



60

CONGRESO IBEROAMERICANO

de Pavimentos de Hormigón



Puerto Iguazú, Argentina

23 y 24
de abril de
2015

Organizan:



Federación Iberoamericana
del Hormigón Premezclado



ASOCIACION
ARGENTINA del
HORMIGON
ELABORADO

Co-sponsor:



FIGEM
FEDERACION INTERAMERICANA
DEL CEMENTO



Fundación
ISCYC

INVESTIGACIÓN DE GRADIENTE TÉRMICO EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO



CONTENIDO

- Objetivos de la investigación,
- Características del proyecto,
- Generalidades del método de Madurez,
- Desarrollo en campo,
- Análisis de la información,
- Incidencia en métodos de diseño y métodos de evaluación de pavimentos.
- Conclusiones,
- Espacio para preguntas y comentarios.



Objetivo Principal

Establecer una relación entre las condiciones climáticas como Temperatura Ambiente, Precipitación y Viento, con las diferentes temperaturas internas en los Pavimentos.



Objetivos Específicos

- Emplear el método de Madurez del Concreto para predecir la resistencia a tensión por flexión a edades tempranas en los pavimentos y estimar tiempo de apertura al tráfico.
- Establecer una relación entre la temperatura interna del pavimento en función de los parámetros climáticos medidos y el espesor del pavimento.



Objetivos Específicos

- Establecer una ecuación de predicción de gradiente de temperatura para las condiciones predominantes de la zona cercana al proyecto.
- Estimar esfuerzos máximos en las losas debido a variaciones de temperatura.
- Conocer el comportamiento del pavimento en edades tempranas en relación al tamaño de losa



Características del Proyecto

25cm MR 48 kg/cm ²
BASE RECICLADA CON CEMENTO 35 kg/cm ² a 7 días



23cm MR 48 kg/cm ²
BASE RECICLADA CON CEMENTO 35 kg/cm ² a 7 días

20cm MR 48 kg/cm ²
BASE RECICLADA CON CEMENTO 35 kg/cm ² a 7 días



6º CONGRESO IBEROAMERICANO de Pavimentos de Hormigón

Puerto Iguazú, Argentina

23 y 24
de abril de
2015



Organizan:



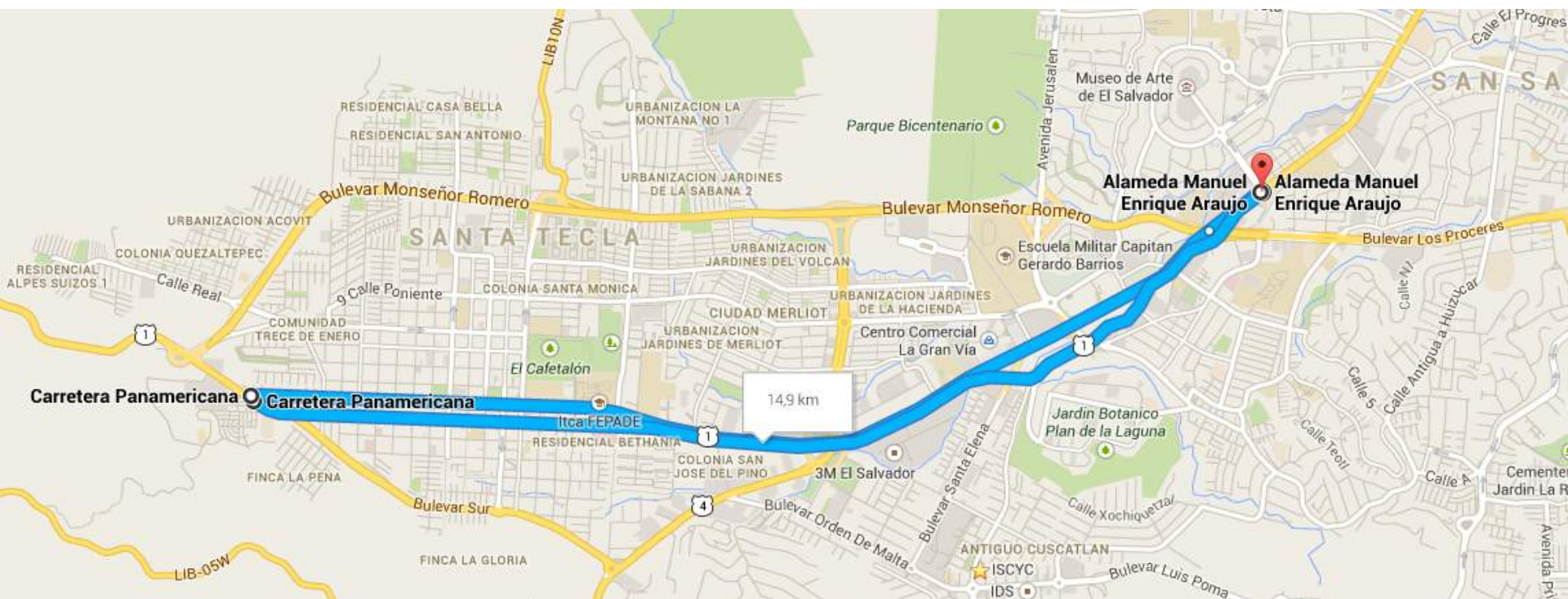
Federación Iberoamericana
del Hormigón Premezclado



ASOCIACIÓN
ARGENTINA del
HORMIGÓN
ELABORADO

Co-sponsor:





Rehabilitación Carretera CA-01, tramo comprendido entre
Avenida la Revolución – Las Delicias.

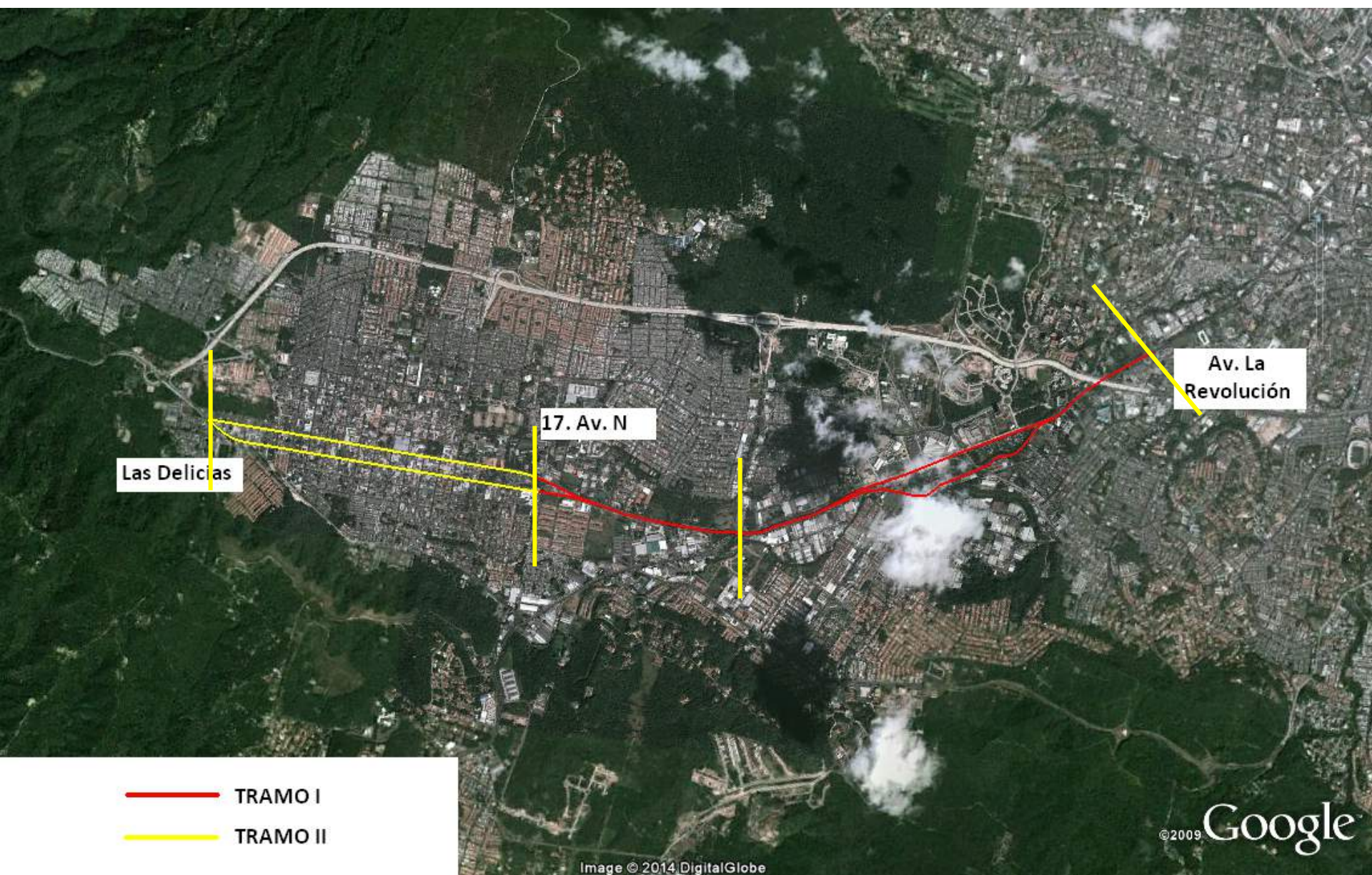


Las Delicias

17. Av. N

Av. La
Revolución

- TRAMO I
- TRAMO II

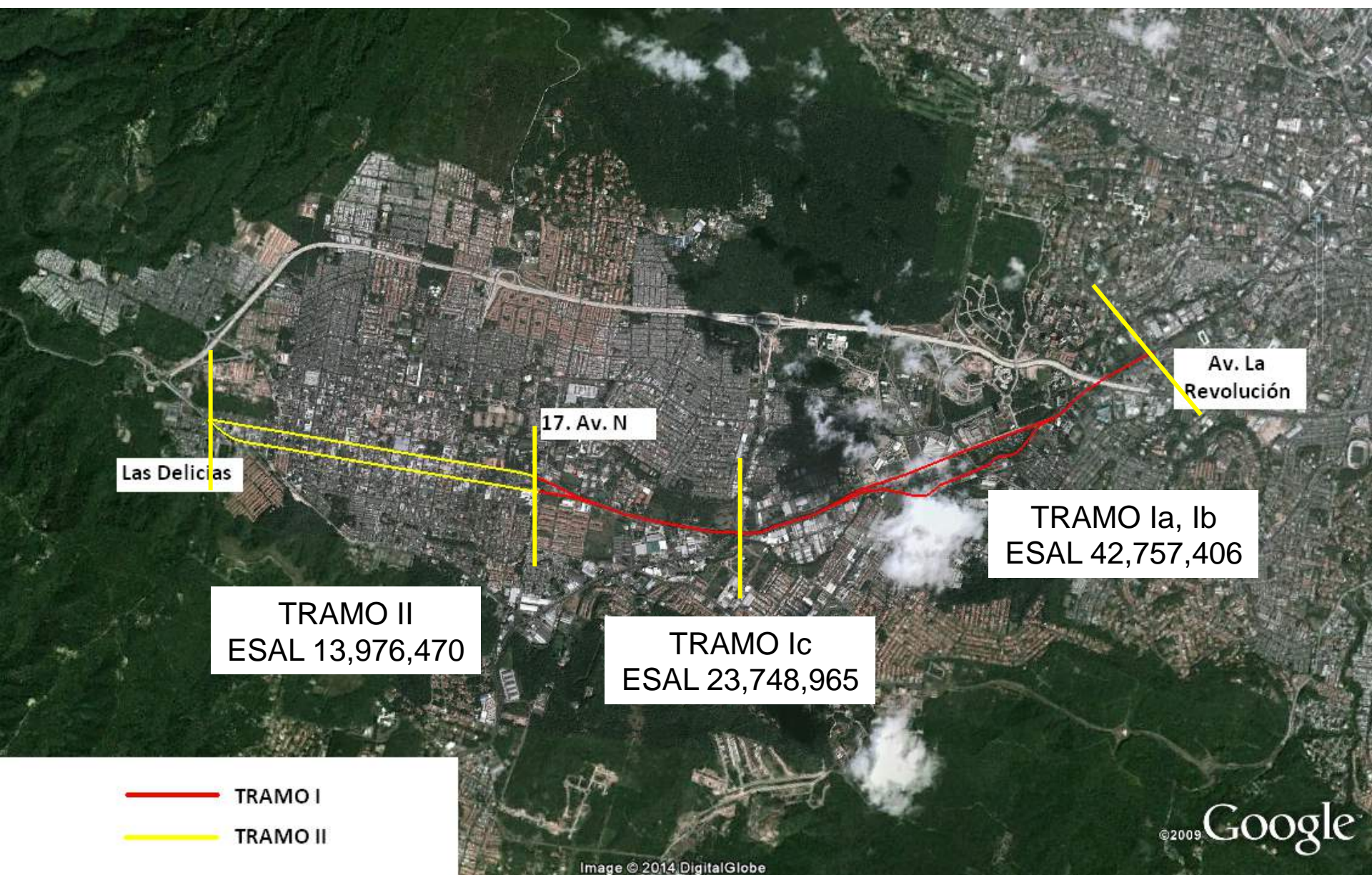


Las Delicias

17. Av. N

Av. La
Revolución

- TRAMO I
- TRAMO II



Las Delicias

17. Av. N

Av. La
Revolución

TRAMO II
ESAL 13,976,470

TRAMO Ic
ESAL 23,748,965

TRAMO Ia, Ib
ESAL 42,757,406

— TRAMO I
— TRAMO II



Características del proyecto

DISEÑO AASHTO 93



TRAMO I-a, I-b
ESAL 42,757,406

TRAMO I-c
ESAL 23,748,965

TRAMO II
ESAL 13,976,470

25cm MR 48 kg/cm ²
BASE REICLADA CON CEMENTO 35 kg/cm ² a 7 días

23cm MR 48 kg/cm ²
BASE REICLADA CON CEMENTO 35 kg/cm ² a 7 días

20cm MR 48 kg/cm ²
BASE REICLADA CON CEMENTO 35 kg/cm ² a 7 días



DISEÑO DE MEZCLA

Material	Identificación	Cantidad	Unidad
Cemento	C 1157 HE	460	kg/m ³
Agua	ANDA	180	Litros/m ³
Agregado fino			
Agregado fino 1	Arena Tihuapa	310	kg/m ³
Agregado fino 2	Arena triturada	135	kg/m ³
Agregado grueso			
Agregado grueso 1	Grava # 67	675	kg/m ³
Agregado grueso 2	Grava # 4	555	kg/m ³
Aditivos			
Aditivo 1	RB 910	1.6	Litros/m ³
Aditivo 2	Megaflow	2	Litros/m ³
Fibras			
Fibra 1	Imifiber A	1	Kg/m ³
Peso Volumétrico Teórico		2319.6	kg/m ³



Generalidades del Método de Madurez





NORMA ASTM C-1074

Práctica Estándar para la Estimación de la Resistencia del Concreto mediante el Método de Madurez.



Designation: C 1074 – 04

Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method¹

This standard is issued under the fixed designation C 1074; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.



Factor Tiempo-Temperatura (Ecuación Nurse Saúl)

El método propone que la ganancia de resistencia del concreto se basa en una ecuación lineal, relacionando el índice de hidratación con la temperatura. En 1951, A.G.A. Saúl asoció esta función de la madurez con la resistencia a la compresión y la llamo “Ley de la Ganancia de Resistencia con Madurez”



$$M = \sum ((t_a - t_0) \Delta T)$$

Donde:

M= Madurez (factor tiempo-temperatura en la edad t.)

T_a= Promedio de la temperatura del concreto durante el intervalo de tiempo Δt.

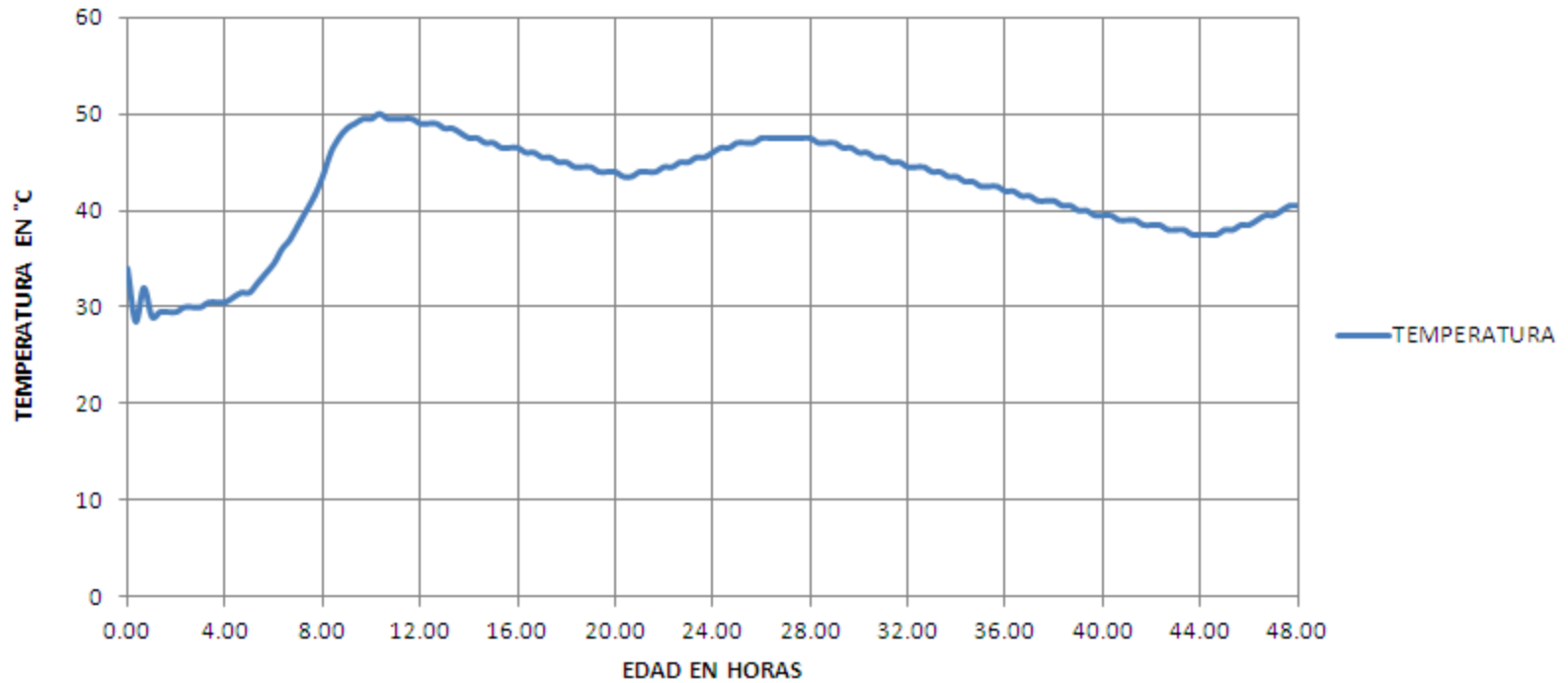
T₀= Dato de temperatura (datum)

Δt= Intervalo de tiempo considerado

La Temperatura a la cual se considera que la ganancia de resistencia se detiene es el “datum” usualmente fijado en función del tipo de cemento entre otros factores.

