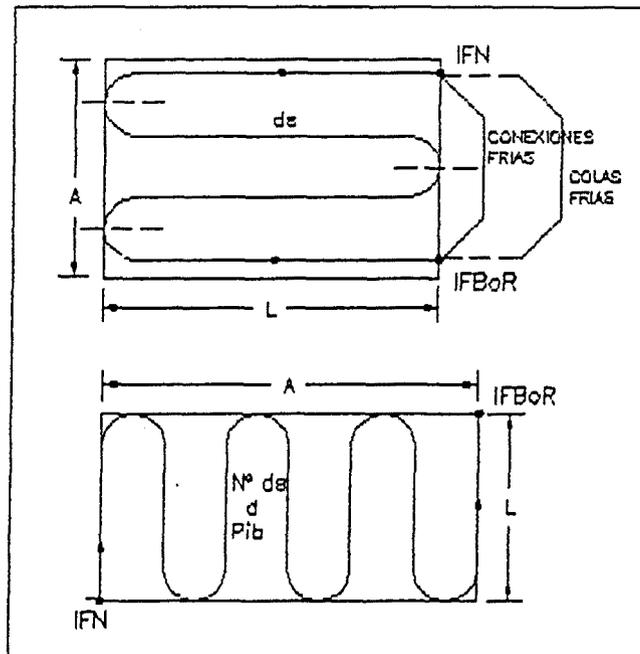
Las características de la trama calefactora son:

Pi ; su potencia

d ; su paso

A' ; su longitud

A'=(Nº dS -1) x d



Trama calefactora. Representación gráfica
fig 5.16

ANCHURA REAL "L _{real} " DE LOS TRAMOS SEGUN EL PASO "d" Y LA ANCHURA NOMINAL "L"								
ANCHURA NOMINAL L (m)	PASO d (cm)							
	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
1	0,93	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83
1,5	1,43	1,42	1,40	1,39	1,38	1,36	1,35	1,33
2	1,93	1,92	1,90	1,89	1,88	1,86	1,85	1,83
2,5	2,43	2,42	2,40	2,39	2,38	2,36	2,35	2,33
3	2,93	2,92	2,90	2,89	2,88	2,86	2,85	2,83

TABLA 5.3

EMISION LINEAL 25 W/m				
TENSION 220 V				
POTENCIA (W)	REFERENCIA	RESISTENCIA LINEAL (Ohms/m)	POTENCIA LINEAL (W/m)	LONGITUD CABLE (m)
500	5020/220	4,850	25,0	20
700	7030/220	2,300	23,3	30
900	9035/220	1,529	25,7	35
1100	11041/220	1,071	26,8	41
1300	13054/220	0,682	24,0	54
1500	15061/220	0,525	24,6	61
1700	17074/220	0,385	23,0	74
2000	20082/220	0,295	24,4	82
2300	23090/220	0,235	25,6	90
2500	25106/220	0,192	23,6	106
2700	27111/220	0,162	24,3	111
3000	30122/220	0,132	24,6	122
3300	33131/220	0,112	25,2	131
3600	36140/220	0,096	25,7	140
4500	45162/220	0,059	24,7	162

TABLA 5.4.a

EMISION LINEAL 25 W/m				
TENSION 380 V				
POTENCIA (W)	REFERENCIA	RESISTENCIA LINEAL (Ohms/m)	POTENCIA LINEAL (W/m)	LONGITUD CABLE (m)
900	9030/380	4,850	27,3	31
1200	12052/380	2,300	23,1	52
1500	15063/380	1,529	23,8	63
1800	18075/380	1,071	24,0	75
2300	23092/380	0,682	25,0	92
2600	26106/380	0,525	24,5	106
3000	30125/380	0,385	24,0	125
3500	35140/380	0,295	25,0	140
3900	39157/380	0,235	24,8	157
4400	44171/380	0,192	25,7	171
4800	48186/380	0,162	25,8	186
5300	53206/380	0,132	25,0	206
5800	58222/380	0,112	26,1	222
6300	63239/380	0,096	26,3	239
8000	80306/380	0,059	26,1	306

TABLA 5.4.b

EMISION LINEAL 33 W/m				
TENSION 220 V				
POTENCIA (W)	REFERENCIA	RESISTENCIA LINEAL (Ohms/m)	POTENCIA LINEAL (W/m)	LONGITUD CABLE (m)
600	6018/220	4,850	33,0	18
800	8025/220	2,300	32,0	25
1000	10031/220	1,529	32,2	31
1200	12037/220	1,071	32,4	37
1500	15047/220	0,682	31,9	47
1700	17054/220	0,525	31,5	54
2000	20063/220	0,385	31,7	63
2300	23071/220	0,295	32,4	71
2500	25082/220	0,235	30,5	82
2900	29086/220	0,192	33,0	86
3100	31096/220	0,162	32,3	96
3500	35105/220	0,132	33,0	105
3800	38114/220	0,112	33,0	114
4000	40126/220	0,096	31,7	126
5200	52158/220	0,059	32,9	158
6800	68209/220	0,034	32,5	209

TABLA 5.5.a

EMISION LINEAL 33 W/m				
TENSION 380 V				
POTENCIA (W)	REFERENCIA	RESISTENCIA LINEAL (Ohms/m)	POTENCIA LINEAL (W/m)	LONGITUD CABLE (m)
1000	10031/380	4,850	32,2	31
1400	14045/380	2,300	31,1	45
1700	17055/380	1,529	30,9	55
2100	21064/380	1,071	32,8	64
2600	26081/380	0,682	32,1	81
3000	30091/380	0,525	33,0	91
3500	35106/380	0,385	33,0	106
4000	40121/380	0,295	33,0	121
4500	45136/380	0,235	33,0	136
5000	50151/380	0,192	33,0	151
5400	54165/380	0,162	32,7	165
6000	60182/380	0,132	33,0	182
6500	65198/380	0,112	32,8	198
7000	70214/380	0,096	32,7	214
9000	90272/380	0,059	33,0	272
11800	118360/380	0,034	32,8	360

fig 5.5.b

Para un local de 2000m² (LT=40m , LR=50m) con una demanda de calor DC =224.000 W se van a analizar diferentes tamaños de TRAMAS CALEFACTORAS.

Una vez definidas las dimensiones de la trama calefactora quedará definido el TIPO DE CABLE y el PASO más óptimo.

OPCION 1

Definimos una superficie equipable de dimensiones las indicadas en la figura 5.17

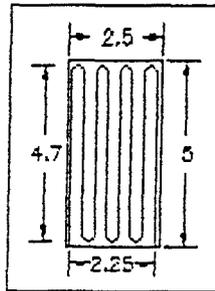


fig 5.17

$$\begin{aligned} \text{LT trama} &= 2,5 \text{ m} ; & A' &= 2,25 \text{ m} \\ \text{LR trama} &= 5 \text{ m} ; & dS &= 4,7 \text{ m} \\ & & L_{\text{real}} &= 4,56 \text{ m} \\ & & & \text{(tabla 5.3)} \end{aligned}$$

$$S \text{ trama} = 2,5 \times 5 = 12,5 \text{ m}^2$$

El número total de tramas calefactoras a instalar en el local será;

$$\begin{aligned} N \text{ tramas} &= S_{\text{local}} / S_{\text{trama}} = 2000 / 12,5 \\ N \text{ tramas} &= 160 \end{aligned}$$

La potencia mínima necesaria de cada una de estas tramas deberá ser;

$$\begin{aligned} P \text{ trama} &= P_{\text{total}} / N_{\text{tramas}} = 224.000 / 160 \\ P \text{ trama} &= 1.400 \text{ W} \end{aligned}$$

Para esta trama y con esta potencia se opta por un cable calefactor de las siguientes características;

Referencia	15047/220
Resistencia lineal	Rm = 0,682 ohmios/m
Potencia lineal	Pl = 31,9 W/m
Longitud cable	B = 47 m
Tensión nominal	VN = 220 V
Potencia trama	P = 1500 W

La potencia de la trama viene dada por;

$$P \text{ trama} = Pl \times B = 31,9 \times 47 = 1500 \text{ W}$$

o bien;

$$P \text{ trama} = (VN)^2 / R$$

$$\begin{aligned} \text{siendo} \quad R &= B \times R_m \\ R &= 47 \times 0,682 \\ R &= 32 \text{ ohmios} \end{aligned}$$

$$P \text{ trama} = (220)^2 / 32 = 1500 \text{ W}$$

El número de espiras (dS) de la trama será;

$$NdS \text{ trama} = B / dS = 47 / 4,7 = 10$$

El paso entre espiras (d) será;

$$d = A' / NdS - 1 = 2,25 / 9 = 0,25 \text{ m}$$

La generación de calor del la trama;

$$G \text{ trama} = P \text{ trama} / S \text{ trama} = 1500 / 12,5 = 120 \text{ W/m}^2$$

La generación de calor del cable;

$$\begin{aligned} G \text{ cable} &= P_l / S_{\text{cable}} = 31,9 / 78,5 \text{ exp-6} \\ G \text{ cable} &= 406.369 \text{ W/m}^3 \end{aligned}$$

o bien, lo que es lo mismo:

$$\begin{aligned} G \text{ cable} &= (pxr)_{\text{cable}} \\ \text{siendo } p &\text{ la densidad del cable (Kg/m}^3) \\ r &\text{ el calor por unidad de masa (W/Kg)} \\ r &= P_l \text{ (W/m)} / \text{Peso (Kg/m)} \end{aligned}$$

OPCION 1'

Definimos una superficie equipable de igual dimensiones que la opcion 1, indicadas en la figura 5.18.

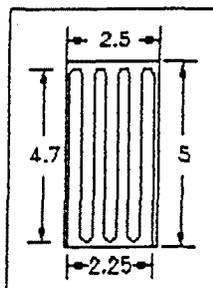


fig 5.18

$$\begin{aligned} LT \text{ trama} &= 2,5 \text{ m} & ; & & A' &= 2,25 \text{ m} \\ LR \text{ trama} &= 5 \text{ m} & ; & & dS &= 4,7 \text{ m} \\ & & & & L_{\text{real}} &= 4,56 \text{ m} \\ & & & & & \text{(tabla 5.3)} \end{aligned}$$

$$S \text{ trama} = 2,5 \times 5 = 12,5 \text{ m}^2$$

El número total de tramas calefactoras a instalar en el local será;

$$N \text{ tramas} = S_{\text{local}} / S_{\text{trama}} = 2000 / 12,5$$

$$N \text{ tramas} = 160$$

La potencia mínima necesaria de cada una de estas tramas deberá ser;

$$P \text{ trama} = P_{\text{total}} / N_{\text{tramas}} = 224.000 / 160$$

$$P \text{ trama} = 1.400 \text{ W}$$

Para esta trama y con esta potencia se opta por un tipo de cable calefactor diferente al elegido en la opción, de las siguientes características;

Referencia	15061/220
Resistencia lineal	Rm = 0,525 ohmios/m
Potencia lineal	Pl = 24,6 W/m
Longitud cable	B = 61 m
Tensión nominal	VN = 220 V
Potencia trama	P = 1500 W

La potencia de la trama viene dada por;

$$P \text{ trama} = Pl \times B = 24,6 \times 61 = 1500 \text{ W}$$

o bien;

$$P \text{ trama} = (VN)^2 / R$$

$$\text{siendo } R = B \times Rm$$

$$R = 61 \times 0,525$$

$$R = 32 \text{ ohmios}$$

$$P \text{ trama} = (220)^2 / 32 = 1500 \text{ W}$$

El número de espiras (dS) de la trama será;

$$NdS \text{ trama} = B / dS = 61 / 4,7 = 13$$

El paso entre espiras (d) será;

$$d = A' / NdS - 1 = 2,25 / 12 = 0,187 \text{ m} = 18,7 \text{ cm}$$

La generación de calor de la trama;

$$G \text{ trama} = P \text{ trama} / S \text{ trama} = 1500 / 12,5 = 120 \text{ W/m}^2$$

La generación de calor del cable;

$$G \text{ cable} = Pl / S_{\text{cable}} = 24,6 / 78,5 \text{ exp-6}$$

$$G \text{ cable} = 313.375 \text{ W/m}^3$$

o bien, lo que es lo mismo:

$$G \text{ cable} = (p \times r)_{\text{cable}}$$

siendo p la densidad del cable (Kg/m³)

r el calor por unidad de masa (W/Kg)
 $r = Pl \text{ (W/m) / Peso (Kg/m)}$

OPCION 2

Definimos una superficie equipable de dimensiones las indicadas en la figura 5.19.

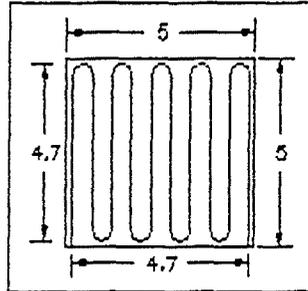


fig 5.19

LT trama = 5 m ; A' = 4,75 m
 LR trama = 5 m ; dS = 4,7 m
 Lreal = 4,56 m
 (tabla 5.3)

$$S \text{ trama} = 5 \times 5 = 25 \text{ m}^2$$

El número total de tramas calefactoras a instalar en el local será;

$$N \text{ tramas} = S_{\text{local}} / S_{\text{trama}} = 2000 / 25$$

$$N \text{ tramas} = 80$$

La potencia mínima necesaria de cada una de estas tramas deberá ser;

$$P \text{ trama} = P_{\text{total}} / N_{\text{tramas}} = 224.000 / 80$$

$$P \text{ trama} = 2.800 \text{ W}$$

Para esta trama y con esta potencia se opta por un cable calefactor de las siguientes características;

Referencia	29086/220
Resistencia lineal	Rm = 0,192 ohmios/m
Potencia lineal	Pl = 33 W/m
Longitud cable	B = 86 m
Tensión nominal	VN = 220 V
Potencia trama	P = 2900 W

La potencia de la trama viene dada por;

$$P \text{ trama} = Pl \times B = 33 \times 86 = 2900 \text{ W}$$

o bien;

$$P \text{ trama} = (VN)^2 / R$$

siendo $R = B \times RM$
 $R = 86 \times 0,192$
 $R = 16,5 \text{ hmios}$

$$P \text{ trama} = (220)^2 / 16,5 = 2900 \text{ W}$$

El número de espiras (dS) de la trama será;

$$NdS \text{ trama} = B / dS = 86 / 4,7 = 18$$

El paso entre espiras (d) será;

$$d = A' / NdS - 1 = 4,75 / 17 = 0,28 \text{ m}$$

La generación de calor del la trama;

$$G \text{ trama} = P \text{ trama} / S \text{ trama} = 2900 / 25 = 116 \text{ W/m}^2$$

La generación de calor del cable;

$$G \text{ cable} = P_l / S_{\text{cable}} = 33 / 78,5 \text{ exp-6}$$

$$G \text{ cable} = 420.382 \text{ W/m}^3$$

o bien, lo que es lo mismo:

$$G \text{ cable} = (p \times r)_{\text{cable}}$$

siendo p la densidad del cable (Kg/m³)
r el calor por unidad de masa (W/Kg)
 $r = P_l \text{ (W/m)} / \text{Peso (Kg/m)}$

OPCION 3

Definimos una superficie equipable de dimensiones las indicadas en la figura 5.20.

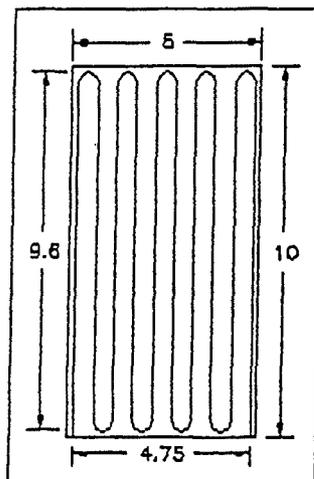


fig 5.20

$$\begin{aligned} \text{LT trama} &= 5 \text{ m} ; & A' &= 4,75 \text{ m} \\ \text{LR trama} &= 10 \text{ m} ; & dS &= 9,6 \text{ m} \end{aligned}$$

$$S \text{ trama} = 5 \times 10 = 50 \text{ m}^2$$

El número total de tramas calefactoras a instalar en el local será;

$$\begin{aligned} N \text{ tramas} &= S_{\text{local}} / S_{\text{trama}} = 2000 / 50 \\ N \text{ tramas} &= 40 \end{aligned}$$

La potencia mínima necesaria de cada una de estas tramas deberá ser;

$$\begin{aligned} P \text{ trama} &= P_{\text{total}} / N_{\text{tramas}} = 224.000 / 40 \\ P \text{ trama} &= 5.600 \text{ W} \end{aligned}$$

Para esta trama y con esta potencia se opta por un cable calefactor de las siguientes características;

Referencia	60182/380
Resistencia lineal	$R_m = 0,132 \text{ ohmios/m}$
Potencia lineal	$P_l = 33 \text{ W/m}$
Longitud cable	$B = 182 \text{ m}$
Tensión nominal	$V_N = 380 \text{ V}$
Potencia trama	$P = 6000 \text{ W}$

La potencia de la trama viene dada por;

$$P \text{ trama} = P_l \times B = 33 \times 182 = 6000 \text{ W}$$

o bien;

$$P \text{ trama} = (V_N)^2 / R$$

$$\begin{aligned} \text{siendo} \quad R &= B \times R_m \\ R &= 182 \times 0,132 \\ R &= 24 \text{ ohmios} \end{aligned}$$

$$P \text{ trama} = (380)^2 / 24 = 6000 \text{ W}$$

El número de espiras (dS) de la trama será;

$$NdS \text{ trama} = B / dS = 182 / 9,6 = 19$$

El paso entre espiras (d) será;

$$d = A' / NdS - 1 = 4,75 / 18 = 0,26 \text{ m}$$

La generación de calor del la trama;

$$G \text{ trama} = P \text{ trama} / S \text{ trama} = 6000 / 50 = 120 \text{ W/m}^2$$

La generación de calor del cable;

$$\begin{aligned} G \text{ cable} &= P_l / S_{\text{cable}} = 33 / 78,5 \text{ exp-6} \\ G \text{ cable} &= 420.382 \text{ W/m}^3 \end{aligned}$$

o bien, lo que es lo mismo:

$$G \text{ cable} = (\text{pxr})_{\text{cable}}$$

siendo p la densidad del cable (Kg/m³)
 r el calor por unidad de masa (W/Kg)
 $r = P_l \text{ (W/m) / Peso (Kg/m)}$

UNA VEZ ELEGIDA LAS DIMENSIONES DE LA TRAMA CALEFACTORA QUEDA DEFINIDO PARA UN TIPO DE CABLE EL PASO MAS OPTIMO. COMPROBACION

El proceso a seguir es:

- Definimos un tamaño de trama y una potencia mínima para esta trama.
- Elegimos un tipo de cable que proporcione esta potencia. (definimos su potencia lineal)
- Obtenemos el paso entre cables

Tomando como referencia la OPCION1 ;

Dimensiones trama	S	= 5m x 2,5m
Potencia mínima necesaria	P	= 1400 W
Cable calefactor;		
Resistencia lineal	Rm	= 0,682 ohmnios /m
Potencia lineal	Pl	= 31,9 W/m
Longitud	B	= 47 m
Tensión nominal	VN	= 220 V
Potencia de la trama	P	= 1500 W
Paso entre cables	d	= 0,25 m

Manteniendo el CABLE CON LA MISMA POTENCIA LINEAL, analizamos que ocurre al VARIAR EL PASO:

- Si AUMENTAMOS EL PASO entre cables, observamos que para la trama diseñada , el tipo de cable a instalar sería;

Paso entre cables	d	= 0,32 m
Cable calefactor		
Resistencia lineal	Rm	= 1,071 ohmnios /m
Potencia lineal	Pl	= 32,4 W/m
Longitud	B	= 37 m
Tensión nominal	VN	= 220 V

Por lo que la potencia de la trama será:

Potencia de la Trama	P	= 1200 W
----------------------	---	----------

que es menor que la mínima necesaria. Por tanto no es aceptable la solución.

- Si DISMINUIMOS EL PASO entre cables, observamos que para la trama diseñada, el tipo de cable a instalar sería:

Paso entre cables $d = 0,16 \text{ m}$

Cable calefactor

Resistencia lineal $R_m = 0,295 \text{ ohmnios /m}$

Potencia lineal $P_l = 32,4 \text{ W/m}$

Longitud $B = 71 \text{ m}$

Tensión nominal $V_N = 220 \text{ V}$

Por lo que la potencia de la trama será:

Potencia de la Trama $P = 2300 \text{ W}$

que es superior a la mínima necesaria. Por tanto es aceptable la solución, pero no es la óptima.

Por tanto si VARIAMOS EL PASO , DEBEREMOS VARIAR TAMBIEN LA POTENCIA LINEAL DEL CABLE PARA UNA MISMA TRAMA CALEFACTORA.

