



**MANUAL DE
PROCEDIMIENTOS DE
CONSTRUCCION DE
ELEMENTOS DE CONCRETO
EN CLIMAS CON CONDICIONES
ESPECIALES**

Elaborado por:
Dr. Pablo Jhoel Peña Torres
Ingeniero Civil

Junio 2023

Lima, Perú

INDICE

1.	Introducción	5
2.	Identificación de climas en Perú.....	7
3.	Concepto de madurez del concreto.....	13
3.1.	Relación entre resistencia y madurez del concreto	15
3.2.	Registro de la temperatura del concreto en obra.....	17
4.	Requerimientos mínimos para la colocación, compactación y curado del concreto	19
4.1.	Preparación, transporte y colocación del concreto	20
4.1.1.	Dosificación del concreto	20
4.1.2.	Mezclado del concreto	21
4.1.3.	Transporte del concreto.....	23
4.1.4.	Colocado del concreto.....	26
4.2.	Consolidación del concreto	27
4.3.	Curado del concreto	32
4.3.1.	Requerimientos mínimos de curado	36
4.3.2.	Métodos y materiales de Curado	39
5.	Colocación del concreto en climas fríos.....	41
5.1.	Diseño de mezclas de concreto en climas fríos.....	46
5.2.	Ensayos de Control	49
5.3.	Microclimas y materiales aislantes	50
6.	Colocación del concreto en climas cálidos	52
6.1.	Efecto de las altas temperaturas en el concreto.....	53
6.2.	Enfriamiento de los materiales del concreto	55
6.3.	Uso de materiales cementicios suplementarios	59
6.4.	Uso de aditivos para mantener la trabajabilidad.....	59
6.5.	Preparación antes del colocado	60
6.6.	Transporte, colocado y acabado	61
6.7.	Fisuración por contracción plástica.....	61
6.1.	Curado y protección	64
7.	Casos prácticos de colocación de concreto en territorio nacional	65
7.1.	Caso N°1: Clima Templado.....	66
7.2.	Caso N°2: Clima cálido	68
7.3.	Caso N°3: Clima frío	70
8.	Referencias bibliográficas	73

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa del Perú zonificado climáticamente (Roberto Prieto, MCVS)	8
Figura 2: Concepto simplificado de madurez del concreto (M. Aspilcueta, 2015)	13
Figura 3: Concepto grafico del modelo de Nurse – Saul (Fuente: O. Aguilar et al., 2009)	14
Figura 4: Visualización esquemática de la ley de Saul. (Fuente: O. Aguilar et al., 2009).....	15
Figura 5: Curva madurez vs. Resistencia.....	16
Figura 6: Fabricación de probetas para generación de curvas de correlación (Fuente: Internet).....	17
Figura 7: Curva de correlación Madurez – Resistencia (M. Aspilcueta, 2015).....	18
Figura 8: Colocación de termocuplas en las estructuras de concreto armado (Fuente: Internet).....	18
Figura 9: Espaciamiento recomendado par juntas en losas no reforzadas (Adaptado del ACI 360R-10)	19
Figura 10: Medios de transporte de concreto (Fuente: Internet)	25
Figura 11: Fachada de concreto caravista	28
Figura 12: Superficie interna de concreto caravista.....	29
Figura 13: Vibrador interno utilizado en compactación de losa (Fuente: Pag. Web TERRA Equipos).....	29
Figura 14: Vibrador externo en encofrados (Fuente: Pag. Web BEKA)	30
Figura 15: Llanas manuales vibratorias (Fuente: Youtube – Javier Borgno, 2010)	30
Figura 16: Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto (Gonnerman y Shuman, 1928).....	34
Figura 17: Efecto de la temperatura de curado sobre el desarrollo de la resistencia (superior) en relación a la resistencia a los 28 días y (inferior) relativa a la resistencia del concreto a 23°C (Burg, 1996)	35
Figura 18: Influencia del curado en la permeabilidad al agua en especímenes de mortero (Kosmatka y Panarese, 1988).....	36
Figura 19: Tuberías que transfieren calor a través de la circulación de una solución de glicol/agua (PCA).	39
Figura 20: Métodos de curado del concreto (Fuente: Internet)	40
Figura 21: Efecto de la temperatura sobre el desarrollo de la resistencia del concreto (PCA).....	42
Figura 22: Efecto de las bajas temperaturas sobre la evolución de la resistencia a compresión (PCA) ..	43
Figura 23: Comparación entre las resistencias tempranas de mezclas de concreto con cementos I y III, curados a 4°C y a 23°C (Klieger, 1958)	43
Figura 24: Pruebas de bloques de concreto después de 40 años de exposición a ciclos de hielo-deshielo (PCA).....	48
Figura 25: Mecanismo de funcionamiento del aire incorporado	48
Figura 26: Medida de temperatura en el concreto con termómetro digital.....	49
Figura 27: Olla Whashington para ensayo de contenido de aire en el concreto	49
Figura 28: Microclima en estructura en construcción (PCA)	50
Figura 29: Calefactor de flama (PCA)	50
Figura 30: Pilas de cubiertas de aislamiento térmico (PCA)	51
Figura 31: Efecto de la temperatura del concreto en el tiempo de fraguado (Burg, 1996)	54
Figura 32: Efecto de las temperaturas elevadas del concreto sobre la resistencia a la compresión en el tiempo (Klieger, 1958).....	55
Figura 33: Enfriamiento del concreto utilizando nitrógeno líquido (Fuente: Internet - ARGOS).....	56
Figura 34: Introducción de hielo en la mezcla de concreto (Fuente: Youtube).....	58
Figura 35: Perdida de asentamiento del concreto usando aditivos (Fuente: ARGOS).....	60
Figura 36: Fisura típica por contracción plástica (PCA)	62

Figura 37: Efecto de las temperaturas del concreto y del aire, humedad relativa y velocidad del viento sobre la tasa de evaporación de la humedad en la superficie del concreto (ACI 305).....	63
Figura 38: Diagrama de flujo para realizar la colocación del concreto	65
Figura 39: Evaluación de la tasa de evaporación	70

Lista de Tablas

Tabla 1: Zonificación bioclimática del Perú según la norma EM.110	7
Tabla 2: Ubicación de provincia por zona bioclimática	8
Tabla 3: Características climáticas de cada zona bioclimática	11
Tabla 4: Correlación de climas de la Norma EM.110 y las Normas ACI.....	12
Tabla 5: Tolerancias para la dosificación (ASTM C94).....	21
Tabla 6: Requerimientos para la uniformidad del concreto (NTP 339.114).....	22
Tabla 7: Métodos y equipos para el transporte y el manejo del concreto	23
Tabla 8: Tiempo mínimo recomendado para la duración de curado de las mezclas de concreto (ACI 308R-01)	37
Tabla 9: Recomendaciones de temperaturas del concreto (ACI 306)	44
Tabla 10: Duración de protección recomendada para el f'_{cr} a 28 días con curado estándar (ACI 306)	45
Tabla 11: Características mínimas del concreto en función a la exposición de congelamiento-deshielo.	47
Tabla 12: Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.....	47
Tabla 13: Contenido total de aire incorporado en concreto lanzado expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.....	47
Tabla 14: Efecto de la temperatura de los materiales sobre la temperatura inicial del concreto	57
Tabla 15: Efecto del hielo (60kg) sobre la temperatura del concreto	58
Tabla 16: Costo referencial de los componentes del concreto	66
Tabla 17: Diseño de mezcla referencial de concreto en climas templados.....	67
Tabla 18: Diseño de mezcla referencial de concreto en climas cálidos.....	69
Tabla 19: Diseño de mezcla referencial de concreto en climas fríos	72

1. Introducción

Es bastante conocido que la calidad de una estructura de concreto armado está dada en función a diversos factores como los materiales que la componen, diseño de ingeniería, proceso constructivo y mantenimiento periódico. Sin embargo, para definir estos puntos, el clima del lugar donde se cimentará la estructura juega un papel importante tanto para el diseño de ingeniería de la estructura como para la definición del proceso constructivo.

El clima en Perú esta influenciado por su ubicación geográfica, ya que se encuentra en una zona de baja latitud y cerca de la línea ecuatorial. Esto implica que la diferencia de temperaturas entre invierno y verano no sea importante en todo el País.

El Perú, debido a su ubicación geográfica, presenta una gran variedad de climas, los cuales es producto de la interacción de las siguientes variables: Cordillera de los andes, latitud, anticiclón del pacifico sur, anticiclón del atlántico sur, ciclón ecuatorial, corriente peruana o de Humboldt, fenómeno del niño y la placa de nazca [1].

Debido a la ubicación geográfica del Perú, es que se tiene una diversidad de climas a lo largo del territorio, esto implica temperaturas bastante bajas (como en zonas de alta montaña), temperaturas templadas (como en zonas de la costa central) y temperaturas cálidas (como en las zonas de selva o costa norte). La Norma Nacional EM.110 “Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética” [2] define 9 zonas bioclimáticas en el Perú, las cuales tienen características diferentes de Humedad Relativa, Velocidad del viento, Radiación Solar, Temperatura ambiental, etc. Estos diversos escenarios climáticos hacen necesario una modificación de los procesos constructivos para la elaboración correcta de concretos en sitio.

La problemática generada por los diversos bioclimas existentes en el Perú es diversa, en climas tropicales húmedos o desérticos (clima cálido) el concreto es propenso a fisuración por contracción plástica debido a la elevada velocidad de evaporación del agua superficial (ACI 305) [3], lo cual podrían provocar problemas de durabilidad en las estructuras, así mismo, cuando se realizan vaciados de concreto en climas alto andinos, mesoandinos o nevado (clima frio) el concreto podría estar expuesto a deterioro por una dosificación de mezcla inadecuada que no considera una relación a/c máxima y un porcentaje de aire atrapado pertinente (ACI 318-19) [4], este daño es causado debido a la presencia de ambientes con ciclos de hielo – deshielo, el cual provocaría que el concreto sea poco durable, del mismo modo, el proceso constructivo no debe dejarse de lado, si el concreto no es colocado ni curado a temperaturas adecuadas (ACI 306) [5], el concreto no llegara a la resistencia mínima requerida y en consecuencia la matriz cementicia será poroso y el concreto poco durable, estos vaciados de concreto normalmente requieren la

instalación de mantas térmicas, micro climas y/o estufas que aumentan la temperatura a la cual el concreto debe mantenerse durante el curado.

Muchas de las ciudades de la Sierra Peruana se encuentran en una zona bioclimática altoandina, cuyos cambios de temperatura son pronunciados en ciertas épocas del año, registrándose temperaturas que fluctúan entre -10°C y $+20^{\circ}\text{C}$ en solo 12 horas, por lo cual, es necesario valorar esta condición, previo a la planificación de la construcción de estructuras de concreto armado a fin de asegurar estructuras durables en el tiempo.

Es así que, se debe entender que el costo de la construcción de estructuras de concreto varía en función al clima al que estará expuesto durante su fabricación y/o su vida útil. Esta variación de costo se da esencialmente por las consideraciones necesarias que deben tener las dosificaciones de las mezclas de concreto bajo condiciones especiales, así como, las precauciones que hay que tener durante la colocación y curado del concreto colocado.

El manual de procedimientos de construcción de elementos de concreto en climas con condiciones especiales, pretende brindar recomendaciones para el diseño del concreto y proceso constructivo de elementos de concreto colocado en sitio, teniendo en cuenta las particularidades de los diversos climas que se presentan en el territorio nacional. Es necesario resaltar la importancia de la dosificación de concreto, y los procesos de fabricación y colocación del mismo, a fin de construir una estructura durable en el tiempo.

2. Identificación de climas en Perú

Tomando como fuente al SENAMHI, “el Perú posee 38 tipos de climas, según el método de clasificación climática de Warren Thornthwaite – SENAMHI (2020), como resultado de la interacción entre los diferentes factores climáticos que lo afectan y su posición geográfica en el trópico, así como a la presencia de la cordillera de los andes, la cual configura una fisiografía compleja. Entre los climas de mayor extensión tenemos al árido y templado en la costa, lluvioso y frío en la sierra, y muy lluvioso y cálido en la selva”.

La Norma Nacional EM.110 CONFORT TERMICO Y LUMINICO CON EFICIENCIA ENERGETICA define y caracteriza los climas del Perú en 9 zonas bioclimáticas (Tabla 1).

Tabla 1: Zonificación bioclimática del Perú según la norma EM.110

Zona bioclimática	Definición climática
1	Desértico costero
2	Desértico
3	Interandino bajo
4	Mesoandino
5	Altoandino
6	Nevado
7	Ceja de montaña
8	Subtropical húmedo
9	Tropical húmedo

En esta Norma se define la zona bioclimática en función a la ubicación de cada provincia, sin embargo, debido a los diferentes climas que puede incluir una provincia, un distrito o hasta un centro poblado de nuestro país, es posible que esta clasificación no sea precisa en muchos casos, no obstante, dicho clima debe cumplir con las 8 características de alguna zona bioclimática (Tabla 3).

Esta zonificación tiene como base la clasificación de Köppen, a la que se ha incluido parámetros de altura, radiación, inversión térmica, entre otros factores. La zonificación corresponde a la clasificación primaria realizada por Rayter – Zuñiga en el 2005.

A partir de esta clasificación se determinan 9 zonas climáticas para el Perú (Figura 1) [6]. Su importancia radica en que, en base a esta clasificación, se darán las orientaciones necesarias para definir el proceso constructivo para colocar concreto en sitio. Cada zona tendrá recomendaciones apropiadas a las condiciones medioambientales.