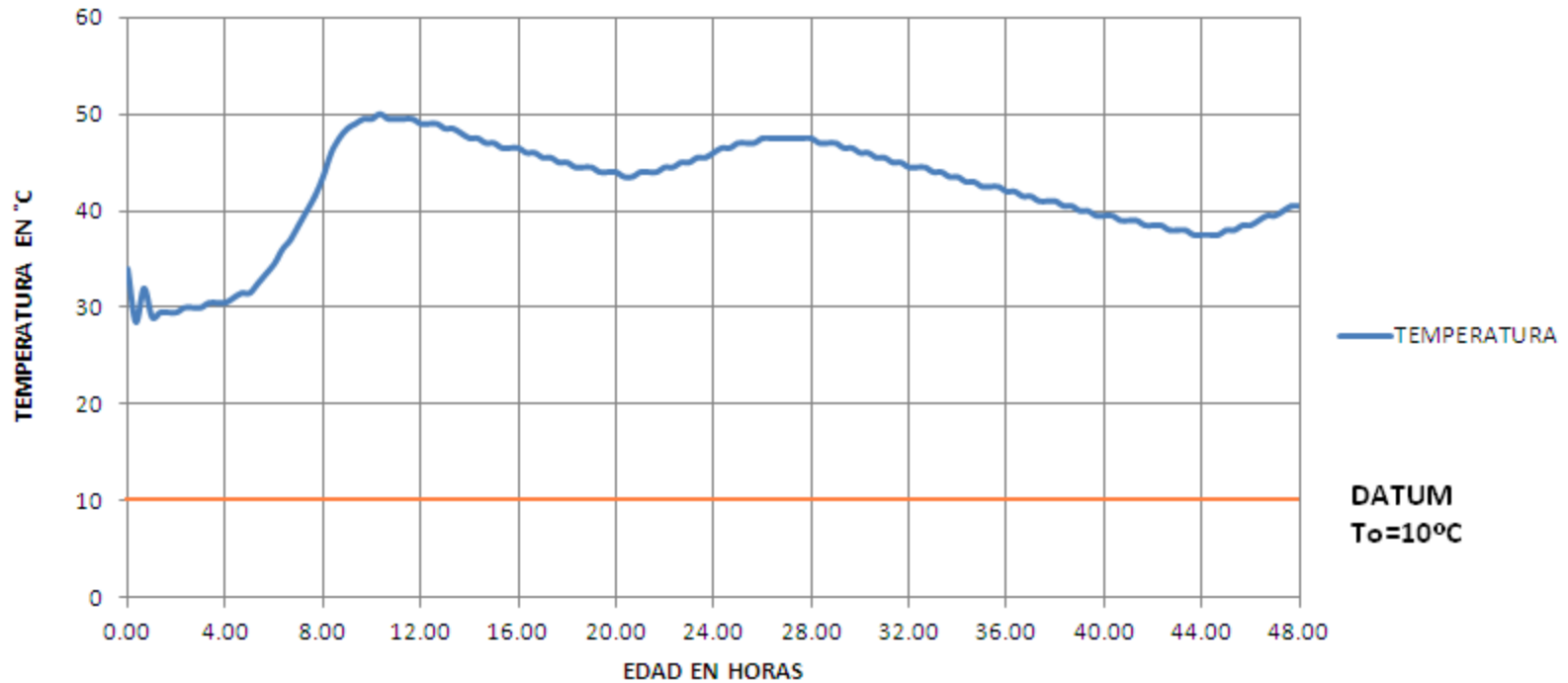


Historial de Temperatura de una muestra de Concreto



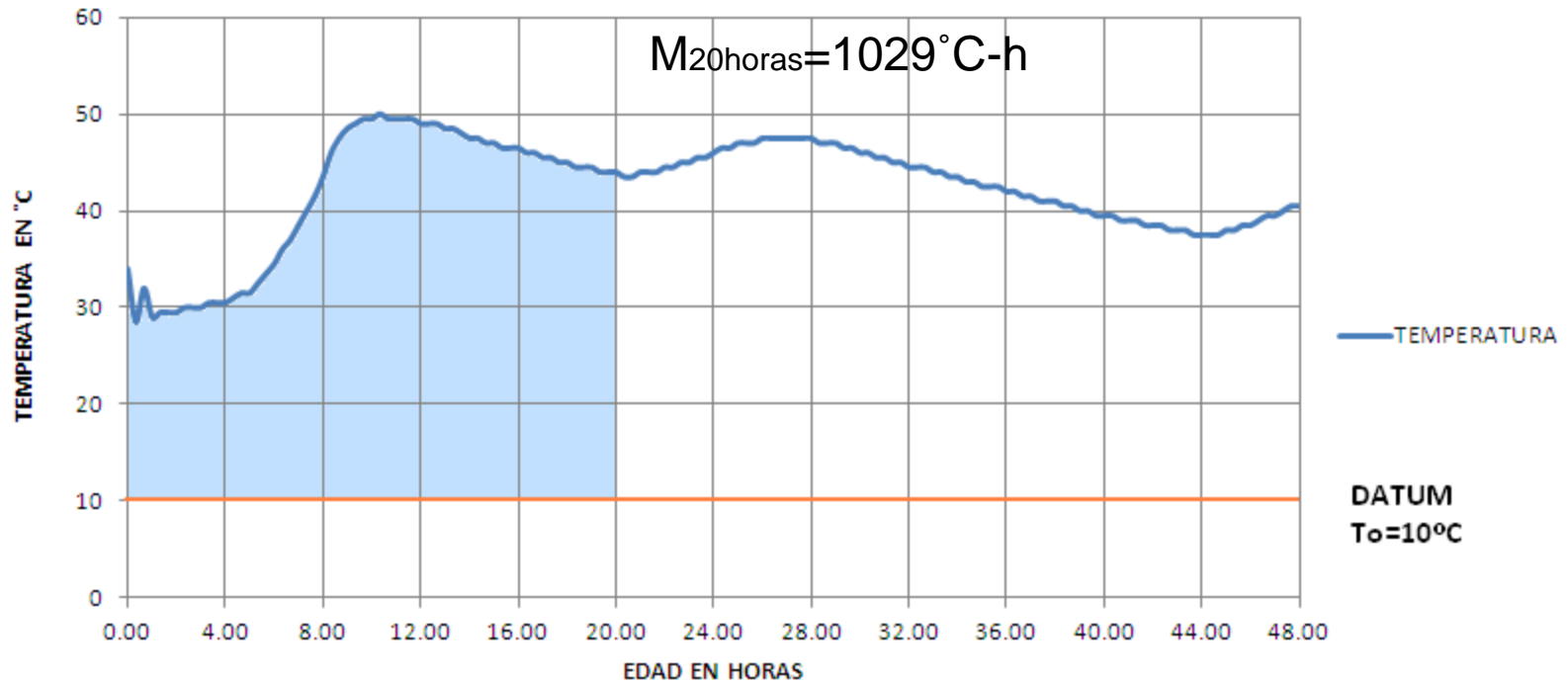


Historial de Temperatura de una muestra de Concreto



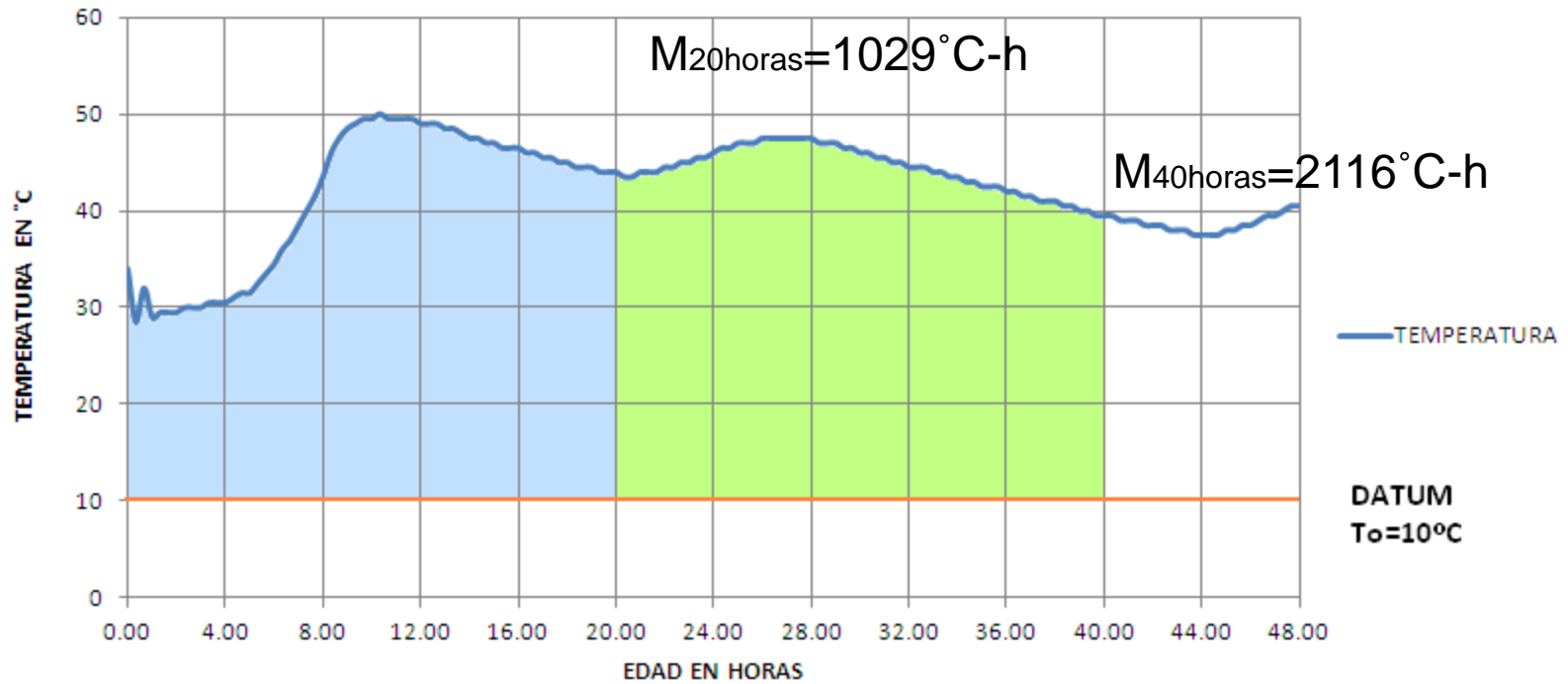


Historial de Temperatura de una muestra de Concreto



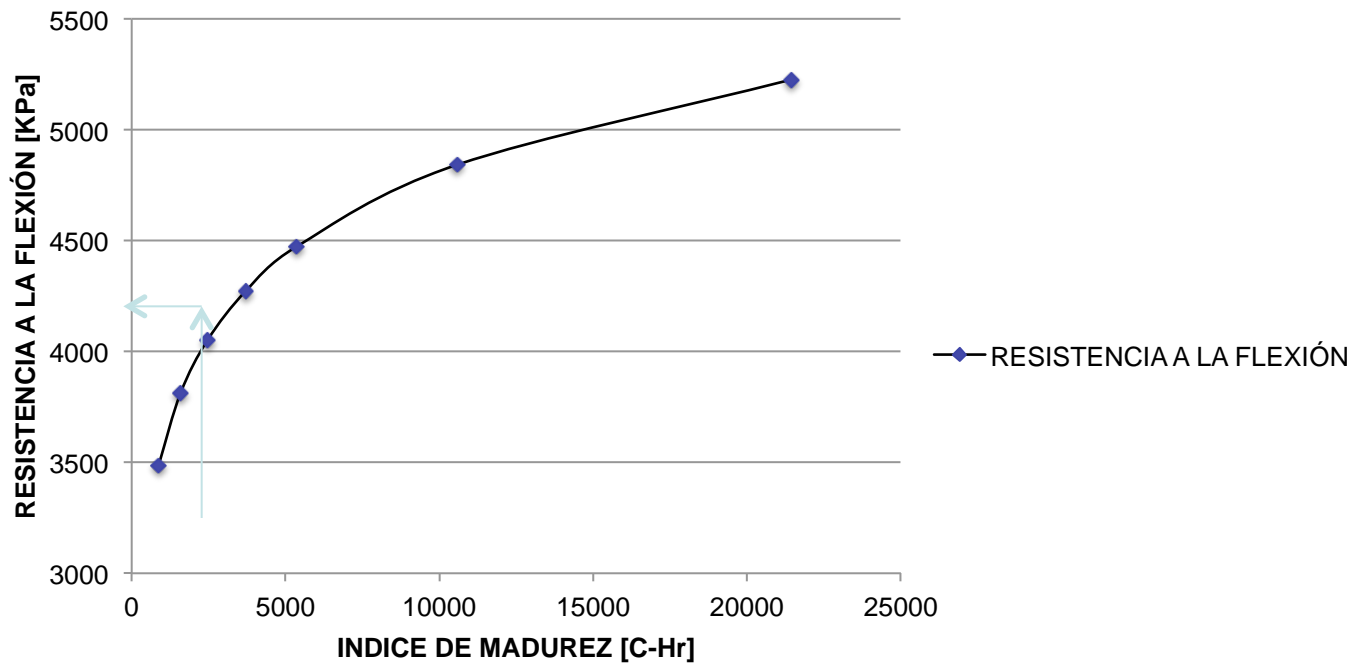


Historial de Temperatura de una muestra de Concreto

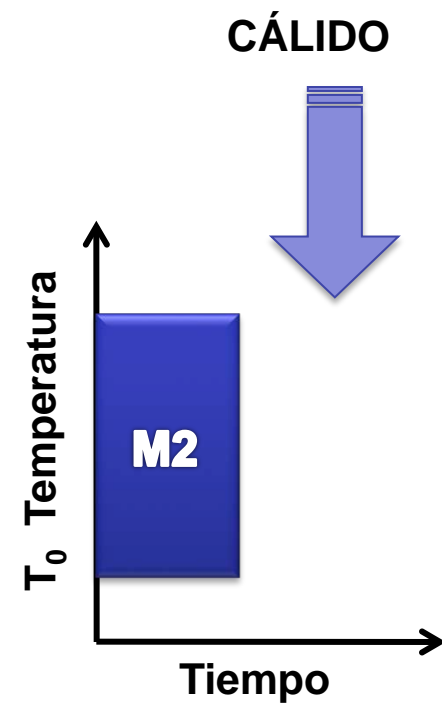
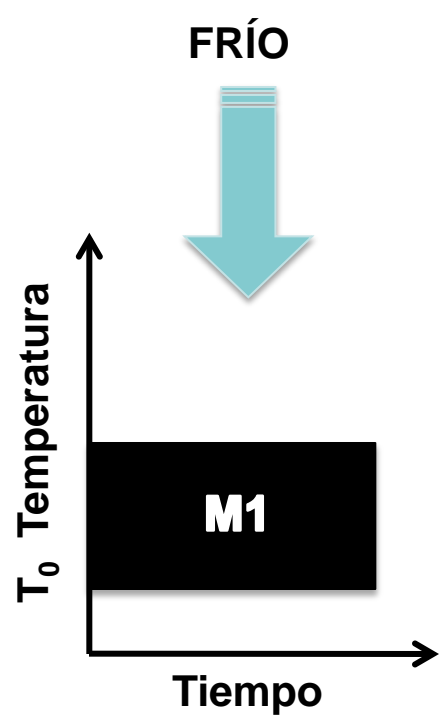