OPCION 1"

Potencia de la trama $P = 1500 \text{ W}$

Cable calefactor

Resistencia lineal $R_m = 1,525 \text{ ohmnios /m}$

Potencia lineal $P_l = 24,6 \text{ W/m}$

Longitud $B = 61 \text{ m}$

Tensión nominal $V_N = 220 \text{ V}$

Por lo que la separación entre cables será:

Separación entre cables $d = 0,187 \text{ m}$

Por tanto para obtener la misma potencia de la trama ,si disminuimos el paso entre cables debemos disminuir también la potencia lineal del mismo.

ELECCION DE LA TRAMA CALEFACTORA: TIPO DE CABLE Y PASO

Comparando las diferentes opciones estudiadas en el diseño de la trama calefactora. Se ha optado por la OPCION 1, que es la que se considera más favorable por sus dimensiones para la posterior realización de las juntas del pavimento (TABLA 5.6).

OPCION					
	OPC 1	OPC 1'	OPC 1''	OPC 2	OPC 3
LT (m)	2,5	2,5	2,5	5	5
LR (m)	5	5	5	5	10
Strama (m ²)	12,5	12,5	12,5	25	50
Ntrama	160	160	160	80	40
Ptrama (W)	1500	1500	2300	2900	6000
Plineal (W/m)	31,9	24,6	32,4	33	33
B (m)	47	61	71	86	181
Rm (Ohm/m)	0,682	0,525	0,295	0,525	0,192
Nº dS	10	13	15	18	19
d (m)	0,25	0,187	0,16	0,28	0,26
VN (V)	220	220	220	220	380
Gtrama (W/m ²)	120	120	120	116	120

Comparacion de opciones para la selección de la trama calefactora

TABLA 5.6

5.19 GENERACION INTERNA DE CALOR

Aunque el funcionamiento de la calefacción es intermitente, podemos considerar un calentamiento ininterrumpido para determinar las temperaturas medias del suelo, variando las resistencias hasta dar con la distribución óptima deseada.

Aunque en el proceso intermitente utilizaremos toda la potencia disponible:

$$DC = (PTP + PPI)(1 + MAO + MVI + MCI)$$

en el estudio del régimen permanente no tendremos en cuenta los coeficientes de seguridad adoptados, tomando como potencia disponible:

$$DC = PTP + PPI$$

La potencia generada por metro lineal será :

$$[Ptrama/B] = [1500/47] = 31,9 \text{ W/m}$$

siendo la potencia máxima del cable calefactor de 33 W/m.

Y puesto que las celdas de generación de calor comprenden solo media resistencia, el calor generado por el elemento que contiene la media resistencia será: 15,95 W/m

5.20 REGULACION DEL SISTEMA DE CALEFACCION

Con respecto a la regulación de la calefacción de base, el aparato regulador determina la cantidad de calor que debe acumular la calefacción de base durante las 8 horas-valle (noche) en función de la temperatura detectada por una sonda exterior.

Divide las 8 horas del periodo de tarifa horas-valle en fracciones de 10 minutos. De cada fracción, pondrá en marcha el sistema de base durante un porcentaje de dicha fracción proporcional al resultado de comparar la temperatura detectada por la sonda con la pendiente establecida en el mando correspondiente del aparato regulador.

"Pendiente" es la diferencia en grados centígrados entre los puntos T_{bn} y T_{xn} , donde:

T_{bn} : Temperatura de consigna de noche = 0% del tiempo funcionando la base.

T_{xn} : Temperatura para la cual el funcionamiento de la base ha de ser del 100% de cada fracción de tiempo, durante las horas-valle (8 horas).

Los porcentajes de tiempo de funcionamiento variarán proporcionalmente con las temperaturas intermedias incluidas en la pendiente consigna en el regulador.

De igual modo, en el relanzamiento de la base, durante las horas-llanas (día) en los días en que la temperatura media exterior es inferior a $+5^{\circ}\text{C}$, tendremos que:

T_{bd} : Temperatura consigna día = 0% de funcionamiento en relance de la base.

T_{xd} : Temperatura para la cual el funcionamiento de la base en relanzamiento será del 100% de cada fracción durante el periodo horas-llanas.

El reloj que ordena los cambios de contaje de las distintas tarifas en el contador discriminador horario (doble o triple tarifa) ordena simultaneamente el cambio de consignas y pendientes día y noche establecidas en el aparato regulador.

5.21 REGIMEN TRANSITORIO

El primer paso será la obtención del diagrama de temperatura exterior a lo largo de las 24 horas del día (periodo de carga + periodo de descarga).

Este gráfico se obtendrá por integración de las temperaturas del día anterior y las temperaturas durante la noche (medidas por una sonda exterior).

La evolución de la temperatura exterior a lo largo de un día tipo la discretizaremos en intervalos de 1 hora.

Realizaremos un análisis transitorio para cada intervalo de tiempo en que la temperatura exterior es prácticamente constante.

5.21.1 PERIODO DE CARGA (FOCOS INTERNOS)

Resolvemos el problema transitorio durante el primer periodo de tiempo en el que consideramos una temperatura exterior constante (problema transitorio con focos internos), observamos como ha variado la temperatura del suelo; si en algún instante del intervalo se supera el límite máximo impuesto a la temperatura superficial de la Losa, volvemos a resolver el problema transitorio a partir de este instante y hasta el final del intervalo pero sin focos internos. Volvemos a analizar como ha variado ahora desde ese instante la temperatura del suelo y si en algún otro instante detectamos que la temperatura del suelo está por debajo del límite mínimo impuesto a esta, entonces volvemos a resolver el problema transitorio desde este segundo instante hasta el final del intervalo pero con focos internos.

Así sucesivamente hasta que en todo el intervalo tengamos una temperatura del suelo que no supere los límites máximo y mínimos.

Este proceso lo repetiremos para todos los intervalos entre las 23 horas y las 7 horas (horas valle) correspondientes a el periodo de carga (periodo que se beneficia de un descuento del 55% en la tarifa eléctrica).

Finalmente obtendremos la evolución del proceso de Carga-Descarga a lo largo de la noche.

5.21.2 PERIODO DE DESCARGA

Dividimos el periodo de descarga en intervalos en los que podamos considerar la temperatura exterior constante.

Tomando como temperaturas iniciales las obtenidas al final del proceso de carga, resolvemos el problema transitorio sin focos internos durante el primero de estos intervalos y observamos como ha variado la temperatura interior del local; si detectamos en algún instante de este intervalo que la temperatura del aire es inferior a la temperatura de confort será necesario realizar un relance de la base a partir de este instante hasta volver a conseguir la temperatura deseada.

El relance de la base solo puede realizarse durante las horas llanas, luego si el instante en que se detecta una temperatura inferior a la de confort pertenece a horas cruce, habrá que volver a dimensionar la instalación para una potencia mayor (habrá que aumentar el número de resistencias disminuyendo la separación entre resistencias, ó bien elegir un cable calefactor de mayor potencia).

La situación ideal será que no sea necesario el relance de la base en horas llanas (durante el día) cuando la climatología sea la supuesta en el estudio, sino que solo se produzca en el caso de una climatología rigurosa y fuera de lo normal.

**MODELIZACION TEORICA. RESOLUCION DE LAS
ECUACIONES Y OBTENCION DE RESULTADOS**

Capítulo 6

MODELIZACION TEORICA RESOLUCION DE LAS ECUACIONES Y OBTENCION DE RESULTADOS

6.1 ELECCION DEL DOMINIO A ANALIZAR Y FORMA DE MODELIZACION

Para la modelización del comportamiento del Suelo Radiante se ha utilizado un programa de elementos finitos que permite resolver la ecuación de Poisson en régimen transitorio, la cual rige la transmisión de calor a través de un medio.

Se realiza un estudio previo para la elección del dominio a discretizar, forma de modelización e implementación de las condiciones de contorno.

Se han analizado distintos dominios de los que se destacan:

- 1er PROPUESTA AIRE NO DISCRETIZADO.

En el dominio en el que no se incluye el aire se analizan dos opciones:

- 1A) INCLUYENDO CAPA DE TERRENO
- 1B) LOSA AISLADA POR SU PARTE INFERIOR

- 2ª PROPUESTA AIRE DISCRETIZADO

El programa permite reflejar la GENERACION INTERNA DE CALOR de dos formas:

- Como una CARGA PUNTUAL, la cual se aplica en el nodo correspondiente al centro del elemento calefactor.
- Como FOCOS INTERNOS DE CALOR, los cuales se consideran que se producen en los elementos de la celda calefactora.

Una vez seleccionada la propuesta de modelización, se analiza para esta propuesta la INFLUENCIA DE LAS VARIABLES:

- DOSIFICACION de la LOSA de HORMIGON
- PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO del CABLE CALEFACTOR dentro de la Losa Radiante

6.1.1 PROPUESTA Nº1 : AIRE NO DISCRETIZADO

1A - INCLUYENDO CAPA DE TERRENO

Modelización del dominio formado por la losa de hormigón, con el cable calefactor embebido en su interior y el terreno sobre el que se apoya. Aislado perimetralmente todo el conjunto;

- 20 cm de hormigón, con el cable calefactor empotrado a una profundidad de 15,5 / 11 / 7 cm
- 25 cm de terreno

Se consideran TRES CONTORNOS ADIABATICOS, que corresponden a:

- Los dos contornos laterales, que como ya se vió en la elección de la celda tipo pueden considerarse como contornos aislados termicamente.
- El contorno inferior del terreno, considerando que a una profundidad de 25 cm podemos desprestigiar las pérdidas de calor hacia el terreno.

1B - LOSA AISLADA INFERIORMENTE

Modelización de la losa de hormigón con el cable calefactor embebido en su interior y aislado el conjunto perimetralmente y por su parte inferior.

Se consideran TRES CONTORNOS ADIABATICOS; los dos contornos laterales y el contorno inferior de la losa.

En ambas propuestas, el contorno correspondiente a la superficie de la losa radiante en contacto con el aire del local será un CONTORNO CON PERDIDA DE CALOR POR RADIACION Y CONVECCION.

La GENERACION DE CALOR dentro del hormigón se produce en el lugar donde se encuentra situado el cable, no en toda la losa de hormigón considerada en el dominio a discretizar. Por lo que se consideran dos materiales, uno para el hormigón y otro para los elementos que contienen el cable calefactor.

Para reflejar la generación de calor se consideran dos opciones:

- CARGA PUNTUAL aplicada en el nodo correspondiente al centro del elemento calefactor.
- FOCOS INTERNOS DE CALOR en los elementos que contiene el cable.

La elección de las DIMENSIONES de este ELEMENTO GENERADOR de calor

se realiza de forma que se asimilen al cable calefactor que contienen.

La función del cable calefactor es mantener una temperatura constante de 18°C en el interior del edificio, independientemente de la variación de temperatura en el exterior y de las perturbaciones que puedan producirse tales como variación en las aportaciones internas, insolación, etc.

PERIODO DE CARGA

Partimos de una variación de la temperatura exterior con el tiempo a lo largo de un día tipo.

Durante las 8 horas valle (de las 23 a las 7 horas) es cuando se realiza la conexión del cable calefactor (CARGA DEL SISTEMA).

Iniciamos el análisis a las 23 horas, partiendo de una temperatura exterior (ejemplo $T_{ext} = 5^{\circ}\text{C}$), que en un inicio consideraremos constante entre las 23 y las 7 horas.

Haciendo una extrapolación al interior, consideraremos al inicio del periodo de carga (23 horas) una temperatura inicial del aire interior de valor $T_{int} = T_{ext} + 3^{\circ}\text{C}$ (8°C), una temperatura inicial en la losa de hormigón entre 8°C en la superficie y 10°C en la parte en contacto con el terreno, y una temperatura inicial en el terreno que variará entre 10°C en los puntos en contacto con la losa de hormigón y 14°C a 25 cm de profundidad.

Conectamos la calefacción (a las 23 horas), resolvemos el problema transitorio con focos internos durante las 8 horas valle y observamos como ha variado la temperatura en el interior de la losa de hormigón, comprobando que en ningún momento la temperatura superficial de la losa supere el límite máximo establecido de $26^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$.

Este análisis puede ajustarse más, si se subdivide el periodo desde las 23 horas a las 7 horas en subperiodos (por ejemplo de una hora) en cada uno de los cuales la temperatura exterior tendrá un valor determinado.

De esta forma se refleja mejor el hecho de que la temperatura exterior no es constante a lo largo de toda la noche. Discretizamos esta variación en intervalos de una hora.

Para cada uno de estos subintervalos repetiremos lo mismo que hemos realizado para el periodo de 8 horas.

Para cada subintervalo la temperatura inicial será la temperatura final del subintervalo anterior.

PERIODO DE DESCARGA (SIN FOCOS INTERNOS)

Resolvemos el problema transitorio en el periodo que va desde las 7 horas a las 22 horas, partiendo de una temperatura inicial igual a la obtenida al final de las 7 horas del periodo de carga.

Observamos como ha evolucionado la temperatura en el interior de la

losa, comprobando al igual que antes, que la temperatura superficial del suelo no sea nunca inferior a los 24°C (lo cual implicaría que la temperatura del aire interior sería inferior a la temperatura de confort).

En el caso de que en algún instante se detectase que la temperatura superficial de la losa de hormigón es inferior a los 24°C, sería necesario un relance de la base (siempre que no sean horas punta), ó bien un nuevo dimensionado del sistema; variación de la profundidad del cable para conseguir una mayor acumulación de calor durante el periodo de carga para una misma potencia instalada, la cual ya ha sido optimizada en el estudio durante el periodo de carga.

Para poder analizar como evoluciona la temperatura del aire del local con el tiempo, será necesario introducir dentro de la modelización la capa de aire.

6.1.2 PROPUESTA Nº2. AIRE DISCRETIZADO

Incluimos en el dominio a analizar la capa de aire interior, con lo cual trasladamos la condición de contorno de convección-radiación a la cubierta del local en contacto con el aire exterior.

El dominio a analizar está formada por:

- 7 cm de cubierta aislada
- 7/8 m de capa de aire
- 20 cm de hormigón armado, con el cable calefactor a una profundidad de; 15,5 / 11 / 7 cm

Se consideran TRES CONTORNOS ADIABATICOS, que corresponden a:

- Los dos contornos laterales, que como ya se vió en la elección de la celda tipo pueden considerarse como contornos aislados termicamente.
- Y al contorno inferior por considerar que la losa está aislada termicamente.

El contorno correspondiente a la última capa de cubierta será un CONTORNO CON PERDIDA DE CALOR POR RADIACION Y CONVECCION.

PERIODO DE CARGA

Iniciamos el análisis a las 23 horas, partiendo de una distribución de temperaturas que será una aproximación de la que se obtendría al final de un periodo de descarga idóneo (que nos hubiese mantenido la temperatura de 18°C durante todo el día, con la carga del día anterior).

Resolvemos el problema transitorio con focos internos durante las 8 horas valle (de las 23 horas a las 7 horas del día siguiente) con una temperatura exterior constante igual al valor medio de la noche más fría del año.

PERIODO DE DESCARGA

Partiendo de la distribución de temperaturas obtenida al final del periodo de carga, resolvemos el problema transitorio sin focos internos durante las 16 horas del día (horas llana y horas cruce) con una temperatura exterior constante e igual al valor medio del día más frío del año y observamos cual ha sido la distribución de temperaturas al final del periodo de descarga.

Volvemos a resolver el periodo de carga tomando como temperaturas iniciales las obtenidas al final del periodo de descarga anterior. A continuación se resuelve el periodo de descarga con las nuevas temperaturas iniciales obtenidas al final del periodo de carga.

Así sucesivamente hasta que el sistema converga, es decir que las temperaturas al final del periodo de carga coincidan con las temperaturas al inicio de la descarga.

Una vez el sistema se ha estabilizado, se obtiene la **DISTRIBUCION de TEMPERATURAS** en el **DOMINIO ANALIZADO** durante el **PERIODO DE CARGA** y durante el **PERIODO DE DESCARGA**. Esta distribución deberá ser tal que mantenga una temperatura de confort en el local para las temperaturas exteriores supuestas (las más desfavorables).

Cuando las temperaturas en el exterior sean mayores que las supuestas en el estudio, el sistema seguirá asegurando una temperatura de confort en el interior del local. En estos casos no será necesario que la carga del sistema dure las 8 horas nocturnas ya que se conectará ó desconectará la carga según sea la temperatura en el interior superior ó inferior a los límites máximo y mínimo establecidos para el confort, mediante el sistema de regulación previsto para tal efecto.

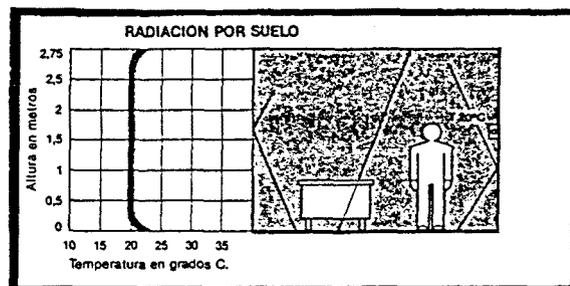
Para cada evolución de la temperatura exterior se obtendrá el **PERIODO DE CALEFACCION (ENCENDIDO / APAGADO) del SISTEMA**.

Al estudiar la **EVOLUCION DE LA TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR** se observa que;

Al considerar la capa de aire dentro del dominio analizado el contorno que se considera con pérdida de calor por convección - radiación corresponde a la última capa de la cubierta en contacto con el aire exterior.

Con este dominio, no se tiene en cuenta directamente el hecho de que la última capa de la losa de hormigón en contacto con el aire interior es una superficie de transmisión de calor por convección - radiación.

Esto implica, que para poder modelizar el sistema de forma correcta y obtener una evolución de la temperatura en la capa de aire interior, habrá que suponer que este aire interior es un "material" con unas propiedades tales que reflejen una evolución de la temperatura tal como la indicada en la figura 6.1 (gráfica conocida a través de la experiencia en la instalación de este tipo de sistema de calefacción)



Gradiente vertical de temperaturas en un suelo calefactor
fig 6.1

Esto implica una modelización de las propiedades del "material" aire que refleje esta evolución.

Una vez resuelto y estabilizado el sistema, se ha obtenido la distribución de temperaturas para cada dosificación de hormigón de la losa y para cada profundidad de embebido del cable, determinándose según estas dos variables:

- Velocidad de crecimiento de la temperatura en la superficie del suelo durante la carga.
- Velocidad de descenso de la temperatura en la superficie del suelo durante la descarga.
- Valor máximo de la temperatura en la superficie del suelo.
- Valor máximo de la temperatura en el plano de las resistencias.
- Valor de las pérdidas en el suelo.

Pudiendo así determinar para cada caso:

- TIEMPO DE CARGA
- TIEMPO DE DESCARGA
- % CONSUMO NOCTURNO
- CONSUMO ELECTRICO
- OSCILACION TERMICA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE

Conceptos que nos permitan determinar la DOSIFICACION Y PROFUNDIDAD de EMBEBIDO más IDONEA.

6.2 COMPARACION DE MODELIZACIONES

Se han analizado los resultados más significativos de evolución de temperaturas de las modelizaciones para proceder a su comparación.

Para ello se ha determinado:

Evolución de la temperatura en la superficie del suelo durante todo un día (24 horas) y para cada modelización.

Evolución de la temperatura en el cable calefactor durante todo un día (24 horas) y para cada modelización.

Evolución de la temperatura en todos los nodos pertenecientes al aire interior durante todo un día (24 horas) y para cada modelización.

Evolución de la temperatura en todos los nodos pertenecientes a la losa de hormigón durante todo un día (24 horas) y para cada modelización.

Evolución de la temperatura en todos los nodos pertenecientes al terreno durante todo un día (24 horas) y para cada modelización.

Analizando en cada caso los parámetros:

- TEMPERATURA SUPERFICIAL de la LOSA
- TEMPERATURA de las RESISTENCIAS
- TEMPERATURA del AIRE INTERIOR
- TEMPERATURA de la LOSA de HORMIGON
- TEMPERATURA en el TERRENO

De dicho análisis se deduce que el dominio que mejor modeliza el comportamiento del Suelo Radiante es el formado por la losa de hormigón con el cable calefactor embebido en su interior y aislado el conjunto en todo su perímetro y por la superficie inferior. (MODELIZACION Nº1B)

Se descarta la MODELIZACION Nº1A por considerarse que al no aislarse la losa inferiormente, debe suponerse que a una determinada profundidad del terreno la transmisión de calor hacia el interior del mismo es prácticamente nula, siendo difícil determinar dicha profundidad.

Asimismo se descarta la MODELIZACION Nº2 por considerarse que al incluir el aire del local en el dominio a discretizar, se añade la necesidad de una modelización adicional del aire, al no considerarse directamente el hecho de que la última capa de la losa de hormigón en contacto con el aire interior es una superficie de transmisión de calor por convección-radiación, consideración básica en el comportamiento de la Losa Radiante.