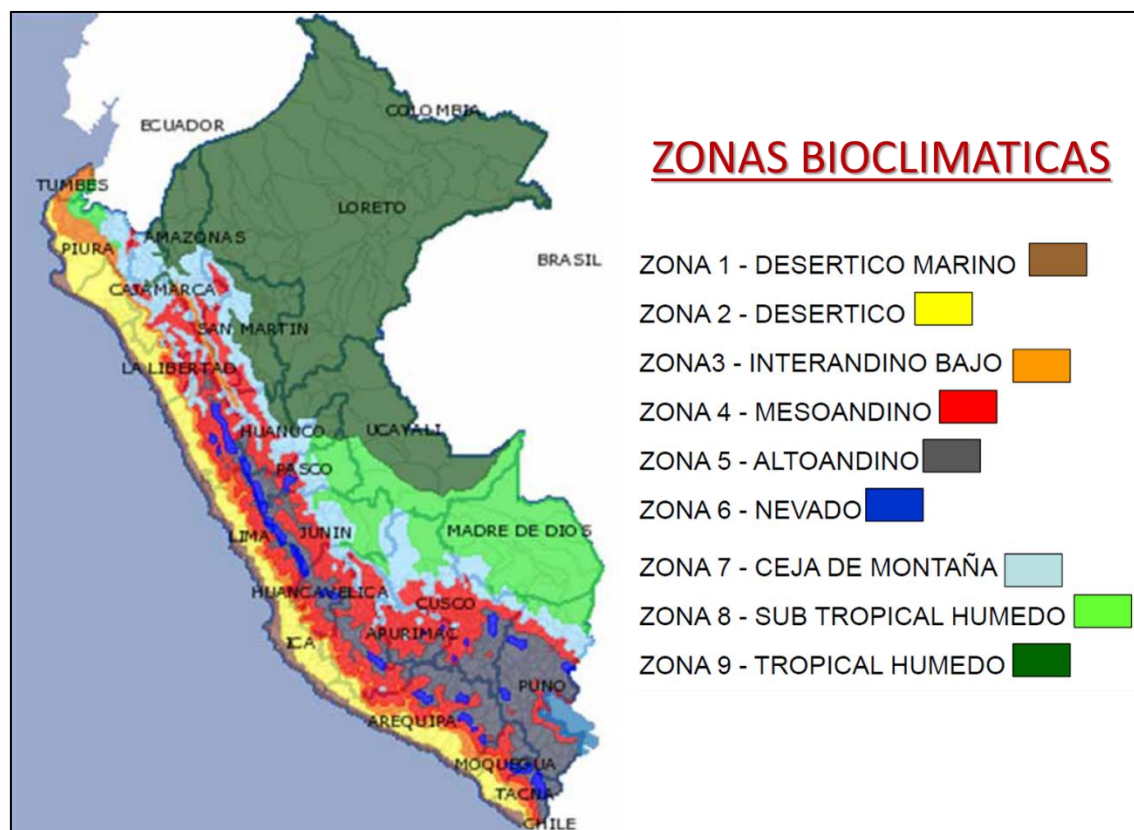


Figura 1: Mapa del Perú zonificado climáticamente (Roberto Prieto, MCVS)

La Tabla 2 muestra la ubicación de cada provincia por zona bioclimática (Anexo N°1 A de la EM.110) y la Tabla 3 muestra las características climáticas de cada zona bioclimática (Anexo N°1 B de la EM.110).

Tabla 2: Ubicación de provincia por zona bioclimática

UBICACION DE PROVINCIAS POR ZONA BIOCLIMATICA									
Departamento	1 Desertico Marino	2 Desertico	3 Interandino Bajo	4 Mesoandino	5 Alto Andino	6 Nevado	7 Ceja de Montania	8 Subtropical Humedo	9 Tropical Humedo
Amazonas							Chachapoyas		Bagua
							Utcubamba		Condorcanqui
							Bongara		
							Luya		
							Rodriguez de Mendoza		
Ancash	Casma			Asuncion	Bolognesi	Mariscal Luzuriaga			
	Huarmey			Pomabamba	Huaraz		Pallasca		
	Santa			Aija					
				Antonio Raimondi	Pomabamba				
				Carhuaz	Recuay				
				Carlos Fermin					
				Fitzcarrald					
				Huari					
				Corongo					
				Huaylas					
				Mariscal Luzuriaga					
Apurimac				Ocos					
				Pallasca					
				Yungay					
				Abancay	Antabamba	Cotabambas	Abancay		
				Andahuaylas	Grao		Chincheros		
				Aymaraes					
				Cotabambas					

CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO EN CLIMAS EXTREMOS

UBICACION DE PROVINCIAS POR ZONA BIOCLIMATICA									
Departamento	1 Desertico Marino	2 Desertico	3 Interandino Bajo	4 Mesoandino	5 Alto Andino	6 Nevado	7 Ceja de Montania	8 Subtropical Humedo	9 Tropical Humedo
Arequipa	Camana		Caraveli	Arequipa	Caylloma	La Union			
	Islay		Castilla	Condesuyos					
			Condesuyos						
Ayacucho				Cangallo	Huancas Sancos	Lucanas	Huanta		
				Huanta	Sucre	Parinacochas	La Mar		
				Huamanga	Victor Fajardo		Vilcashuaman		
				La Mar					
				Lucanas					
				Parinacochas					
				Paucar del Sara					
				Sara					
Cajamarca			Contumaza	Vilcashuaman					
			Cajabamba				Cajabamba		
			San Miguel	Cajamarca			Cajamarca		
				Celendin			Celendin		
				Chota			Chota		
				Contumaza			Contumaza		
				Hualgayoc			Cutervo		
				San Marcos			Hualgayoc		
				San Miguel			Jaen		
				San Pablo			San Marcos		
Cusco							San Ignacio		
							San Pablo		
							Santa Cruz		
				Cusco	Canas		La Convencion	La Convencion	
				Paruro	Espinar				
				Canchis	Chumbivilcas				
				Acomayo					
				Anta					
				Calca					
				La Convencion					

UBICACION DE PROVINCIAS POR ZONA BIOCLIMATICA									
Departamento	1 Desertico Marino	2 Desertico	3 Interandino Bajo	4 Mesoandino	5 Alto Andino	6 Nevado	7 Ceja de Montania	8 Subtropical Humedo	9 Tropical Humedo
Huancavelica				Castrovirreyna		Angaraes	Tayacaja		
					Huancavelica				
				Tayacaja					
				Churcamp					
				Huaylara					
Huanuco				Acobamba					
			Marañon	Huamallas	Lauricocha		Ambo	Leoncio Prado	
				Huanuco	Dos de mayo		Huacaybamba	Puerto Inca	
				Pachitea			Marañon		
				Ambo			Yarowilca		
Ica				Huacaybamba					
				Yarowilca					
		Palpa							
Junin		Ica							
		Chincha							
		Pisco							
				Tarma	Junin		Chanchamayo	Chanchamayo	
				Concepcion				Satipo	
La Libertad				Huancayo					
				Chupaca					
				Jauja					
	Pacasmayo	Ascope		Bolivar			Gran Chimu		
	Trujillo	Chepen		Sanchez Carion					
		Gran Chimu							
Lambayeque		Viru		Bolivar					
				Otuzco					
				Patate					
				Julcan					
Lambayeque				Santiago de Chuco					
	Chiclayo							Lambayeque	
	Ferreñafe	Lambayeque							

CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO EN CLIMAS EXTREMOS

UBICACION DE PROVINCIAS POR ZONA BIOCLIMATICA									
Departamento	1 Desertico Marino	2 Desertico	3 Interandino Bajo	4 Mesoandino	5 Alto Andino	6 Nevado	7 Ceja de Montania	8 Subtropical Humedo	9 Tropical Humedo
Lima	Barranca		Cañete	Cajatambo	Oyon	Oyon			
	Cañete			Huachipa					
	Huachipa			Yauyos					
	Huachipa Lima								
Loreto									Maynas
									Alto Amazonas
									Loreto
									Mariscal Ramon Castilla
									Requena
									Datem del marañon
Madre de Dios							Manu	Tahuamanu	Ucayali
Moquegua			Mariscal Nieto					Tambopata	
	Ilo		General Sanchez Cerro						
Pasco					Pasco	Daniel Alcides Carion		Oxapampa	
Piura	Talara	Paita		Huancabamba			Ayabaca	Huancabamba	
		Sechura		Ayabaca				Morropon	
		Piura						Sullana	

UBICACION DE PROVINCIAS POR ZONA BIOCLIMATICA									
Departamento	1 Desertico Marino	2 Desertico	3 Interandino Bajo	4 Mesoandino	5 Alto Andino	6 Nevado	7 Ceja de Montania	8 Subtropical Humedo	9 Tropical Humedo
Puno				Sandia	Azangaro	Carabaya		San Antonio de Putina	
				Yunguyo	Carabaya	Chucuito		Sandia	
					Chucuito	El Collao			
					El Collao	Huancane			
					Huancane	Puno			
					Lampa	Yunguyo			
					Melgar				
					Moho				
					Puno				
					San Roman				

UBICACION DE PROVINCIAS POR ZONA BIOCLIMATICA									
Departamento	1 Desertico Marino	2 Desertico	3 Interandino Bajo	4 Mesoandino	5 Alto Andino	6 Nevado	7 Ceja de Montania	8 Subtropical Humedo	9 Tropical Humedo
San Martin									Bellavista
									Mariscal Caceres
									San Martin
									El Dorado
									Huallaga
									Lamas
									Moyobamba
									Picota
Tacna		Jorge Basadre Tacna	Jorge Basadre	Tacna	Tacna	Candarave			Tocache
Tumbes			Contralmirante Villar			Tarata		Tumbes	
		Tumbes						Zarumilla	
Ucayali									Purus
									Padre Abad
									Atalaya
									Coronel Portillo

CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO EN CLIMAS EXTREMOS

Tabla 3: Características climáticas de cada zona bioclimática

Características climáticas		ZONAS BIOCLIMÁTICAS DEL PERU								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Desértico Costero	Desértico	Interandino Bajo	Mesoandino	Alto Andino	Nevado	Ceja de Montania	Subtropical Húmedo	Tropical Húmedo
1	Temperatura media anual	18 a 19°C	24°C	20°C	12°C	6°C	< 0°C	25 a 28°C	22°C	22 a 30°C
2	Humedad relativa media	> 70%	50 a 70%	30 a 50%	30 a 50%	30 a 50%	30 a 50%	70 a 100%	70 a 100%	70 a 100%
3	Velocidad del viento	Norte: 5-11 m/s Centro: 4-5 m/s Sur: 6-7 m/s	Norte: 5-11 m/s Centro: 4-5 m/s Sur: 6-7 m/s	Norte: 4 m/s Centro: 6 m/s Sur: 5-7 m/s	Norte: 10 m/s Centro: 7,5 m/s Sur: 4 m/s Sur - Este: 7 m/s	Centro: 6 m/s Sur: 7 m/s Sur - Este: 9 m/s	Centro: 7 m/s Sur: 7 m/s	Norte: 4-6 m/s Centro: 4-5 m/s Sur: 6-7 m/s	Norte: 5-7 m/s Este: 5-7 m/s Centro: 5 m/s	Este: 5-6 m/s Centro: 5 m/s
4	Dirección predominante del viento	S - SO - SE	S - SO - SE	S	S - SO - SE	S - SO	S - SO	S - SO - SE	S - SO - SE	S - SO
5	Radiación solar	5 a 5,5 kWh/m ²	5 a 7 kWh/m ²	2 a 7,5 kWh/m ²	2 a 7,5 kWh/m ²	S kWh/m ²	s kWh/m ²	3 a 5 kWh/m ²	3 a 5 kWh/m ²	3 a 5 kWh/m ²
6	Horas de sol	Norte: 5 horas Centro: 4,5 horas Sur: 6 horas	Norte: 6 horas Centro: 5 horas Sur: 7 horas	Norte: 5-6 horas Centro: 7-8 horas Sur: 6 horas	Norte: 6 horas Centro: 8-10 horas Sur: 7-8 horas	Centro: 8-10 horas Sur: 8-10 horas	Centro: 8-10 horas Sur: 8-11 horas	Norte: 6-7 horas Centro: 8-11 horas Sur: 6 horas	Norte: 4-5 horas Sur Este: 4-5 horas Este: 4-5 horas	Norte: 4-5 horas Este: 4-5 horas
7	Precipitación anual	< 150 mm	< 150 a 500 mm	< 150 a 1500 mm	150 a 2500 mm	< 150 a 2500 mm	250 a 750 mm	150 a 6000 mm	150 a 3000 mm	150 a 4000 mm
8	Altitud	0 a 2000 msnm	400 a 2000 msnm	2000 a 3000 msnm	3000 a 4000 msnm	4000 a 4800 msnm	> 4800 msnm	1000 a 3000 msnm	400 a 2000 msnm	80 a 1000 msnm
Equivalente en la clasificación Koppen		BSs-BW, BW	Bw	BSw	Dwb	ETH	EFH	Cw	Aw	Af

La clasificación bioclimática de la Norma EM.110 es diferente a la clasificación internacional establecida por el ACI con fines de vaciados de concreto, la cual clasifica los climas en:

- Clima templado
- Clima Cálido (ACI 306)
- Clima Frio (ACI 305)

A fin de correlacionar la clasificación bioclimática de la Norma Nacional EM.110 y los estándares internacionales del ACI, los cuales proporcionan recomendaciones para el vaciado de concreto en función al clima particular, es que establece la Tabla 4.