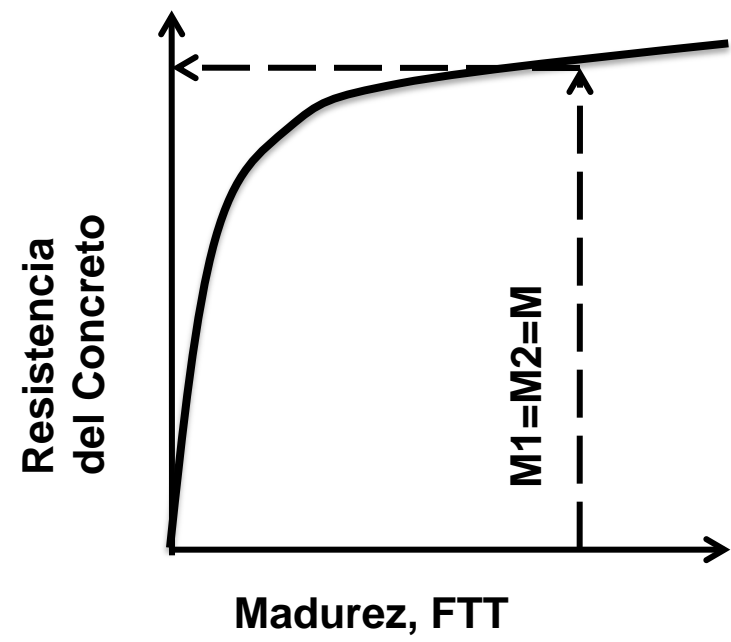
Proyección de Resistencia en Base a Índice de Madurez



$$M_{40\text{horas}} = 2116^{\circ}\text{C-h}$$



Relación Resistencia-Madurez



T_0 =Datum de Temperatura
M=Madurez
FTT=Factor Tiempo Temperatura



La madurez es un indicador de la historia tiempo-temperatura de una mezcla de concreto y se registra como el producto del tiempo y de la temperatura. La asunción inherente en el método de la madurez es que “dos muestras de concreto con la misma madurez tendrán la misma resistencia, aunque cada una se pudo haber expuesto a diversas condiciones de curado”

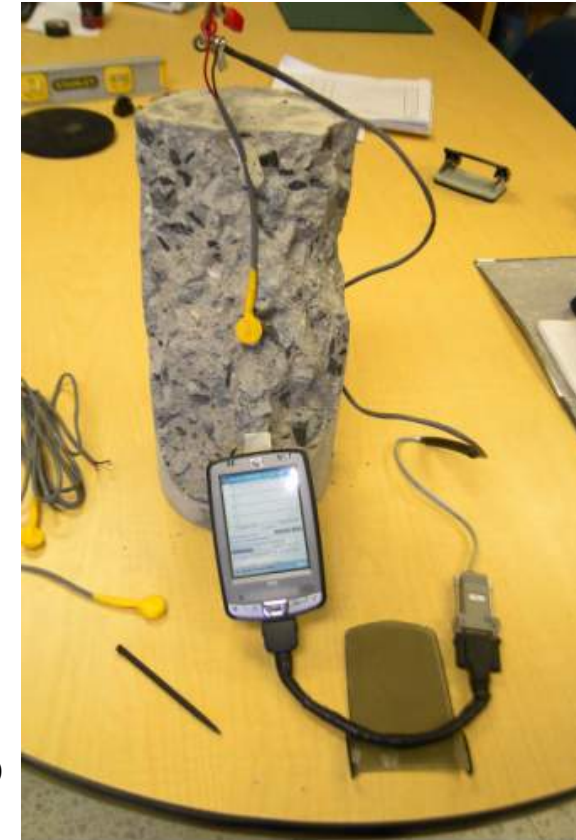


Trabajo de Campo



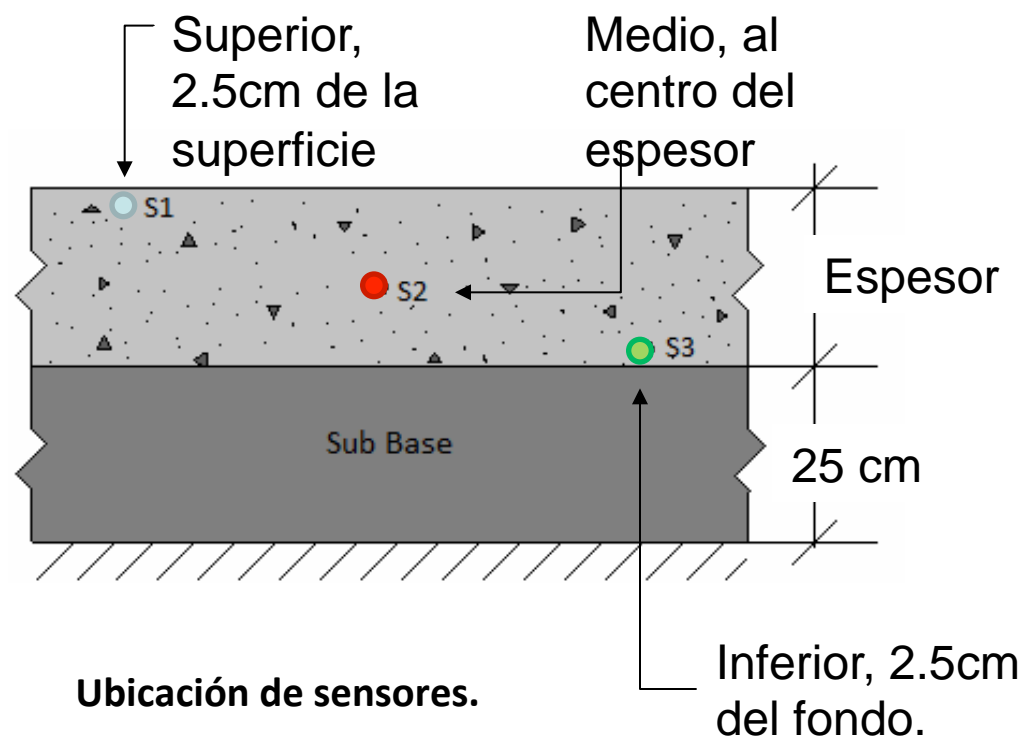
Criterios de Instalación de sensores

- 1- Número de secciones representativas por espesor,
- 2- Distancia respecto a la estación meteorológica,
- 3- Tráfico esperado en cada zona,
- 4- Carril de mayor o menor tráfico,
- 5- Ubicaciones que correspondieran a concreto colocado con molde deslizante,
- 6- Facilidad de acceso para toma de muestras,
- 7- Puntos seguros y alejados del fácil acceso del público en general.



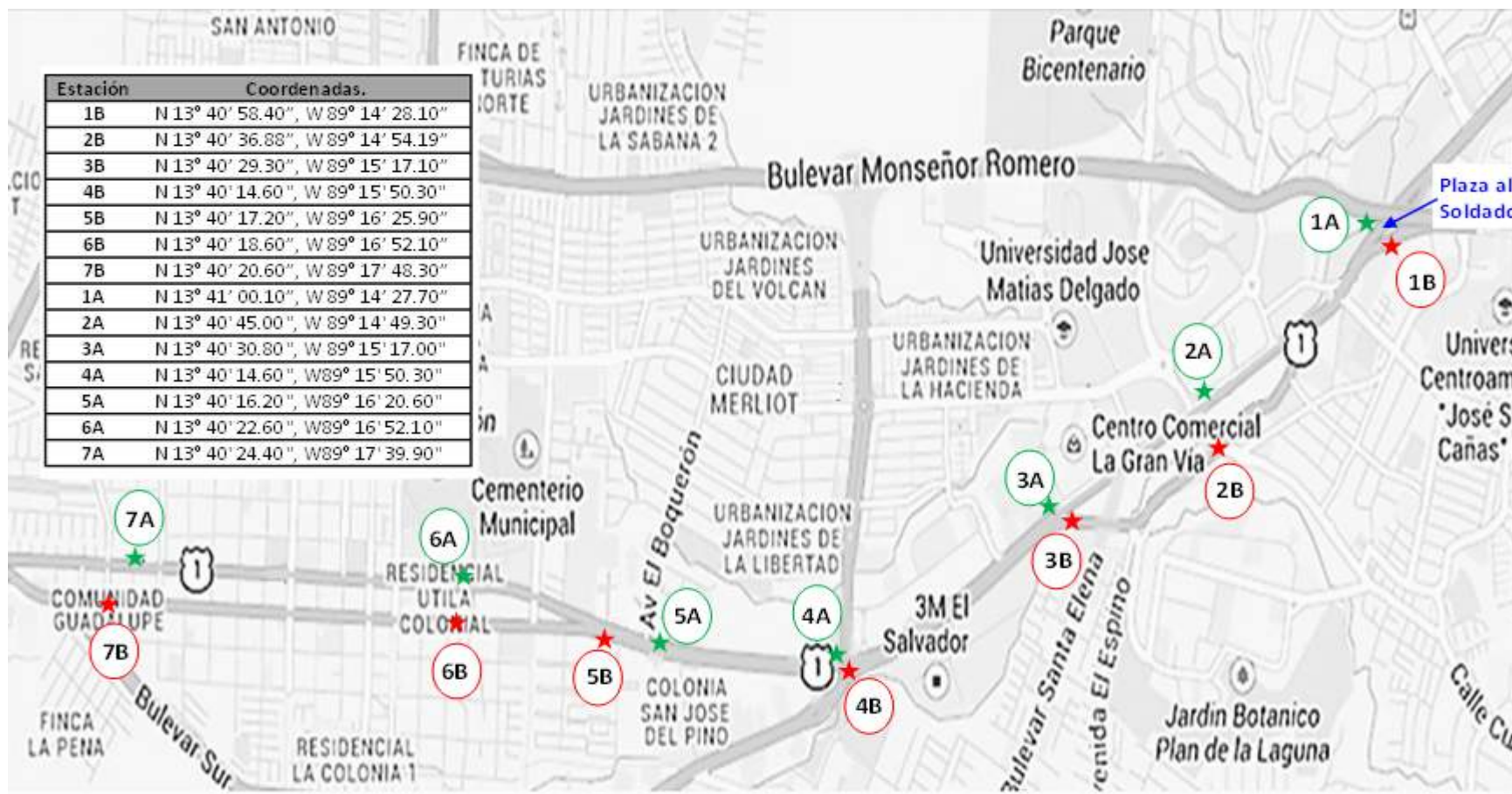


Instalación de sensores





Instalación de sensores





Instalación de sensores





Instalación de sensores





Instalación de sensores





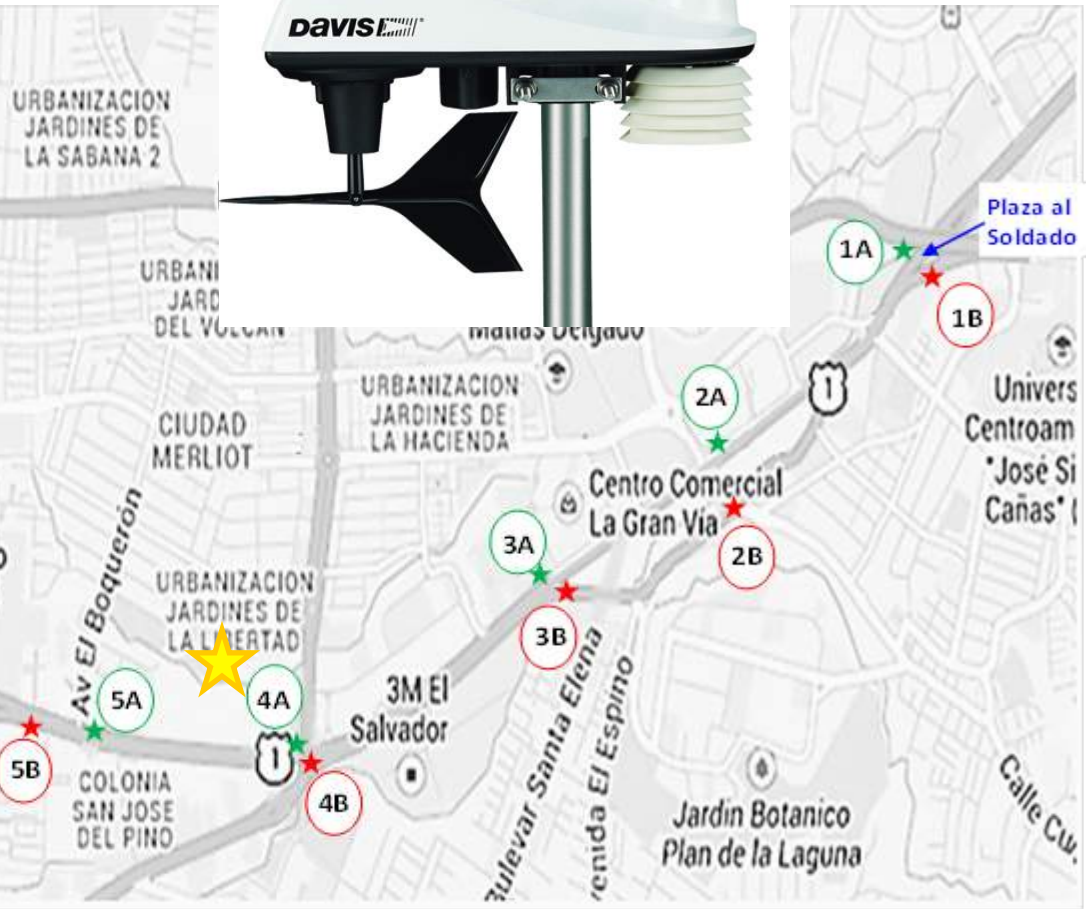
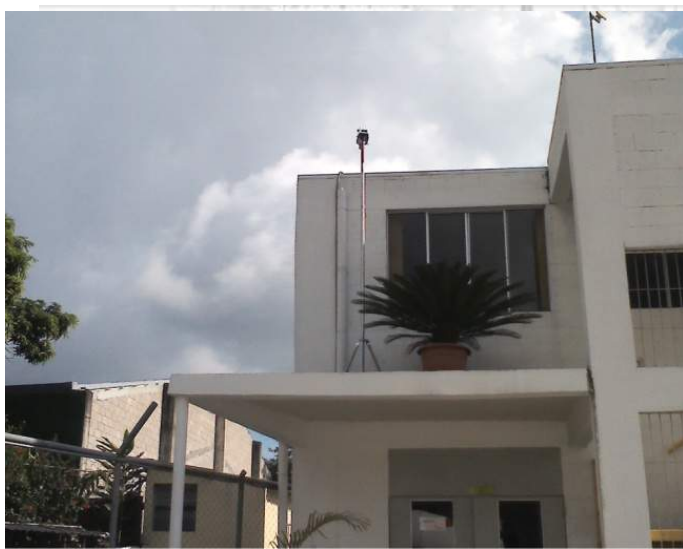
Instalación de sensores



Secuencia de colocación de concreto sobre sensores de medición.



Instalación de estación Meteorológica





Análisis de la Información

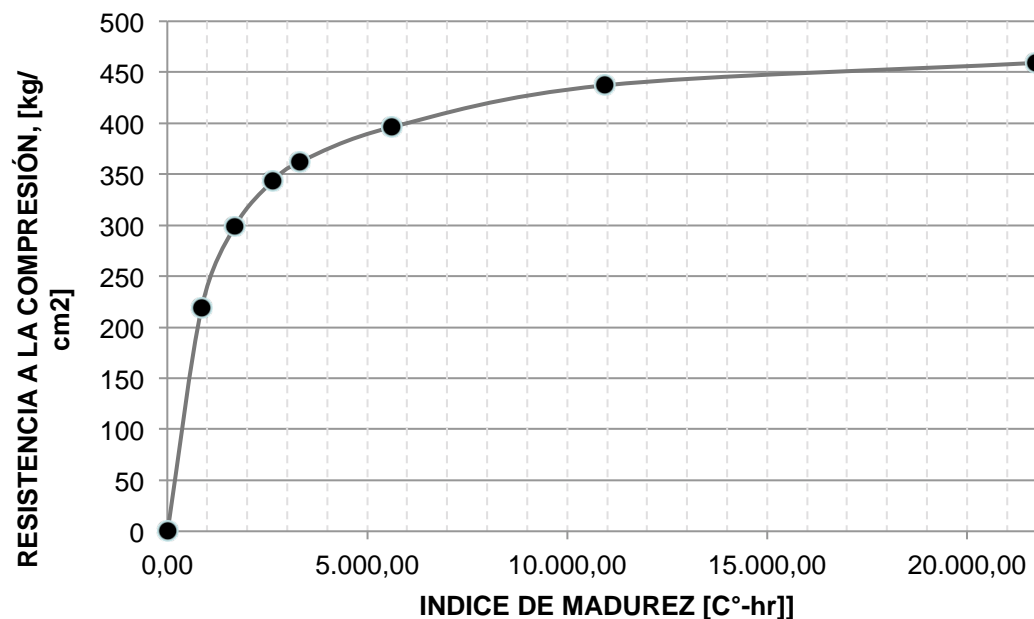




Elaboración de la Curva de Calibración, para Compresión

Resultado de Resistencia a la
Compresión (en cilindros).

Edad	IM [C°-hr]	f'c [kg/cm ²]
0	0	0
1	859	219
2	1,692	299
3	2,630	343
4	3,315	362
7	5,608	396
14	10,951	437
28	21,736	459

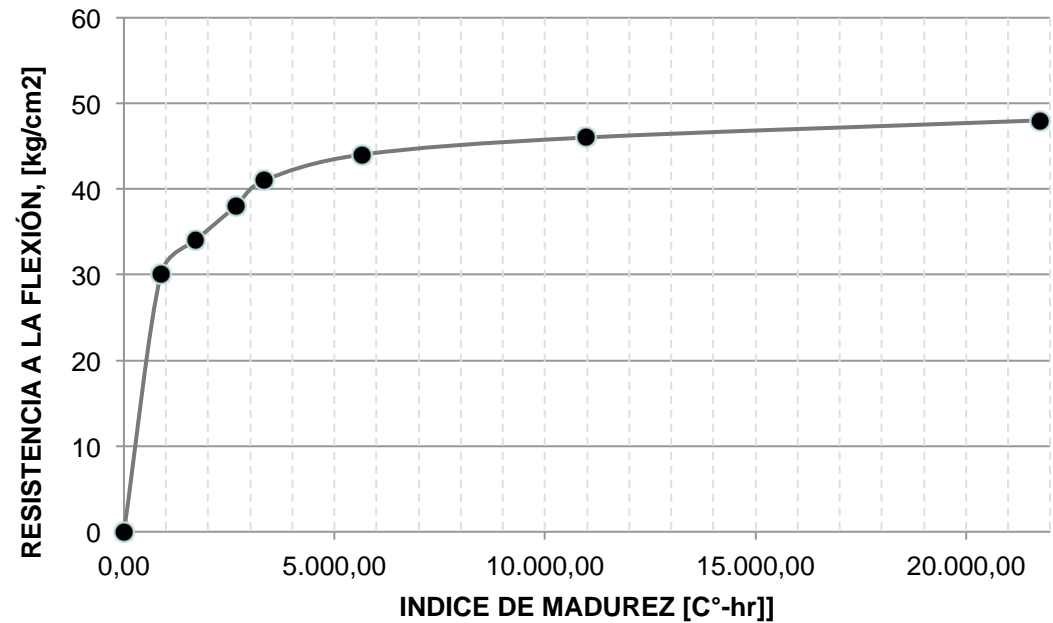




Elaboración de la Curva de Calibración para Flexión

Resultados de Resistencia a la Flexión (en vigas).