Las propiedades de los materiales utilizados en los diferentes dominios analizados vienen indicadas en la TABLA 6.1

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m ² C)	PRODUCTO p x Ce (W.h/m ³ °C)	GENERACION INTERNA (W/m ³)/(°C)
CUBIERTA	0,01	520	-
AIRE	0,26	0,34	-
HORMIGON	2,26	552	-
CABLE	0.80	230	250.000/52
TERRENO	2,1	414	-

TABLA 6.1

COEFICIENTE DE TRANSMISION SUPERFICIAL = 11,6 W/m² °C
CONVECCION + RADIACION

TEMPERATURA EXTERIOR MEDIA NOCHE = 5 °C

TEMPERATURA EXTERIOR MEDIA DIA = 9 °C

TEMPERATURA INTERIOR AIRE (CONFORT) = 18 °C

TEMPERATURA min/máx SUPERFICIE DEL SUELO = 24 - 32 °C (26°C)

6.3 ELECCION DE LAS DIMENSIONES DE LA CELDA GENERADORA DE CALOR Y W/m³ CORRESPONDIENTES

Las dimensiones y forma óptimas de la celda generadora deberían ser las del cable calefactor.

El material y el diámetro del cable variaran en función del tipo de cable elegido.

Para un local industrial, el tipo más usual es el cable con pantalla metálica (bien sea con aislamiento mineral u orgánico).

La potencia lineal máxima que puede disipar este cable es de 33 W/m.

Como la discretización del dominio se realiza mediante el elemento cuadrilátero lagrangiano de 4 nodos, las celdas serán de forma rectangular, no circular como el cable, por lo que deberemos adecuar lo mejor posible las dimensiones de la celda a las del cable.

El tipo de cable que se modeliza, y que posteriormente será el que se utilice en los ensayos, tiene las siguientes características:

Potencia Lineal	25	W/m	25	W/m
Resistencia lineal	6,05	ohmios/m	1,51	ohmios/m
longitud	20	m	40	m
Tensión nominal	220	V	220	V
Potencia trama	600	W	800	W

El diámetro total del cable (el alma conductora, el aislamiento de magnésita comprimida, la pantalla metálica para puesta a tierra y el aislamiento de PVC) es del orden de 8 - 10 mm = 0,8 - 1 cm.

Las propiedades a asignar a esta celda serán las del material del alma calefactora (cobre)

Conductividad térmica = 389 W/m °C

Densidad = 8930 Kg/m³

Calor específico = 0,11 W h/ Kg °C

Una 2ª opción sería considerar una celda de dimensiones;

$$\begin{aligned} &[\text{diámetro del cable}] \times [\text{paso entre cables} / 6] \\ &D \times d/6 \end{aligned}$$

Para un paso entre cables $d = 15 \text{ cm}$

Para diámetro = 1 cm ; $S_{\text{celda}} = 0,01 \times 0,005 = 50 \text{ exp-6 cm}^2$

Con lo que los W/m³ a asignar serían :

$$W/m^3 = P1/S_{\text{celda}} = 12,5 / 50 \text{ exp-6} = 250.000 \text{ W/m}^3$$

En esta segunda opción, la dimension de la celda en la discretización horizontal es superior a las dimensiones del cable;

- el paso considerado es $d = 15 \text{ cm}$, con lo que $d/6 = 2,5 \text{ cm}$
- dentro de la celda generadora habrá la mitad del cable calefactor con dimensiones $D/2 = 0,5 \text{ cm}$, menor que $d/6$.

Esta segunda opción sería correcta solo para el caso de que el paso entre pasos calefactores fuese $d = 3 \text{ cm}$ y el diámetro del cable calefactor $D = 1 \text{ cm}$;

$$d/6 = D/2 = 0,5 \text{ cm}$$

Se realiza la modelización para las siguientes celdas generadoras indicadas en la tabla 6.2.

DIMENSIONES CELDA		W/m ³ ASIGNADOS
$S = D \times D/2$		250.000
$D = 1 \text{ cm}$	$S = 0,5 \text{ cm}^2$	
$S = D \times d/6$		50.000
$D = 1 \text{ cm}$	$S = 2,5 \text{ cm}^2$	

TABLA 6.2

Analizando los resultados obtenidos se observa que las DIMENSIONES de la CELDA GENERADORA que MEJOR MODELIZA el cable calefactor son:

$$S = D \times D/2$$

En la modelización, para aumentar la cantidad de calor generado podemos actuar de dos formas;

- aumentando la superficie de la celda generadora para igual cantidad de W/m³
- aumentar los W/m³ generados manteniendo las dimensiones de la celda generadora.

Por tanto, para mantener la misma cantidad de calor, si aumentamos la superficie de la celda generadora deberemos disminuir los W/m³.

Para un mismo tipo de cable a modelizar, si se aumenta la superficie debe disminuirse los W/m³ y viceversa.

6.4 ANALISIS DE LA INFLUENCIA EN LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS DE LA POTENCIA LINEAL Y DEL PASO DEL CABLE.

En el diseño de la trama calefactora (apartado 5.18.2) se han considerado diferentes opciones.

6.4.1 CABLES CON LA MISMA POTENCIA LINEAL (33W/m) PERO DIFERENTES PASOS

De las diferentes tramas calefactoras consideradas analizamos aquellas (tabla 6.3) con;

- la misma potencia lineal = 33 W/m
- la misma generación de calor = 105.028 W/m³

OPCION Nº	DIMENSIONES TRAMA m ²	POTENCIA LINEAL W/m	GENERACION CALOR W/m ³	PASO m
1	5 x 2,5	31,9	406.369	0,25
1"	5 x 2,5	32,4	412.738	0,16
2	5 x 5	33	420.382	0,28
3	10 x 5	33	420.382	0,26

TABLA 6.3

Considerando en todas las opciones:

- la misma potencia lineal = 33 W/m
- la misma generación de calor = 420.382 W/m³

Analizamos como influye la VARIACION DEL PASO en la distribución de temperaturas.

Realizando las modelizaciones correspondientes y analizando los resultados SE OBSERVA que:

COMPARANDO 1 y 1" (dos soluciones para una misma trama de dimensiones 5 m x 2,5 m);

- AUMENTA la TEMPERATURA MAXIMA en el plano de las RESISTENCIAS
- AUMENTA la TEMPERATURA MINIMA en el plano de las RESISTENCIAS
- DISMINUYE la DIFERENCIA entre la T[°]MAX y la T[°]MIN en el plano de las RESISTENCIAS.

COMPARANDO 1" Y 2 (dos soluciones correspondientes a tramas de diferentes dimensiones);

- DISMINUYE la TEMPERATURA MAXIMA de la RESISTENCIA
- DISMINUYE la TEMPERATURA MINIMA de la RESISTENCIA
- AUMENTA la DIFERENCIA entre la T[°]MAX Y T[°]MIN en la RESISTENCIA

6.4.2 CABLES CON DIFERENTE POTENCIA LINEAL

De las diferentes tramas calefactoras consideradas analizamos las que corresponden a dos soluciones para una trama calefactora de dimensiones 5 x 2,5 m (tabla 6.4).

OPCION Nº	DIMENSIONES TRAMA m ²	POTENCIA LINEAL W/m	GENERACION CALOR W/m ³	PASO m
1	5 x 2,5	31,9	406.369	0,25
1'	5 x 2,5	24,6	313.375	0,18

TABLA 6.4

Realizando las modelizaciones correspondientes a ambas opciones y analizando los resultados obtenidos, SE OBSERVA:

- Una DISMINUCION de la POTENCIA LINEAL del cable (es decir de la cantidad de calor generado) se traduce en una DISMINUCION de la Tr^{máx} y la Tr^{mín} y un AUMENTO de la DIFERENCIA entre la Tr^{máx} y la Tr^{mín}.
- Por otra parte, una DISMINUCION del PASO se traduce en un AUMENTO de la Tr^{máx} y la Tr^{mín} y una DISMINUCION de la diferencia entre ellas, tal como se observó en el apartado anterior.

En la opción 1' respecto a la opción 1, se produce a la vez una disminución de la potencia lineal del cable y del paso, luego los efectos producidos son contrarios y se superponen dando lugar a una distribución de temperaturas bastante parecida en las dos opciones.

6.5 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES. DOSIFICACION DE LA LOSA Y EMBEBIDO DEL CABLE CALEFACTOR

6.5.1 MODELIZACION DE LA PRIMERA VARIABLE DOSIFICACION DE LA LOSA DE HORMIGON

Las propiedades del dominio analizar son:

LOSA DE HORMIGON

Las propiedades de las diferentes dosificaciones de las losas de hormigón que se van a modelizar se detallan en la tabla 6.5.

CONDUCTIVIDAD TERMICA &(W/m C)	DENSIDAD p(Kg/m3)	CALOR ESPECIFICO c(W.h/kg C)	PRODUCTO p X c pc(W.h/m3)
&0 = 0,256	p1 = 800	c1 = 0,18 c2 = 0,23 c3 = 0,32	p1c1 = 144 p1c2 = 184 p1c3 = 256
&1 = 0,68	p1 = 1300	c1 = 0,18 c2 = 0,23 c3 = 0,32	p1c1 = 234 p1c2 = 299 p1c3 = 416
&2 = 1,315	p2 = 2080	c1 = 0,18 c2 = 0,23 c3 = 0,32	p2c1 = 374 p2c2 = 478 p2c3 = 666
&3 = 1,696	p3 = 2240	c1 = 0,18 c2 = 0,23 c3 = 0,32	p3c1 = 403 p3c2 = 515 p3c3 = 716
&4 = 2,26	p4 = 2400	c1 = 0,18 c2 = 0,23 c3 = 0,32	p4c1 = 432 p4c2 = 552 p4c3 = 716
&5 = 3,6	p5 = 2600	c1 = 0,18 c2 = 0,23 c3 = 0,32	p5c1 = 468 p5c2 = 598 p5c3 = 832
RANGO 1,4 - 3,6	>2200	RANGO 0,233 - 0,325	

TABLA 6.5

CABLE CALEFACTOR

Se analizan 3 profundidades de embebido del cable calefactor;

Profundidades de embebido : 15,5/11/7 cm

AIRE

Coefficiente superficial de convección-radiación = 11.6 W/m² °C
 Temperatura media del aire ambiente ;

durante la carga = 13 °C
 durante la descarga = 19,5 °C

DISCRETIZACION

Se ha realizado una discretización de la geometría según lo indicado en el apartado 6.1. Modelización 1B.

Los 20 cm de hormigón se han subdividido en 10 capas ; 6 capas de 0,5 cm cada una para las tres posibilidades de embebido del elemento calefactor, el resto en 4 capas de espesores variables; 4/3,5/3/6,5 cm, obteniéndose 20 elementos y 33 nodos (figura 6.2).

El hormigón está formado por los elementos del 1 al 20 y los nodos del 1 al 33, siendo los nodos 31,32,33 de los elementos 19 y 20 los pertenecientes a la superficie de la losa en contacto con el aire ambiente (superficie de contorno con transmisión de calor por convección y radiación)

Los elementos 4 y 6 / 10 y 12 / 16 y 18 serán los pertenecientes al cable calefactor según la profundidad de embebido a la que se sitúe este respectivamente 15,5 / 11 / 7 cm.

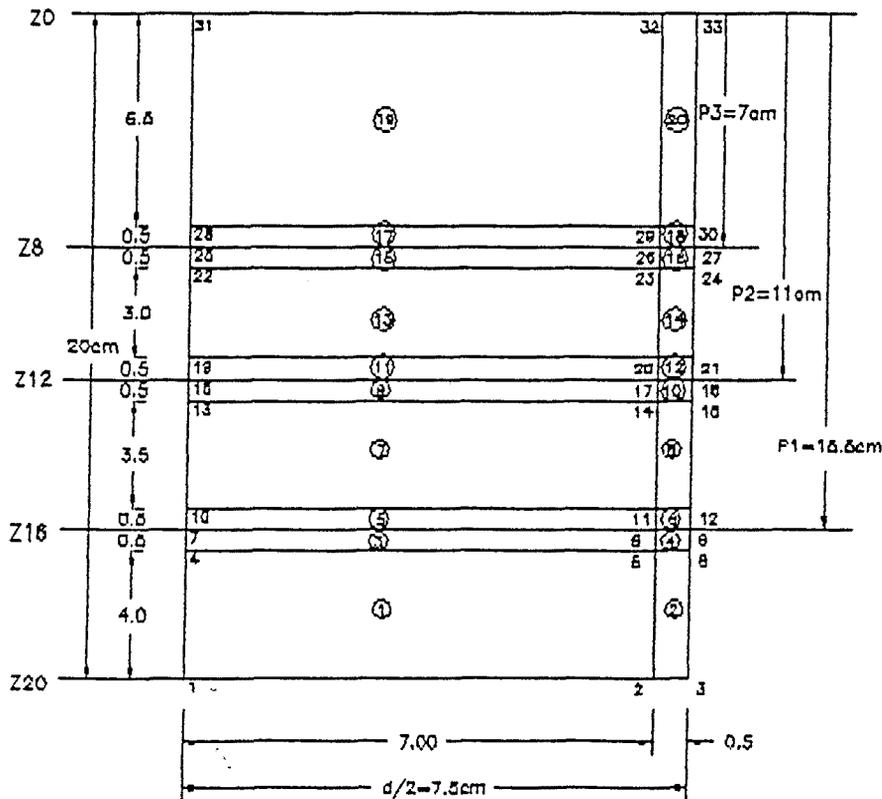


fig 6.2

GENERACION DE CALOR

Durante el proceso de carga los focos internos se asimilan bien :

- a una carga puntual situada en el nodo 9 / 18/ 27 según esté situado el cable respectivamente a 15,5 / 11 / 7 cm de la superficie superior de la losa.
- a una generación interna de calor en los elementos 4 y 6 / 10 y 12 / 16 y 18 según la profundidad de embebido del cable sea respectivamente 15,5 / 11 / 7 cm.

El programa utilizado para la modelización requiere siempre la prescripción de una temperatura; durante la descarga al no tener prescrita ninguna temperatura (no hay focos internos) se prescriben las temperaturas del nodo en el cual estaba situado el cable calefactor y que durante la descarga se mantendrá a una temperatura practicamente constante.

Cuando los focos internos no se asimilan a una carga puntual, sino que se considera una generación interna, hay que prescribir alguna temperatura. Esto supone una hipótesis adicional, por lo que se considera más fiable trabajar con una carga puntual.

En caso contrario, deberá analizarse la temperatura a prescribir en cada caso para que la modelización sea correcta.

TEMPERATURA MEDIA DEL CABLE

durante la carga = 52 °C
durante la descarga = 21 °C

Se ha resuelto el problema transitorio (en carga y descarga) para cada una de las dosificaciones y cada una de las profundidades de embebido, según la modelización 1B.

En el ANEJO I están reflejados los valores más significativos de evolución de la temperatura en el dominio analizado para las diferentes dosificaciones de hormigón consideradas, durante el periodo de carga y de descarga.

A partir de estos datos se realiza un estudio comparativo de la INFLUENCIA DE LA DOSIFICACION DE HORMIGON (de sus propiedades térmicas) en la evolución de la temperatura en el dominio analizado, se extraen las siguiente CONCLUSIONES:

- 1- A medida que AUMENTA LA CONDUCTIVIDAD TERMICA del hormigón:

Durante la CARGA ;

- AUMENTA con MAYOR RAPIDEZ la TEMPERATURA DEL SUELO, es decir se tarda menos tiempo en conseguir que la temperatura ambiente alcance los 18°C, por tanto DISMINUYE EL TIEMPO DE CARGA (AUMENTANDO EL % DE CONSUMO NOCTURNO)
- DISMINUYE LA TEMPERATURA en el plano de las RESISTENCIAS, por tanto DISMINUYEN las PERDIDAS POR

EL SUELO, lo cual se traduce en un MENOR CONSUMO ELECTRICO.

Durante la DESCARGA ;

- DISMINUYE MAS LENTAMENTE LA TEMPERATURA DEL SUELO, es decir mantenemos durante más tiempo la temperatura ambiente de 18°C , por tanto AUMENTA EL TIEMPO DE DESCARGA

- 2- Para una misma conductividad térmica, a medida que AUMENTA SU CALOR ESPECIFICO:

Durante la CARGA ;

- AUMENTA MAS LENTAMENTE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO, ya que se necesita más calor para elevar la temperatura del hormigón, por tanto AUMENTA EL TIEMPO DE CARGA DEL SISTEMA.

Durante la DESCARGA ;

- DISMINUYE MAS LENTAMENTE LA TEMPERATURA DEL SUELO, por tanto AUMENTA EL TIEMPO DE DESCARGA

Analizando estos resultados se observa que la DOSIFICACION IDONEA DEL HORMIGON será aquella que proporcione:

- MENOR TIEMPO DE CARGA
(conductividad alta)
(calor específico bajo)
- MAYOR TIEMPO DE DESCARGA
(conductividad alta)
(calor específico alto)
- MENOR CONSUMO ELECTRICO
(conductividad alta)
- MENOR OSCILACION TERMICA
(calor específico alto)
- MENOR COSTE
(densidad no muy alta)

Adoptando una solución de compromiso entre los valores de la conductividad térmica, la densidad y el calor específico, se considera que la DOSIFICACION IDONEA DE LA LOSA será aquella que tenga una conductividad térmica alta pero sin que la densidad sea excesiva y un calor específico intermedio.

De las DOSIFICACIONES analizadas (las más usuales en la industria) se considera OPTIMA aquella cuyas propiedades térmicas sean del siguiente orden:

- conductividad termica = 2,26 - 3,6 W/m C

- densidad = 2400 - 2600 kg/m³
- calor específico = 0,23 - 0,32 W.h/Kg C

6.5.2 MODELIZACION DE LA SEGUNDA VARIABLE PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO DEL ELEMENTO CALEFACTOR

Para el margen de dosificaciones consideradas más representativas (tabla 6.6) en el análisis de la primera variable, se van a analizar 3 profundidades de embebido del cable calefactor (aumentamos y disminuimos la profundidad con respecto a la considerada para el primer análisis)

DOSIFICACION Nº	CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m ² C)	DENSIDAD (Kg/m ³)	CALOR ESPECIFICO (W.h/kg °C)	PRODUCTO p x c (W.h/m ³)
C1	2,26	2400	0,23	552
C2	3,60	2600	0,23	598
C3	0,68	1300	0,23	299

TABLA 6.6

PROFUNDIDADES DE EMBEBIDO A ANALIZAR

- P1 = 15,5 cm situada en NODO 9
- P2 = 11 cm situada en NODO 18
- P3 = 7 cm situada en NODO 27

Se ha resuelto el problema transitorio en carga y descarga para cada uno de estos casos.

En el ANEJO I están reflejados los valores más significativos de evolución de la temperatura en el dominio analizado para los diferentes casos.

A partir de estos datos y tras realizar un estudio de la influencia de la profundidad de embebido del elemento calefactor en la evolución de la temperatura, se extraen las siguiente CONCLUSIONES:

- 1- A medida que AUMENTA LA PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO DURANTE LA CARGA ;
 - AUMENTA MAS LENTAMENTE LA TEMPERATURA DEL SUELO, por tanto AUMENTA EL TIEMPO DE CARGA. Disminuyen las temperaturas por encima del cable calefactor y aumentan por debajo de estas, por tanto se acumula más calor.

- DURANTE LA DESCARGA ;
 - DISMINUYE EL RIZADO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE, el calor acumulado se disipa más lentamente al ambiente, por tanto LA OSCILACION TERMICA ES MENOR.

Por un lado interesa que la PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO sea GRANDE, puesto que así, tendremos una MENOR OSCILACION TERMICA de la temperatura ambiente, pero por otra parte también AUMENTA EL TIEMPO DE CARGA, lo cual implicaría para contrarrestarlo AUMENTAR LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA LOSA.

De los datos obtenidos se considera que la PROFUNDIDAD OPTIMA para que la oscilación de la temperatura ambiente esté dentro de los límites de confort (1-2°C) es de $p = 15,5$ cm.

Para evitar que el tiempo de carga del sistema pueda ser superior a las 8 horas valle, el hormigón deberá tener una CONDUCTIVIDAD TERMICA del orden de 2,26 - 3,6 W/m°C, una DENSIDAD del orden de 2400 - 2600 Kg/m³ Y UN CALOR ESPECIFICO del orden de 0,23 W.h/Kg °C.

Por tanto, la SOLUCION OPTIMA de las analizadas desde el PUNTO DE VISTA ECONOMICO Y DE EXPLOTACION será:

DOSIFICACION DE LA LOSA

CONDUCTIVIDAD TERMICA	= 2,26 - 3,6 W/m°C
DENSIDAD	= 2400 - 2600 Kg/m ³
CALOR ESPECIFICO	= 0,23 W.h/Kg °C

PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO	P = 15,5 cm
-------------------------	-------------

En el ANEJO I se reflejan los datos de la evolución de la temperatura en todos los puntos del dominio analizado para la dosificación óptima y la profundidad óptima .