Tabla 4: Correlación de climas de la Norma EM.110 y las Normas ACI

Clima Templado	Clima Frio (ACI 305)	Clima Cálido (ACI 306)
Desértico Costero	Mesoandino	Desértico
Interandino Bajo	Alto Andino	Tropical Húmedo
Ceja de montaña	Nevado	
Subtropical húmedo		

Esta correlación se estableció en función a las características climáticas promedio de la EM.110 (Tabla 3) y las definiciones de Clima Frio y Clima Cálido dadas indicadas en el Capítulo 5 y Capítulo 6 del presente documento. El clima templado o convencional es aquel que no está dentro de la definición de clima cálido o clima frio. Es así que se considera como climas extremos a los bioclimas que están clasificados como climas fríos y climas cálidos.

Es necesario remarcar, que la Tabla 4 presenta una correlación referencial basado en parámetros climáticos promedio, estos parámetros podrían cambiar en función a la estación del año del lugar. Por ejemplo, si bien es cierto, Lima puede estar considerado en un clima templado (Desértico costero) durante gran parte del año, en época de verano, este puede considerarse como de clima cálido (Desértico).

3. Concepto de madurez del concreto

La madurez de un concreto hace referencia a la amplitud de la hidratación del cemento. El concepto se basa en el principio en que la resistencia del concreto (y otras propiedades), están directamente relacionadas con la edad y el desarrollo de su temperatura [7].

Nurse y Saul definieron a la madurez como la variable que se encarga de medir la cantidad de calor interno generado en el concreto a lo largo de su evolución. Dicho calor es representado por medio de los efectos combinados de temperatura y tiempo, cuyo producto de ambas variables representa la madurez del concreto. Esto mismo puede expresarse como el área bajo la curva del historial de la temperatura interna del concreto en estudio, la cual puede apreciarse en la Figura 2. El termino T_0 hace referencia al concepto de temperatura datum.

La aplicación del Método de Madurez del Concreto es una alternativa para monitorear la evolución de la resistencia del concreto colocado en sitio, este método se aplica según lo indicado en la ASTM C1074 [8] o NTP 339.217 [9], la cual nos permitirá conocer indirectamente la evolución de la resistencia del concreto en función de la Madurez.

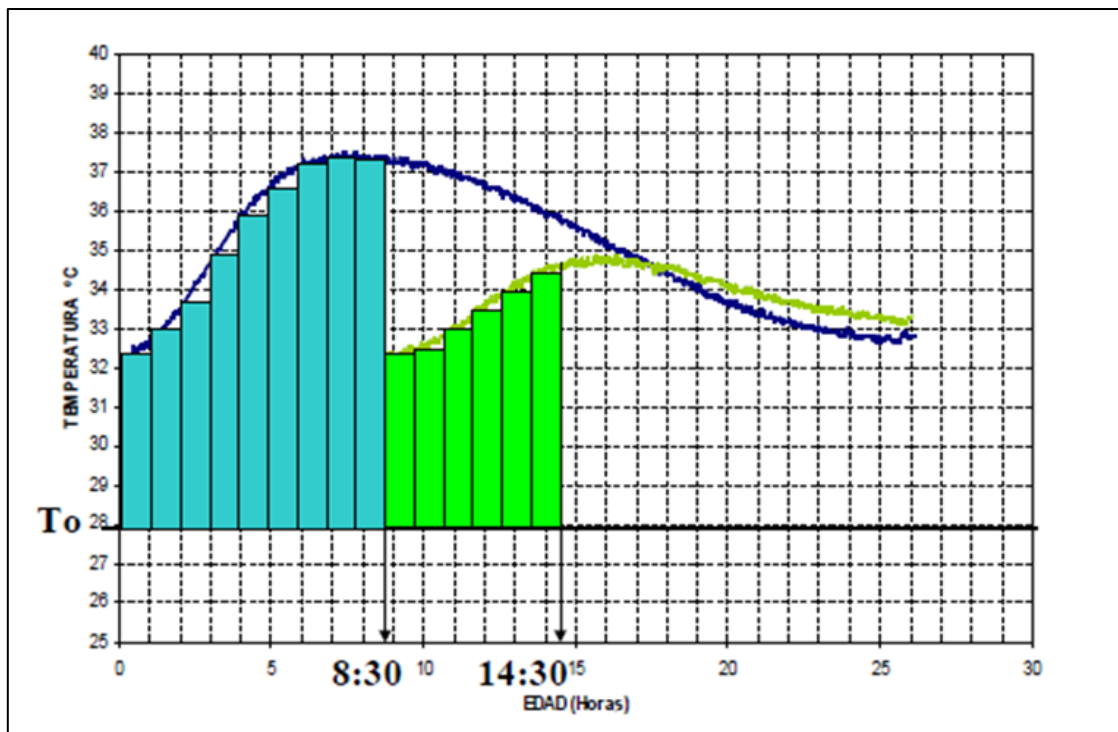


Figura 2: Concepto simplificado de madurez del concreto (M. Aspilcueta, 2015)

Los orígenes del Método de Madurez se remontan a una serie de estudios realizados por McIntosh (1949), Nurse (1949) y Saul (1951) en Inglaterra, los cuales fueron referidos a los métodos de curado acelerado. Estos ensayos mostraron la influencia de la temperatura de curado sobre la resistencia del concreto, lo cual conllevó a la necesidad de crear un procedimiento que considerara los efectos combinados de tiempo y temperatura en el desarrollo de la resistencia [7]. En base a esa experiencia, propuso la siguiente hipótesis: “La velocidad de endurecimiento del concreto en cualquier momento es directamente proporcional a la cantidad en la que la temperatura de curado excede a la temperatura datum” [10]. El concepto de la temperatura datum fue definido como la temperatura bajo la cual empieza el proceso de endurecimiento del concreto, en base a esta propuesta McIntosh, Nurse y Saul proponen en 1950 el siguiente modelo:

$$M_s = \sum_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t$$

Donde:

- M_s : Madurez del concreto al tiempo t (°C-hr).
- t : Tiempo del proceso de endurecimiento del concreto. (horas o días).
- T : Temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt .
- T_0 : Temperatura datum (°C).

Esta misma función matemática se puede expresar en la Figura 3 (Fuente: Carino y Lew (2001)) [11], aquí se muestra un esquema de la historia de la temperatura y el factor de temperatura-tiempo según la función de Nurse-Saul.

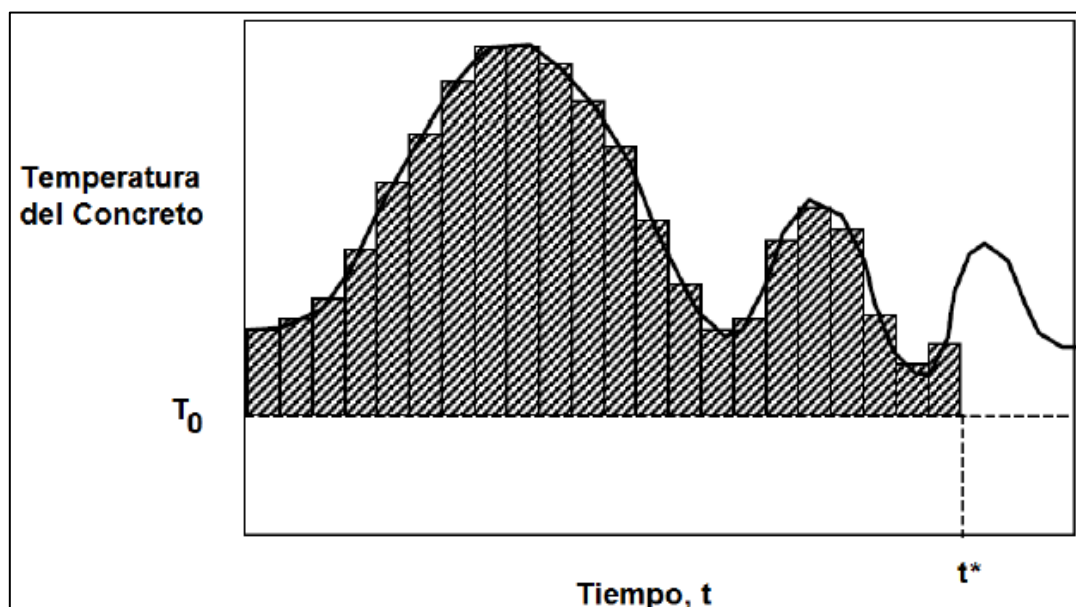


Figura 3: Concepto grafico del modelo de Nurse – Saul (Fuente: O. Aguilar et al., 2009)

3.1. Relación entre resistencia y madurez del concreto

La Ley propuesta por Saul menciona que “concretos de la misma mezcla con la misma madurez, medido usando el factor temperatura - tiempo, tendrá aproximadamente la misma resistencia, sin importar la combinación de temperatura y tiempo que dio como resultado esa madurez”, esto implica que, para una mezcla de concreto, con una madurez correspondiente a la resistencia particular establecida, uno puede estimar cuando el concreto ha alcanzado dicha resistencia, incluso si el concreto en estudio tiene diferente historia de curado que el concreto original. Esto es mostrado en la Figura 4 [12].

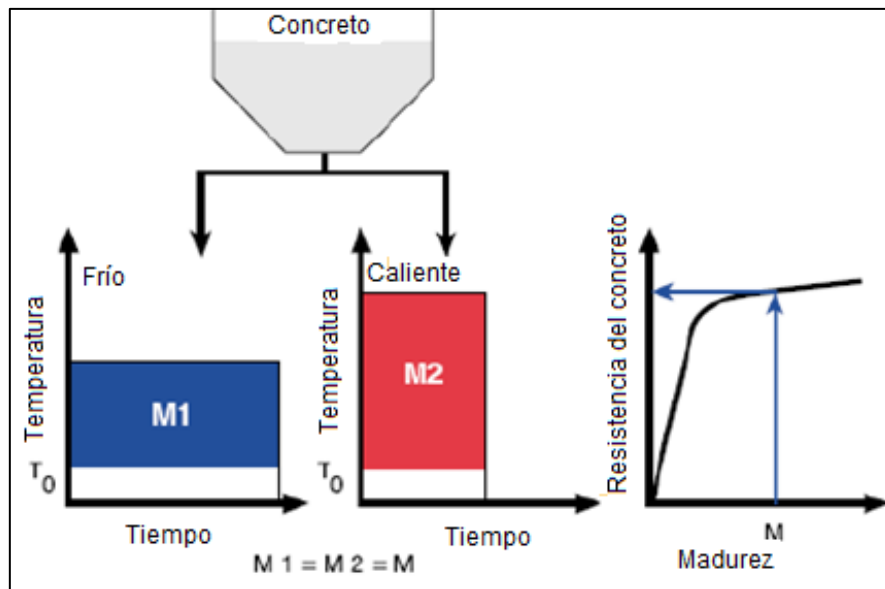


Figura 4: Visualización esquemática de la ley de Saul. (Fuente: O. Aguilar et al., 2009)

Freisleben Hansen y Pedersen (1977) propusieron un nuevo modelo para calcular la madurez del concreto, este modelo se fundamenta en la ecuación de Arrhenius, la cual se utiliza para describir el efecto de la temperatura en el índice de una reacción química, así como el concepto propuesto Rastrup de edad equivalente. La nueva función matemática era de la siguiente forma:

$$teq = \sum_0^t e^{-\frac{Ea}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{Tr} \right)} \cdot \Delta t$$

Donde:

- t_{eq} : Edad equivalente (horas).
- T : Temperatura promedio del concreto en el intervalo Δt (°C).
- Tr : Temperatura de curado constante bajo la cual se espera alcanzar la misma madurez que el historial de temperatura del concreto bajo investigación (°C).
- e : Número de Euler ($\approx 2,718$).

- E_a : Energía aparente de activación (J/mol).
- R : Constante de los gases (8.314 J/mol K).

El concepto de energía aparente de activación es muy similar al de temperatura datum, es decir la energía aparente de activación significa la mínima energía que se requiere para empezar el proceso de endurecimiento del concreto. Para poder determinarla, Freisleben Hansen y Pedersen recomendaron usar las siguientes ecuaciones:

$$E_a = 33500 + 1470 \cdot (20 - T_c) \text{ J/mol,} \quad \text{para } T_c < 20^\circ\text{C}$$

$$E_a = 33500 \text{ J/mol,} \quad \text{para } T_c \geq 20^\circ\text{C}$$

Donde:

- E_a : Energía aparente de activación (J/mol).
- T_c : Temperatura de curado del concreto ($^\circ\text{C}$).

Según la ASTM C1074 [8] “la precisión de la estimación de la resistencia con el Método de Madurez, depende de varios factores, como la apropiada elección de la función de madurez para una mezcla específica, el historial de temperatura en edades tempranas, las proporciones actuales de la mezcla. Por tal razón, no es posible escribir algo específico respecto a la precisión de la resistencia estimada”.

Finalmente, este ensayo nos otorga datos con los que se podría generar la famosa curva de madurez del concreto en función a su resistencia a la compresión (Figura 5), en base a esta curva patrón se podrá realizar estimaciones de la resistencia a la compresión del concreto.