Edad	IM [C°-hr]	MR [kg/cm ²]
0	0	0
1	876	30
2	1,711	34
3	2,655	38
4	3,334	41
7	5,655	44
14	10,991	46
28	21,766	48



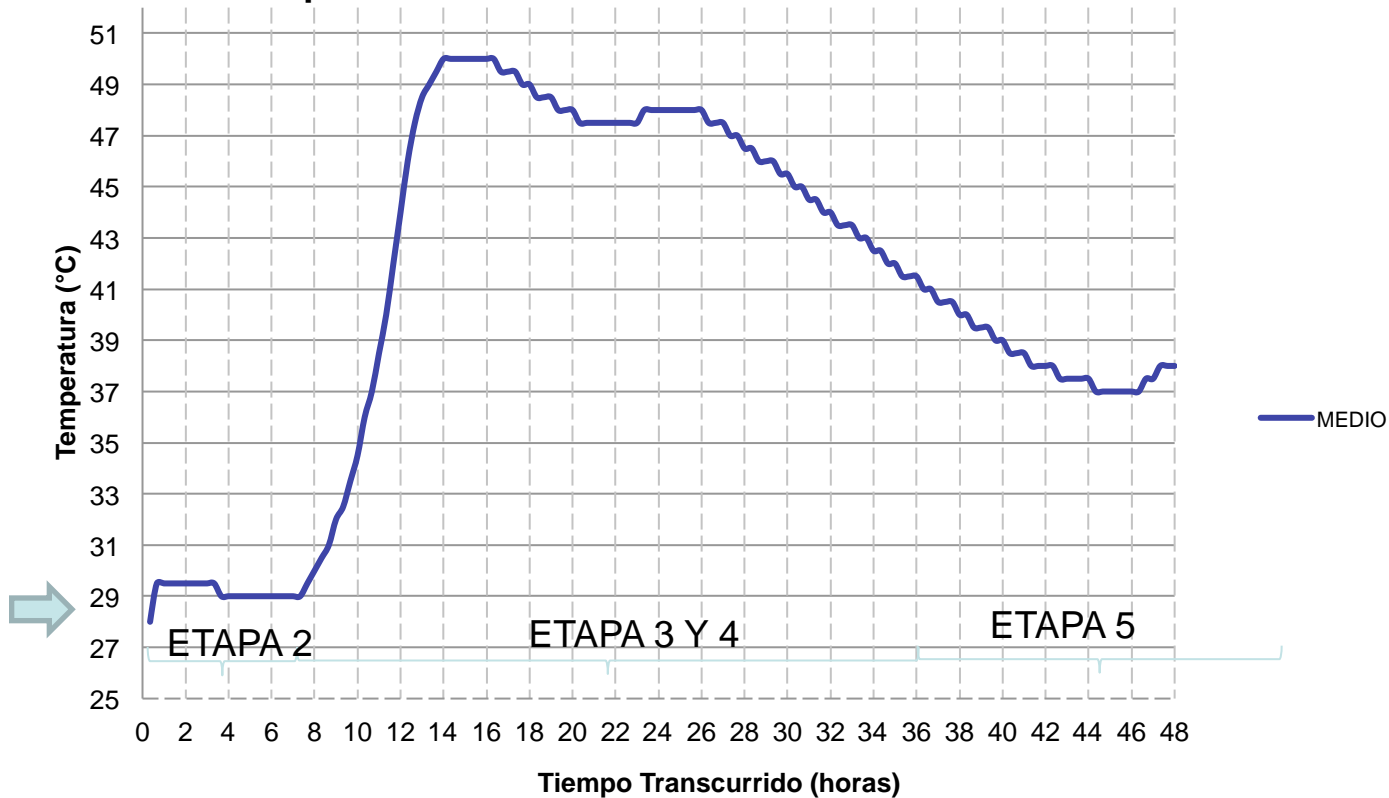
$$MR = \frac{573.4 \cdot \ln(IM) - 824.8}{98.06}$$





Estimación de las ventanas de corte

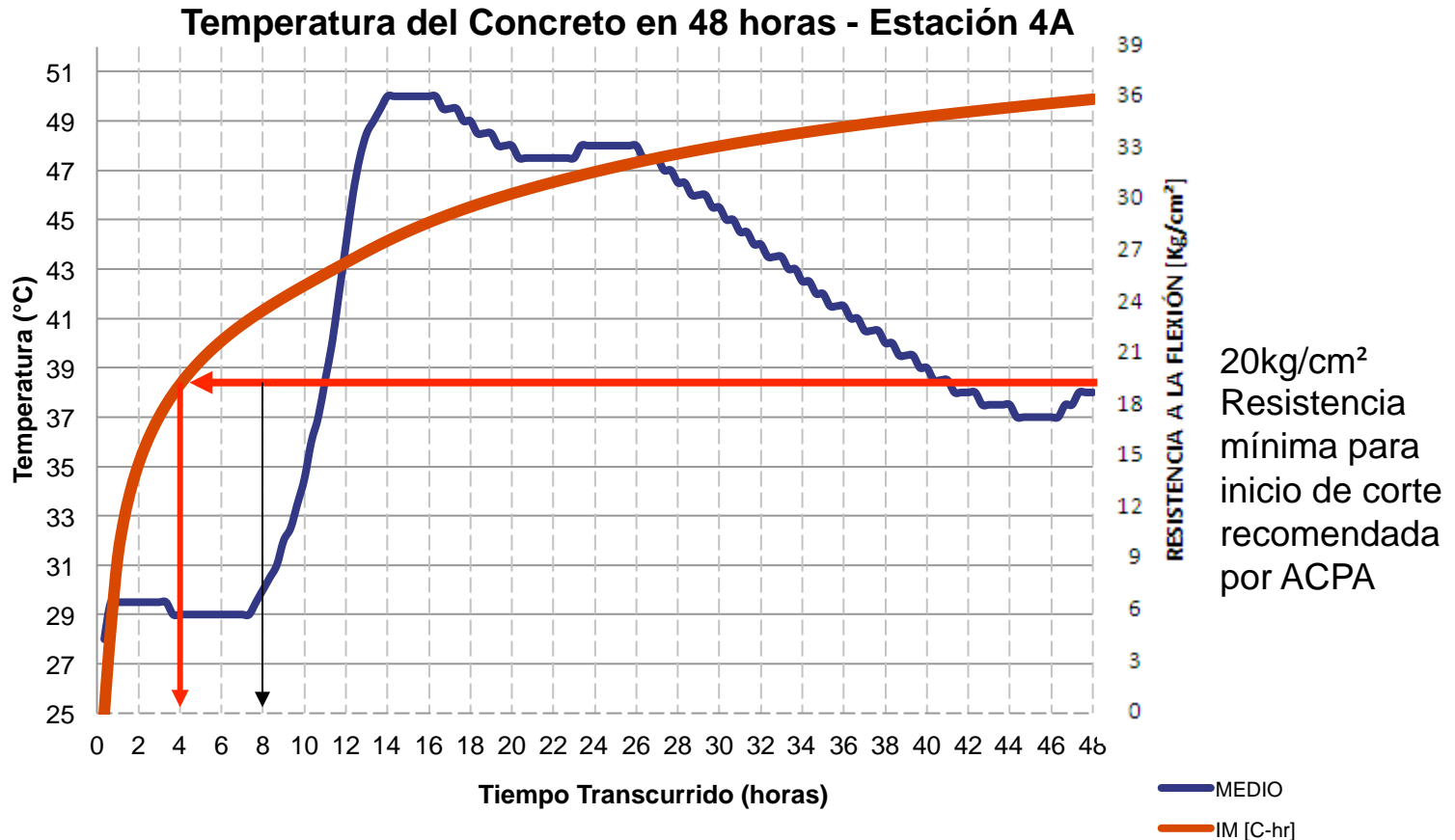
Temperatura del Concreto en 48 horas - Estación 4A



Historial de Temperatura de las primeras 24 h de la estación 4-A, La losa tiene un espesor de 25cm y se coló a las 3:20pm 18-nov-2013.



Estimación de las ventanas de corte (inicio de corte)



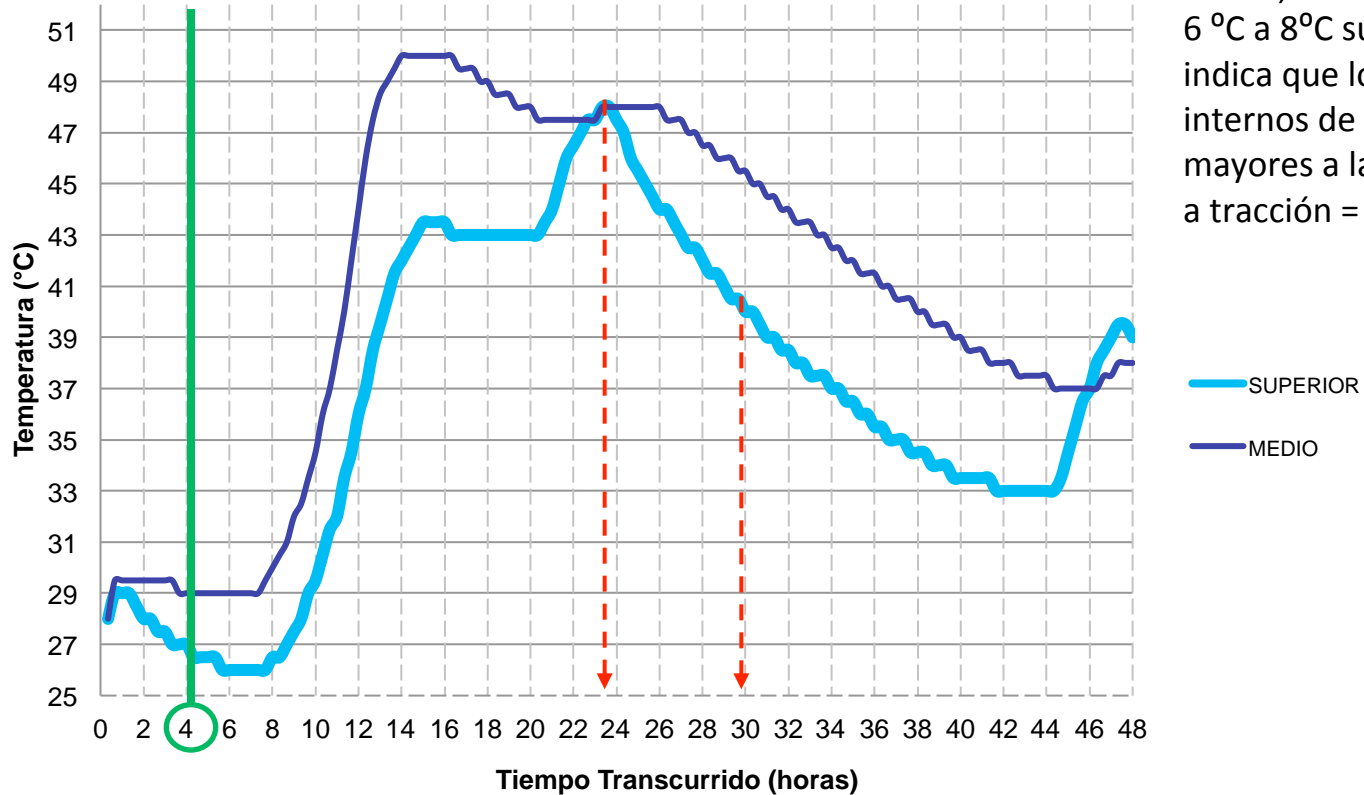
Historial de Temperatura de las primeras 24 h de la estación 4-A, La losa tiene un espesor de 25cm y se coló a las 3:20pm 18-nov-2013.





Estimación del final de la ventana de corte

Temperatura del Concreto en 48 horas - Estación 4A



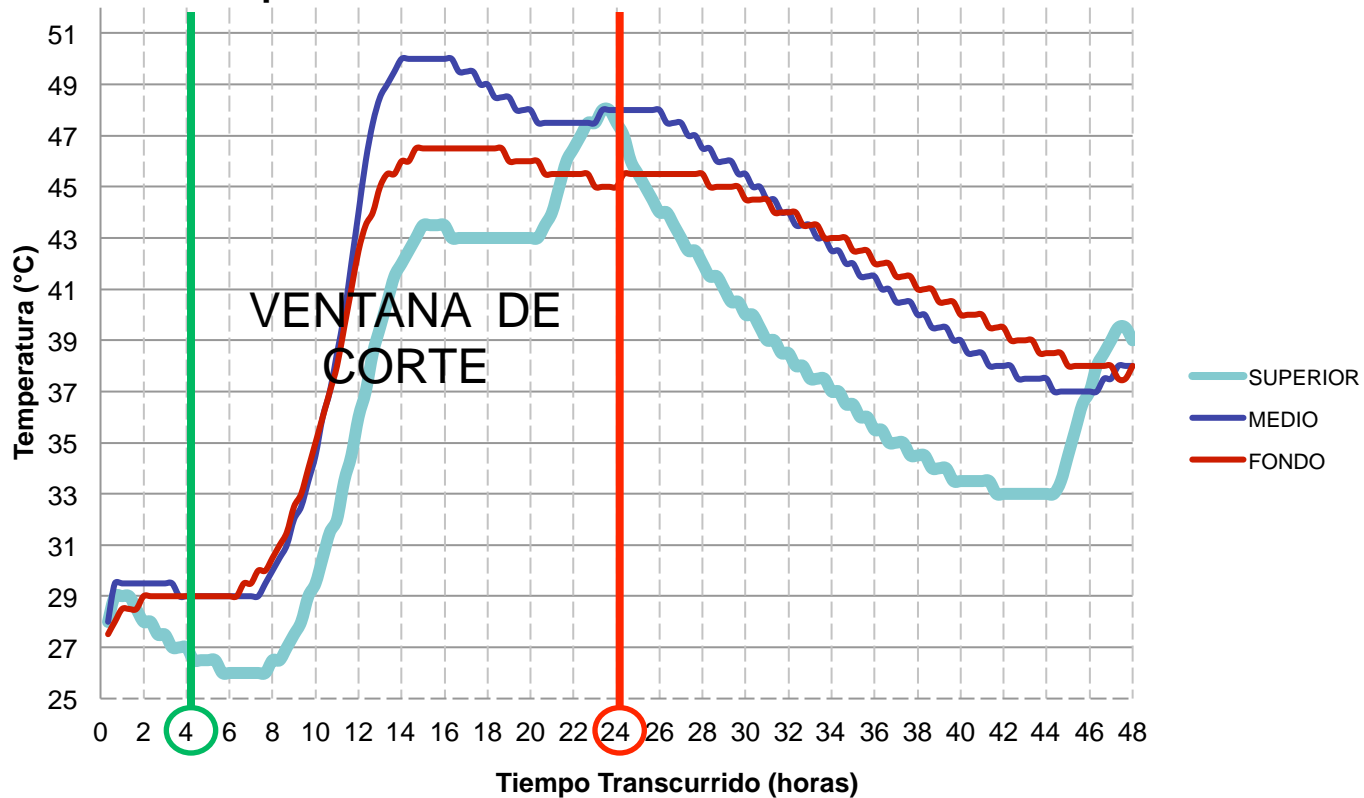
FHWA, disminución de 6 °C a 8°C superficial indica que los esfuerzos internos de tracción son mayores a la resistencia a tracción = fisuras

Historial de Temperatura de las primeras 24 h de la estación 4-A, La losa tiene un espesor de 25cm y se coló a las 3:20pm 18-nov-2013.