6.5.3 OBTENCION DE LA EVOLUCION DE TEMPERATURAS UNA VEZ ESTABILIZADO EL SISTEMA

Se resuelve el problema transitorio hasta que converga, obteniéndose la evolución de temperaturas en la losa una vez el sistema se ha estabilizado.

En el ANEJO I se encuentran reflejados los valores más significativos de esta evolución de temperaturas.

CLASIFICACION RESULTADOS MODELIZACION

Capitulo 7

CLASIFICACION RESULTADOS MODELIZACION

7.1 CLASIFICACION RESULTADOS TEORICOS DE EVOLUCION TEMPERATURAS EN LOSAS TIPO

En el presente capitulo se refleja la forma en que se han clasificado los resultados obtenidos con la modelización definida en el capitulo 6, para las 3 dosificaciones de hormigón y las 3 profundidades de embebido consideradas mas representativas y que justifican las conclusiones referentes a la influencia de la profundidad de embebido y de la dosificación de hormigón, indicadas en dicho capitulo.

La representación gráfica de estos resultados se encuentra en el ANEJO N°1.

7.1.1 CARACTERISTICAS DE LA MODELIZACION

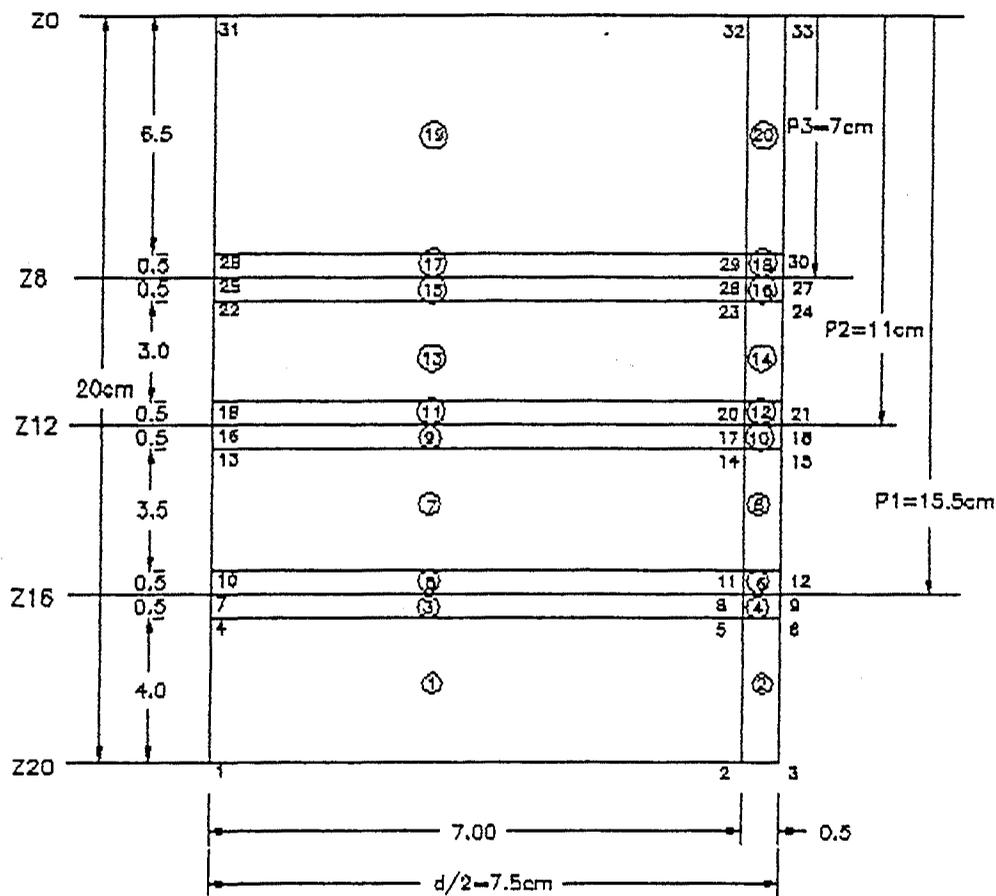
DOMINIO Y DISCRETIZACION

El dominio y la discretización utilizada es la definida en el capitulo 6. (figura 7.1)

Para esta discretización se definen 4 posiciones de estudio;

- Z0 SUPERFICIE SUPERIOR DE LA LOSA
- Z8 SUPERFICIE A 7 cm DE PROFUNDIDAD
- Z12 SUPERFICIE A 11 cm DE PROFUNDIDAD
- Z16 SUPERFICIE A 15,5 cm DE PROFUNDIDAD
- Z20 SUPERFICIE INFERIOR DE LA LOSA

fig 7.1



PROPIEDADES

Las características de las condiciones de la modelización se indican en la tabla adjunta:

DENOMIN. MODELIZ.	H11	H12	H13	H21	H22	H23	H31	H32	H33									
DENOMIN. DOSIFIC.	C1			C2			C3											
HORMIGON CONDUCTIV.	2,26 W/m °C			3,6 W/m°C			0,68 W/m°C											
DENSIDAD	2400 Kg/m3			2500 Kg/m3			1300 Kg/m3											
C.ESPECIF.	0,23 W.h/Kg°C			0,23 W.h/Kg°C			0,23 W.h/Kg°C											
DEMONIN. PROFUNDID. (cm)	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3									
	15	11	7	15	11	7	15	11	7									
CARGA PUNTUAL																		
NODO	9	18	27	9	18	27	9	18	27									
ELEMENTOS	4	10	16	4	10	16	4	10	16									
	6	12	18	6	12	18	6	12	18									
CABLE CONDUCTIV.	0.35 W/m°C																	
DENSIDAD										100 Kg/m3								
C.ESPECIF.																		
FOCOS INT.	52 °C																	
Tc.CARGA										21 °C								
Tc.DESCAR.	13 °C																	
AIRE										19,5 °C								
Ta.CARGA																		
Ta.DESCAR.																		

TABLA CARACTERISTICAS MODELIZACION

7.1.2 TABLAS DE EVOLUCION DE TEMPERATURA

En las tablas denominadas MODHxy, donde "x" es la variable dosificación (x = C1, C2, C3) e "y" la variable profundidad de embebido (y = p1, p2, p3), se refleja como evoluciona la temperatura durante el periodo de carga y de descarga (en intervalos de 1 hora) en el interior de la Losa Radiante (posiciones Z8, Z12, Z16, Z20) y en la superficie del suelo (posición Z0).

El formato para la clasificación de los datos es del tipo:

TABLA MOD H11

TEMPERATURA						
POSICION		TZ20	TZ16	TZ12	TZ8	TZ0
NODOS		1 2 3	7 8 9	16 17 18	25 26 27	31 32 33
T I E M P O	tc=0					
	..					
	tc=8 td=0					
	..					
	td=16					

Analogamente para el resto de losas, se obtendran;

TABLA MODH12, TABLA MODH13, TABLA MODH21, TABLA MODH22 ,
TABLA MODH23, TABLA MODH31, TABLA MODH32, TABLA MODH33

7.1.3 GRAFICOS DE EVOLUCION DE TEMPERATURA

Los datos obtenidos se han representado graficamente para su mejor interpretaci3n . Para cada losa modelizada MODHxy se han realizado 5 gr3ficos, uno para cada posici3n de estudio (Z20, Z16, Z12, Z8, Z0)

En cada uno de estos gr3ficos se ha reflejado la evoluci3n de la temperatura de los 3 nodos considerados m3s representativos en cada posici3n;

- nodo situado en la vertical que pasa por el centro de la resistencia
- nodo situado en la vertical que pasa por el extremo de la resistencia
- nodo situado en la vertical que pasa entre espiras de la resistencia.

La denominaci3n de dichos gr3ficos es la siguiente:

- Z20CHAN Gr3fico de evoluci3n de la temperatura en la posici3n Z20 (nodos 1,2,3)
- Z16CHAN Gr3fico de evoluci3n de la temperatura en la posici3n Z16 (nodos 7,8,9)
- Z12CHAN Gr3fico de evoluci3n de la temperatura en la posici3n Z12 (nodos 16,17,18)
- Z8CHAN Gr3fico de evoluci3n de la temperatura en la posici3n Z8 (nodos 25,26,27)
- Z0CHAN Gr3fico de evoluci3n de la temperatura en la posici3n Z0 (nodos 31,32,33)

Para cada losa modelizada se representa en el ANEJO I los gr3ficos;

GRAFICOS MODH11

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH12

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH13

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH21

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH22

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH23

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH31

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH32

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

GRAFICOS MODH33

Z20CHAN, Z16CHAN, Z12CHAN, Z8CHAN, Z0CHAN

7.2 CLASIFICACION RESULTADOS ANALISIS PRIMERA VARIABLE: DOSIFICACION DE HORMIGON

El análisis de la influencia en la evolución de la temperatura de la variable "dosificación de hormigón" se realiza para cada una de las profundidades de embebido.

Se repite el análisis por tanto 3 veces, lo cual permite comparar las conclusiones derivadas de cada uno de ellos.

PRIMER ANALISIS (P1 = 15,5 cm)

LOSAS ANALIZADAS: MODH11, MODH21, MODH31

SEGUNDO ANALISIS (P2 = 11 cm)

LOSAS ANALIZADAS: MODH12, MODH22, MODH32

PRIMER ANALISIS (P3 = 7 cm)

LOSAS ANALIZADAS: MODH13 MODH23, MODH33

7.2.1 TABLAS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN DOSIFICACION

Para el análisis de la influencia de la dosificación se ha agrupado y comparado para cada análisis los correspondientes resultados obtenidos en las modelizaciones de cada una de las losas, obteniendose tablas del tipo;

TABLAS MODHD1 (MODH11 - MODH21 - MODH31)

TEMPERATURA								
POSICION		TZ20			TZ16	TZ12	TZ8	TZ0
LOSAS MODHXY		MOD H11	MOD H21	MOD H31
T I E M P O	tc=0							
	..							
	tc=8 td=0							
	..							
	td=16							

Analogamente;

TABLA MOD HD2 (MODH12 - MODH22 - MODH31)

TABLA MOD HD3 (MODH13 - MODH23 - MODH33)

7.2.2 GRAFICOS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN DOSIFICACION

Mediante la representación gráfica de los datos de las tablas del apartado 7.2.1, se ha obtenido para cada análisis los graficos correspondientes a la evolución de la temperatura para 3 dosificaciones de hormigón (C1, C2, C3) en 5 posiciones diferentes; Z20, Z16, Z12, Z8, Z0.

Se ha tomado como nodo representativo de cada posición, el correspondiente situado en la vertical del cable calefactor.

POSICION	Z20	Z16	Z12	Z8	Z0
NODO	3	9	18	27	33

La denominación genérica de los gráficos es la siguiente:

GRAFICO HxTyZz

donde;

- x = nº de análisis
análisis 1 (p1), análisis 2 (p2), análisis 3 (p3)
- y = nodo cuya temperatura se representa
3, 9, 18, 27, 33
- z = posición donde se compara la temperatura según la dosificación
Z20, Z16, Z12, Z8, Z0

Para cada análisis se obtienen los siguientes gráficos;

GRAFICOS MODHD1 (GRAFICOS 1er ANALISIS)
H1T33ZO, H1T27Z8, H1T18Z12, H1T9Z16, H1T3Z20

GRAFICOS MODHD2 (GRAFICOS 2º ANALISIS)
H2T33ZO, H2T27Z8, H2T18Z12, H2T9Z16, H2T3Z20

GRAFICOS MODHD3 (GRAFICOS 3er ANALISIS)
H3T33ZO, H3T27Z8, H3T18Z12, H3T9Z16, H3T3Z20

7.3 CLASIFICACION RESULTADOS ANALISIS SEGUNDA VARIABLE: PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO

Analogamente al apartado 7.2, el análisis de la influencia de la variable "profundidad de embebido" se realiza para cada una de las dosificaciones consideradas.

Realizandose por tanto 3 análisis;

PRIMER ANALISIS (C1)

LOSAS ANALIZADAS: MODH11, MODH12, MODH13

SEGUNDO ANALISIS (C2)

LOSAS ANALIZADAS: MODH21, MODH22, MODH23

PRIMER ANALISIS (C3)

LOSAS ANALIZADAS: MODH31 MODH32, MODH33

7.3.1 TABLAS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN PROFUNDIDAD

Para el análisis de la influencia de la profundidad de embebido del elemento calefactor se ha agrupado y comparado para cada análisis los correspondientes resultados obtenidos en las modelizaciones de cada una de las losas, obteniendose tablas del tipo;

TABLA MODH1P (MODH11 - MODH12 - MODH13)

TEMPERATURA								
POSICION		TZ20			TZ16	TZ12	TZ8	TZ0
LOSAS MODHXY		MOD H11	MOD H12	MOD H13				
T I E M P O	tc=0							
	..							
	tc=8 td=0							
	..							
	td=16							

Analogamente;

TABLA MODH2P (MODH21 - MODH22 - MODH23)

TABLA MODH3P (MODH31 - MODH32 - MODH33)

7.3.2 GRAFICOS EVOLUCION TEMPERATURA SEGUN PROFUNDIDAD

Mediante la representación gráfica de los datos de las tablas del apartado 7.3.1, se ha obtenido para cada análisis los graficos correspondientes a la evolución de la temperatura para 3 profundidades de embebido del cable calefactor (P1,P2,P3) en 5 posiciones diferentes; Z20, Z16, Z12, Z8, Z0.

Se ha tomado como nodo representativo de cada posición, el correspondiente situado en la vertical del cable calefactor.

POSICION	Z20	Z16	Z12	Z8	Z0
NODO	3	9	18	27	33

La denominación genérica de los gráficos es análoga a la utilizada en el análisis de la 1ª variable (apartado 7.2.2).

Para cada análisis se obtienen los siguientes gráficos;

GRAFICOS MODH1P

H1T33ZO, H1T27Z8, H1T18Z12, H1T9Z16, H1T3Z20

GRAFICOS MODH2P

H2T33ZO, H2T27Z8, H2T18Z12, H2T9Z16, H2T3Z20

GRAFICOS MODH3P

H3T33ZO, H3T27Z8, H3T18Z12, H3T9Z16, H3T3Z20

TERCERA PARTE

ENSAYOS EXPERIMENTALES

CAPITULO 8

METODOLOGIA DE LA PARTE EXPERIMENTAL

Capítulo 8

METODOLOGIA DE LA PARTE EXPERIMENTAL

8.1 INTRODUCCION

La parte experimental ha consistido en el diseño de las pruebas y análisis de resultados para determinar el comportamiento del Suelo Radiante por cable eléctrico, según las diferentes profundidades de embebido de los elementos calefactores y las diferentes dosificaciones de hormigón utilizadas en la confección de la Losa Radiante, para poder comprobar así la eficacia del mismo en función de estas variables.

8.2 VARIABLES A CONSIDERAR

Las variables que se van a considerar en el estudio son:

- 1 - DOSIFICACION DE LA LOSA DE HORMIGON
- 2 - PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO DEL CABLE CALEFACTOR

8.2.1 DOSIFICACION Y PROPIEDADES TERMICAS DE LA LOSA

Según la composición del material utilizado en la confección de la Losa Radiante esta tendrá un comportamiento térmico diferente (69).

Las propiedades del material que interesa analizar de cara al comportamiento térmico de la losa son:

Su CALOR ESPECIFICO, es decir la cantidad de calor que se necesita para elevar 1º C la temperatura de 1 Kg de material.

Sus unidades; [J/Kg ºC] ó [Kcal/Kg ºC]

Cuanto mayor sea el calor específico del material, por una parte mayor será la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de la losa radiante, lo cual implicará que para una cantidad de calor determinada se tardará más tiempo en elevar su temperatura, por tanto AUMENTARA EL TIEMPO DE CARGA DEL SISTEMA.

El calor específico, que representa la capacidad calorífica del hormigón, no resulta muy afectado por la naturaleza mineralógica del agregado, pero aumenta considerablemente cuando se incrementa la humedad en el hormigón. El rango común de valores para un hormigón normal está entre 840 y 170 J/Kg ºC. El calor específico del hormigón se determina por métodos elementales de física.

Su **CONDUCTIVIDAD TERMICA**, es decir la cantidad de calor que atraviesa 1 m² de material, con un espesor de 1m, por hora y para una diferencia de temperatura de 1°C entre las dos caras.

Sus unidades; [W/m °C] ó [Kcal/h m °C].

La conductividad térmica mide por tanto la capacidad del material para conducir el calor y se define como la relación entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura.

La conductividad del hormigón normal depende de su **COMPOSICION** y, cuando el hormigón está saturado, la conductividad se localiza dentro de un rango de entre 1.4 y 3.6 J/m² s °C/m.

La densidad no afecta mucho la conductividad del hormigón normal pero, debido a la baja conductividad del aire, la conductividad térmica del hormigón de peso ligero varía según su densidad (70).

En la tabla 8.1 se incluyen los valores típicos de conductividad.

TIPO DE AGREGADO	DENSIDAD HORMIGON Kg /m ³	CONDUCTIVIDAD J/m ² s °C /m
BARITAS	3640	1,38
IGNEOS	2540	1,44
DOLOMITA	2560	3,68
HORMIGON LIGERO (secado al horno)	480-1760	0,14-0,60

TABLA 8.1

En la tabla anterior se puede observar que la **NATURALEZA MINERALOGICA** del agregado afecta en gran medida la conductividad del hormigón que los contiene.

En términos generales, el basalto y la traquita son de baja conductividad, la dolomita y la piedra caliza se encuentran en un término medio y el cuarzo presenta la mayor conductividad, que depende también de la dirección del flujo de calor, relativa a la orientación de los cristales. En general, la cristalinidad de las rocas aumenta su conductividad.

El **GRADO DE SATURACION** del hormigón es un factor primordial, ya que la conductividad del aire es menor que la del agua. Por ejemplo, en el caso del hormigón ligero, un aumento del 10% del contenido de humedad incrementa la conductividad en una mitad. Por otra parte, la conductividad del agua es menos de la mitad de la conductividad de la pasta de cemento, de tal modo que mientras menor sea el contenido del agua de la mezcla, mayor será la conductividad del hormigón endurecido.

Una dificultad que se encuentra con frecuencia en la práctica radica en conocer el verdadero contenido de humedad del hormigón (71).

Loudon y Stacy sugieren como típicos los siguientes valores de contenido de humedad como porcentaje del volumen, expresados en la tabla 8.2.

	PARA HORMIGON EXPUESTO AL INTEMPERISMO	PARA HORMIGON PROTEGIDO DEL INTEMPERISMO
HORMIGON DE AGREGADO DE PESO NORMAL	5	2,5
HORMIGON AIREADO Y DE AGREGADO LIGERO	8	5

TABLA 8.2

Con base en lo anterior, los mismos autores sugieren el uso de los valores de conductividad que aparecen en la tabla 8.3 a y b.

La TEMPERATURA AMBIENTAL normal afecta poco a la conductividad; el efecto general de un aumento de temperatura es una pequeña disminución de la conductividad del hormigón normal pero, en el caso del hormigón ligero, sucede todo lo contrario. Sin embargo, a altas temperaturas hay un descenso en la conductividad hasta que, a 800°C, es de aproximadamente la mitad del valor que alcanza a 20°C.

La conductividad térmica se suele calcular a partir del coeficiente de difusión, ya que este último es más fácil de medir, pero una determinación directa de la conductividad es, por supuesto, posible. No obstante, el método empleado en la prueba puede afectar los resultados que se obtengan. Por ejemplo, los métodos de estado estable (placa caliente y caja caliente) indican la misma conductividad térmica para hormigón seco, pero dan un valor demasiado alto para hormigón húmedo porque el gradiente de temperatura produce migración de la humedad. Por esta razón es preferible determinar la conductividad del hormigón húmedo por medio de métodos transitorios.

Cuanto mayor sea la conductividad térmica del material, más rápidamente se conducirá el calor a través de la losa radiante, para un mismo espesor de losa y para una misma diferencia de temperatura entre el exterior (aire del local) y el interior de la losa, por tanto DISMINUIRA EL TIEMPO DE CARGA (tardará menos tiempo en conseguir que la temperatura ambiente del local adquiera los 18°C) y AUMENTARA EL TIEMPO DE DESCARGA (disminuye más lentamente la temperatura del suelo).

Hay que tener en cuenta además que la conductividad térmica del material varía con la temperatura.

La Normativa referente a este tipo de instalaciones de calefacción recomienda que la conductividad térmica del hormigón utilizado en la losa radiante sea mayor de 1,4 W/m °C
(DTU N° 65-7 cap 4 (4.2.1) Calidad del Hormigón)

La conductividad térmica elevada limita la temperatura de los elementos de calefacción a favor de su durabilidad.

Los materiales usuales utilizados en construcción tienen una conductividad

que oscila entre 0,1 y 3 W/m °C

En la tabla 8.4 se indican la conductividad a una temperatura de 20°C de los materiales más usuales utilizados en construcción.