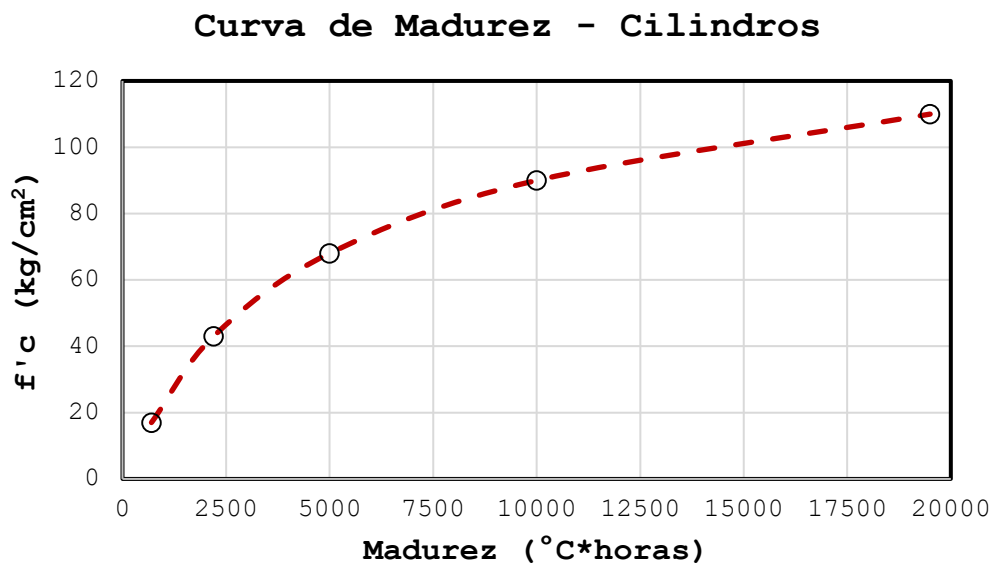


Figura 5: Curva madurez vs. Resistencia

3.2. Registro de la temperatura del concreto en obra

Para realizar estimaciones de la resistencia del concreto en obra, primero será necesario calibrar la curva de madurez – resistencia del concreto que se utilizará en el proyecto. Para generar esta curva, se fabrican varias probetas, las cuales serán usadas para evaluar la resistencia a la compresión del concreto, mientras que en paralelo se monitorea la temperatura en el tiempo de otras probetas para calcular la madurez de ese concreto (Figura 6). Con los datos obtenidos de resistencia y madurez, es posible obtener una curva característica de Madurez versus Resistencia para el diseño de concreto evaluado (Figura 7) [13].

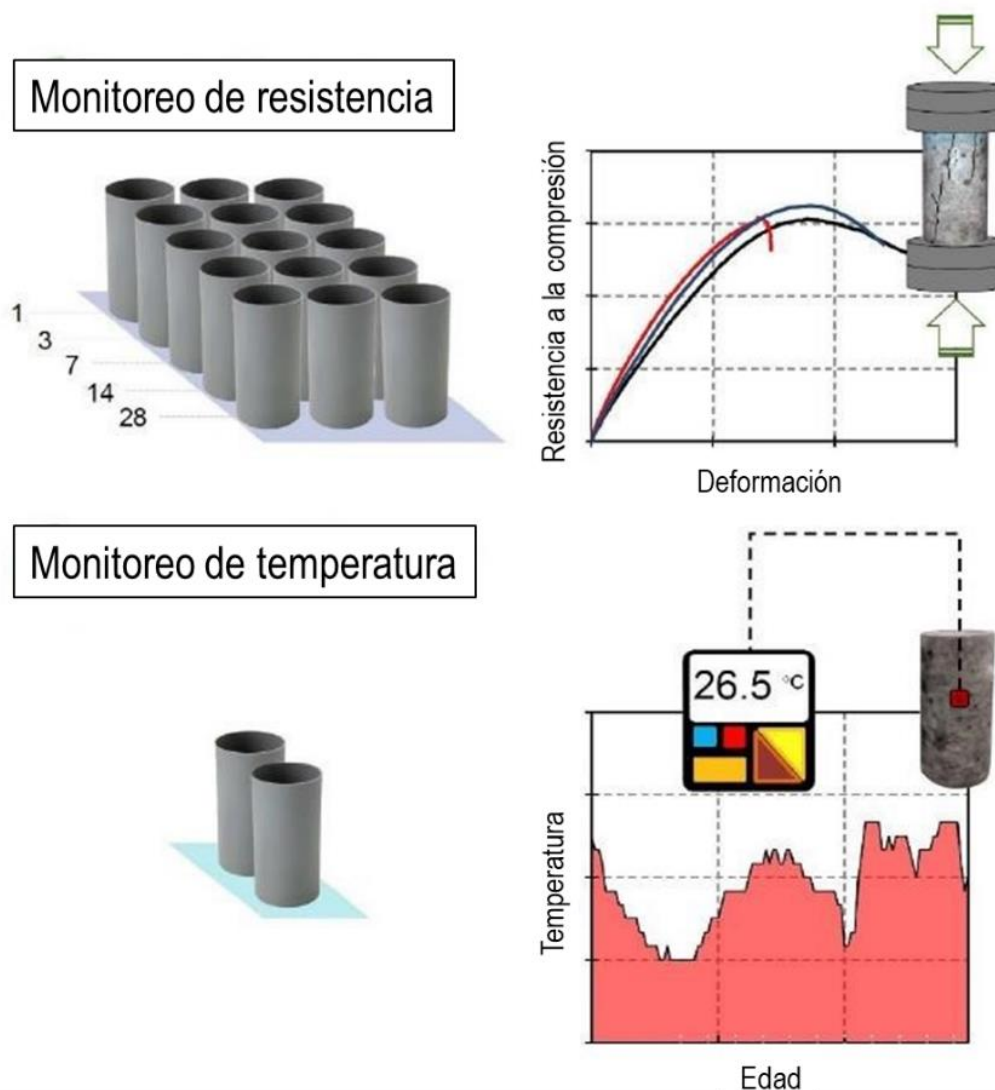


Figura 6: Fabricación de probetas para generación de curvas de correlación (Fuente: Internet)

Una vez obtenida la curva madurez-resistencia del concreto, se podrá monitorear la temperatura del concreto colocado y así mismo, determinar la madurez de las secciones de concreto de la obra. Esto se realiza correlacionando la madurez de este elemento con la resistencia de la curva ya establecida.

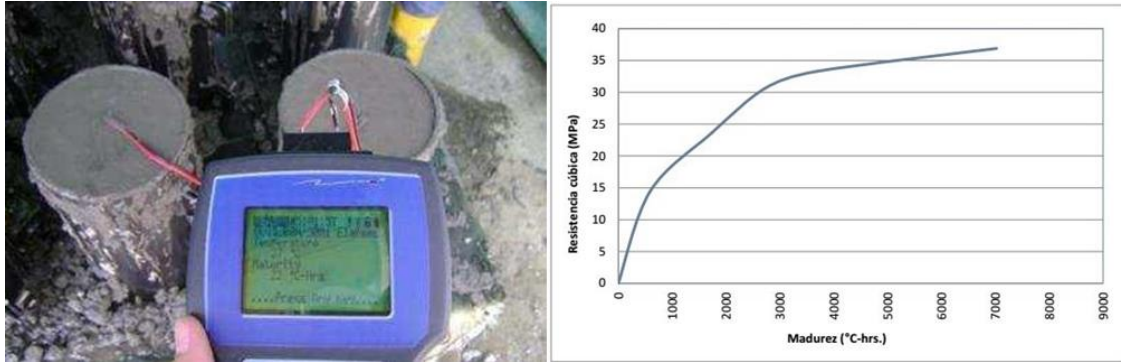


Figura 7: Curva de correlación Madurez – Resistencia (M. Aspilcueta, 2015)

Para obtener las lecturas de temperatura y madurez, se usan Termocuplas (sensores que registran temperaturas), las cuales se colocaran en el interior del concreto, en puntos donde se requiera realizar el monitoreo (Figura 8). Las termocuplas son bastante utilizadas para el registro de temperaturas cuando se realizan vaciados de concreto masivo.

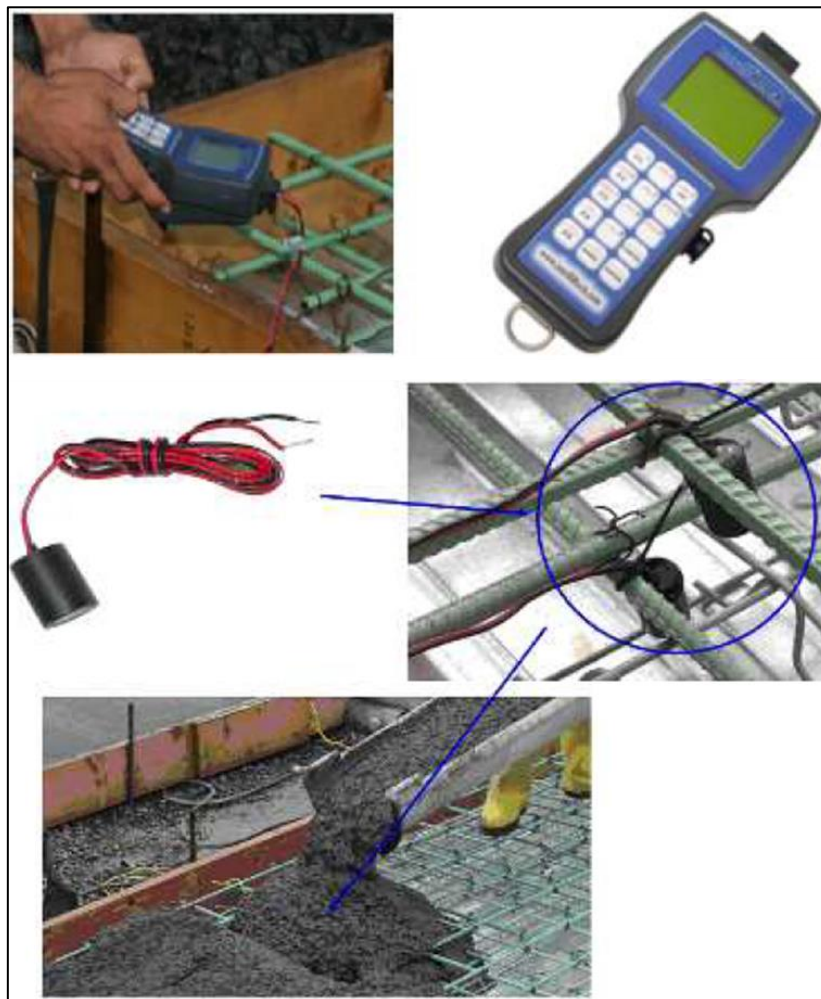


Figura 8: Colocación de termocuplas en las estructuras de concreto armado (Fuente: Internet)

4. Requerimientos mínimos para la colocación, compactación y curado del concreto

El American Concrete Institute (ACI) en sus diferentes comités brindan recomendaciones mínimas para la colocación, compactación y curado del concreto colocado en sitio, esto con el fin de obtener buenos resultados en la resistencia y durabilidad de la estructura. Los comités donde se describe estos requerimientos mínimos a cumplirse son:

- El ACI 304R [14] brinda recomendaciones generales para la preparación, transporte y colocación del concreto en obra;
- El ACI 309R [15] brinda recomendaciones generales para una correcta consolidación del concreto en obra y;
- El ACI 308R [16] brinda recomendaciones generales para un correcto curado del concreto.

En una estructura es necesario colocar las juntas de contracción o dilatación detalladas en los planos, esto es necesario para controlar la fisuración del concreto. Estas juntas son diseñadas según lo indicado en el ACI 224.3R [17] y pueden ser formadas antes o después de la colocación del concreto.

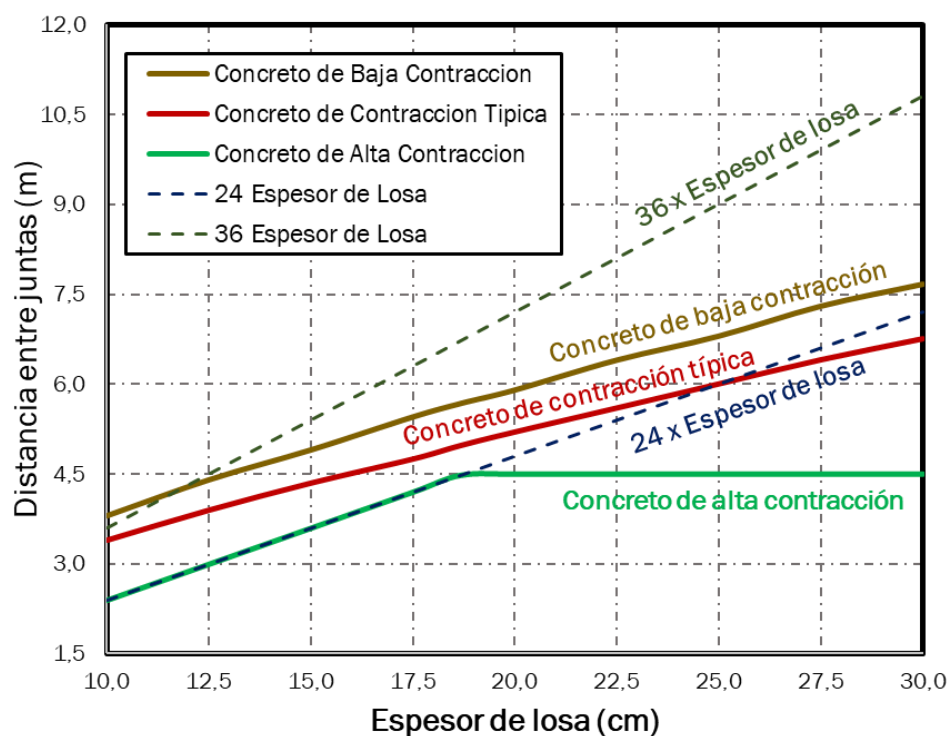


Figura 9: Espaciamento recomendado par juntas en losas no reforzadas (Adaptado del ACI 360R-10)

Las juntas de losas de concreto contra terreno se colocan según lo indicado en el ACI 360R [18] (Figura 9), estas juntas deben tener una profundidad de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{4}$ del espesor de la sección de concreto.