Estimación de las ventanas de corte

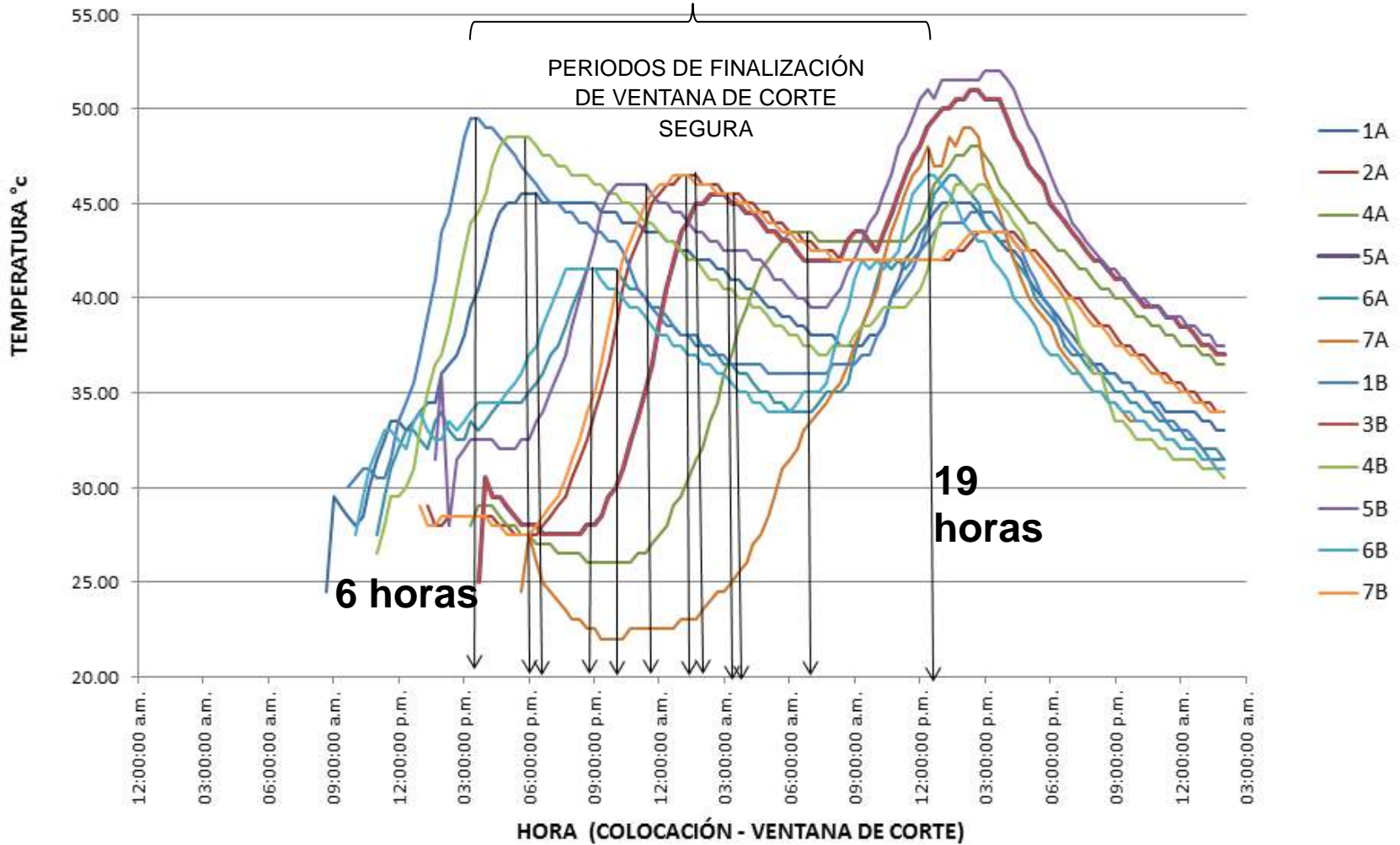
Temperatura del Concreto en 48 horas - Estación 4A



Historial de Temperatura de las primeras 24 h de la estación 4-A, La losa tiene un espesor de 25cm y se coló a las 3:20pm 18-nov-2013.



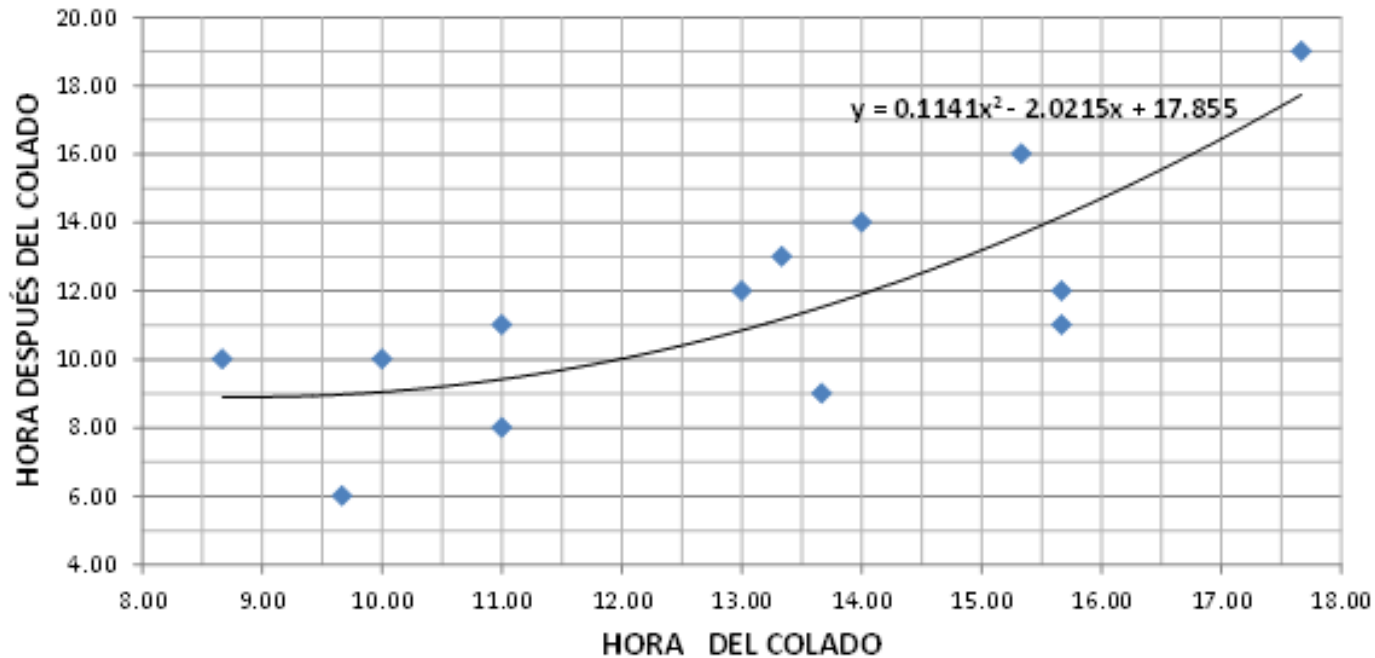
Historial de temperatura superficial para determinación de ventana de corte





Ventana Final de Corte de Juntas

Hora de Corte Final vs Hora de Colado



$$\Delta hr = 0.1141h_i^2 - 2.0215h_i + 17.85$$

Δhr :

Número de horas después de colado para finalizar corte de juntas [hr]

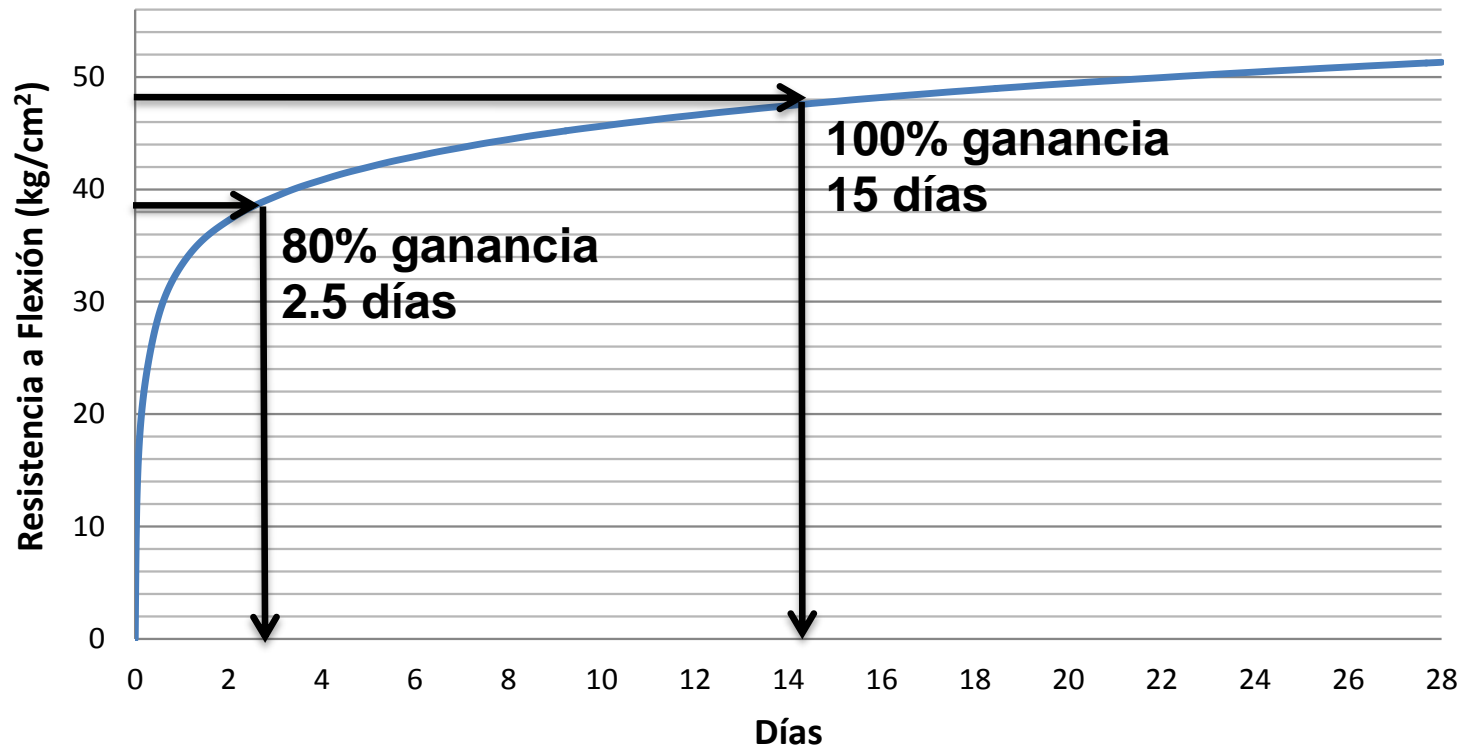
h_i :

Hora de colado, en formato 24 horas, ejemplo: $h_i=3:30pm$ usar $h_i=15.5$ h.



Resistencia Temprana

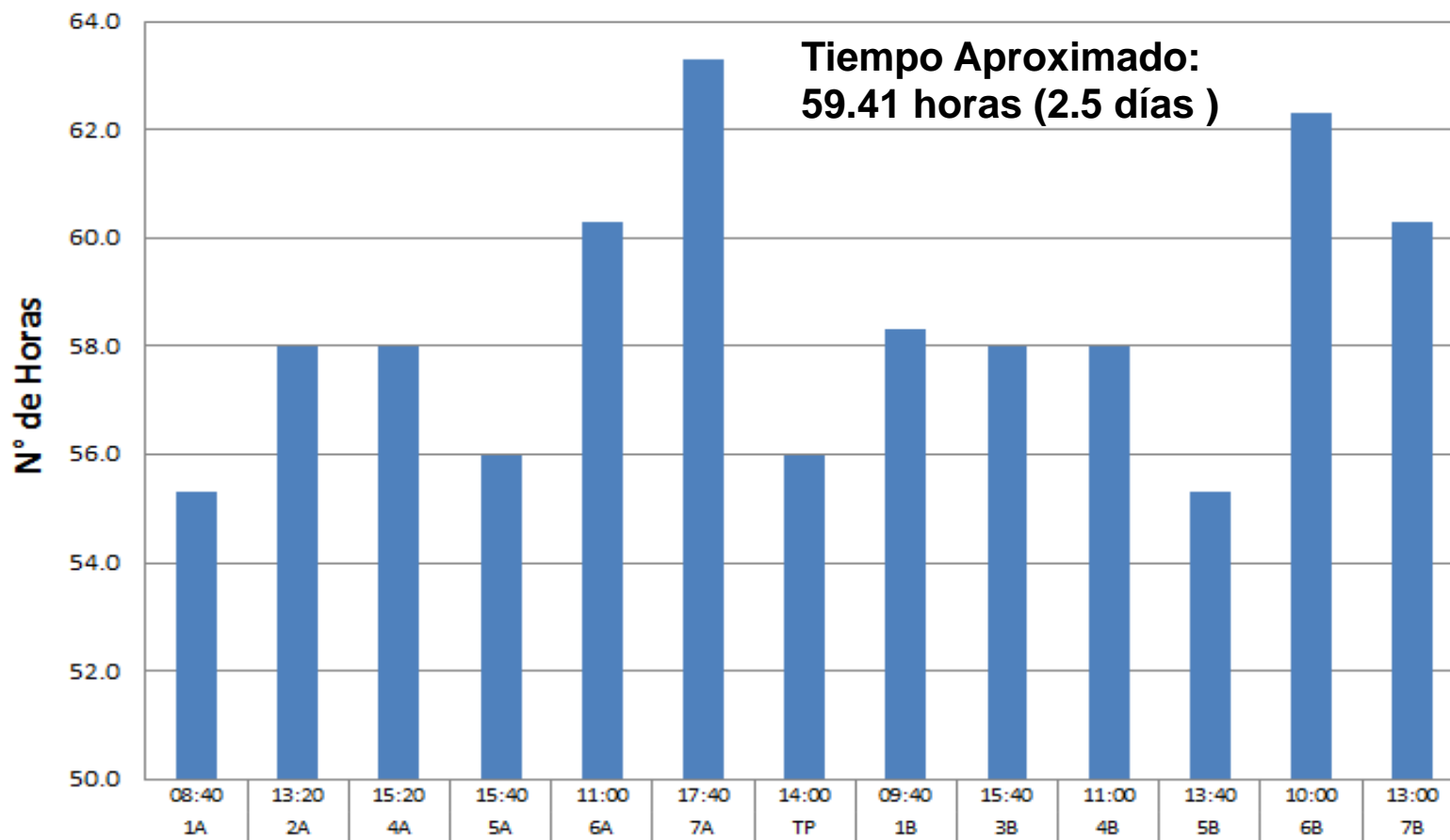
Resistencia a Flexión Promedio a 28 días - Método de Madurez del Concreto





*Ganancia de Resistencia a Flexión a Edades Tempranas
(número de horas para alcanzar el 80% de la resistencia a flexión de diseño)*