VALORES DE CONDUCTIVIDAD RECOMENDADOS POR LOUDON Y STACEY				
CONDUCTIVIDAD (J/m ² s °C/m)				
PARA HORMIGON PROTEGIDO DEL INTEMPERISMO				
PESO UNITARIO (kg/m ³)	HORMIGON AIREADO	HORMIGON LIGERO CON ESCORIA ESPUMOSA	HORMIGON LIGERO CON ARCILLA EXPANDIDA O CENIZA VOLANTE SINTETITAZA	HORMIGON CON AGREGADO PESO NORMAL
320	0.109	0.087	0.130	
480	0.145	0.116	0.173	
640	0.203	0.159	0.230	
800	0.260	0.203	0.303	
960	0.315	0.260	0.376	
1120	0.389	0.315	0.462	
1280	0.476	0.389	0.562	
1440		0.462	0.678	
1600		0.549	0.794	0.706
1760		0.649	0.952	0.838
1920				1.056
2080				1.315
2240				1.696
2400				2.267
2600				3.600

TABLA 8.3a

VALORES DE CONDUCTIVIDAD RECOMENDADOS POR LOUDON Y STACEY				
CONDUCTIVIDAD (J/m ² s °C/m)				
PARA HORMIGON EXPUESTO AL INTEMPERISMO				
PESO UNITARIO (Kg/m ³)	HORMIGON AIREADO	HORMIGON LIGERO CON ESCORIA ESPUMOSA	HORMIGON LIGERO CON ARCILLA EXPANDIDA O CENIZA VOLANTE SINTETIZADA	HORMIGON CON AGREGADO PESO NORMAL
320	0.123	0.100	0.145	
480	0.166	0.130	0.187	
640	0.223	0.173	0.260	
800	0.273	0.230	0.332	
960	0.360	0.289	0.433	
1120	0.433	0.360	0.519	
1280	0.533	0.433	0.635	
1440				
1600				0.808
1760				0.952
1920				1.194
2080				1.488
2240				1.904
2400				2.561
2500				3.600

TABLA 8.3 b

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA T = 20°C (W/m °C)
COBRE	390
ALUMINIO	200
HIERRO	60
MARMOL	3
HORMIGON	1,5
VIDRIO	1
FIBRA DE VIDRIO	0,04
POLIESTIRENO	0,037
VIDRIO CELULAR	0,057

TABLA 8.4

Su DENSIDAD, es decir su masa volumétrica.

Sus unidades; [Kg/m³]

La normativa referente a este tipo de instalaciones recomienda que la densidad del material utilizado para la confección de la losa radiante sea superior a 2200 Kg/m³.

(DTU N°65.7 cap 4 (4.2.1) Calidad del Hormigón).

Su COEFICIENTE DE DIFUSION TERMICA, el cual representa la velocidad a la que ocurren los cambios de temperatura en una masa y, por lo tanto, es un índice de la facilidad con que el hormigón sufre cambios de temperatura.

El coeficiente de difusión, se relaciona de manera sencilla con la conductividad, mediante la ecuación:

$$\text{calor específico} = \frac{\text{(conductividad)}}{\text{(calor específico x densidad)}}$$

En esta expresión se puede observar que la conductividad y el coeficiente de difusión varían en su paso. El rango de los valores típicos del coeficiente de difusión es entre 0.002 y 0.006 m²/h, lo que depende del tipo de agregado que se emplee. A continuación se enumeran diferentes tipos de rocas por orden creciente de su coeficiente de difusión: basalto, riolita, granito, caliza, dolerita y cuarcita.

La medición del coeficiente de difusión consiste esencialmente en determinar la relación entre el tiempo y la diferencia de temperatura entre la parte interna y la superficie de un espécimen de hormigón, que inicialmente se

encuentra a una temperatura constante cuando se aplica un cambio térmico en la superficie (72).

Debido a la influencia que ejerce la humedad del hormigón en sus propiedades térmicas, el coeficiente de difusión se debería medir en especímenes con un contenido de humedad como el que ha de existir en la estructura real.

Las DIFERENTES DOSIFICACIONES que se suelen utilizar en los suelos industriales son (73):

- Hormigón con árido 20 con diferentes porcentajes de magnesita
- Hormigón con árido 25 con diferentes porcentajes de magnesita

y los diferentes ACABADOS SUPERFICIALES:

- Pintura de poliuretano
- Pintura de epoxi de 2 componentes
- Mortero de epoxi de dos componentes
- Autonivelante de epoxi de dos componentes

Deberá estudiarse una solución de compromiso entre las diferentes propiedades térmicas del material utilizado en la confección de la losa radiante. El objetivo será obtener un TIEMPO DE CARGA de como MAXIMO 8 horas y un TIEMPO DE DESCARGA NO INFERIOR a 16 horas, para poder asegurar así que con la potencia instalada se puede cargar el sistema durante las 8 horas valle (noche) y que la descarga del sistema asegure durante las 16 horas restantes del día (horas llana y horas punta) la temperatura de confort prefijada en el local (18 °C).

DOSIFICACION DEL HORMIGON

Las dosificaciones de hormigón realizadas son las indicadas en la tabla 8.5.

TIPO	DOSIFICACION POR M3 DE HORMIGON					DENSIDAD HORMIGON p(Kg/m3)
	CEMENTO I-55 (Kg)	ARENA 0-5 (kg)	GRAVILLA 5-12 (Kg)	GRAVA 12-18 (Kg)	ARLITA (Kg)	
C1	324	1146	800	-	-	2400
C2	324	946	590	410	-	2600
C3	325	695	-	-	280	1200-1400

TABLA 8.5

Para la realización de las losas de hormigón se ha utilizado CEMENTO I-55, prácticamente en la misma dosificación (325 Kg cemento por m3 de hormigón), en las tres tipologías de losas, variándose en cada una de ellas el tipo y tamaño del árido (lo cual nos ha permitido obtener conductividades térmicas diferentes).

Para la PRIMERA TIPOLOGIA de dosificación se ha utilizado como árido principal la GRAVILLA 5-12 (800Kg/m3) y 1146 Kg/m3 de ARENA ,

obteniéndose una densidad del hormigón de 2400 Kg/m³.

En la **SEGUNDA TIPOLOGIA** de dosificación se ha reducido la cantidad de ARENA a 946 Kg/m³ y la de GRAVILLA 5-12 a 590 Kg/m³, añadiéndose un árido de mayor tamaño como es la GRAVA 12-18 (canto rodado) en una proporción de 410Kg/m³.

De esta forma se obtiene un hormigón con una densidad ligeramente superior a la anterior (del orden de 2500-2600 Kg/m³).

Finalmente para la **TERCERA TIPOLOGIA** de dosificación se ha utilizado un árido de tamaño y densidad considerablemente menor a los casos anteriores (ARLITA F3) en una dosificación de 280 Kg/m³, reduciendo así la densidad del hormigón hasta los 1200-1300 Kg/m³.

En la realización de las losas se ha utilizado un superfluidificante de elevado rendimiento (MELCRET 10).

Según las dosificaciones realizadas se obtienen propiedades térmicas diferentes, que son las indicadas en la tabla 8.6.

Se OBSERVA que:

- el 1er tipo de losa (C1) tiene una conductividad térmica y densidad intermedias
- el 2º tipo de losa (C2) tiene una conductividad térmica y densidad ligeramente superior a C1
- en el 3er tipo de losa (C3) se han reducido considerablemente la densidad y la conductividad térmica.

PROPIEDADES TERMICAS Y MECANICAS

Las propiedades térmicas y mecánicas para las dosificaciones consideradas son las indicadas en la tabla 8.6.

COMP	ALTURA LOSA cm	CONDUCT. TERMICA W/m °C (Kcal/h m°C)	CALOR ESPECIFICO Wh/Kg° (Kcal/h kg°)	DENSIDAD HORMIGON Kg/m ³	RESIS.COMP. Kg/cm ²
C1	20	2,26 (1,94)	0,23 (1,26)	2400	317
C2	20	2,80 (2,40)	0,23 (1,26)	2500	373 379
C3	20	0,80 (0,68)	0,23 (1,26)	1300	198 204

TABLA 8.6

Para conocer la resistencia a compresión de las 3 tipologías de losas, se han realizado dos probetas cilíndricas de dimensiones 15x30 cm para cada dosificación.

A los 28 días se ha realizado el ensayo a compresión según Norma UNE 83.304/84 obteniéndose los resultados expresados en la tabla 8.7.

TIPO DOSIFICACION	RESISTENCIA A COMPRESION
C1 (GRAVILLA 5-12)	56.000 T ---- 317 Kg/cm ²
	56.000 T ---- 317 Kg/cm ²
C2 (CANTO RODADO 12-18)	67.000 T ----- 379 Kg/cm ²
	66.000 T ----- 373 Kg/cm ²
C3 (ARLITA)	35.000 T ----- 198 Kg/cm ²
	36.000 T ----- 204 Kg/cm ²

TABLA 8.7

8.2.2 PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO DEL ELEMENTO CALEFACTOR

Es evidente que un factor determinante del grado de acumulación de la losa de hormigón será función de la posición de las resistencias.

Se han estudiado tres profundidades de embebido del elemento calefactor dentro de la losa de hormigón.

PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO

- p = 7 cm
- p = 11 cm
- p = 15,5 cm

Se analiza la evolución de la temperatura dentro de la losa de hormigón para las distintas posiciones de las resistencias.

Los espesores de embebido considerados son superiores al espesor mínimo indicado por la Normativa Francesa DTU N^o 65-7 en su capítulo 4 artículo 4.3.1.2 : "espesor mínimo de embebido".

La elección de las diferentes profundidades de embebido se ha realizado acondicionando las recomendaciones de la Normativa a la disponibilidad de ejecución experimental.

8.3. PARAMETROS SIGNIFICATIVOS EN EL ESTUDIO COMPARATIVO

Los parámetros que se analizan en el estudio comparativo son:

8.3.1 TIEMPO DE CARGA DEL SISTEMA DE CALEFACCION

Interesa cargar el máximo de horas en tarifa nocturna y el mínimo en tarifa diurna.

Las condiciones de trabajo son:

- Las resistencias se conectan a las 23 horas (inicio de la tarifa nocturna en invierno)
- Las resistencias se desconectan cuando la temperatura ambiente alcanza la temperatura de confort (18°C) ó bien a las 7 de la mañana del día siguiente.
- No hay reconexión hasta las 23 horas del día siguiente.

Se analiza en cada ensayo el tiempo que tarda el sistema en alcanzar una temperatura determinada.

8.3.2 TIEMPO DE DESCARGA DEL SISTEMA

Interesa que durante las 16 horas del día se asegure la temperatura de confort de 18 °C.

Se analiza en cada ensayo la rapidez con que disminuye la temperatura cuando el sistema se está descargando, así como el tiempo que el sistema tarda en descargar toda la energía acumulada.

8.3.3 TEMPERATURA MAXIMA EN LA SUPERFICIE DEL SUELO

No deben superarse en ningún momento los 32°C en la superficie del suelo. Se analiza en cada ensayo si en algún instante se supera esta temperatura límite.

8.3.4 TEMPERATURA MAXIMA EN EL PLANO DE LAS RESISTENCIAS

No debe superarse en ningún momento los 36 °C en el plano de las resistencias.

Se analiza en cada ensayo si en algún instante se supera esta temperatura límite.

8.3.5 OSCILACION DE LA TEMPERATURA AMBIENTE

Cuanto menor sea la oscilación térmica de la temperatura ambiente mayor será el confort de los ocupantes.

Se analiza en cada ensayo la evolución de la temperatura ambiente.

8.3.6 EVOLUCION DE LA TEMPERATURA DE LA LOSA

Para cada ensayo se obtendrá como evoluciona la temperatura dentro de la losa.

La situación óptima para el valor de estos parámetros será:

LOSA RADIANTE OPTIMA

TIEMPO DE CARGA	8 h (NOCHE)
TIEMPO DE DESCARGA	16 h (DIA)
% CONSUMO NOCTURNO	100 %
Tª MAXIMA SUELO	MENOR 32ºC
Tª MAXIMA RESISTENCIAS	MENOR 36ºC
OCILACION AMBIENTE	MENOR 2ºC (17 -19ºC)

El TIEMPO DE RESPUESTA DEL SISTEMA es el tiempo que tarda el sistema de calefacción en elevar la temperatura ambiente desde una dada (generalmente igual a la temperatura exterior) a la temperatura deseada de confort.

El tiempo de respuesta de la calefacción radiante es elevado puesto que además de calentar el ambiente paralelamente debe calentar la masa de suelo, medio de transmisión del calor ambiente.

En el cálculo teórico, la temperatura ambiente de partida puede ser un poco superior a la temperatura exterior en ese momento, debido a que existe un desfase entre la temperatura ambiente y la temperatura exterior debido a la inercia térmica (las variaciones de temperatura exterior no tienen efecto en el local instantaneamente sino al cabo de transcurrido un tiempo característico de cada local.

8.4 DISEÑO DE LA LOSA DE HORMIGON

8.4.1 TAMAÑO DE LA LOSA

Para la determinación del tamaño de la losa a ensayar se han tenido en cuenta aspectos tales como:

- La capacidad de los moldes disponibles
 - La zona central de losa mínima para un análisis representativo. Según la Normativa DTU N°65-7 cap 4: "Disposiciones concernientes a la puesta en obra de los elementos calefactores", artículo 4.12: "situación" ; los elementos de calefacción deben estar situados como mínimo a:
 - 0,40 m de muro interior (para evitar perjudicar la puesta de armadura alrededor y el encofrado)
 - 0,20 m de otros bordes de la losa
- Se sitúan los cables calefactores entre 0,3 y 0,5 m de los bordes de la losa de prueba.

- Número mínimo de espiras de las resistencias a considerar

Se ha considerado que como mínimo son necesarias 5 resistencias para obtener un análisis representativo del flujo de calor

- Separación entre cables calefactores

Se ha optado por una separación entre cables calefactores de 15 cm

- Profundidad de embebido de los cables calefactores

Se estudian 3 profundidades de embebido; 7, 11 y 15,5 cm. La losa debe tener por tanto un grosor de 20 cm.

Con estas consideraciones se ha obtenido una losa de dimensiones:

2,20 x 2,60 x 0,20 m

Con la siguiente disposición de las resistencias:

Número de resistencias: $NR = 12$

Paso entre las resistencias: $d = 15 \text{ cm}$

Profundidad de embebido cables : $p (7/11/15,5 \text{ cm})$

En los gráficos 8.1 y 8.2 se indican las dimensiones de la losa y la disposición de las resistencias.

8.4.2 AISLAMIENTO DE LA LOSA

Se aísla la parte inferior así como todo el perímetro de la losa con POLIESTIRENO de 5 cm de espesor.

8.4.3 ELECCION DEL CABLE CALEFACTOR

POTENCIA LINEAL DEL CABLE

Al estar la losa tipo aislada interiormente, el sistema tendrá una inercia baja, por lo cual se opta por un cable cuya potencia lineal máxima sea de 25 W/m

TENSION DE ALIMENTACION

La conexión de las resistencias se realiza a una tensión nominal común de 220 V.

LONGUITUD DEL CABLE CALEFACTOR

La longitud mínima del cable calefactor según el diseño de la losa tipo y de

la trama calefactora será:

$$B = NR \times L = 12 \times 1,53 = 18 \text{ m}$$

CABLE CALEFACTOR

Las características de los cables calefactores que se han utilizado en los ensayos vienen indicas en la tabla 8.9.

LOSAS	C1 Y C2	C3
UNIDADES	6	3
TENSION NOMINAL (V)	220	220
RESISTENCIA (ohmios/m)	6,05	1,51
POTENCIA LINEAL (W/m)	20	20
LONGITUD (m)	20	40
POTENCIA TRAMA (W)	400	800

TABLA 8.9

En las losas de tipología C3 se ha utilizado un cable de mayor longitud pero de igual potencia lineal.

De la longitud total (40 m) solo se han embebido 20 m (al igual que en las losas de tipología C1 y C2), dejando en el exterior los 20 m restantes. Por tanto, todas las losas tienen la misma potencia de trama calefactora (400 W).

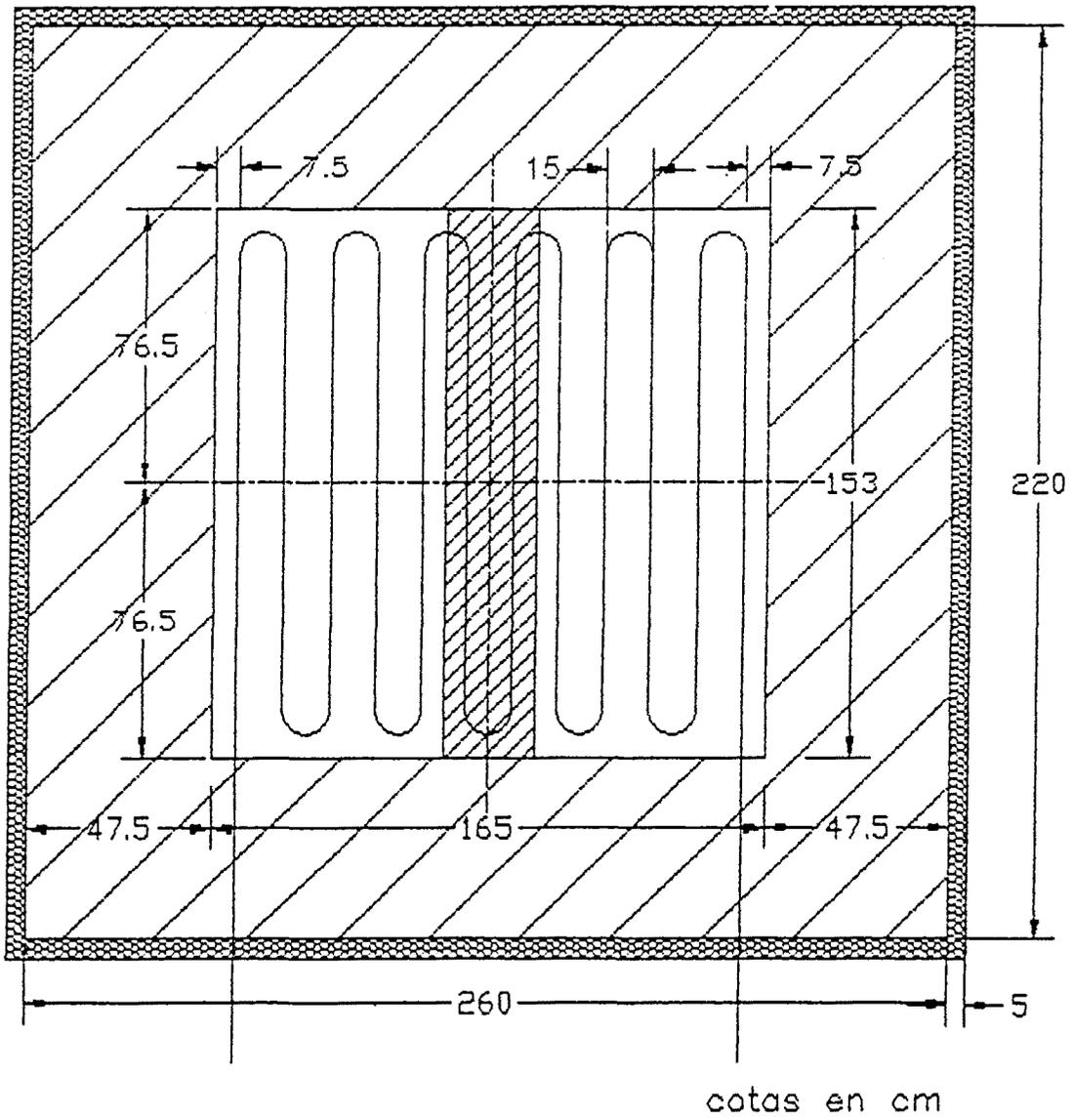
SECCION COLA FRIA

Para una tensión nominal de 220V

Para una potencia entre 500 W hasta 700 W

SECCION : 1,5 mm²

Dimensiones Losa 260x220x20
Longitud cable 12x1.5=18m



PLANTA

fig 8.1

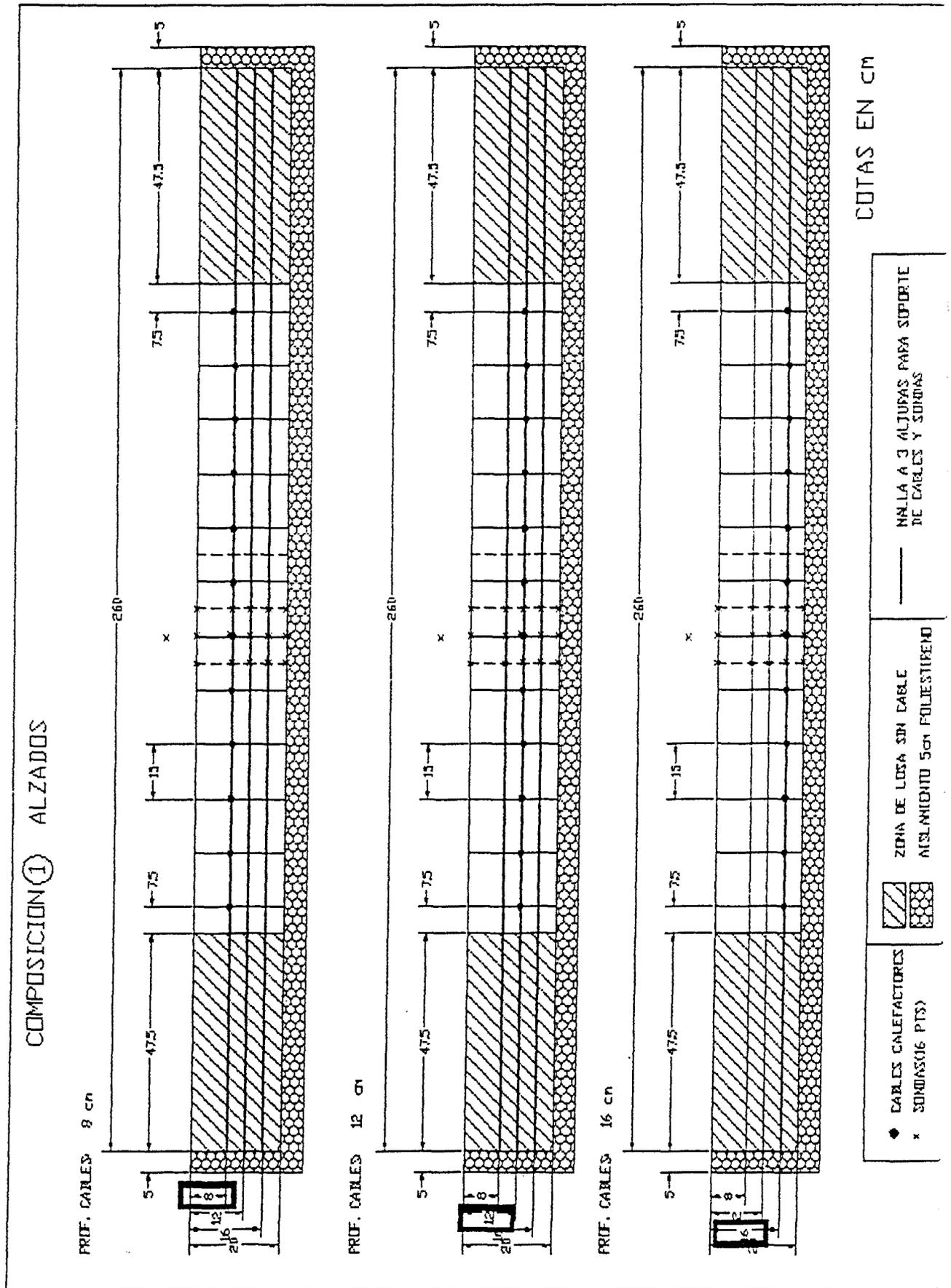


fig 8.2

8.4.4 DETERMINACION DEL NUMERO DE ENSAYOS

Se han analizado 3 dosificaciones diferentes de hormigón y 3 profundidades de embebido del cable calefactor.