Las recomendaciones para el colocado, vibrado y curado del concreto son brevemente descritas a continuación:

4.1. Preparación, transporte y colocación del concreto

El ACI 304R describe los procedimientos para lograr buenos resultados en la dosificación y mezclado de ingredientes para el concreto, transportarlo al sitio y colocarlo. La especificación, producción y entrega del concreto se hacen de diversas maneras. Las normas ASTM C94 y NTP 339.114 indican especificaciones para la producción y entrega del concreto fresco

La ASTM C94 describe tres opciones para solicitar y especificar concreto:

- Opción A se basa en el desempeño. Esta requiere que el comprador especifique solo la resistencia a compresión, mientras que el productor del concreto selecciona las proporciones de la mezcla necesarias para la obtención de la resistencia a compresión requerida.
- Opción B se basa en prescripción. El comprador especifica las proporciones de la mezcla, incluyendo el contenido de cemento, agua y aditivos. En este caso, el comprador controla las proporciones de la mezcla y por lo tanto asume la responsabilidad del desempeño de la mezcla.
- Opción C es una opción mezclada. Esta requiere que el comprador especifique la resistencia a la compresión y el contenido mínimo de cemento. El productor de concreto selecciona las proporciones de la mezcla para cumplir con el requisito del comprador. El requisito de resistencia rige: se debe usar cemento en exceso del mínimo establecido si es necesario para lograr la resistencia requerida.

4.1.1. Dosificación del concreto

La dosificación es el proceso de medida por masa o por volumen de los integrantes del concreto e introducirlos en la mezcladora. Para producirse un concreto con calidad uniforme, los ingredientes se deben medir con precisión para cada tanda. La mayor parte del concreto premezclado se produce dosificando materiales sólidos por masa y líquidos por volumen. Este método de producción se aborda en la norma ASTM C94 (AASHTO M157). ASTM C685 [19], Especificación estándar para concreto

fabricado mediante dosificación volumétrica y mezcla continua (AASHTO M241), cubre la dosificación volumétrica y la mezcla continua en equipos diseñados para la producción volumétrica, comúnmente conocidos como mezcladores móviles [20].

La ASTM C94 requiere que los materiales se midan dentro de los porcentajes de precisión que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Tolerancias para la dosificación (ASTM C94)

INGREDIENTE	CANTIDAD MEDIDA	
Materiales Cementicios	± 1 % de la masa requerida, y la cantidad medida acumulada de todos los materiales cementicios también debe estar dentro del ± 1 % de la masa acumulada requerida en cada pesaje intermedio, si la masa es > 30 % de la capacidad de la báscula. Hasta $+4$ % y no menos de la masa requerida (-0 %), si la masa es < 30 % de la capacidad de la báscula*.	
Agregados	DOSIFICACION INDIVIDUAL	DOSIFICACION ACUMULADA**
	± 2 % de la masa requerida, si la masa es ≥ 15 % de la capacidad de la báscula. $\pm 0,3$ % de la capacidad de la báscula, si la masa < 15 % de la capacidad de la báscula.	± 1 % de la masa requerida, si la masa es ≥ 30 % de la capacidad de la báscula. $\pm 0,3$ % de la capacidad de la báscula, si la masa < 30 % de la capacidad de la báscula.
Agua	± 1 % de masa de agua	
Aditivos	Mayor de: ± 3 % de la masa requerida $\pm$ dosificación para 50kg de cemento.	

*Tamaño mínimo de tanda de 1m³.

** Masa de agregados totales (arena + piedra).

4.1.2. Mezclado del concreto

El concreto debe ser mezclado completamente hasta que sus ingredientes sean mezclados uniformemente. Los mezcladores no deben cargarse por encima de sus capacidades nominales de mezclado y deben operarse a la velocidad de mezclado y durante el periodo recomendado por el fabricante, ya sea en función de las revoluciones o del tiempo. Generalmente, se obtiene una mayor producción mediante dosificación por lotes para una carga, utilizando un mezclador más grande o mezcladoras adicionales, en lugar de acelerar o sobrecargar el equipo disponible. En caso las palas (aspas o paletas) de la mezcladora se vuelven desgastadas o recubiertas con concreto endurecido, el mezclado va a ser menos eficiente. Estas condiciones deben corregirse reemplazando las cuchillas o eliminando el concreto endurecido. [20]

Si el concreto se ha mezclado adecuadamente, las muestras tomadas de diferentes porciones de un lote deben tener esencialmente la misma resistencia, densidad, contenido de aire, asentamiento y contenido de agregado grueso, con cierta tolerancia para la variabilidad de las pruebas. El proceso para evaluar las mezcladoras por su capacidad para lograr una mezcla uniforme de concreto se indica en los anexos de la ASTM C94 [21] (AASHTO M157). Los requisitos para las diferencias máximas permitidas para evaluar la uniformidad de la mezcla dentro de una tanda de concreto recién mezclado son mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6: Requerimientos para la uniformidad del concreto (NTP 339.114)

ENSAYO	REQUERIMIENTO*
Densidad calculada en base a concreto libre de aire)	16 kg/m ³
Contenido de aire, volumen en el concreto	1,0%
Asentamiento:	
• Si el asentamiento promedio es de 100mm (4 pulg) o menos.	25 mm (1,0 pulg)
• Si el asentamiento promedio es de 100 a 150mm (4 a 6 pulg).	40 mm (1,5 pulg)
Contenido de agregado grueso, porción de masa de cada muestra retenida en un tamiz de 4,75mm (#4)	6,0%
Resistencia promedio a la compresión a los 7 días para cada muestra, ** basada en la resistencia promedio de todos los especímenes de prueba comparativos.	7,5%***

*Diferencia máxima permisible en los resultados de las pruebas de muestras tomadas de dos lugares de la tanda de concreto.

**Se moldearán y probarán no menos de 3 cilindros de cada una de las muestras.

***La aprobación de la mezcladora será tentativa, en espera de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de 7 días.

En el caso de que el mezclado de concreto sea de forma manual, se sugiere que la dosificación de concreto sea para una resistencia considerablemente más alta, esto debido al poco control de pesos/volumen de los materiales mezclados, la inexistente corrección de agua por humedad de los agregados y por ende a la poca uniformidad del concreto entre tandas. Las causas antes descritas generarán mezclas muy variables, tanto en estado fresco como en estado endurecido, con lo cual finalmente se obtendrán concretos de trabajabilidad y de resistencia mecánica poco uniforme. La variabilidad en la resistencia mecánica es la mas preocupante, debido a que es muy probable que gran parte del volumen de concreto producido tenga una resistencia menor a la requerida en la estructura.

4.1.3. Transporte del concreto

Planificar anticipadamente la colocación del concreto, ayuda en la elección del método de transporte más apropiado. Es necesario considerar las posibles 3 ocurrencias, que si suceden durante el transporte y la colocación podrían afectar seriamente la calidad del concreto colocado en la estructura. Estas ocurrencias son:

- Retrasos en la colocación del concreto
“La mayor productividad será lograda si se planea el trabajo para que se aprovechen al máximo, el personal y los equipos, que a su vez son seleccionados para reducir los retrasos durante la colocación del concreto”. A pesar de estas consideraciones, los retrasos en la colocación del concreto se podrían dar debido a la demora del concreto a la obra o la demora del contratista para colocar el concreto en la estructura.
- Perdida de trabajabilidad prematura del concreto
“El concreto empieza a endurecerse en el momento que se mezclan los materiales cementantes y el agua, pero el grado de endurecimiento que ocurre en los primeros 30 minutos no es problema”. El problema es la perdida de trabajabilidad del concreto antes de ser colocado en la estructura, esto se puede dar debido a retrasos en la llegada del concreto a obra, altas temperaturas ambiente, mala planificación del contratista, entre otras causas.
- Segregación del concreto
“Tendencia del agregado grueso de separarse del mortero, esto resulta en que parte de la mezcla tiene poca cantidad de agregado grueso y el resto tiene cantidad excesiva”. Esta segregación podría darse en caso exista una mala dosificación de la mezcla o se realice un inadecuado proceso de transporte y/o colocado del concreto.

La Tabla 7 [20] muestra los métodos y los equipos más comunes para el transporte del concreto son:

Tabla 7: *Métodos y equipos para el transporte y el manejo del concreto*

EQUIPO	TIPO DE TRABAJO MÁS ADECUADO PARA EL EQUIPO
Baldes (cubos, cubetas, tolvas)	Usados con las grúas, cablevías y helicópteros para la construcción de edificios y presas. Transporta el concreto directamente del punto de descarga de la mezcladora hasta el encofrado o hasta un punto secundario de descarga.
Bombas	Usadas para transportar concreto directamente desde el punto de descarga de la mezcladora hasta el encofrado o hasta un punto de descarga secundario.

Camión agitador	Usados para transporte de concreto para pavimentos, estructuras y edificios, La distancia de transporte debe permitir la descarga del concreto en 1,5 horas, pero este límite se puede ignorar bajo ciertas circunstancias. Es necesario una planta mezcladora.
Camión mezclador	Usados para transporte de concreto para pavimentos, estructuras y edificios, La distancia de transporte debe permitir la descarga del concreto en 1,5 horas, pero este límite se puede ignorar bajo ciertas circunstancias. Es necesario solo una planta dosificadora.
Camiones no agitadores	Usados para transportar concreto en distancias cortas sobre pavimentos lisos,
Canalones sobre camión mezclador	Para transportar concreto a un nivel interior, normalmente bajo el nivel del terreno, en todos los tipos de construcción de concreto.
Canalones de desnivel	Usados en la colocación del concreto en encofrados verticales de todos los tipos. Algunos canalones son tuberías producidas en lona flexible, mientras que otras son tuberías metálicas.
Carretillas manuales y motorizadas	Para transporte corto y plano en todos los tipos de obra, especialmente donde la accesibilidad al área de trabajo es restringida.
Esparcidores de tornillo	Usados para esparcir concreto en áreas grandes, tales como en pavimentos y losas de puentes.
Bandas transportadoras	Para transportar horizontalmente el concreto o a niveles inferiores o superiores. Normalmente se posicionan entre los puntos de descarga principal y secundario.
Bandas transportadoras montadas sobre camión mezclador	Para transportar el concreto a un nivel inferior, al mismo nivel o a un nivel más alto.
Grúas y balde	Es el equipo adecuado para el trabajo a grandes alturas sobre el nivel de terreno.
Mezcladoras de dosificación móvil	Usadas en la producción intermitente de concreto en la obra o donde se necesitan solo pequeñas cantidades
Pistolas neumáticas (Concreto lanzado)	Usadas donde se va a colocar el concreto en sitios difíciles y en secciones finas con áreas grandes.
Tremie (Tubo embudo)	Para la colocación del concreto bajo el agua.

Para elegir el mejor método de transporte de concreto (Figura 10), primero es necesario observar el tipo de obra, su tamaño físico, el volumen de concreto a colocar y el tiempo programado. Una evaluación más detallada del proyecto, ayuda a determinar las mejores alternativas para la elección del equipo para transportar el concreto, el cual debe trasladarlo de tal manera que evite segregación. Así mismo, los equipos de transporte deben tener la capacidad de mover una cantidad suficiente de concreto para evitar juntas frías.

CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO EN CLIMAS EXTREMOS



(a) Mezcladora manual



(b) Carretillas manuales



(c) Camión no agitador



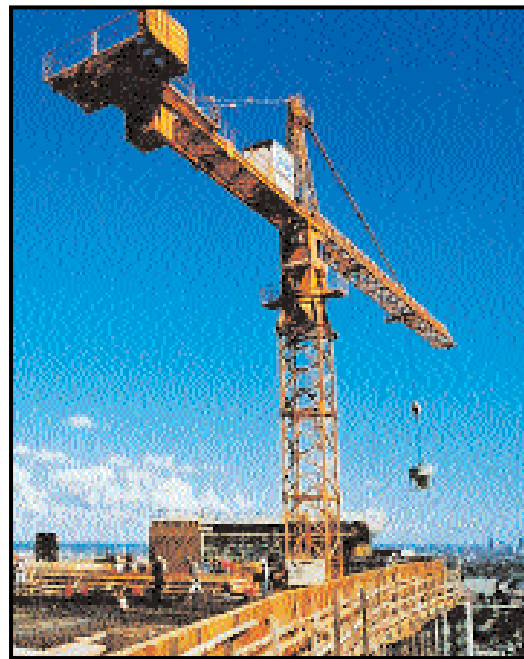
(d) Camión agitador



(e) Mezcladora de dosificación móvil



(f) Banda transportadora



(g) Grúas y balde

Figura 10: Medios de transporte de concreto

4.1.4. Colocado del concreto

Previamente a la colocación del concreto es necesario preparar la superficie y/o estructura donde se vaciará el concreto, en pavimentos o losas sobre terreno es necesario compactar previamente la superficie y humedecer la subrasante a fin de evitar que la superficie absorba mucha agua del concreto, esto es particularmente importante en climas cálidos. Así mismo, en climas fríos, no se debe colocar concreto sobre una superficie congelada. La nieve, hielo y otros escombros se deben retirar del interior de los encofrados antes de la colocación del concreto. [20]

En general, cuando el concreto se coloca sobre una superficie, previamente hay que limpiar bien la superficie y asegurarse de que no tenga escombros. Cuando se vaya a colocar concreto sobre una superficie de concreto ya endurecida, es recomendable escarificar la superficie de contacto ya existente para tener mejor adherencia entre las partes, esta superficie existente normalmente es escarificada horas después de haber endurecido. [20]

La limpieza y humedecimiento de los encofrados, el correcto armado y limpieza del acero de refuerzo, colocación del desmoldante en las superficies internas del encofrado y la colocación adecuada de los arriostres del encofrado, deben ser verificados antes de iniciar con la colocación del concreto.