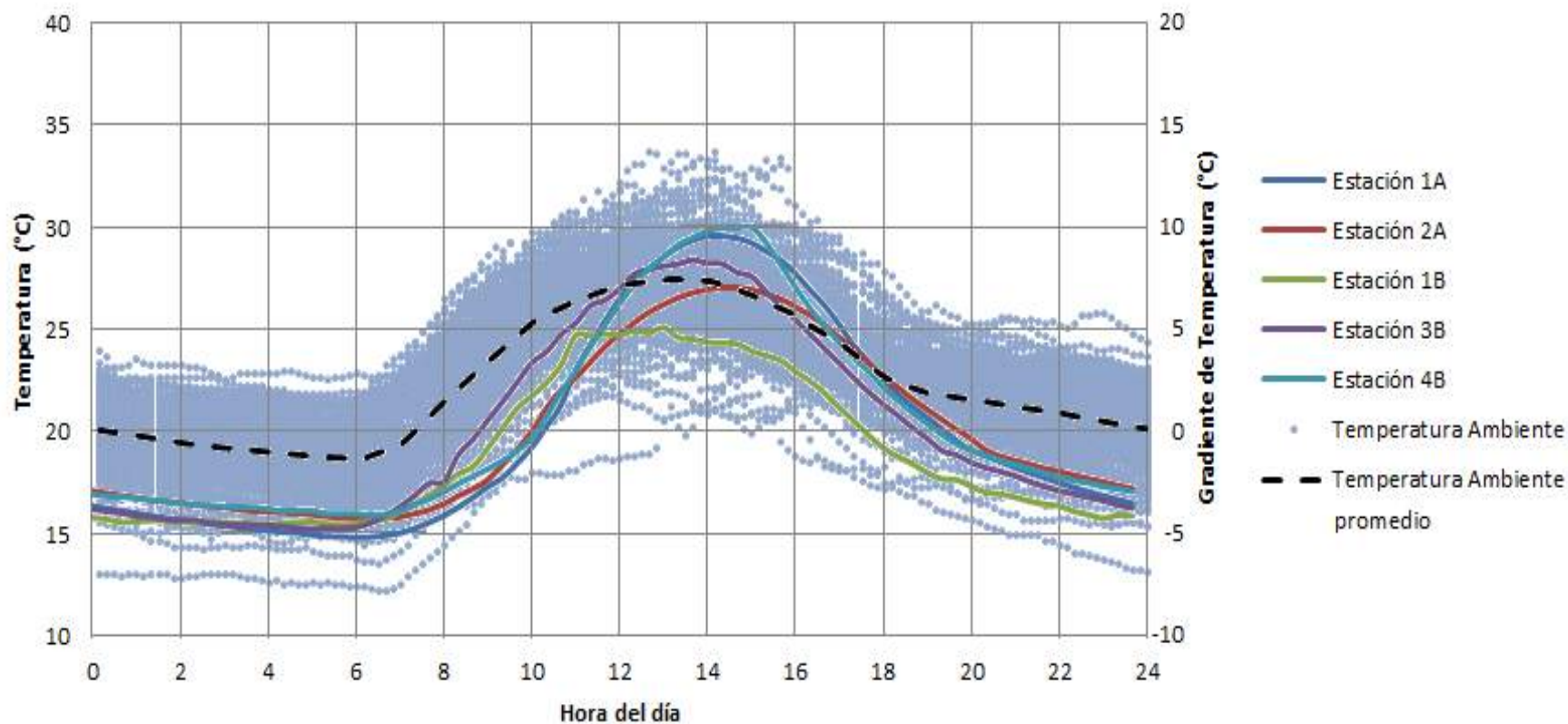
Tiempo Promedio de Apertura al Tráfico





Gradiente de Temperatura por Espesor

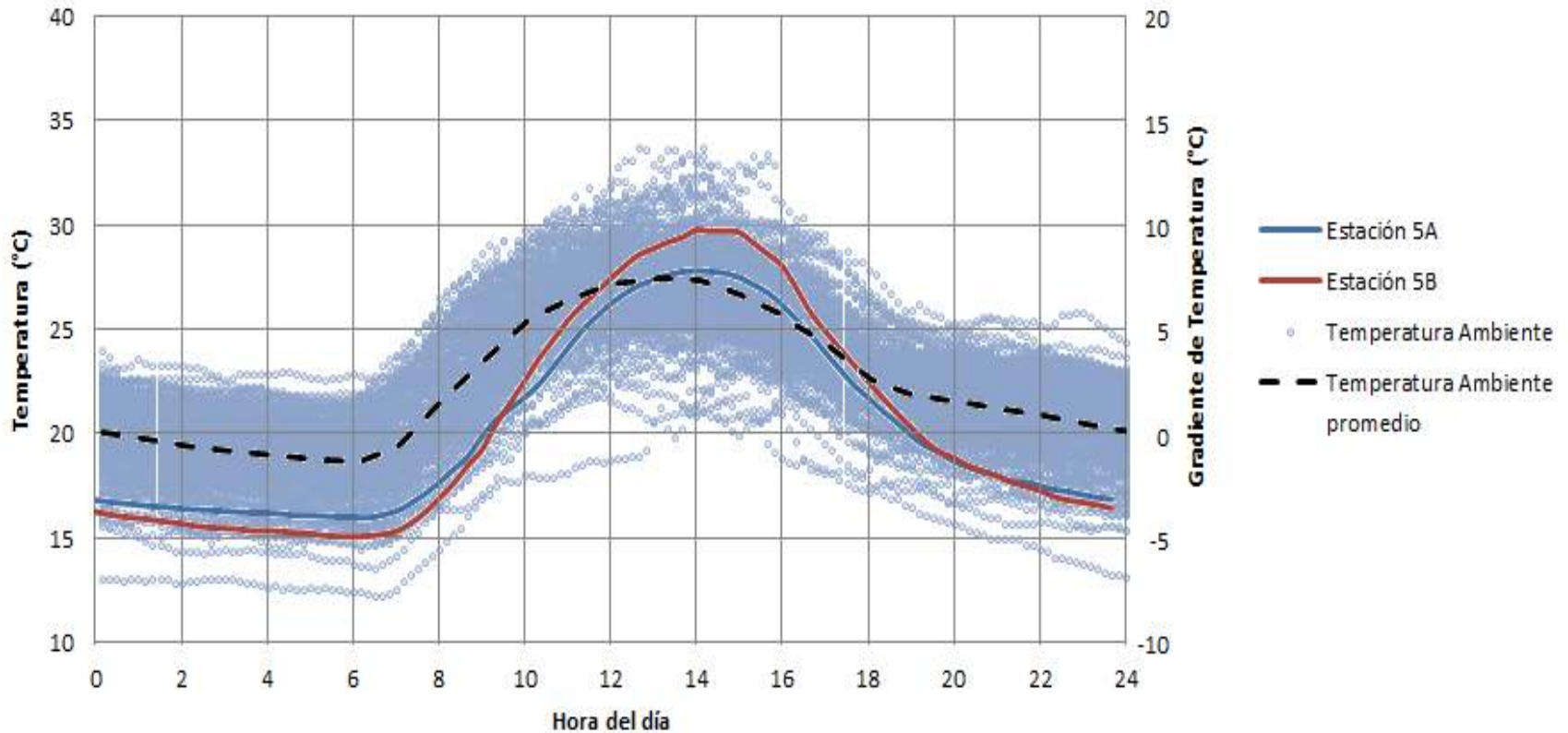
Gradiente de Temperatura promedio - Espesor de losa: 25 cm





Gradiente de Temperatura por Espesor

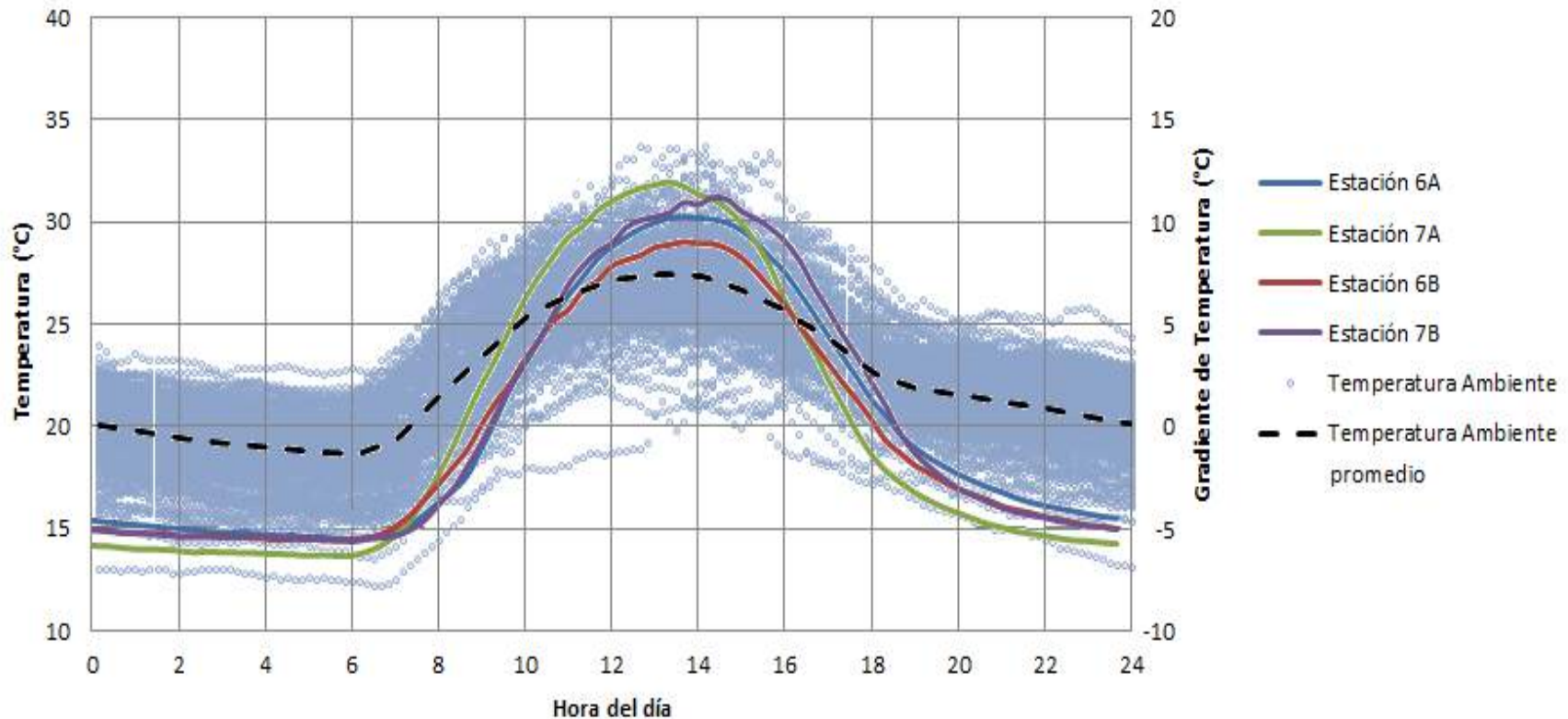
Gradiente de Temperatura promedio - Espesor de losa: 23 cm





Gradiente de Temperatura por Espesor

Gradiente de Temperatura promedio - Espesor de losa: 20 cm





Gradientes Máximos Promedio por Estaciones.

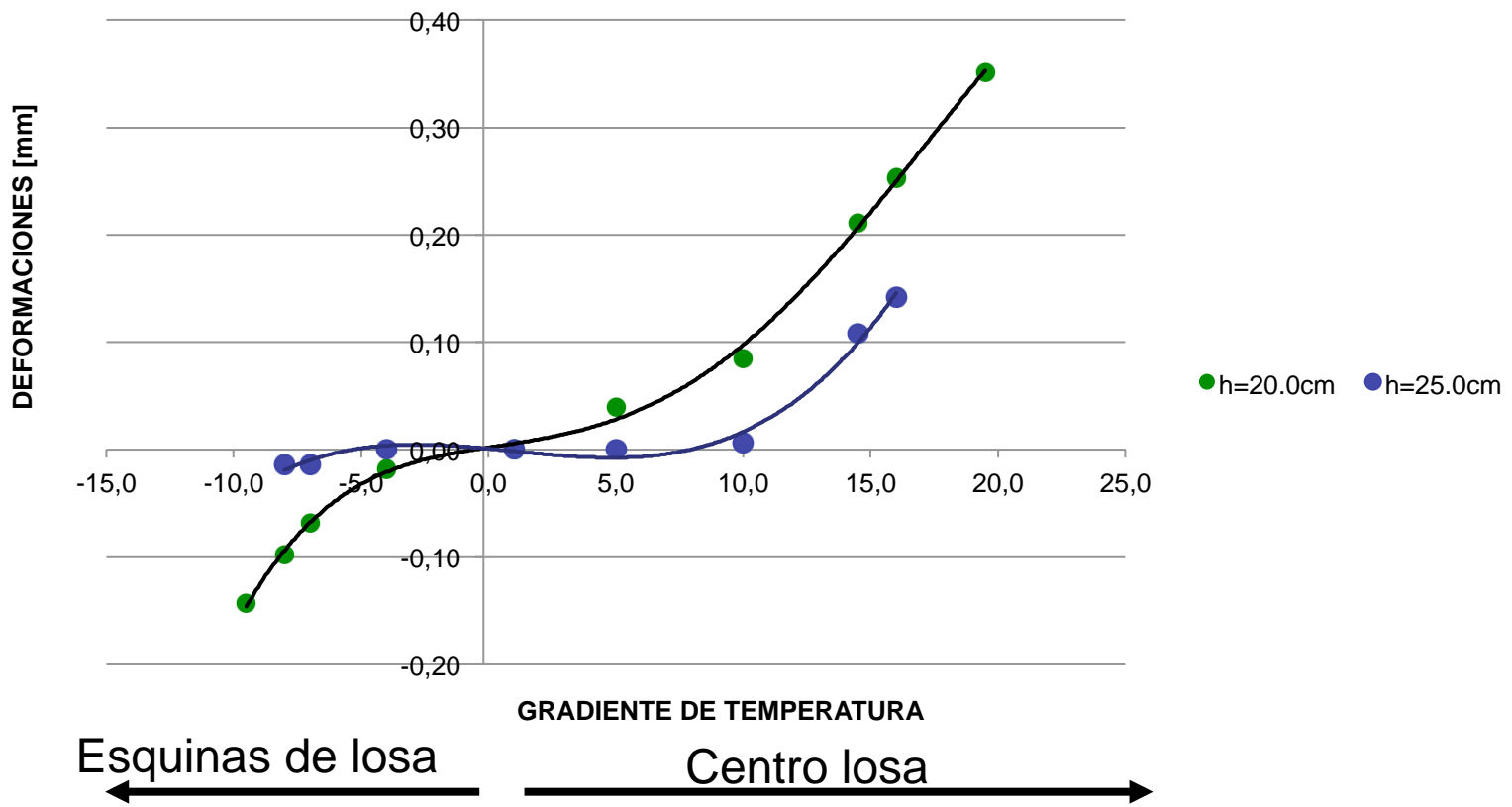
Estación	1A	2A	1B	3B	4B	5A	5B	6A	6B	7A	7B
Espesor de losa	25				23		20				
Prom. $\Delta t +$	9.52	7	5.04	8.34	9.95	7.76	9.71	10.23	11.9	8.98	11.13
Prom. $\Delta t -$	-5.25	-4.29	-4.62	-4.81	-4.15	-4.09	-4.99	-5.54	-6.38	-5.64	-5.68

Espesor de losa	25cm	23cm	20cm
Max registrado. $\Delta t +$	16.0	14.5	19.5
Mín registrado $\Delta t -$	-8.0	-7.5	-9.5



Deformaciones en las losas (calculados en EverFE).

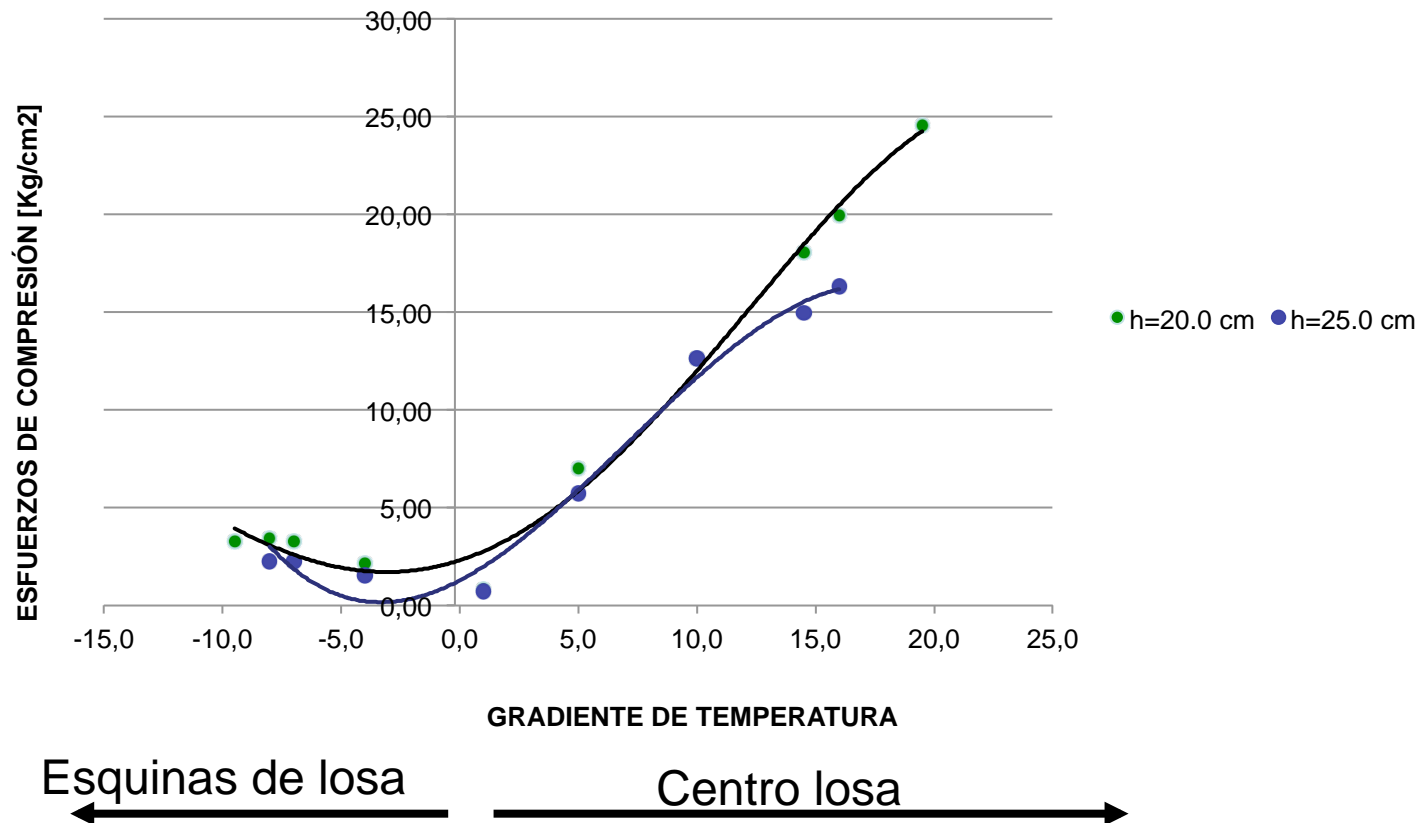
Alabeo de esquina y al centro (en losas de proyecto)





Esfuerzos de Compresión en losas (calculados en EverFE)..

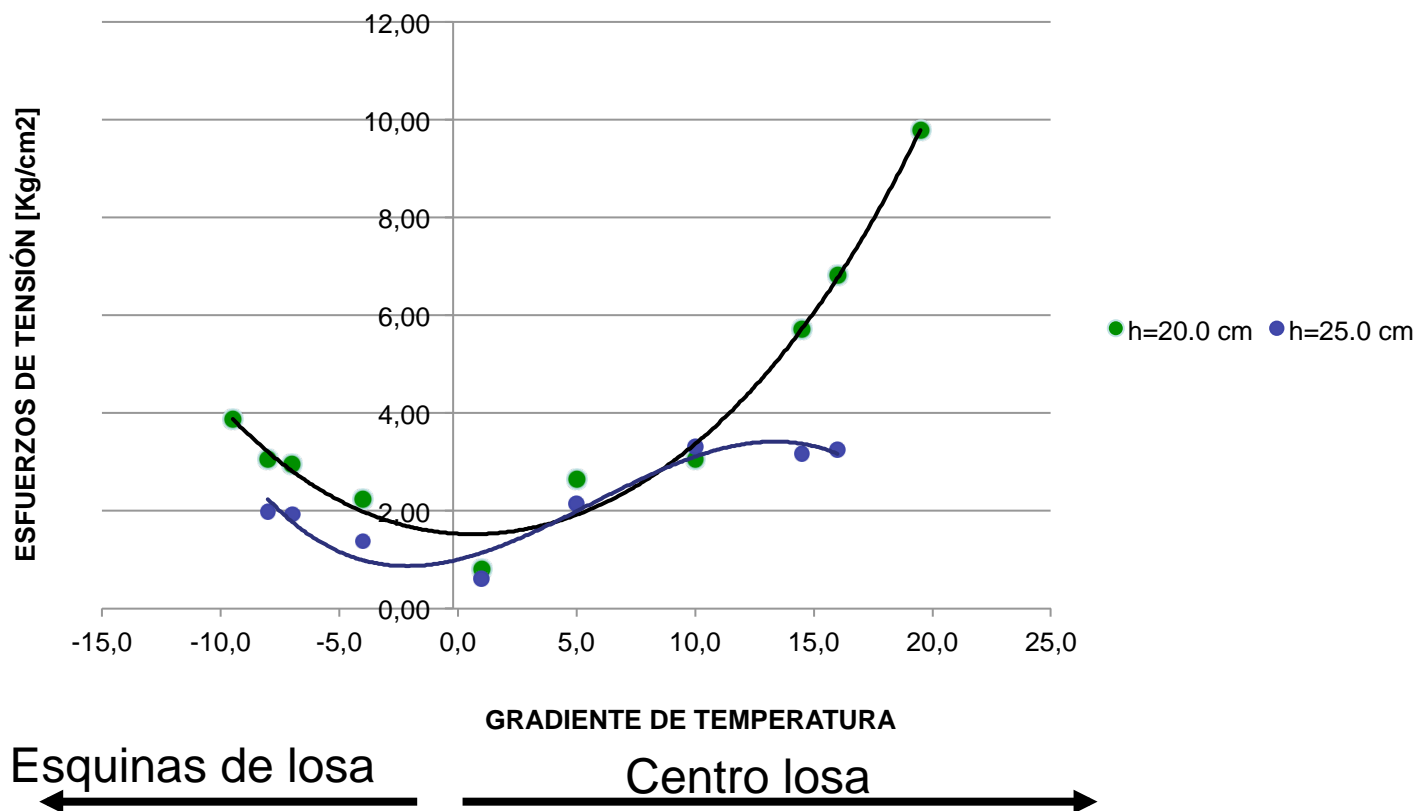
Esfuerzos de Compresión en losas de proyecto





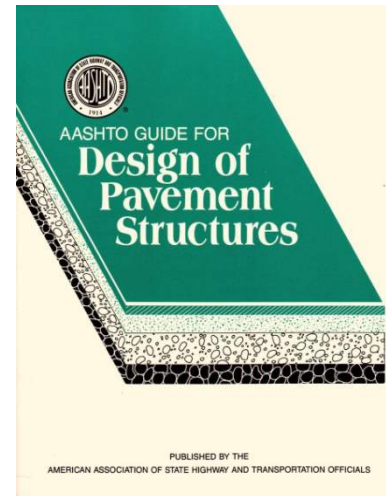
Esfuerzos de Tensión en losas (Calculado en EverFE).