Se construyen 3 series de losas para cada dosificación, colocando el cable a 3 profundidades diferentes de embebido.

Para cada una de estas losas se repite el ensayo 2 veces, con el objetivo de que los resultados sean fiables.

En total se construyen 9 losas y se realizan 18 ensayos completos.

8.4.5 APARATOS E INSTRUMENTAL NECESARIO

Para la medición de la temperatura (74) en los diferentes puntos de la losa tipo, se han utilizado SONDAS TIPO K.

Como aparato medidor y registrador de datos se utiliza un SQUIRREL serie 1200.

SONDAS TIPO K

Los transductores termoeléctricos (termopares) se basan en dos efectos que, a diferencia del efecto Joule, son reversibles. Se trata del efecto Peltier y el efecto Thompson (75).

El efecto Peltier consiste en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales distintos al pasar corriente por ella. Al invertir el sentido de la corriente, se invierte también el sentido del flujo de calor. Es decir, si una unión antes se calentaba (cedía calor), al cambiar el sentido de la corriente se enfría (absorbe calor), y si primero se enfriaba, ahora se calienta.

Este efecto es reversible e independiente del contacto, es decir, de la forma y dimensiones de los conductores. Esta dependencia resulta ser además lineal.

El hecho de que el calor intercambiado por unidad de superficie de la unión sea proporcional a la corriente y no a su cuadrado, marca la diferencia respecto al efecto Joule. En éste, el calentamiento depende del cuadrado de la corriente, y no cambia al hacerlo su dirección.

El efecto Thompson consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor homogéneo con temperatura no homogénea por el que circule una corriente.

El calor liberado es proporcional a la corriente - no a su cuadrado -, y por ello cambia de signo al hacerlo el sentido de la corriente. Se absorbe calor si la corriente y el calor fluyen en direcciones opuestas, y se libera si fluyen en la misma dirección.

El efecto Seebeck es el resultado de los efectos Peltier y Thompson, y expresa el teorema fundamental de la termoelectricidad.

La aplicación de los termopares está sujeta a una serie de limitaciones que conviene conocer de cara a su uso correcto:

- La temperatura máxima que alcance el termopar debe ser inferior a su temperatura de fusión. Por tanto ha de elegirse un modelo adecuado a los valores de temperatura a medir.
- Debe garantizarse que el medio donde se va a medir no ataca a ninguno de los metales de la unión.
- La corriente que circule por el circuito de termopares debe ser mínima.
- Debe mantenerse una de las uniones a una temperatura de referencia fija, si se desea medir la de la otra unión.

A pesar de estas limitaciones, los termopares son los transductores de uso más frecuente para la medida de temperaturas, y ello se debe a las ventajas que presentan, entre las que figuran las siguientes:

- Tienen un alcance de medida grande (desde -270°C hasta 3000°C)
- Su estabilidad a largo plazo es aceptable y su fiabilidad elevada
- Por su pequeño tamaño permiten tener velocidades de respuesta rápidas, del orden de milisegundos.
- Poseen robustez, simplicidad y flexibilidad de utilización.

En las uniones del termopar interesa tener:

- Resistividad elevada, para tener una resistencia alta sin requerir mucha masa, lo cual implicaría alta capacidad calorífica y respuesta lenta.
- Coeficiente de temperatura débil en la resistividad
- Resistencia a la oxidación a temperaturas altas

Para lograr estas propiedades se emplean aleaciones especiales (76).

En la tabla 8.10 se recogen las características de algunos de los termopares más comunes y su designación de acuerdo con las normas ANSI. Se remarca el tipo de termopar utilizado en los ensayos.

DESIGNACION ANSI	COMPOSICION	MARGEN HABITUAL	mV/MARGEN
B	Pt(6%)/Rodio-Pt(30%)/Rodio	38 a 1800°C	13,6
C	W(5%)/Renio-W(26%)/Renio	0 a 2300°C	37,0
E	Cromel-Constantan	0 a 982°C	75,0
J	Hierro-Constantan	-184 a 760°C	50,0
K	Cromel-Alumel	-184 a 1260°C	56,0
R	Pt(13%)/Rodio-Pt	0 a 1593°C	18,7
S	Pt(10%)/Rodip-Pt	0 a 1538°C	16,0
T	Cobre-Constantan	-184 a 400°C	26,0

TABLA 8.10

SQUIRREL SERIE 1200

MEMORIA DISPONIBLE

Se disponen de un squirrel serie 1200 con 42.000 pistas de memoria (77).

NUMERO Y TIPO DE CANALES DE ENTRADA

Dicho aparato dispone de 16 canales para registro de datos.

Mediante la utilización de dicho aparato podran registrarse datos de 16 puntos simultaneamente, ó bien en 15 puntos si se desea reservar un canal para evento ó alarma.

El SQUIRREL serie 1200 permite utilizar algunas de las entradas como canales de acontecimiento, los cuales mediante la programación previa de una alarma nos indicará cuando se produce un evento determinado, lo cual resulta muy práctico para poder detectar temperaturas límites máxima ó mínima fuera del intervalo de registro, bien sea de la superficie del suelo ó del cable calefactor.

INTERVALOS DE REGISTRO E INTERVALO DE EXPLORACION

Se define el INTERVALO DE REGISTRO como el intervalo entre el almacenamiento de un conjunto regular de lecturas (intervalo ó promedio) y el siguiente.

El intervalo de registro MAXIMO que permite el aparato es de 24 horas, 59 minutos, 0 segundos; y el MINIMO es de 1 ó 2 segundos en función del número de canales ajustados a registro de datos.

Esto permite tomar lecturas de temperaturas en intervalos lo suficientemente pequeños como para obtener una buena precisión en la evolución de la temperatura.

El INTERVALO DE EXPLORACION se define como el intervalo entre las lecturas tomadas para el promediado y el intervalo entre exploraciones para comprobar si ha ocurrido un acontecimiento ó se ha cruzado un nivel de alarma.

El intervalo de exploración NO debe ser nunca MENOR que $1/4000$ del intervalo de registro.

El intervalo de registro máximo con el que se tabajará será de una hora, debiendo ser para este caso el intervalo de exploración superior a los 0,9 segundos.

ALCANCE DE LA MEMORIA

Cada conjunto de lecturas utiliza una pista por canal.

Las lecturas activadas por un evento ó alarma utilizan un extra de 3 pistas por conjunto de lecturas para registrar fecha y hora (tiempo).

En el SUIRREL con memoria de 42.000 pistas si se utilizan los 16 canales

para registro de datos en intervalos de 1 hora, se usará en un día 384 pistas, por lo que el registro de datos podrá realizarse durante 109 días.

Si se utiliza un canal del SQUIRREL para lecturas por evento ó alarma, que se efectuen a una velocidad media de 1 hora, deberá tenerse en cuenta que se necesitaran un extra de 72 pistas.

COMIENZO Y PARADA DE LA ANOTACION DE DATOS

El SQUIRREL permite ajustar tiempos preestablecidos para el COMIENZO y FINAL de una serie de datos.

El tiempo de comienzo del registro de una serie de datos se puede modificar despues del final de una serie de anotaciones de datos.

El tiempo de parada del registro de datos se puede variar en cualquier momento; durante ó despues del registro de datos.

Se fijaran los siguientes tiempos:

TIEMPO DE CONEXION DEL SISTEMA	D- M-1994 7h
TIEMPO DE INICIO DEL REGISTRO DE DATOS	D`-M-1994 23h
TIEMPO DE PARADA DEL REGISTRO DE DATOS	D"-M-1994 23h

$$D' = D + 3 \text{ (DIAS) (PARA QUE SE ESTABILICE)}$$

$$D'' = D' + 2 \text{ (DIAS)}$$

D = día según la losa que se esté ensayando

Se deja evolucionar el sistema durante 3 días hasta que se estabiliza y los resultados que se obtienen son periodicos.

Por tanto, utilizando un canal como canal de acontecimiento y el resto como canales de registro de datos, tendremos:

TIPO DE CANAL	Nº DE PISTAS	PISTAS /CANAL
Registro datos	15	1
Acontecimiento	1	3

PISTAS NECESARIAS EN UN DIA:

$$[N^{\circ}\text{CANALES}] \times [PISTAS/\text{CANAL}] \times [N^{\circ}\text{INTERVALOS}/\text{DIA}]$$

TIEMPO DE DURACION DE LA MEMORIA: (DIAS)

$$[PISTAS \text{ TOTALES DISPONIBLES}] / [PISTAS \text{ NECESARIAS EN UN DIA}]$$

INT.REGISTRO(IR) INT.EXPLORACION(IE)	PISTAS NECESARIAS EN UN DIA	TIEMPO DURACION MEMORIA (TR)(dias)
---	--------------------------------	---------------------------------------

IR = 1 hora

IE = 0	384	109
IE = 1	432	97
IE = 1/2	504	83
IE = 1/4	648	64
IE = 1/12	1224	34
IE = 1/60	4680	8
IE = 1/120	9000	4

IR = 1/2 hora

IE = 0	768	54
IE = 1	792	53
IE = 1/2	864	48
IE = 1/4	1008	41
IE = 1/12	1584	26
IE = 1/60	5040	8
IE = 1/120	9360	4

IR = 1/4 hora

IE = 0	1536	27
IE = 1	1512	27
IE = 1/2	1584	26
IE = 1/4	1728	24
IE = 1/12	2304	18
IE = 1/60	5760	7
IE = 1/120	10080	4

IR = 1/6 hora

IE = 0	2304	18
IE = 1	2332	18
IE = 1/2	2304	18
IE = 1/4	2448	17
IE = 1/12	3024	13
IE = 1/60	6480	6
IE = 1/120	10800	3

INT.REGISTRO(IR) INT.EXPLORACION(IE)	PISTAS NECESARIAS EN UN DIA	TIEMPO DURACION MEMORIA (TR)(dias)
---	--------------------------------	---------------------------------------

IR = 1/12 hora

IE = 0	4608	9
IE = 1	4392	9
IE = 1/2	4464	9
IE = 1/4	4608	9
IE = 1/12	5184	8
IE = 1/60	8640	4
IE = 1/120	12960	3

IR = 1/60 hora

IE = 0	23040	1
IE = 1	21672	1
IE = 1/2	21744	1
IE = 1/4	21888	1
IE = 1/12	22464	1
IE = 1/60	25920	1
IE = 1/120	30240	1

IR = 1/120 hora

IE = 0	46080	menor 1
IE = 1	43272	menor 1
IE = 1/2	43344	menor 1
IE = 1/4	43488	menor 1
IE = 1/12	44064	menor 1
IE = 1/60	47520	menor 1
IE = 1/120	51840	menor 1

Se sitúan las sondas K en 22 posiciones diferentes de la cámara de pruebas tal como se indique en la figura 8.3

1 sondas en el aire
15 sondas en la losa

Para el análisis de la DOSIFICACION del hormigón y de la PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO del elemento calefactor se utilizan las 16 sondas para cada una de las losa tipo a ensayar.

Como el número de losas es de 9 , se necesitarán en total 144 sondas.

Cada una de estas sondas servirá para realizar 2 mediciones completas. Se realizará pues un total de 288 mediciones completas.

Cada una de estas mediciones corresponde a 1 día entero (24 horas), el cual se subdivide en intervalos de 10 minutos.

El número de datos por losa que se obtendrán será por tanto de 4608 datos.

En total para las 9 losas ensayadas se trabaja con 41.472 datos.

Como se ha visto la memoria disponible del SQUIRREL es de 42.000 datos. En función del número de días que se considere para una medición completa, el intervalo de registro, y si se considera ó no un intervalo de exploración, el número de datos registrados será mayor ó menor.

En cada ensayo deberá determinarse el tiempo transcurrido para pasar de una temperatura determinada (temperatura exterior) a la temperatura de confort de 18°C.

SONDA DE TEMPERATURA EXTERIOR

Se dispone de una sonda para control de la evolución de la temperatura exterior, la cual irá conectada al canal 16 del registrador de datos.

LOSA DE HORMIGON

Se construyen 9 losas tipo, de dimensiones 2,2 x 2,6 x 0,2 m, combinando 3 profundidades de embebido del cable calefactor y tres dosificaciones de hormigón.

CABLES CALEFACTORES

Para cada losa ensayada se necesitarán 18 metros de cable calefactor. Para un total de 9 losas serán necesarios del orden de 170 metros de cable.

CONEXION ELECTRICA DE LOS CABLES

Los cables calefactores se conectan a un reloj horario y este a la red de 200v.

El reloj horario permite programar una CARGA (conexión a la red) de las 23 horas a las 7 horas del día siguiente y la DESCARGA (desconexión de la red) de las 7 horas a las 23 horas.

8.5 PROCESO DE EJECUCION

La fabricación de las losas así como la realización de las pruebas experimentales se han realizado en la fábrica que la empresa PREFABRICADOS DEL SOLSONES S.A. dispone en el término municipal de SOLSONA.

Esta empresa se dedica a la fabricación y montaje de estructuras y elementos de hormigón armado prefabricados.

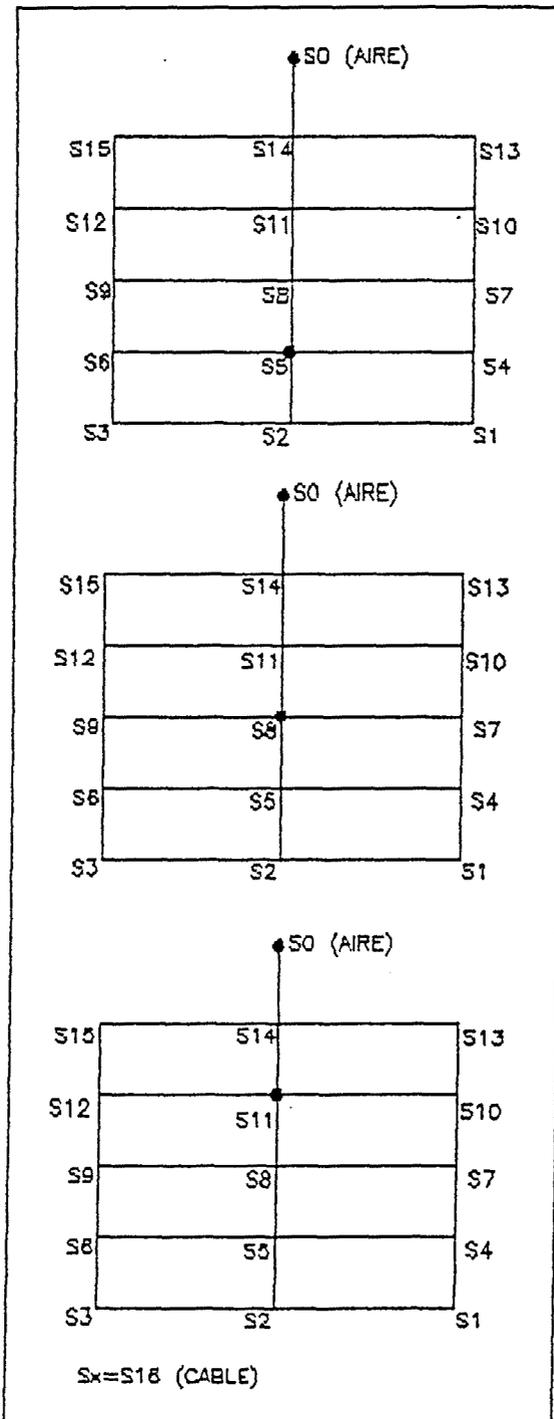


fig 8.3

8.5.1. PROCESO

Para la fabricación de placas de cerramiento la mencionada empresa utiliza unos moldes metálicos horizontales de dimensiones máximas 2,20 x 8 m.

Para la realización de las losas tipo se ha dispuesto de uno de estos moldes, subdividiéndolo en 3 tramos iguales mediante la colocación de separadores metálicos intermedios, obteniéndose así tres tramos de dimensiones 2,20x2,60 (fig 8.4).

En cada uno de los tramos se han colocado tres mallas electrosoldadas de diámetro 5 mm y dimensiones 1,95 x 2,40 m, situadas a 3 alturas diferentes una de otra e iguales en los tres tramos. (figura 8.5)

Previamente se ha colocado el cable calefactor unido a una de las tres mallas.

La malla con el cable calefactor se sitúa en la posición inferior en el primer tramo, en una posición intermedia en el segundo tramo y en la posición superior en el tercer tramo, obteniéndose así tres profundidades de embebido diferentes. (figura 8.6).

Posteriormente se sitúan las sondas numeradas (figura 8.7) para medición de temperatura unidas a las mallas y a diferentes alturas (figura 8.8).

Una vez situados los cables calefactores y las sondas tipo K, se procede al hormigonado de los tres tramos simultáneamente, utilizando la misma dosificación de hormigón (dosificación C1). (figura 8.9).

Una vez transcurrido el tiempo necesario para el endurecimiento del hormigón, se procede al desmoldaje de las 3 losas.

Este proceso se repite para las dosificaciones de hormigón C2 y C3 (figura 8.10), obteniéndose finalmente las 9 losas tipo en las que se combinan 3 profundidades de embebido y 3 dosificaciones diferentes.

8.5.2 CABLE CALEFACTOR

El cable calefactor se sitúa sobre una malla electrosoldada de diámetro 5 mm formando una superficie calefactora con un paso entre espiras de 15 cm. (figura 8.11)

La malla realiza una doble función:

- soporte del cable calefactor y de las sondas
- armadura de la losa radiante

8.5.3 MALLA ELECTROSOLDADA

Como se ha indicado en el apartado 8.5.1, se sitúan en cada tramo del molde 3 mallas a 3 alturas diferentes respecto a la superficie inferior de dicho molde;

- La primera malla se sitúa a 4,5 cm de la superficie inferior

- La segunda malla se sitúa a 4,5 cm de la primera malla
- La tercera malla se sitúa a 4,5 cm de la segunda malla.