Los equipos que serán usados para la colocación de concreto deben estar limpios y en buenas condiciones de uso. Es importante que el concreto sea colocado de modo continuo lo más cerca posible a su posición final, con el fin de evitar segregación debido a una manipulación excesiva previo a su colocación final en la estructura. [20]

En la construcción de losas, la colocación del concreto debe empezar a lo largo del perímetro de una extremidad del elemento, se debe descargar el concreto de forma constante sobre el concreto colocado previamente. No se debe vaciar el concreto en pilas separadas para luego nivelarlo y trabajarlo simultáneamente, ni tampoco se debe colocar el concreto en grandes pilas y moverlo horizontalmente hasta su posición final. Estas prácticas generan segregación y riesgo de generación de juntas frías en el elemento recién vaciado. [20]

En elementos de concreto con secciones verticales de gran espesor, como muros, columnas, cimentaciones o losas con espesores considerables, el concreto debe ser colocado de manera continua y en capas horizontales uniformes, cada capa se debe consolidar totalmente antes de colocar la próxima capa. Así mismo, se debe tener atención en la velocidad de vaciado, la cual debe ser lo suficientemente rápida para que el concreto colocado previamente no haya fraguado cuando se coloque la próxima capa de concreto. Es así que la colocación constante y la compactación adecuada del concreto, previenen juntas frías (unión provocada por el vaciado de concreto fresco sobre un

concreto ya fraguado) en la unión de los concretos vaciados en diferentes tiempos, lo cual provocaría planos débiles que podrían provocar fallas prematuras.

Durante el proceso de colocación del concreto y a fin de evitar segregación, no debemos moverlo horizontalmente, ya sea en las superficies de losas o dentro de los encofrados de elementos verticales.

Para descargar concreto a niveles inferiores, se pueden usar canaletas, los cuales ayudarían a mover el concreto sin segregarlo y salpicarlo en los aceros de refuerzo ni los encofrados. Es posible colocar concreto con asentamientos elevados dejándolo caer desde alturas de hasta 46 metros sobre los encofrados o aceros de refuerzo sin tener segregación de los componentes de concreto ni reducción de su resistencia, para lo cual se sugiere realizar ensayos previos que validen la mezcla de concreto que se utilizara en el proceso constructivo [20].

La colocación de concreto a través de ventanas (aberturas en los lados del encofrado) es una práctica bastante utilizada en elementos verticales y estrechos.

Cuando se coloca concreto en encofrados altos a velocidades elevadas, se puede acumular agua de exudación en la superficie superior, especialmente en concreto sin aire incorporado. La exudación puede disminuirse si se reduce la velocidad de colocación y usando mezclas de concreto con consistencias más secas, sobre todo en las secciones inferiores del encofrado.

En la colocación monolítica de vigas profundas, placas o columnas, es recomendable que la colocación del concreto sea pausada luego de la finalización de cada capa (cerca de una hora) a fin de disminuir la presión lateral que genera el concreto en el encofrado (ACI 347-14) [22]. Este retraso debe ser lo suficientemente corto como para permitir que la próxima capa de concreto se entrelace con la capa anterior a través de la vibración previniendo la formación de juntas frías y oquedades.

4.2. Consolidación del concreto

El ACI 309R describe los procedimientos para la realización de un correcto vibrado en las estructuras de concreto colocadas en sitio. Esta actividad es de suma importancia para eliminar el aire atrapado excesivo y perjudicial en el concreto recién colocado, siendo este aire atrapado bastante perjudicial para su resistencia y durabilidad debido a la generación de una alta permeabilidad en la masa de concreto. Si se deja endurecer en esta condición, el concreto será poroso, mal adherido al refuerzo y una mala apariencia. Es por esto que la mezcla debe consolidarse para que tenga las propiedades deseadas y esperadas en el concreto.

La consolidación es el proceso de inducir una disposición más cercana de las partículas sólidas del concreto o mortero recién mezclado durante la colocación mediante la reducción de vacíos, generalmente por vibración, centrifugación, varillaje, apisonamiento o alguna combinación de estas acciones.

Las mezclas más secas (con menor asentamiento) requieren un mayor esfuerzo para lograr una consolidación adecuada. Empleando aditivos químicos (ACI 212.3R) [23], se puede lograr consistencias que requieren un esfuerzo de compactación reducido con un contenido de agua más bajo. A medida que se reduce el contenido de agua del concreto, mejora la resistencia, permeabilidad y otras propiedades deseables del concreto, siempre que el concreto se compacte correctamente. Si no se proporciona una vibración adecuada para estas mezclas más secas, la resistencia y durabilidad del concreto disminuirán en función a la porosidad provocada por el inadecuado proceso. [15]

Existen equipos y métodos disponibles para una compactación rápida y eficiente del concreto en una amplia gama de condiciones de colocación. El concreto con un contenido de agua relativamente bajo se puede moldear fácilmente en una variedad ilimitada de formas, lo que lo convierte en un material de construcción muy versátil y económico. Cuando las buenas prácticas de vibración se combinan con un buen encofrado y buenos agentes desmoldantes, las superficies de concreto tienen una apariencia muy agradable (Figura 11 y Figura 12).

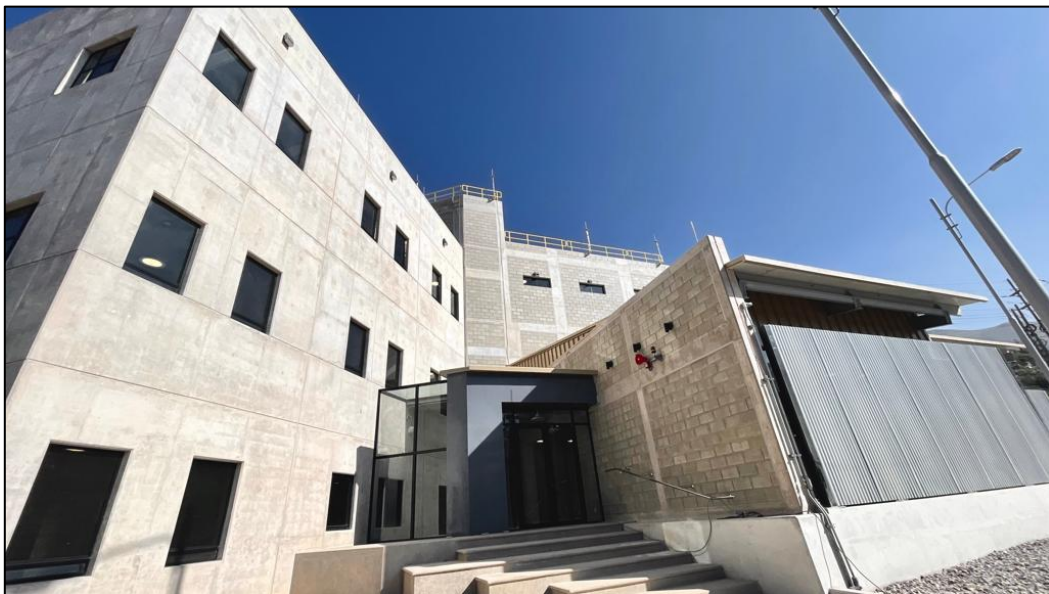


Figura 11: Fachada de concreto caravista



Figura 12: Superficie interna de concreto caravista

Los vibradores internos o de inmersión se usan normalmente para consolidar el concreto en muros, columnas, vigas y losas. Los vibradores internos consisten en un eje flexible con una cabeza vibratoria conectada a un motor por medio del mismo eje. La cabeza de este vibrador tiene un peso desbalanceado conectado al eje que gira de manera circular a alta velocidad. El motor se puede impulsar por electricidad, gasolina o aire. El cabezal vibratorio es normalmente cilíndrico con un diámetro que varía de $\frac{3}{4}$ a 7 pulg. [20]



Figura 13: Vibrador interno utilizado en compactación de losa (Fuente: Pag. Web TERRA Equipos)

El uso adecuado de los vibradores internos es importante para que se obtengan los mejores resultados. Los vibradores no deben ser utilizados para mover el concreto horizontalmente, puesto que podría causar segregación. [20]

La vibración externa consiste en vibradores colocados en los encofrados (Figura 14) o vibradores de superficie (plantillas vibratorias o llanas manuales vibratorias) (Figura 15).



Figura 14: Vibrador externo en encofrados (Fuente: Pag. Web BEKA)



Figura 15: Llanas manuales vibratorias (Fuente: Youtube – Javier Borgno, 2010)

Los vibradores de encofrados pueden ser eléctricos o neumáticos. Se deben colocar de manera espaciada para distribuir uniformemente la intensidad de vibración por todo el encofrado. Este

espaciamiento entre vibradores se determina a través de experimentación. Para obtener mejores resultados, en ocasiones es necesaria la operación de algunos de los vibradores externos en frecuencias diferentes y por lo tanto se recomienda que los vibradores externos tengan controles para que se regule la frecuencia y la amplitud. La duración de la vibración externa es más larga que la vibración interna, habitualmente entre 1 y 2 minutos. [20]

No se deben usar los vibradores externos en la parte superior del encofrado, esto podría generar oquedades en la sección de concreto (Esto puede ocurrir principalmente para secciones de encofrados delgados). Para estas zonas es recomendable usar el vibrador de inmersión (interno). [20]

Considerar que los vibradores de superficie de losas de concreto son menos eficientes que los vibradores internos, por lo cual se debe usar un vibrador de inmersión antes de la aplicación de la llana manual vibratoria. Las plantillas vibratorias se usan para consolidar losas de hasta 25cm. (10 pulg.) de espesor que no tengan acero de refuerzo o solo contengan acero de refuerzo por temperatura. [20]

Muy a menudo se presentan defectos causados por la falta de vibración o una vibración inadecuada:

- Oquedades; los cuales resultan cuando el espacio entre las partículas de agregado grueso no se llena con mortero. Las causas podrían ser por equipos defectuosos, procedimientos inadecuados de colocación, un concreto que contenga mucho agregado grueso o congestiónamiento por el refuerzo de acero.
- Cantidad excesiva de aire atrapado; es similar a las oquedades, pero menos severa. Los equipos de vibrado y los procedimientos de operación son las principales causas, pero las otras causas que originan las oquedades también son posibles.
- Rayado de arena; esto ocurre cuando la exudación excesiva retira el mortero a lo largo del encofrado. Una mezcla áspera con trabajabilidad deficiente por falta de mortero o de agregado fino puede causar el rayado de arena. Además, la segregación causada por el golpeo del refuerzo sin la vibración adecuada también puede contribuir para este tipo de defecto.
- Juntas frías; son discontinuidades resultantes del retraso en la colocación, que permite que una capa se endurezca antes de la colocación de la capa adyacente. Esta discontinuidad puede reducir la integridad estructural de la sección de concreto si las capas sucesivas no se unen adecuadamente. El concreto puede ser vibrado hasta antes del inicio del fraguado inicial, sin embargo, luego que haya superado el inicio de fraguado, el vibrado se debe interrumpir y la superficie se debe preparar apropiadamente para recibir el concreto.
- Franjas de colocación; son líneas oscuras entre la colocación de franjas adyacentes. Pueden ocurrir si, durante la vibración de la capa superior, el vibrador no penetra suficientemente en la capa inferior para que se entrelacen las capas.

- Fisuración por asentamiento; puede ocurrir cerca del inicio del fraguado cuando el concreto se asienta sobre el acero de refuerzo, en elementos relativamente profundos que no hayan sido adecuadamente vibrados. En el revibrado, al introducir el vibrador en el concreto por su peso propio, por última vez, puede eliminar estas fisuras.

Los defectos resultantes de la vibración excesiva son: (1) segregación, pues la vibración y la gravedad hacen que los agregados más pesados se sedimenten, mientras que los agregados más ligeros suban (2) rayado de arena, (3) pérdida de aire incluido en el concreto con aire incorporado, (4) flecha (deflexión) excesiva del encofrado o daño del encofrado y (5) falla del encofrado, causada por la presión excesiva resultante de la vibración en el mismo punto por mucho tiempo o debido a una velocidad más elevada de colocación del concreto, la cual es superior a la velocidad de diseño. La falta de vibración es el problema más común que la vibración excesiva [20] .

4.3. Curado del concreto

El ACI 308R define al curado como el proceso por el cual el concreto de cemento hidráulico madura y desarrolla propiedades de endurecimiento con el tiempo como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente agua y calor. Si bien todo el concreto cura a diversos niveles de madurez en el tiempo, la velocidad a la que se produce este desarrollo depende del entorno natural que rodea el concreto y de las medidas adoptadas para modificar este entorno limitando la pérdida de agua, calor o ambos, del concreto, o proporcionando externamente humedad y calor. El término “curado” también se usa para describir la acción tomada para mantener las condiciones de humedad y temperatura en una mezcla cementicia recién colocada para permitir que ocurra la hidratación del cemento hidráulico y, en caso corresponda, las adiciones cementicias para que puedan desarrollarse las potenciales propiedades del concreto (ACI 116R [24] y ASTM C125 [25]). (Una mezcla está adecuadamente dosificada y curada cuando se logran las propiedades potenciales de la mezcla e igualan o superan las propiedades deseadas del concreto). El periodo de curado se define como el periodo de tiempo que comienza en la colocación y se extiende hasta que se hayan desarrollado las propiedades deseadas del concreto. Los objetivos del curado son evitar la pérdida de humedad del concreto y, cuando sea necesario, suministrar humedad adicional y mantener una temperatura adecuada del concreto durante un periodo de tiempo suficiente. El curado adecuado permite que el material cementicio dentro del concreto se hidrate adecuadamente.