Esfuerzos de Tensión en losas de proyecto





Se espera Influir nacionalmente, en el Diseño y Evaluación de Pavimentos





INFLUENCIA EN MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y DE DISEÑO

Comportamiento de Pavimentos de
Concreto Simple, enfocado en:

- *Escalonamiento de Juntas*
- *Agrietamiento Transversal (fatiga)*

- *Deterioro de Juntas Transversales*
- *Rugosidad (IRI)*



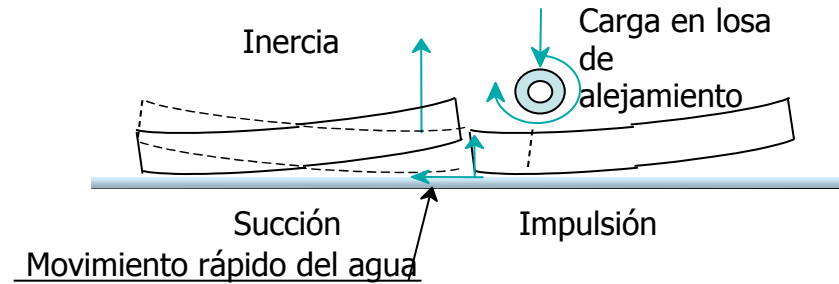
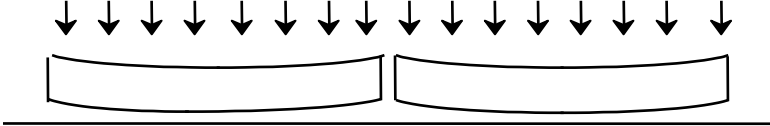
Escalonamiento

- Factores que inciden:
 - Tráfico (ESALs)
 - Dimensiones Losas
 - Tipo de Transferencia de Carga
 - Diámetro Dovelas
 - Tipo de Sub-rasante
 - Tipo de Base
 - **Condiciones climáticas**
 - Drenaje

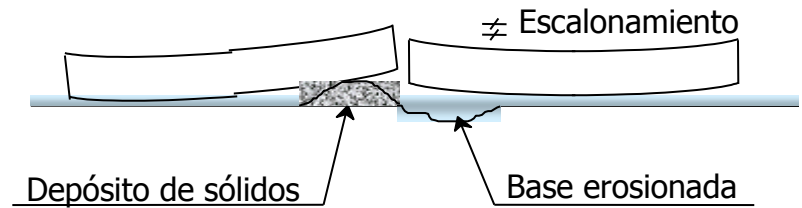
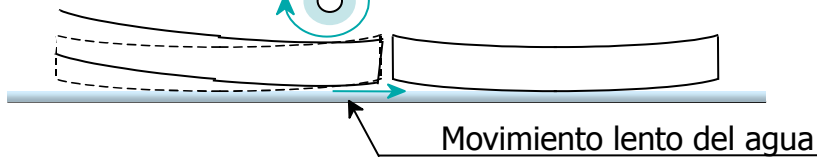


Escalonamiento

Temperatura + Humedad + Alabeo de
Construcción



Carga en losa
de
aproximación





Escalonamiento

Modelo de deterioro HDM4 (Pav. Sin dovelas)

$$FAULT = K_{jpn_f} * NE4^{0.25} * \left[\begin{array}{l} 0.2347 - 0.1516 * Cd - 0.00025 * (SLABTHK^2 / JTSPACE^{0.25}) \\ - (0.0115 * BASE + 7.78 * 10^{-8} * FI^{1.5} * PRECIP^{0.25}) \\ - (0.002478 * DAYS90^{0.5} - 0.0415 * WIDENED) \end{array} \right]$$

FAULT	average transverse joint faulting (inches)
NE4	cumulative ESALs since pavement construction (millions 18-kip axles per lane)
Cd	drainage coefficient, modified AASHTO
SLABTHK	slab thickness (inches)
JTSPACE	average transverse joint spacing (ft)
BASE	base type: 0 if not stabilised 1 if stabilised
FI	freezing Index (°F-days)
PRECIP	annual average precipitation (inches)
DAYS90	number of days with mean temperature greater than 90°F
WIDENED	widened lane: 0 if not widened 1 if widened
K_{jpn_f}	calibration factor (default = 1.0)



Escalonamiento

Modelo de deterioro MPDEG

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} * (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 * DE_i$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_{i-1} + C_7 * DE_i * \text{Log}(1 + C_5 * 5.0^{EROD})^{C_6}$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} * \delta_{\text{curling}} * \left[\text{Log}(1 + C_5 * 5.0^{EROD}) * \text{Log}\left(\frac{P_{200} * \text{WetDays}}{P_s}\right) \right]^{C_6}$$

$Fault_m$ = mean joint faulting at the end of semester m , in.

$\Delta Fault_i$ = incremental change (semiannual) in mean transverse joint faulting during semester i , in.

$FAULTMAX_i$ = maximum mean transverse joint faulting for semester i , in.

$FAULTMAX_0$ = initial maximum mean transverse joint faulting, in.

$EROD$ = base/subbase erodibility factor.

DE_i = differential deformation energy accumulated during semester i .

$EROD$ = base/subbase erodibility factor

δ_{curling} = maximum mean monthly slab corner upward deflection PCC due to temperature curling and moisture warping.

P_s = overburden on subgrade, lb.

P_{200} = percent subgrade material passing #200 sieve.

$WetDays$ = average annual number of wet days (greater than 0.1 in rainfall).

C_1 through C_6 and C_{12} , C_{34} are calibration constants:

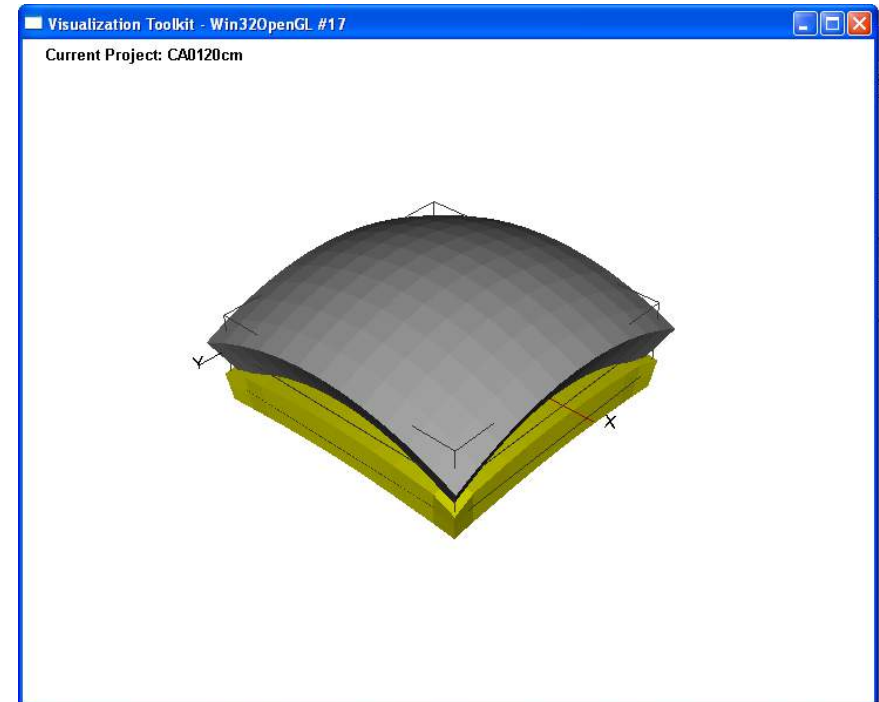
$$C_{12} = C_1 + C_2 * FR^{0.25}$$



Agrietamiento transversal y longitudinal

- Factores incidentes:

- Tránsito (ESALs)
- Espesor y Longitud de Losa
- Módulo de Ruptura
- **Alabeo Térmico**
- Modulo de Reacción Subrasante-Subbase
- Tipo de Base





Agrietamiento transversal (Modelo HDM4)

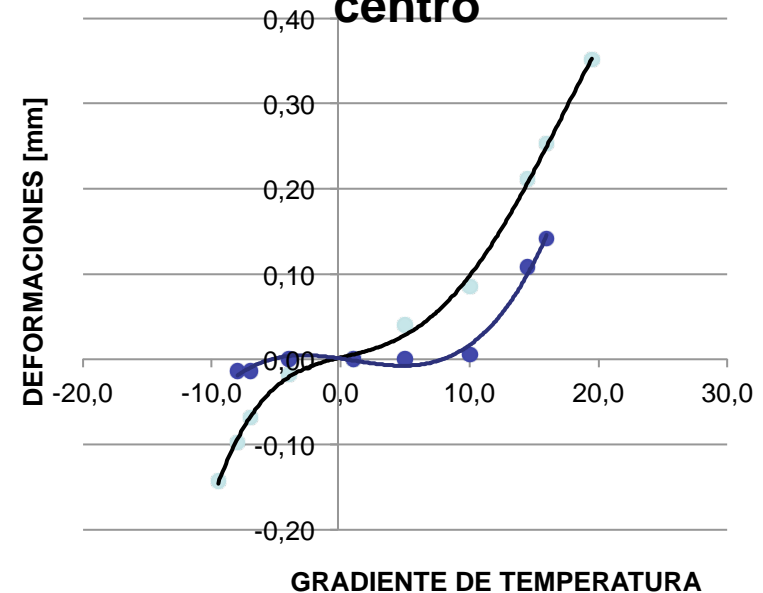
$$PCRACK = K_j p_c * \frac{100}{1 + 1.41 * FD^{-1.66}}$$

El agrietamiento transversal es
función del Daño Acumulado por
Fatiga (FD)

$$FD = \sum_{tg=1}^G \frac{n_{tg}}{N_{tg}} \quad \text{Ley de Miner}$$

FD	Daño acumulado por fatiga
tg	Gradiente de temperatura
n_{tg}	numero de ejes equivalentes de 80 kN que pasan (ESALs/pista)
N_{tg}	numero máximo de ejes equivalentes de 80 kN que pasan antes de que ocurra la falla (ESALs/pista)

Alabeo de esquina y al centro





Agrietamiento transversal (Modelo HDM4)

Temperature difference (ΔT) in °F	Frequency (FREQ)			
	Dry with freezing	Dry without freezing	Wet with freezing	Wet without freezing
-8	0.086660	0.073237	0.090494	0.086209
-6	0.092003	0.067994	0.094611	0.072691
-4	0.076447	0.057834	0.081522	0.052129
-2	0.058163	0.039585	0.067007	0.039496
0	0.057014	0.031803	0.052426	0.033466
2	0.034749	0.029573	0.036817	0.030790
4	0.036162	0.024472	0.039393	0.031347
6	0.037122	0.019472	0.033196	0.021113
8	0.031273	0.021223	0.033254	0.024858
10	0.036200	0.028565	0.032462	0.032160
12	0.021978	0.027069	0.026291	0.025427
14	0.037272	0.029359	0.034706	0.038571
16	0.026134	0.036464	0.029423	0.037274
18	0.032394	0.030194	0.034758	0.038976
20	0.033724	0.037439	0.032034	0.038803
22	0.023131	0.032684	0.017874	0.037385
24	0.009683	0.036172	0.006422	0.027180
26	0.000047	0.024021	0.000078	0.011631
28	0.000000	0.013717	0.000000	0.001188

$$FD = \sum_{tg=1}^G \frac{n_{tg}}{N_{tg}}$$

$$n_{tg} = \frac{NE4}{LCR_{tg}} * FREQ_{tg}$$

n_{tg} número de ejes equivalentes de 80 kN que pasan (ESALs/pista)

NE4 número acumulado de ejes equivalentes de 80kN desde la construcción del pavimento.

$FREQ_{tg}$ frecuencia de cada gradiente de temperatura.

LCR_{tg} relación de cobertura lateral de tráfico para el gradiente de temperatura



Cálculo de esfuerzos (Modelo HDM4)

$$FD = \sum_{tg=1}^G \frac{n_{tg}}{N_{tg}}$$

$$\text{Log}_{10}(N_{tg}) = 2.13 * SR_{tg}^{-1.2}$$

N_{tg}
 SR_{tg} Numero máximo de ejes equivalentes de 80 kN que pasan antes de que ocurra la falla (ESALs/pista)
Relación entre el esfuerzo combinado en la losa y el módulo de ruptura del concreto, **para el gradiente de temperatura tg**

$$SR_{tg} = \frac{\text{SIGMA}_{tg}}{MR}$$

$$\text{SIGMA}_{tg} = f_{SB} * (\sigma_{load(tg)} + R_{tg} * \sigma_{curl(tg)})$$

SR_{tg} Relación entre el esfuerzo combinado en la losa y el módulo de ruptura del concreto, para el gradiente de temperatura tg

SIGMA_{tg} Esfuerzo combinado en el borde de la losa debido a la carga y a la temperatura

MR Módulo de ruptura del concreto (psi)

f_{SB} Factor de ajuste para bases estabilizadas.

$\sigma_{load(tg)}$ Esfuerzo en la losa debido a las cargas por tránsito (psi)

R_{tg} Coeficiente de regresión

$\sigma_{curl(tg)}$ Esfuerzo en la losa debido a los cambios de temperatura (psi)



Agrietamiento transversal (Modelo MPDEG)

$$CRK = \frac{1}{1 + C1 \cdot FD^{-C2}}$$

**El agrietamiento es función
del Daño Acumulado por
Fatiga (FD)**

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k,l}}{N_{i,j,k,l}}$$

FD = accumulated fatigue damage over the design period for current crack spacing occurring at the critical fatigue location in the slab.

n_{ijkl} = number of applied axle load applications of the j th magnitude evaluated during the i th traffic increment, the k th temperature difference and the l th traffic path.

N_{ijkl} = number of allowable axle load applications of the j th magnitude evaluated during the i th traffic increment, the k th temperature difference and the l th traffic path.

i = axle type

j = load level (incremental load for each axle type)

k = temperature difference

l = traffic path

$$\log(N_{i,j,k,l}) = a \cdot \left(\frac{\sigma_{i,j,k,l}}{MOR} \right)^b$$

$\sigma_{i,j,k,l}$: Applied stress, condition i,j,k,l

MOR: Concrete modulus of rupture

a, b : calibration constant;



Deterioro de juntas transversales

Factores incidentes:

Edad

Tipo de Sello

Condiciones climáticas

extremas

Espaciamiento entre

Juntas

Existencia de Barras

Protección contra

corrosión





Deterioro de juntas transversales Modelo HDM4

$$SPALL = K_{jp_s} * AGE^2 * JTSPACE * 10^{-6} *$$

$$\left[\begin{aligned} &549.9 - 895.7 * (LIQSEAL + PREFSEAL) \\ &+ 1.11 * DAYS90^3 * 10^{-3} + 375 * DWLCOR \\ &+ (29.01 - 27.6 * LIQSEAL) * FI \\ &- (28.59 * PREFSEAL + 27.09 * SILSEAL) * FI \end{aligned} \right]$$

SPALL	percentage of spalled transverse joints	DWLCOR	dowel corrosion protection:
AGE	age since pavement construction (years)		0 if no dowels exist, or are protected from corrosion
JTSPACE	average transverse joint spacing (ft)		1 if dowels are not protected from corrosion
LIQSEAL	presence of liquid sealant in joint:	FI	freezing Index (°F-days)
	0 if not present	SILSEAL	presence of silicone sealant in joint:
	1 if present		0 if not present
PREFSEAL	presence of pre-formed sealant in joint:		1 if present
	0 if not present	K _{jp_s}	calibration factor (default = 1.0)
	1 if present		
DAYS90	number of days with temperature greater than 90°F		



Deterioro de juntas transversales

Modelo MPDEG

$$cw = \text{Max}(L \cdot \beta \cdot (\alpha \cdot (T_{\text{constr.}} - T_{\text{media}}) + \varepsilon_{\text{horm}}))$$

Where:

cw : Joint opening

L : Joint Spacing

β : Pavement-Base Friction coefficient

α : Coefficient of thermal expansion

T_{constr} : Concrete Setting Temperature

T_{promedio} : Mean Temperature

$\varepsilon_{\text{horm}}$: 365-days concrete shrinkage

Los modelos mecánicos empíricos, modelan comportamientos más complejos para predecir su comportamiento y funcionalidad.