Para ello se utilizan piezas prefabricadas de plástico con una altura de 4,5 cm. Estas piezas disponen en su parte inferior de soportes para su apoyo y en su parte superior de un encaje para calce de la malla. (figura 8.12).

La colocación de la primera malla se realiza colocando la pieza prefabricada directamente apoyada sobre la superficie inferior del molde y enganchando la malla en el calce de su parte superior.

Para la colocación de la segunda y tercera malla se utilizan las mismas piezas pero invirtiéndolas de forma que el calce de la pieza quede unido a la malla inferior y los soportes de la pieza se unan mediante bridas de plástico a la malla superior. (figura 8.13)

De esta forma se obtiene una separación de 4,5 cm entre una malla y otra, disponiéndose así de 3 posibles profundidades de embebido del elemento calefactor según este dispuesto el cable en la primera, segunda o tercera malla. (figura 8.14)

8.5.4 SONDAS

La disposición indicada de las mallas permite así mismo la colocación de sondas a diferentes alturas y distancias del cable calefactor.

La unión de las sondas a la malla se realiza mediante bridas de plástico, evitando siempre que el extremo de la sonda (punto de medida de temperatura) esté en contacto directo con la malla, para no distorsionar la medida de la temperatura en el hormigón debido a la presencia de otro material (el acero de las varillas que forman la malla) (figura 8.15)

La situación y forma de disposición de las sondas es la indicada en las figuras 8.1 y 8.2.

Como se observa en la figuras 8.1 y 8.2 esta disposición de las sondas nos permite obtener la temperatura de la losa radiante en 5 alturas diferentes;

- POSICION Z0 Superficie superior de la losa
- POSICION Z8 Malla superior, a 7 cm de profundidad
- POSICION Z12 Malla intermedia, a 11 cm de profundidad
- POSICION Z16 Malla inferior, a 15,5 cm de profundidad
- POSICION Z20 Superficie inferior de la losa

La colocación de las sondas en la posición Z20 se realiza ajustando estas bajo los soportes de las piezas prefabricadas situadas sobre la superficie inferior del molde (figura 8.16).

La colocación de las sondas en la posición Z0 se realiza justo después de haber hormigonado, cuando el hormigón todavía no ha endurecido y permite

introducir la sonda a través de él pero que ya dispone de la suficiente consistencia como para sujetar la sonda lo más cercana posible a la superficie superior de la futura losa. (figura 8.17)

Para cada una de las alturas estudiadas se colocan 3 sondas; una en la vertical del cable, otra a su izquierda entre espira y espira y otra a su derecha entre espira y espira. La colocación de sondas tanto a la derecha como a la izquierda del cable calefactor se realiza con el objetivo de obtener medidas de comprobación, puesto que dado la simetría del modelo, la temperatura deberá ser la misma en ambos extremos.

8.5.5 HORMIGONADO

Una vez situadas las mallas, el cable calefactor y las sondas tipo K, se procede al hormigonado de la primera serie de losas con dosificación común C1 (figura 8.18), obteniéndose las losas indicadas en la tabla 8.11.

LOSA	DOSIFICACION	PROFUNDIDAD EMBEBIDO
H11	C1	P1
H12	C1	P2
H13	C1	P3

TABLA 8.11

Una vez endurecido el hormigón y retiradas las losa del molde, se repite el proceso para la segunda dosificación de hormigón C2 (figura 8.19), obteniéndose las losas indicadas en la tabla 8.12.

LOSA	DOSIFICACION	PROFUNDIDAD EMBEBIDO
H21	C2	P1
H22	C2	P2
H23	C2	P3

TABLA 8.12

Análogamente para la tercera dosificación C3 (figura 8.20), se obtienen las losas de la tabla 8.13.

LOSA	DOSIFICACION	PROFUNDIDAD EMBEBIDO
H31	C3	P1
H32	C3	P2
H33	C3	P3

TABLA 8.13

De cada losa se toman probetas para la realización del ensayo a compresión según UNE 83.304/84 (figura 8.21), obteniéndose los resultados indicados en la tabla 8.7

8.5.6 AISLAMIENTO PERIFERICO

Una vez construidas las 9 losas tipo y previamente al registro de temperaturas en cada una de ellas, se procede al aislamiento periférico de la losa mediante poliestireno expandido de 5 cm de espesor (figura 8.22).

8.5.7 REGISTRO DE DATOS

Para proceder al registro de datos se conecta la parte exterior de las 15 sondas embebidas dentro de cada una de las losas a los canales de entrada del aparato registrador (SQUIRREL 1200).

El canal 16 del registrador se utiliza para conectar la sonda de temperatura exterior, la cual se encuentra situada a 1 metro por encima de la superficie superior de la losa radiante (figura 8.23).

El registrador se programa para que inicie la lectura de datos, con un intervalo de registro de 10 minutos, a las 23 horas del día en que se inicia el ensayo y finalice el registro 2 días después a las 7 horas. De esta forma se realiza dos ciclos de carga y dos de descarga en cada ensayo.

El cable calefactor se conecta a la red a través de un reloj horario programado para que se conecte el cable a las 23 horas y se desconecte a las 7 horas (figura 8.24).

Este proceso se repite 2 veces para cada una de las 9 losas ensayadas con el fin de obtener resultados más fiables.

8.6 PROCESO DE ANALISIS

Las losas prototipo se han diseñado y se han fabricado tal como se indica en el apartado 8.5.

8.6.1 CONDICIONES DE TRABAJO

A continuación se exponen las condiciones de trabajo de las distintas pruebas que se han llevado a término y se define la metodología y criterios del análisis de resultados.

Las variables que se analizan son la dosificación del hormigón y la disposición geométrica de las resistencias eléctricas en la losa de hormigón.

Se analizan 3 tipos de hormigones con propiedades térmicas distintas y 3 profundidades de embebido del elemento calefactor.

Ver tablas de apartados 8.2.1 y 8.2.2 para su identificación.

Se presentan resultados de las pruebas más significativas, que son las que nos ayudan a comprender mejor el complejo fenómeno de la inercia térmica, así como aquellas que puedan ayudar a tomar decisiones sobre el tipo de hormigón a escoger y la profundidad de ubicación de las resistencias eléctricas, de cara a un mayor aprovechamiento de la tarifa nocturna y del cumplimiento de la normativa; no se pueden sobrepasar los 28 °C en la superficie del suelo ni los 36°C en el plano de las resistencias.

Para todas las pruebas se ha seguido el siguiente proceso:

- Las resistencias se conectan a las 23 h
- Las resistencias se desconectan a las 7 h del día siguiente
- No hay reconexión hasta las 23 h del día siguiente
- La distancia entre las resistencias es de 15 cm (se ha escogido este valor después de varias pruebas y comprobar que esta era la densidad de potencia más conveniente para un aprovechamiento de la tarifa nocturna)
- En todas las pruebas realizadas se deja evolucionar el sistema durante 3 días y las mediciones se inician a partir del cuarto día, a partir del cual la evolución es periódica y facilita la comparación de resultados.

8.6.2 ANALISIS DE RESULTADOS

Se va a analizar la influencia de dos VARIABLES;

- DOSIFICACION DE LA LOSA DE HORMIGON
- PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO DEL ELEMENTO CALEFACTOR

Las dosificaciones y profundidades analizadas son las indicadas en la tabla 8.14.

TIPO HORMIGON	C1	C2	C3
ALTURA LOSA (cm)	$e_1 = e = 20$	$e_2 = e = 20$	$e_3 = e = 20$
CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m °C)	λ_1 $\lambda_1 = 2,26$	$\lambda_2 > \lambda_1$ $\lambda_2 = 2,8$	$\lambda_3 < \lambda_1$ $\lambda_3 = 0,8$
CALOR ESPECIFICO (W h/Kg °C)	$Ce_1 = 0,23$	$Ce_2 = Ce_1 = 0,23$	$Ce_3 = Ce_1 = 0,23$
DENSIDAD (Kg/m ³)	p_1 $p_1 = 2400$	$p_2 > p_1$ $p_2 = 2500$	$p_3 < p_1$ $p_3 = 1300$
PROFUNDIDAD EMBEBIDO (cm)	$p_1/p_2/p_3$ 7/11/15,5	$p_1/p_2/p_3$ 7/11/15,5	$p_1/p_2/p_3$ 7/11/15,5

TABLA 8.14

Se construyen 9 losas tipo para cada una de las 3 DOSIFICACIONES y para cada una de las 3 PROFUNDIDADES DE EMBEBIDO cuya denominación y características son las indicadas en la tabla 8.15.

DENOMINACION LOSA PRUEBA	DOSIFICACION HORMIGON	PROFUNDIDAD DE EMBEBIDO
H11	C1	P1
H12	C1	P2
H13	C1	P3
H21	C2	P1
H22	C2	P2
H23	C2	P3
H31	C3	P1
H32	C3	P2
H33	C3	P3

TABLA 8.15

Se realizan 2 mediciones, a partir del 4º día, para cada losa de los puntos indicado en la tabla 8.16 , tabla de resultados de las mediciones de

temperatura de la losa genérica;

Hxy x : 1,2,3 dosificaciones
y : 1,2, 3 profundidades

NºSONDA	DENOMINACION MEDICION	MEDICION i= 1,2	POSICION TERMOPAR
S0	Tª AMBIENTE	TiS16	0
S13	Tª SUP.SUELO IZQ.CABLE	TiS13	Z0
S14	Tª SUP.SUELO SOBRE CABLE	TiS14	
S15	Tª SUP.SUELO DER.CABLE	TiS15	
S10	Tª 1ª MALLA IZQ.CABLE	TiS10	Z8
S11	Tª 1ª MALLA SOBRE CABLE	TiS11	
S12	Tª 1ª MALLA DER.CABLE	TiS12	
S7	Tª 2ª MALLA IZQ.CABLE	TiS7	Z12
S8	Tª 2ª MALLA SOBRE CABLE	TiS8	
S9	Tª 2ª MALLA DER.CABLE	TiS9	
S4	Tª 3ª MALLA IZQ.CABLE	TiS4	Z16
S5	Tª 3ª MALLA SOBRE CABLE	TiS5	
S6	Tª 3ª MALLA DER.CABLE	TiS6	
S1	Tª TERRENO IZQ.CABLE	TiS1	Z20
S2	Tª TERRENO SOBRE CABLE	TiS2	
S3	Tª TERRENO DER.CABLE	TiS3	

TABLA 8.16

Cada una de estas mediciones abarcará un día completo (24 h), el cual se subdivide en intervalos de 10 minutos, de forma que cada $TiSj$ se desglosa en 144 valores, que se denominan según la nomenclatura:

$$Ti S_j /k \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, 3 \text{ (medición día } i) \\ j = 0 \dots 15 \text{ (número de sonda)} \\ k = 1 \dots 24 \text{ (intervalos de tiempo)} \end{array}$$

El número total de datos de temperatura que se obtiene es:

$$N^{\circ} \text{ TOTAL DATOS} = N^{\circ} \text{ LOSAS} \times N^{\circ} \text{ MEDICIONES} \times N^{\circ} \text{ SONDAS} \\ \times N^{\circ} \text{ INTERVALOS}$$

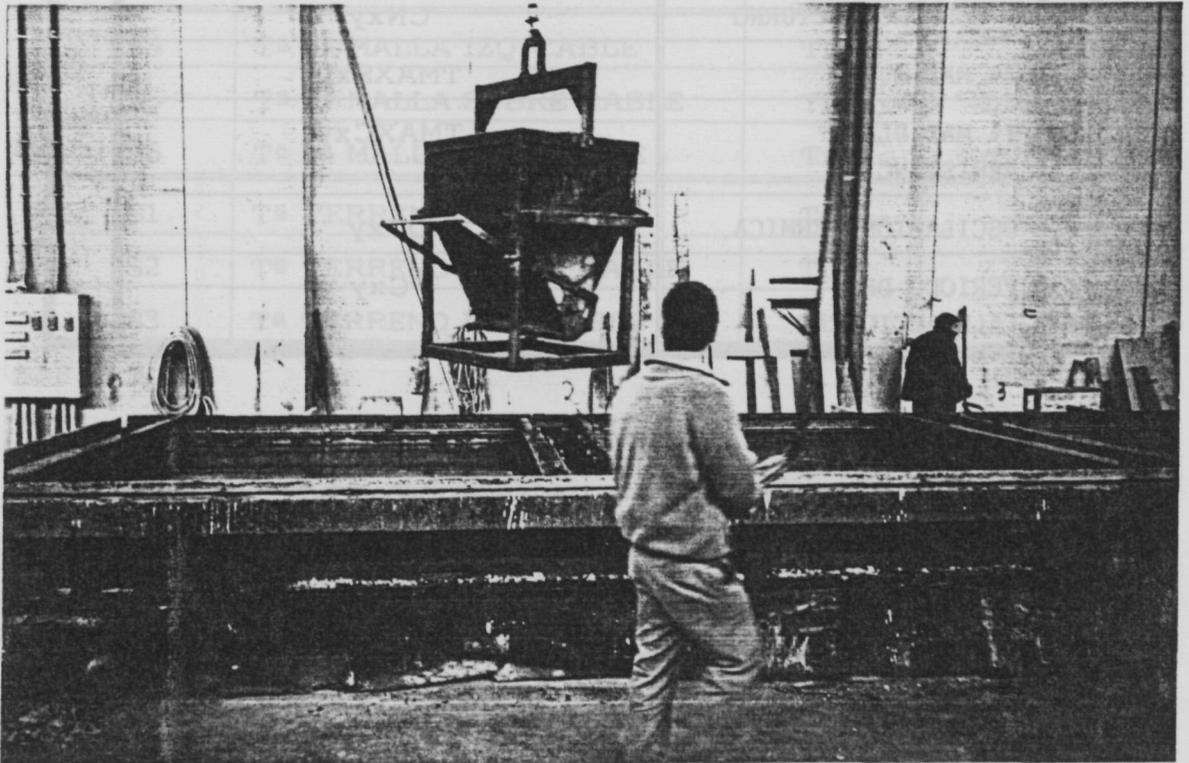
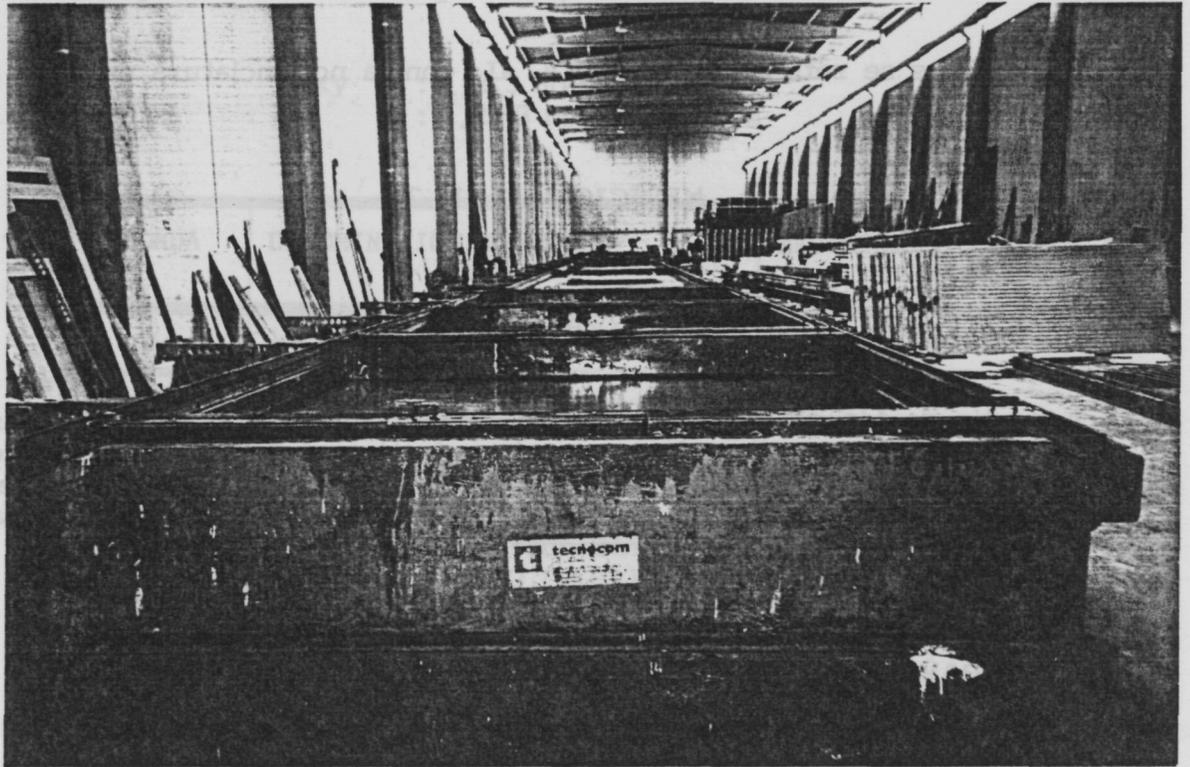


fig 8.4

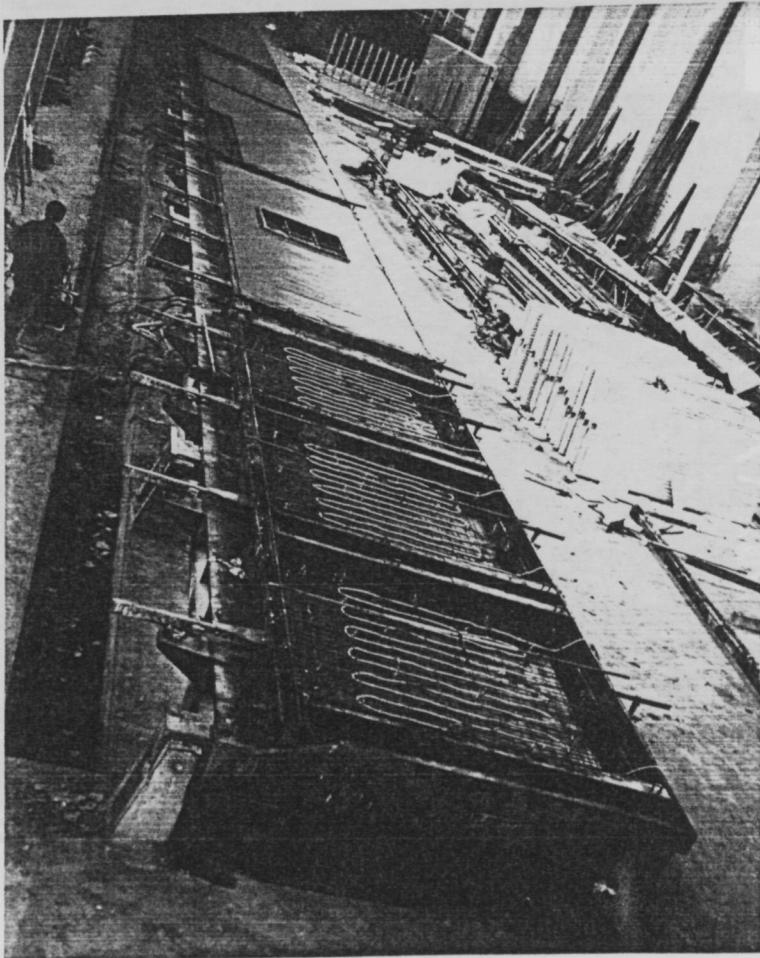
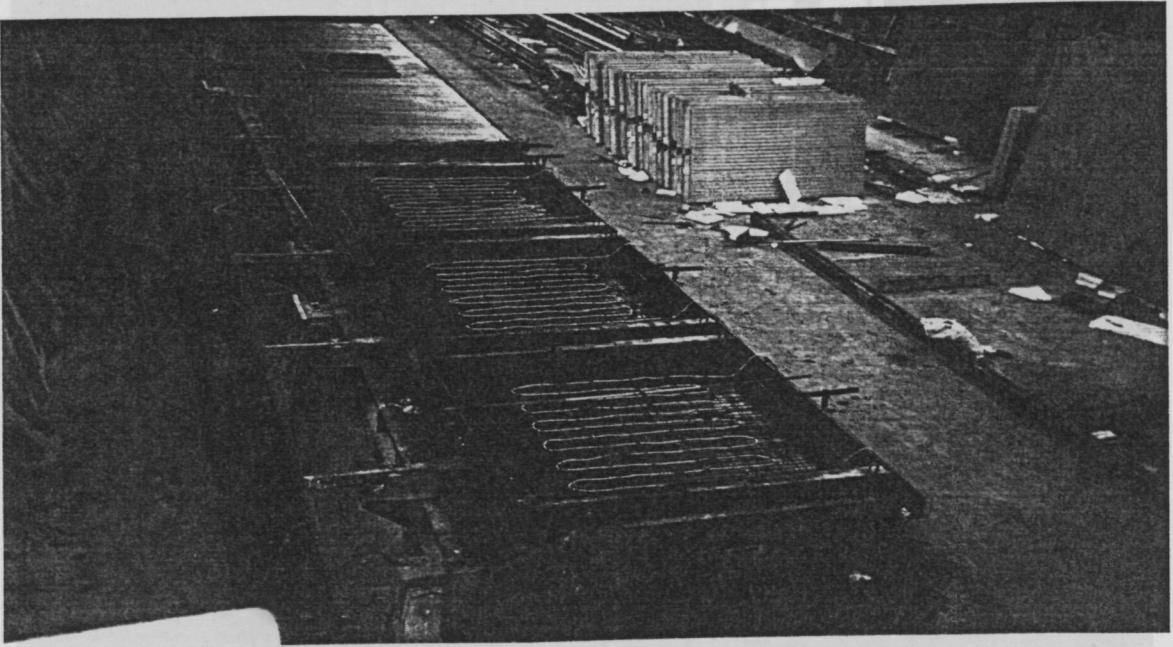