La hidratación se refiere a los cambios químicos y físicos que tienen lugar cuando el cemento portland o algún material cementicio reacciona con el agua. Tanto en profundidad como cerca de la superficie, el curado tiene una influencia significativa en las propiedades del concreto endurecido, como la

resistencia, la permeabilidad, la resistencia a la abrasión, la estabilidad del volumen y la resistencia al efecto hielo - deshielo.

El concreto de cemento portland es un material compuesto en el que los agregados se unen en una matriz porosa de pasta de cemento endurecido. A microescala, la pasta endurecida se mantiene unida por enlaces que se desarrollan entre los productos de la reacción del material cementante (cemento y/o adiciones cementicias) con el agua.

La reacción del cemento y el agua incluye procesos químicos y físicos que se conocen como hidratación del cemento. A medida que continua el proceso de hidratación, aumenta la fuerza de unión entre partículas y disminuye la porosidad entre partículas. En la hidratación se requiere agua para la formación química de los productos de gel y para llenar los microporos que se desarrollan entre los productos de gel a medida que se forman. El ratio y grado de hidratación depende de la disponibilidad de agua. Se ha mostrado que a medida que la pasta de cemento se hidrata a una Humedad Relativa más baja, la tasa de hidratación del cemento se reduce significativamente (Parrott y Killot, 1984). Se ha mostrado que el cemento hidratado a una HR=80% tiene una velocidad de hidratación del 10% con respecto a los especímenes hidratados a una HR=100%. Es así, que los procedimientos de curado aseguran que haya suficiente agua disponible para que el cemento mantenga la velocidad y el grado de hidratación necesarios para lograr las propiedades deseadas del concreto en el momento requerido [26].

El agua consumida en la formación de los productos del gel generado por la hidratación, se conoce como agua químicamente unida o agua hidratada, y su cantidad varía con la composición del cemento y las condiciones de hidratación. Se requiere una fracción de masa de agua líquida de entre 0.21 y 0.28 para hidratar una unidad de masa de cemento [26].

La cantidad de agua consumida en la hidratación del cemento portland es la suma del agua incorporada físicamente en las superficies del gel más el agua incorporada químicamente en los propios productos hidratados. Debido a que la hidratación solo puede ocurrir en un espacio saturado, el requerimiento total de agua para la hidratación del cemento es "alrededor de 0.44 g de agua por gramo de cemento, más el agua de curado que se debe agregar para mantener (los poros capilares) la pasta saturada" (Powers 1948). Siempre que haya suficiente agua disponible para formar los productos de hidratación, llene los espacios de gel de la capa intermedia y asegurarse que los espacios de reacción permanezcan llenos de agua, el cemento continuará hidratándose hasta que todo el espacio poroso disponible se llene con productos de hidratación o hasta que todo el cemento se ha hidratado [26].

Con el curado adecuado, el concreto se vuelve más impermeable y más resistente a esfuerzos, a abrasión y a congelamiento de hielo-deshielo. El desarrollo de las propiedades es muy rápido en los primeros días, para luego continuar lento por un tiempo indefinido. La Figura 16 y Figura 17 muestran

el desarrollo de la resistencia con relación a la edad, en concretos sujetos a diferentes periodos y temperaturas de curado. [26]

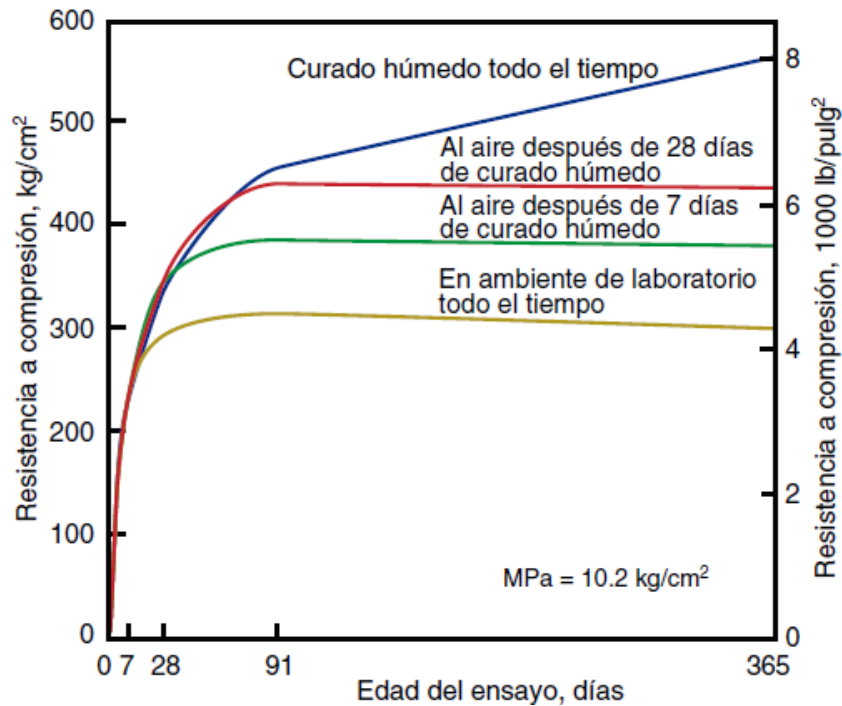


Figura 16: Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto (Gonnerman y Shuman, 1928)

Sin embargo, la clave para el desarrollo de la resistencia y la durabilidad del concreto no es el grado de hidratación del cemento, sino el grado de llenado de los poros entre las partículas de cemento con productos de hidratación. El llenado continuo de poros que acompaña al curado húmedo sostenido conduce a un concreto más denso, más resistencia y menos permeable. Sin embargo, el grado de llenado de los poros depende no solo del grado de hidratación del cemento, sino también del volumen inicial de poros en la pasta, de ahí la importancia combinada de la disponibilidad de agua de curado y la relación agua-cemento inicial (a/c). [20]

El volumen de poros entre las partículas de cemento en la pasta fresca, originalmente es ocupado por el agua de mezclado. A medida que el volumen de agua de la mezcla disminuye en relación con el volumen del cemento, la porosidad inicial de la pasta también disminuye. Por esta razón las pastas con menor a/c tienen una porosidad inicial menor, requiriendo un menor grado de hidratación para lograr un determinado grado de llenado de poros. Esto se aprecia en la Figura 18, que muestra los efectos combinados del curado y la relación a/c. Para ensayos particulares de especímenes de morteros, se logró una tasa de permeabilidad de 2.4 kg/m²/h después de 21 días de curado húmedo para una relación a/c=0.8. El mismo nivel de permeabilidad y el mismo grado de llenado de poros se alcanzó después de 10 días para una relación a/c=0.64 y 2.5 días para una relación a/c=0.50 [26].

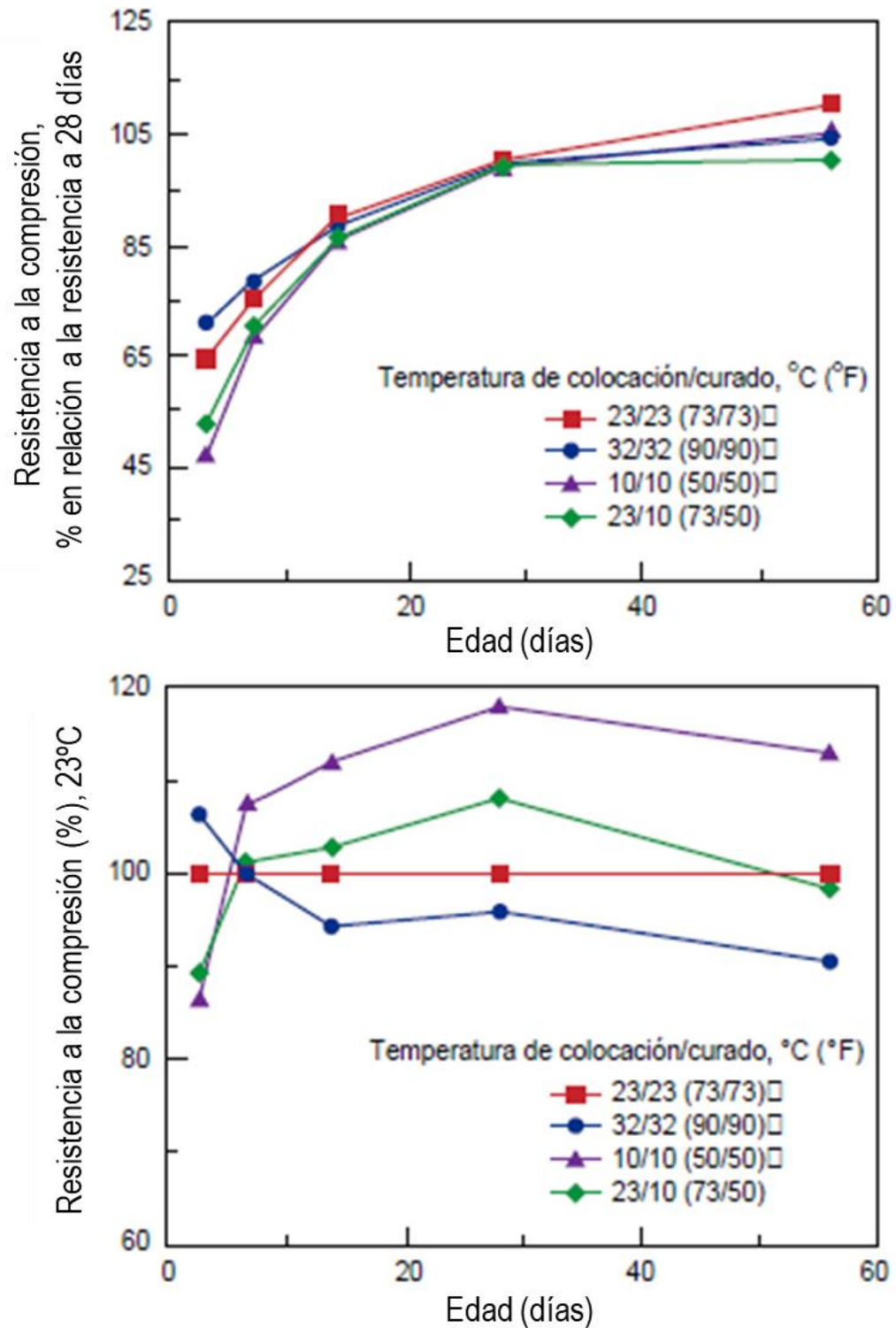


Figura 17: Efecto de la temperatura de curado sobre el desarrollo de la resistencia (superior) en relación a la resistencia a los 28 días y (inferior) relativa a la resistencia del concreto a 23°C (Burg, 1996)

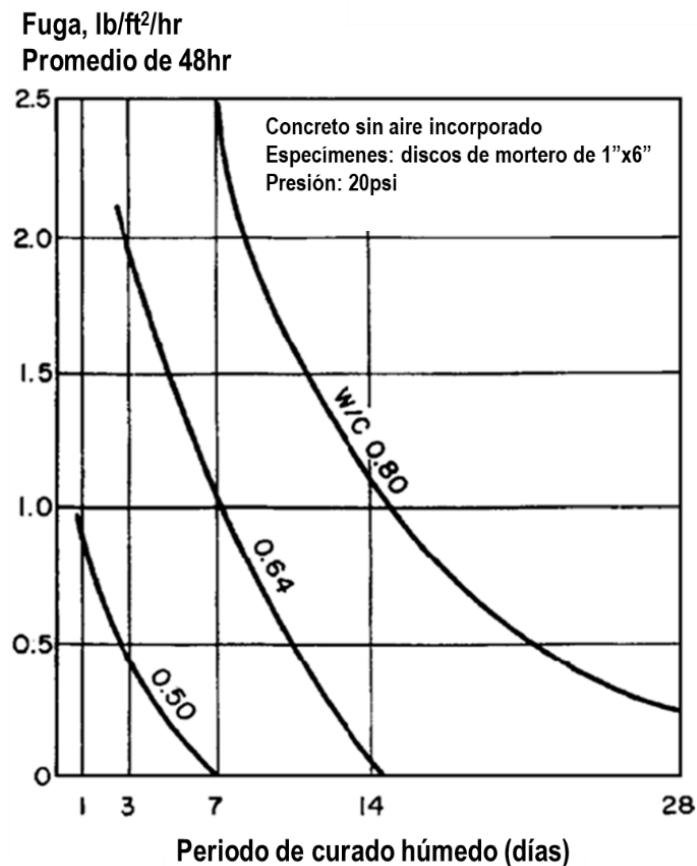


Figura 18: Influencia del curado en la permeabilidad al agua en especímenes de mortero (Kosmatka y Panarese, 1988)

El concepto de madurez es introducido para evaluar el desarrollo de la resistencia cuando hay variación en la temperatura de curado del concreto. La madurez es el resultado de la edad del concreto y la temperatura promedio de curado, la cual es superior a una cierta temperatura base. Esto se explica mejor en el capítulo 3 de este documento. Es así, que es necesario proteger el concreto para que su temperatura sea favorable para su hidratación y para que no haya pérdida de humedad durante el periodo de endurecimiento en las primeras edades.