Modelos de deterioro de IRI Modelo HDM4

$$RI_t = K_{jpr} * (RI_0 + 2.6098 * TFAULT + 1.8407 * SPALL + 2.2802 * 10^{-6} * TCRACKS^3)$$

RI_t	roughness at time t (in/mile)
RI_0	initial roughness at the time of pavement construction (in/mile), (default = 98.9)
TFAULT	total transverse joint faulting per mile (in/mile)
SPALL	percentage of spalled joints
TCRACKS	total number of cracked slabs per mile
K_{jpr}	calibration factor (default = 1.0)



Modelos de deterioro de IRI Modelo MPDEG

$$IRI = IRI_I + C1 CRK + C2 SPALL + C3 TFAULT + C4 SF \quad \text{LTPP (FHWA 2009)}$$

Where:

IRI	=	predicted IRI, in/mi.
IRI_I	=	initial smoothness measured as IRI, in/mi.
CRK	=	percent slabs with transverse cracks (all severities).
$SPALL$	=	percentage of joints with spalling (medium and high severities).
$TFAULT$	=	total joint faulting cumulated per mi, in.
SF	=	site factor



Project1 Project1:Climate

Summary Hourly climate data

ClimateStation
Longitude (decimal) -88.17
Latitude (decimal) 40.02
Elevation (m) 229
Depth of water table Annual(10)
Climate station CHAMPAIGN/URBA

Identifiers

PropertyGridView

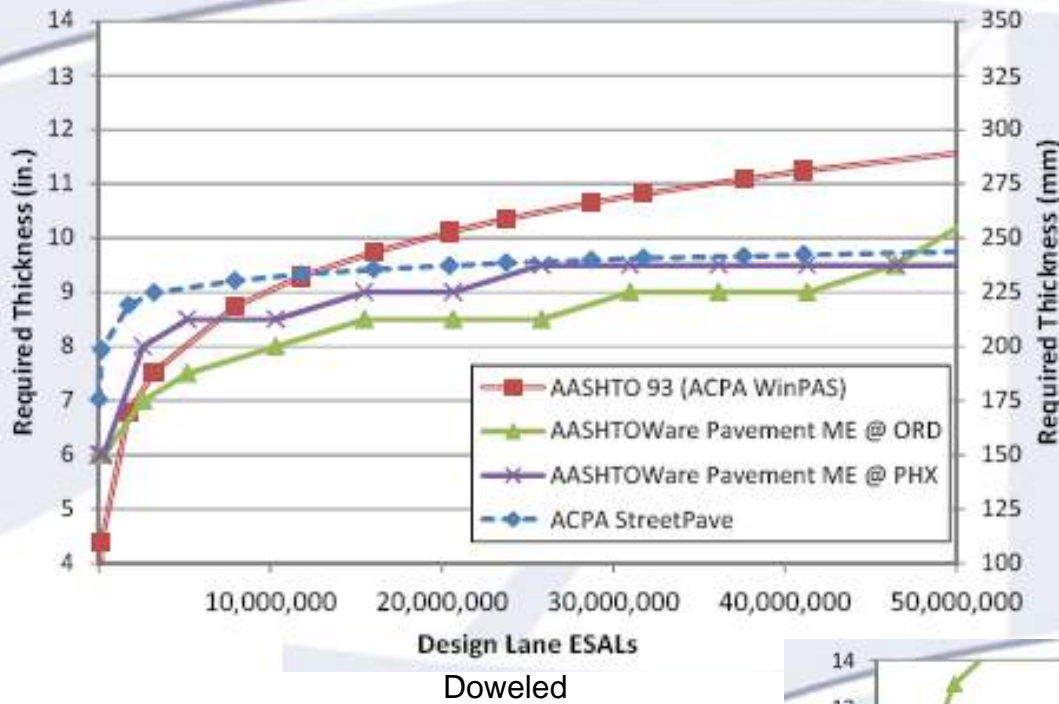
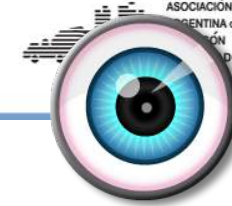
Climate station
Climate station selected from hourly climatic database (optional)

Summary Hourly climate data

Thursday, May 02, 1996 to Tuesday, February 28, 2006

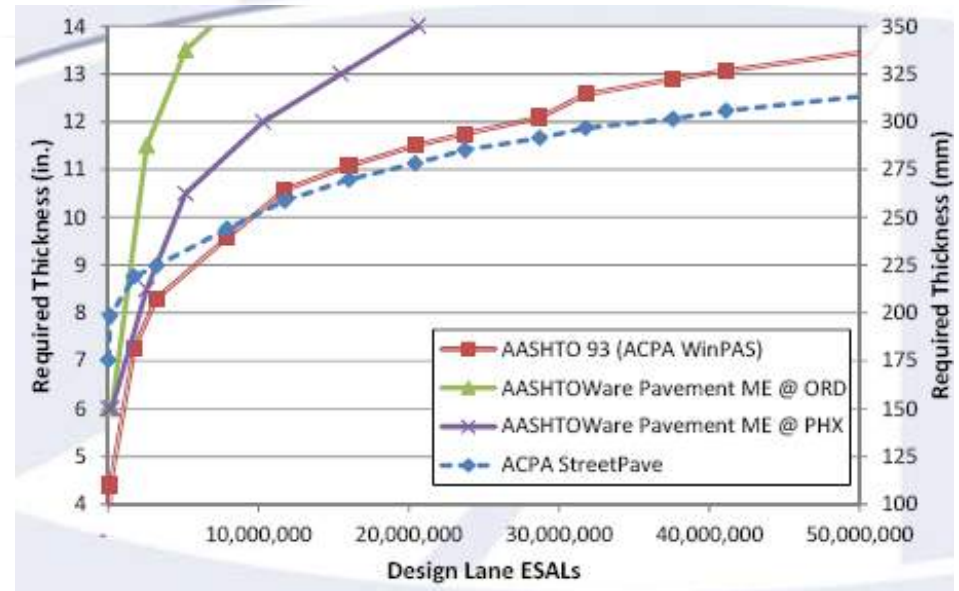
Verify Weather Import ICM

Date/Hour	Temperature	Windspeed (kph)	Sunshine(%)	Precipitation (mm)	Humidity(%)	Water table (m)
5/2/1996 12:00:00...	38.3	4.7	0	0.2	58.5	33
5/2/1996 1:00:00...	38.2	5.3	0	0.05	58.5	33
5/2/1996 2:00:00...	38	5.7	0	0.02	58.5	33
5/2/1996 3:00:00...	37.6	6.3	0	0	58.5	33
5/2/1996 4:00:00...	37.5	3	13	0	58.5	33
5/2/1996 5:00:00...	36.6	4	13	0	58.5	33
5/2/1996 6:00:00...	37	4.3	13	0	58.5	33
5/2/1996 7:00:00...	39.7	6	7	0	58.5	33
5/2/1996 8:00:00...	40.9	4	7	0	58.5	33
5/2/1996 9:00:00...	44.4	6.6	7	0	58.5	33
5/2/1996 10:00:00...	45.9	8	20	0	58.5	33
5/2/1996 11:00:00...	48.5	7.7	17	0	58.5	33
5/2/1996 12:00:00...	45.2	11.3	10	0	58.5	33
5/2/1996 1:00:00...	44.2	8.7	0	0	58.5	33
5/2/1996 2:00:00...	47.1	7.3	7	0	58.5	33
5/2/1996 3:00:00...	47.2	5.7	0	0	58.5	33
5/2/1996 4:00:00...	43.2	10.3	0	0	58.5	33
5/2/1996 5:00:00...	41.3	8.9	0	0	58.5	33
5/2/1996 6:00:00...	40.3	4.3	0	0	58.5	33



¿conocemos nuestras variables y tenemos calibrado el modelo?

Fuente: ACPA



Undoweled

Fuente: ACPA



A manera de ejemplo

- El no conocer ni medir las variables propias, al implementar los modelos mecanísticos puede resultar en valores no adecuados.
- El uso de un método u otro está en función del comportamiento que más se ajuste a las condiciones propias del proyecto.



Investigación de Madurez en Carretera Panamericana CA-01 Tramo “Los Chorros”





Ecuación AASHTO 98 para cálculo de espesores de losa.

$$\log_{10}(W_{18}) = \log_{10}(W) + (5.065 - 0.03295 P_{t \geq 2.4}) [\text{Log}((s'_{lt}) / \sigma'_{lt}) - \log(690 / \sigma'_{lt})]$$

Esfuerzos por Carga

$$W_{18} R = 10^{\uparrow} (\log W_{18} + Z \cdot S_{lt})$$

$$\sigma'_{lt} = \sigma_{lt} EF [1.0 + 10^{\uparrow} (\log b) TD]$$

Gradiente positivo de Temperatura

Esfuerzos al centro de
la Losa en Análisis

Esfuerzos al centro de
la Losa para el
AASHTO Road Test





Esfuerzos por Carga

$$\sigma_{ll} = 18,000 / D^{1.2} \{ 4.227 - 2.381 (180 / l)^{10.2} - 0.0015 [E_{cb} H_{cb} / 1.4 k]^{10.5} - 0.155 [H_{cb} (E_{cb} / E_{cc})^{10.75}]^{10.5} \}$$

Esfuerzos por fricción

$$F = 1.177 - 4.3 \cdot 10^{-8} \cdot D \cdot E_{cb} - 0.01155542 D + 6.27 \cdot 10^{-7} E_{cb} - 0.000315 f$$

Factor para Esfuerzo por temperatura positiva + condiciones ambientales

$$\log b = -1.944 + 2.279 D / l + 0.0917 L / l - 433,080 D^{1.2} / k l^{1.4} + (0.0614 / l) \cdot (E_{cb} H_{cb})^{1.5}$$

Radio de Rigidez Relativa

$$l = \sqrt[4]{4 \cdot E \cdot D^3 / 12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}$$

Gradiente de temperatura equivalente

$$\text{effective positive } TD = 0.962 - 52.181 / D + 0.341 WIND + 0.184 TEMP - 0.00836 PRECIP$$



AASHTO 98, Gradiente de temperatura Positivo (Para cálculo de Espesor de Losa)

$$\text{effective positive } TD = 0.962 - 52.181/D + 0.341 WIND + 0.184 TEMP - 0.00836 PRECIP$$

Utilizando:

WIND (Velocidad promedio anual del viento)	7.9Km/h	4.9 mph
TEMP (Temperatura promedio anual)	26.3°C	79.3°F
PRECIP (Precipitación histórica anual)	1800 mm	71 in
D (espesor de losa)	24 cm	9.45 in

$$\text{effective positive } TD = 0.962 - 52.181/9.45 + 0.341(4.9) + 0.184(79.3) - 0.00836(71)$$

$$\text{effective positive } TD = 11.11 \text{ } ^\circ F \approx 6.17 \text{ } ^\circ C$$

El Diferencial de temperatura máximo positivo de la guía AASHTO se define como: “ el diferencial efectivo de temperatura entre la temperatura superficial menos la del fondo de la losa, en °F” Guía AASHTO pág.. 14. este incluye además los efectos del viento, temperatura y lluvia. *En campo el diferencial de temperatura promedio en el mes de marzo fue de 8°C, aunque hubieron registros de diferenciales de temperatura positivos de hasta 12°C !El doble de lo predicho por la guía!*



¿Qué significa lo anterior?

“En campo el diferencial de temperatura promedio en el mes de marzo fue de 8°C, aunque hubieron registros de diferenciales de temperatura positivos de hasta 12°C !El doble de lo predicho por la guía!”

Al evaluar los gradientes medidos, en las ecuaciones AASTHO 98, en lugar de utilizar los propuestos, indican un aumento de 2.5cm..... El pavimento re-diseñado con AASTHO 93, tiene 3cm más , lo que indica que el método es más confiable para nuestras condiciones..



¿Qué Pasa con los gradientes negativos?

Para el caso de los gradientes negativos debido a temperatura y cambios de humedad, el predicho por la guía AASTHO 98 es de -5.7°C y el medido en el proyecto fue de -6°C , por lo que la predicción del gradiente negativo se adapta a nuestras condiciones.



AASHTO 98, Gradiente de temperatura Negativo (Usado para revisión de Esfuerzos en Esquinas)

$$\text{effective negative } TD = -18.14 + 52.01/D + 0.394WIND + 0.007TEMP + 0.00407PRECIP$$

Utilizando:

WIND (Velocidad promedio anual del viento)	7.9Km/h	4.9 mph
TEMP (Temperatura promedio anual)	26.3°C	79.3°F
PRECIP (Precipitación histórica anual)	1800 mm	71 in
D (espesor de losa)	24 cm	9.45 in

$$\text{effective negative } TD = -18.14 + 52.01/9.45 + 0.394(4.9) + 0.007(79.3) + 0.00407(71)$$
$$\text{effective negative } TD = -4.87^\circ F \approx 2.7^\circ C$$

Esfuerzos debido al Diferencial de temperatura máximo negativo son definidos por la guía AASHTO como: “Diferencial de temperatura negativo (periodos nocturnos), causa que las esquinas se curven hacia arriba, debido al peso de la losa, esto produce esfuerzos de tensión en la superficie de la losa” Guía AASHTO pág. 46.

En campo, el diferencial de temperatura negativo promedio en el mes de marzo fue de -5°C, aunque hubieron registros de diferenciales de temperatura negativos de hasta -6°C



AASHTO 98, Gradiente de temperatura Positivo equivalente (Para cálculo de Esfuerzos al centro de losa)

*Wet climate (Annual precipitation ≥ 30 in [762mm] or Thornthwaite
Moisture Index ≥ 0): 0 to 2°F per inch [0 to 0.0044°C per mm] of slab thickness.*

*Dry climate (Annual precipitation < 30 in [762mm] or Thornthwaite
Moisture Index < 0): 1 to 3°F per inch [0.0022 to 0.0066°C per mm] of slab thickness.*

“Es difícil el cuantificar de forma separada los esfuerzos debido al alabeo de construcción y esfuerzos debido al gradiente de humedad. Sin embargo, su efecto combinado puede ser asumido como el diferencial de temperatura para llevar la losa a una posición plana en ausencia del diferencial de temperatura real en la losa. Un equivalente aproximado al diferencial de temperatura puede ser asumido de acuerdo al clima del sitio y de acuerdo al procedimiento de curado” AASHTO Guía 98, pág. 46.

Este valor de diferencial de temperatura positivo se resta al diferencial de temperatura negativo, obteniendo un DT- mayor, que ahora incluye los efectos de alabeo por humedad y construcción. Para el caso el diferencial de temperatura negativo total es de -5.93°C (máximo registrado -6°C).



Conclusiones y Recomendaciones





Conclusiones y Recomendaciones

- Con los resultados de ensayos de vigas se verificó la precisión del método de madurez en este proyecto.
- El método puede ser empleado como método de control en campo con bastante seguridad.
- Se recomienda, la colocación mínima de 2 sensores por día en el 70% central de la producción diaria o un sensor cada 300 m³ o fracción de producción diaria, en concreto a colocar en pista, siempre al centro del espesor.



Conclusiones y Recomendaciones

- El diferencial de temperatura positivo, aproximadamente, se da en un período de 10 horas, iniciando a las 09:00 a.m. y finaliza a las 07:00 p.m.
- El máximo gradiente positivo corresponde a la máxima temperatura del día, y el gradiente negativo mayor corresponde al momento de menor temperatura, independientemente del espesor de la losa
- Los máximos gradientes de temperatura que se generan en las losas de pavimento coinciden con los máximos de temperatura ambiente.



- La mayor parte del día (14 horas), las losas se encuentran sometidas a gradientes de temperatura negativos.
- Los valores máximos de gradientes positivos y negativos, se producen en las losas de menor espesor (20 cm), siendo estas más susceptibles a los daños por efectos de alabeos por temperatura.
- El máximo gradiente de temperatura positivo, se da entre la 1:00 p.m. y las 2:00 p.m., mientras que el gradiente máximo negativo se da entre 6:00 a.m. y las 7:00 a.m.



Gradiente de temperatura positivo ES

$$\Delta t^+ = 0.724 * T_{amb} + \frac{169.638}{D} - 20.499 \quad (*)$$

Donde:

Δt^+ : Gradiente positivo en la losa, °C.

T_{amb} : Temperatura ambiente, °C.

D : Espesor de la losa de pavimento, cm.

* Actualmente se está incluyendo la precipitación y el viento



Gradiente de temperatura negativo ES

$$\Delta t^- = 0.259 * Tamb - \frac{133.561}{D} - 3.167 \quad (*)$$

Donde:

Δt^- : Gradiente negativo en la losa, °C.

$Tamb$: Temperatura ambiente, °C.

D : Espesor de la losa de pavimento, cm.

* Actualmente se está incluyendo la precipitación y el viento



Sobre los métodos de diseño de pavimentos

- El uso de la guía AASTHO 93 para el diseño de los pavimentos de concreto hidráulico, es vigente y ha brindado resultados muy buenos para las condiciones nacionales
- La información recopilada permitirá mejorar los modelos de pavimentos de concreto utilizados en la evaluación con programas como HDM4.



Sobre los métodos de diseño de pavimentos

- El empleo de la guía MPDEG necesita de mayor estudios para calibrar las condiciones nacionales, lo que demanda mayor investigación, recopilación de información y seguimiento del comportamiento de los proyectos viales.
- EN EL SALVADOR DEBEMOS DE TENER PRECAUCIÓN EN EL DISEÑO DE ESPESORES AL UTILIZAR MÉTODOS MECANÍSTICOS YA QUE NO HAY SUFICIENTE INFORMACIÓN PARA UNA ADECUADA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS. AASHTO 93, NOS HA DADO SEGURIDAD Y BUENOS RESULTADOS POR MÁS DE 20 AÑOS.