fig 8.5

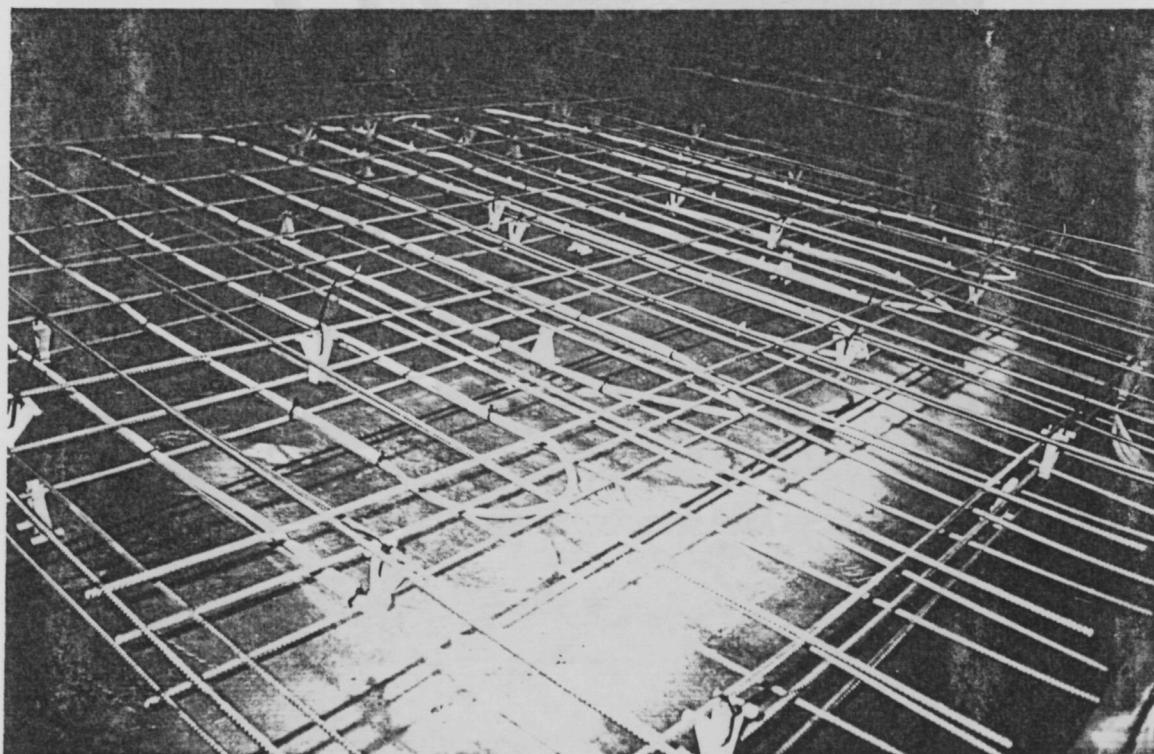
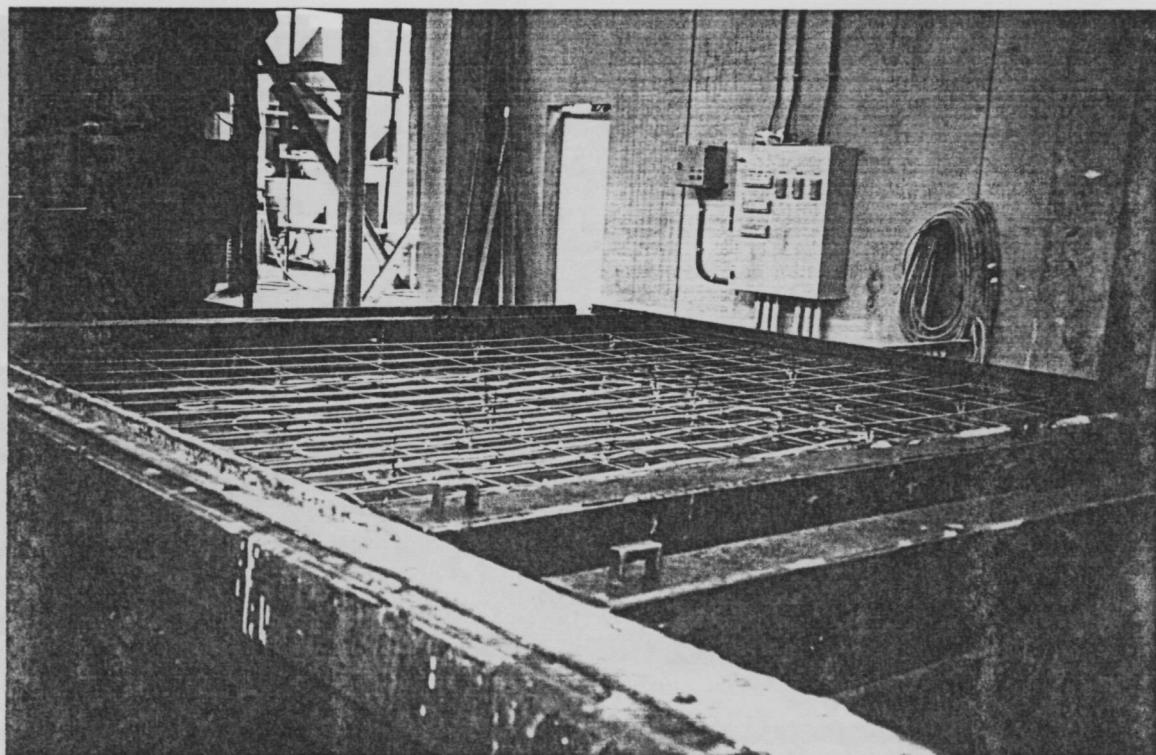


fig 8.6

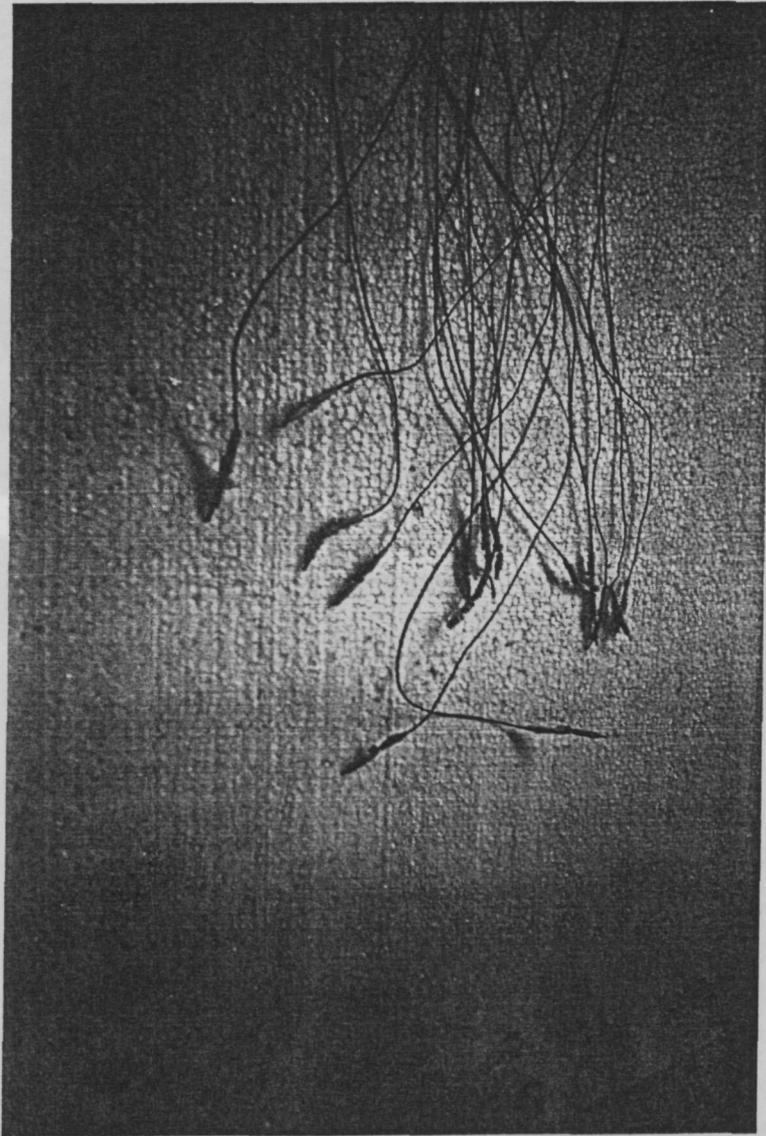


fig 8.7

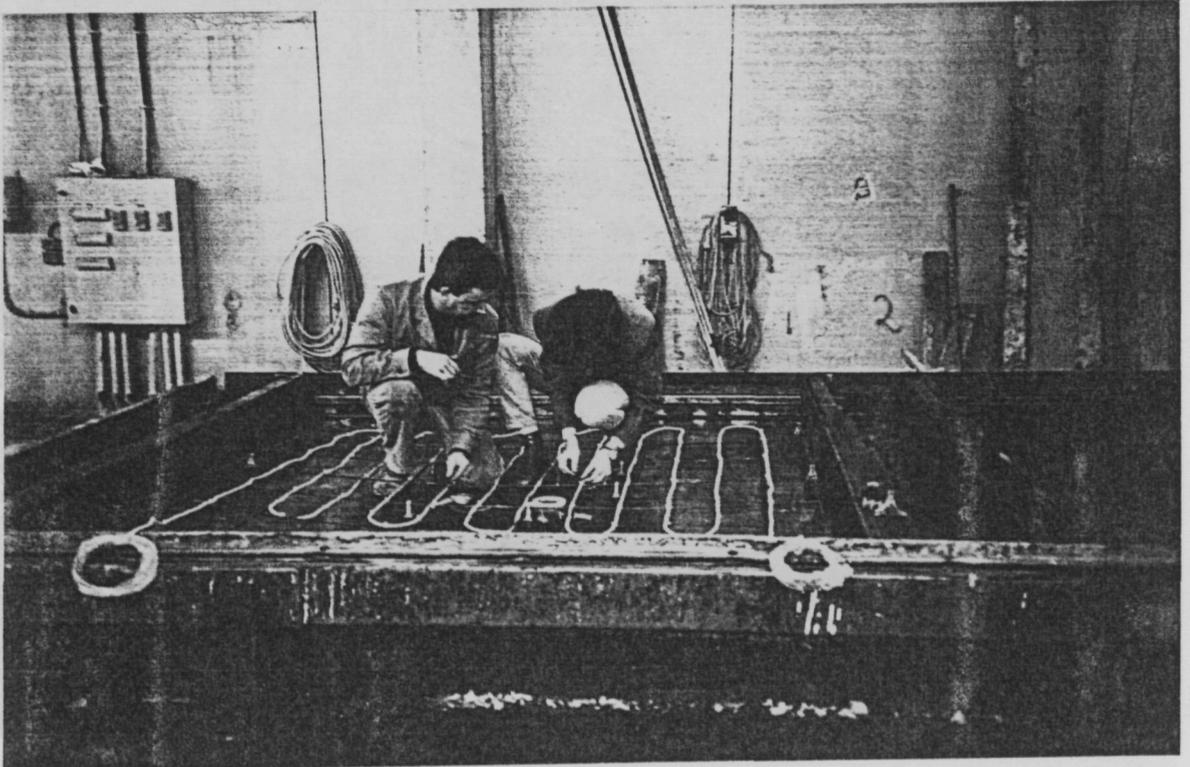
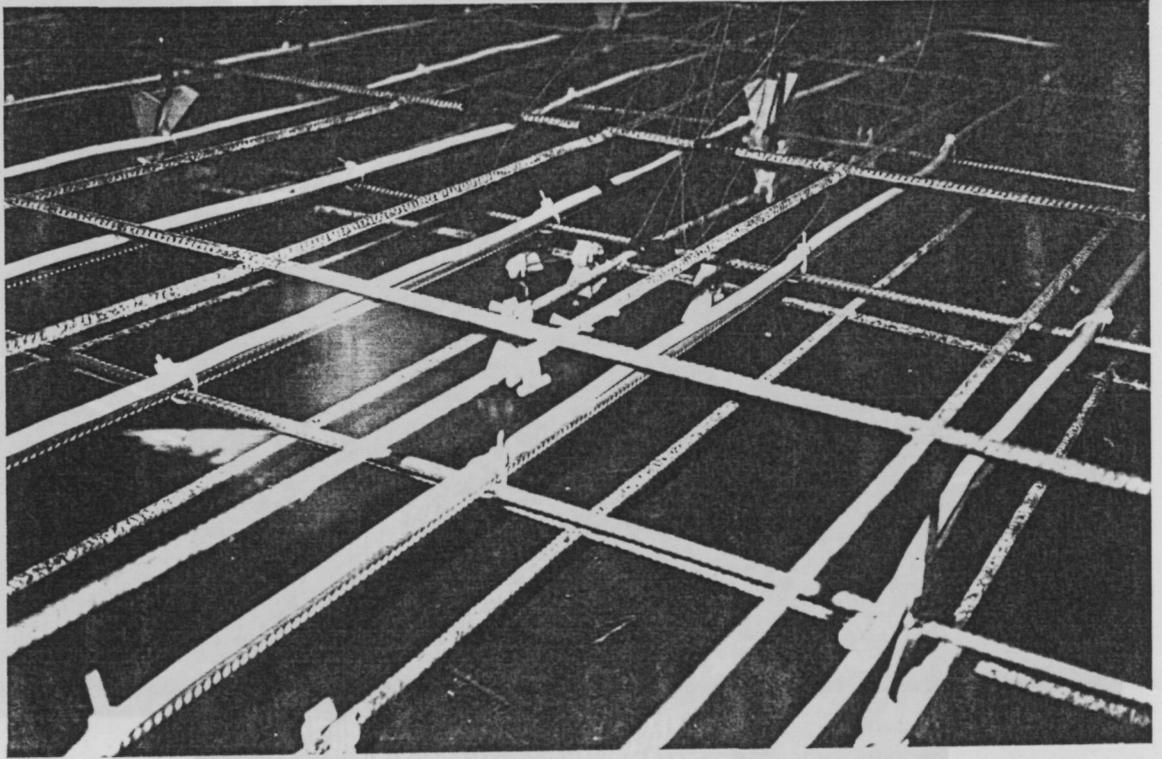


fig 8.8

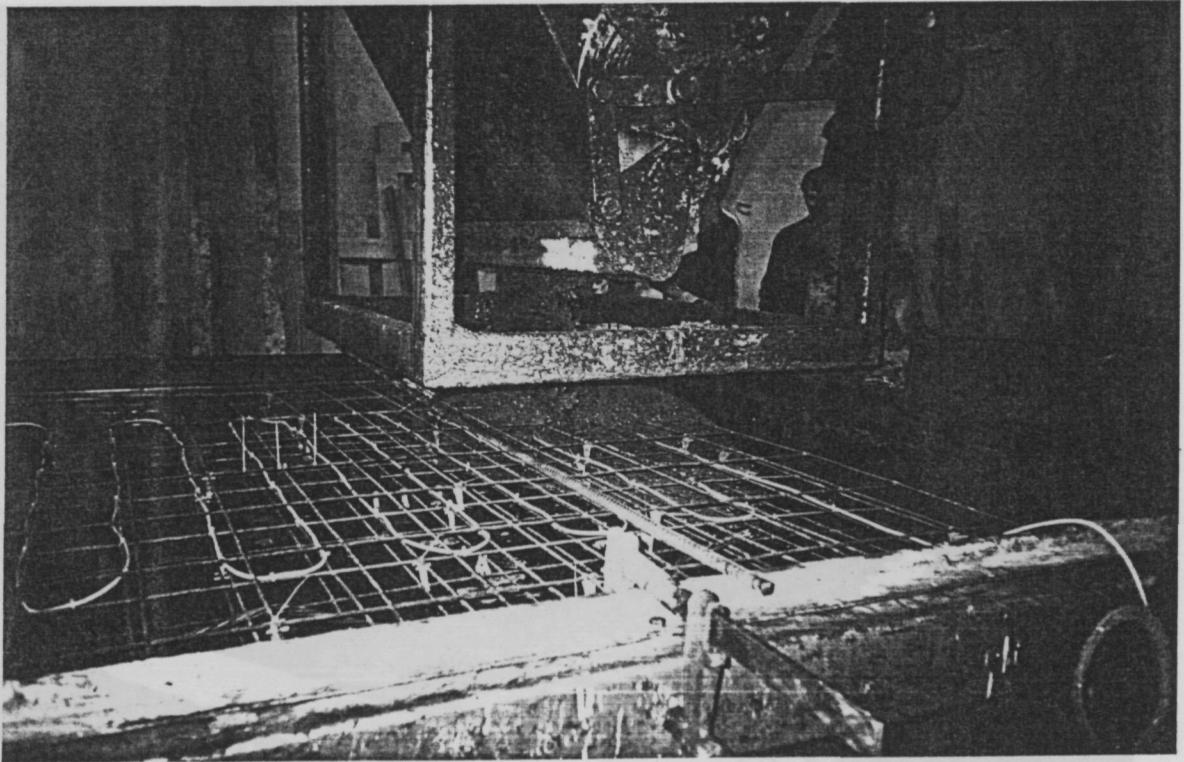
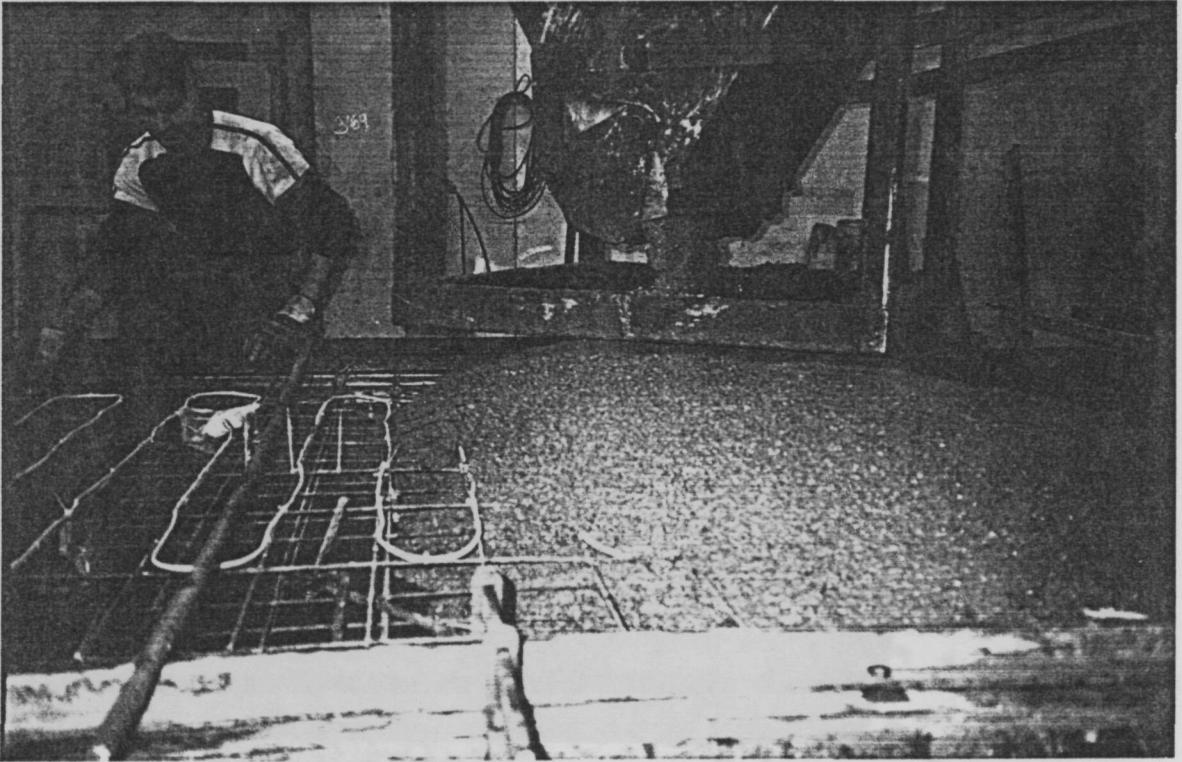


fig 8.9