4.3.1. Requerimientos mínimos de curado

El curado debe continuarse el tiempo suficiente para garantizar que el 100 % del valor especificado para las propiedades del concreto se desarrollen en un periodo de tiempo razonable después de que se hayan terminado las medidas de curado establecidas, especialmente para las propiedades mecánicas como la resistencia o el módulo de elasticidad, y para la durabilidad relacionada a propiedades, como baja permeabilidad, resistencia a la abrasión o descamación, absorción superficial inicial o resistencia a la congelación y descongelación. Una vez que finalizan las medidas de curado y

el concreto está completamente expuesto al entorno natural, la velocidad a la que continúan desarrollándose las propiedades mecánicas o relacionadas con la durabilidad podría reducirse significativamente. En el caso de las propiedades del concreto en la zona afectada por el curado, el desarrollo posterior puede cesar por completo al secarse la superficie cercana. Por estas razones, siempre es mejor mantener el curado establecido hasta que se hayan logrado las propiedades deseadas en el lugar. La terminación del curado establecido en algún momento antes del desarrollo completo de las propiedades deseadas puede ser razonable cuando se basa en la experiencia con una mezcla de concreto dada en un ambiente dado. [16]

Por lo tanto, cuando la resistencia es el criterio esencial de desempeño, es común mantener las medidas de curado hasta que se haya logrado un mínimo del 70% de la resistencia especificada a los 28 días f'_c (ACI 301). Cuando el desempeño de la estructura requiere que la resistencia en el lugar u otra propiedad del concreto alcance el 100% del valor especificado, el curado debe extenderse hasta que las pruebas demuestren que se ha alcanzado la propiedad especificada. Sin embargo, la temperatura y el contenido de humedad de las probetas curadas en laboratorio pueden diferir significativamente del concreto colocado que deben representar. La resistencia in situ se puede verificar mediante pruebas como resistencia a la penetración (ASTM C803) [27], pruebas de extracción (ASTM C900) [28], medición de madurez (ASTM C1074) [8] o pruebas de muestras cilíndricas moldeadas in situ (ASTM C873) [29]. El ACI 228.1R [30] describe los procedimientos a implementar estas pruebas de sitio. [16]

En el ítem 3.2.3 “Duration of curing” del ACI 308R-01 [16] “Guide to curing Concrete” indica que “Cuando la temperatura ambiente media diaria es superior a 5°C, el curado debe ser continuo durante el periodo mostrado en la Tabla 8 o durante el tiempo necesario para alcanzar un mínimo del 70% de la resistencia a la compresión especificada (o a la flexión, si corresponde), el período que sea más largo. Si el concreto se coloca a temperaturas ambiente media diaria de 5°C o menos, se deben tomar las precauciones recomendadas en el ACI 306R. El criterio basado en la resistencia debe reemplazarse o aumentarse con un criterio relacionado con la durabilidad cuando corresponda”.

Tabla 8: Tiempo mínimo recomendado para el curado de las mezclas de concreto (ACI 308R-01)

Tipo de cemento (ASTM C150)	Periodo mínimo de curado
Tipo I	7 días
Tipo II	10 días
Tipo III	3 días
Tipo IV o Tipo V	14 días
Cemento mezclado con material cementante según la ASTM C595, ASTM C845 y ASTM C1157	Variable

La duración requerida del curado para lograr los niveles deseados de resistencia, durabilidad o ambos, depende de la combinación química y finura de los materiales cementicios, relación a/c, proporciones de la mezcla, características de los agregados, mezclas químicas y minerales, la temperatura del concreto y la efectividad del método de curado para retener la humedad en el concreto. Este conjunto complejo de factores hace que sea difícil establecer con confianza el tiempo mínimo requerido de curado para lograr el nivel deseado de desempeño con la mezcla particular en cuestión. Para concretos con y sin puzolanas y aditivos químicos, una duración mínima de curado de 7 días suele ser suficiente para alcanzar aproximadamente el 70% de la resistencia a la compresión especificada. Sin embargo, no es necesariamente cierto que las características de durabilidad, como la resistencia a la abrasión o la absorción superficial, alcancen niveles satisfactorios en el mismo tiempo mínimo. Ciertas combinaciones de cemento y aditivos, y la alta temperatura probablemente reduzcan el tiempo requerido a menos de 7 días, mientras que otras combinaciones de materiales, temperaturas más bajas del concreto, o ambos, extenderán el tiempo requerido. [16]

En general, cuando el desarrollo de una determinada resistencia o durabilidad es crítico para el desempeño del concreto durante la construcción o en servicio, la duración mínima del curado debe establecerse sobre la base de pruebas de las propiedades requeridas realizadas con la mezcla de concreto en cuestión. Es responsabilidad del diseñador y especificador determinar qué propiedades son críticas para el desempeño del concreto bajo las condiciones de servicio previstas y desarrollar un programa de prueba para verificar que el curado se haya mantenido el tiempo suficiente para lograr tales propiedades. [16]

Cuando las condiciones climáticas naturales de temperatura, humedad y precipitación se combinan para causar una evaporación neta cero de la superficie del concreto, no se requieren medidas de curado para mantener un contenido de humedad adecuado mientras permanezcan esas condiciones naturales. Sin embargo, en la mayoría de los climas, tales condiciones pueden cambiar cada hora o cada día, y rara vez persisten durante el tiempo requerido para fomentar el desarrollo de las propiedades requeridas del concreto. Por lo tanto, es necesario tomar medidas para proteger el concreto contra la pérdida de humedad. Cuando no hay datos disponibles de la experiencia, los valores no se especifican para la resistencia o durabilidad del concreto, y cuando no se realizan pruebas para verificar la resistencia en el lugar, el concreto debe mantenerse por encima de 10 °C y mantenerse húmedo durante los períodos mínimos de curado que se muestran en la Tabla 8. La Tabla 8 no está destinada a aplicarse al curado acelerado a alta temperatura, alta presión o ambas. [16]

4.3.2. Métodos y materiales de Curado

Se puede mantener el concreto húmedo a través de tres métodos de curado:

- Métodos que mantienen el agua de la mezcla (agua de mezclado) presente durante los periodos iniciales de endurecimiento. Entre estos se incluyen el encharcamiento o inmersión, rociado, aspersión o niebla y coberturas saturadas de agua. Estos métodos permiten un cierto enfriamiento a través de la evaporación, que es beneficioso en clima caluroso.
- Métodos que reducen la pérdida del agua de la mezcla de la superficie de concreto. Esto se puede hacer cubriéndose el concreto con papel impermeable, plástico o a través de la aplicación de compuestos formadores de membrana.
- Métodos que aceleran el desarrollo de la resistencia a través del suministro de calor y humedad adicional al concreto. Esto se realiza normalmente con vapor directo, serpentines donde fluye agua caliente (Figura 19) o encofrados calentados.



Figura 19: Tuberías que transfieren calor a través de la circulación de una solución de glicol/agua (PCA).

El método o la combinación de métodos elegido depende de factores como la disponibilidad de los materiales de curado, el tamaño, forma y edad del concreto, las instalaciones de producción, apariencia estética y economía. Como resultado, el curado normalmente implica una serie de procedimientos usados en momentos específicos a medida que el concreto madura.

- Encharcamiento e inmersión
- Rociado o Aspersión
- Coberturas húmedas
- Papel impermeable

CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO EN CLIMAS EXTREMOS

- Hojas de plástico
- Compuestos de curado formadores de película
- Curado por Humedad Interna
- Encofrados dejados en el lugar
- Curado a vapor
- Mantas o cubiertas aislantes



Figura 20: Métodos de curado del concreto

5. Colocación del concreto en climas fríos

Según el ACI 306 [5], el clima frío se define como un período cuando, por más de 3 días consecutivos, existen las siguientes condiciones:

- La temperatura promedio diaria del aire es inferior a 5 °C y
- La temperatura del aire no supera los 10 °C durante más de la mitad de cualquier período de 24 horas.

La temperatura promedio diaria del aire es el promedio de las temperaturas más altas y más bajas que ocurren durante el período de medianoche a medianoche. El clima frío, generalmente comienza durante el otoño y continúa hasta la primavera. El clima frío existe cuando la temperatura del aire ha descendido o se espera que descienda por debajo de 4°C durante el período de curado. El período de curado se define como el tiempo necesario para evitar que el concreto se vea afectado por la exposición al frío.

El concreto desarrolla muy poca resistencia a bajas temperaturas. Por esto, el concreto debe ser protegido ante los efectos perjudiciales de la congelación hasta que su grado de saturación se haya reducido suficientemente por el proceso de hidratación. Esta reducción de la saturación se logra aproximadamente cuando el concreto desarrolle una resistencia de 35 kg/cm² (Powers 1962), lo cual ocurre dentro de las primeras 24 horas luego de su colocación bajo temperaturas normales y relaciones a/c menores a 0.60. Se pueden dar disminuciones importantes de la resistencia mecánica hasta cerca de un 50%, si un concreto se congela pocas horas después del colocado de concreto o antes que desarrolle una resistencia a la compresión de 35 kg/cm² (McNeese 1952).

Un clima frío podría causar diversos problemas en el concreto, algunos de estos problemas son mencionados a continuación:

- Bajas resistencias del concreto
- Congelamiento del concreto a edad temprana
- Lento desarrollo de la evolución de la resistencia mecánica del concreto
- Disminución de la durabilidad del concreto

La temperatura afecta la velocidad de hidratación del cemento, a bajas temperaturas se retarda la hidratación, el cual causa un retardo en el endurecimiento y la evolución de la resistencia del concreto. La Figura 21 y Figura 22 muestran la evolución de la resistencia a la compresión del concreto con respecto a su temperatura de colocación y curado. En la Figura 22 se aprecia que los concretos colocados y curados a 4°C y a 13°C presentaron resistencias más bajas en la primera semana, pero después de 28 días cuando

los especímenes se curaron a 23°C, un año después, las resistencias del concreto fueron un poco mayores que los especímenes curados a 23°C desde un inicio [20].

Se puede obtener concretos con altas resistencias iniciales si se utiliza cemento de alta resistencia inicial (Tipo III o HE), tal cual se observa en la Figura 23. Se aprecia que usando el cemento tipo III se obtienen altas resistencias en los primeros 7 días, así sea curando el concreto a 4°C. En climas fríos, las ventajas del cemento de alta resistencia inicial son más marcada y persisten por más tiempo que en altas temperaturas [20].

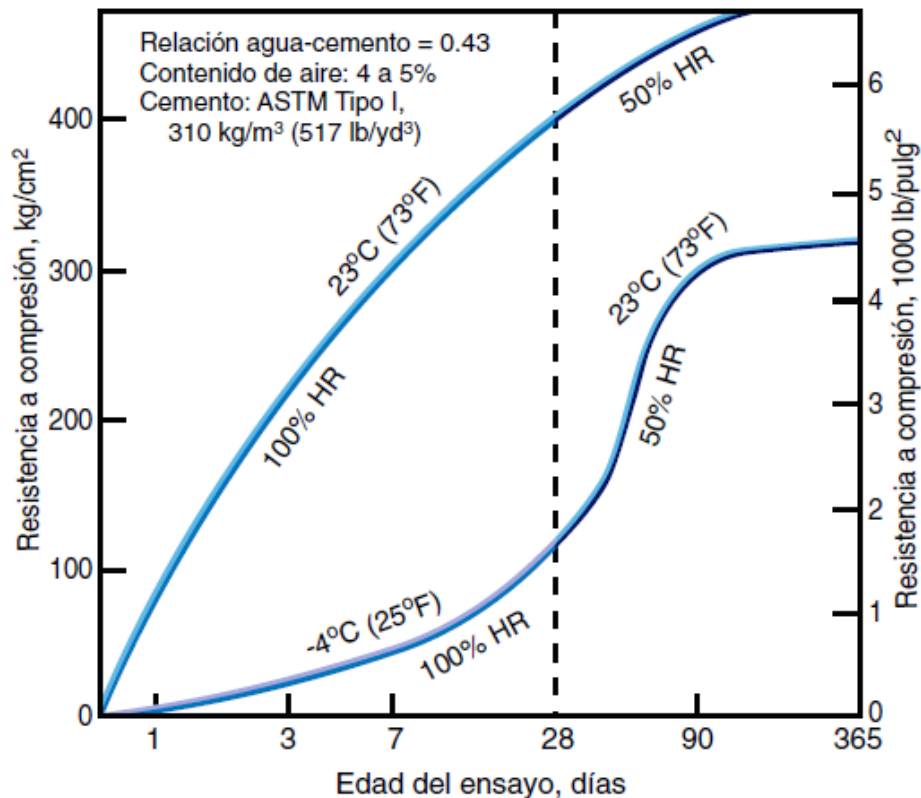


Figura 21: Efecto de la temperatura sobre el desarrollo de la resistencia del concreto (PCA)

El concreto genera calor durante su endurecimiento como consecuencia del proceso químico (calor de hidratación) a través del cual el cemento reacciona con el agua para formar una pasta endurecida y estable. La cantidad y tasa de liberación varían con el tipo de cemento. Además, las dimensiones de la sección de concreto, temperatura ambiente, temperatura inicial del concreto, la relación agua-cemento, los aditivos y su composición, finura y cantidad de material cementante también afectan el calor de hidratación. Es así que el calor de hidratación es muy importante en climas fríos, pues contribuye para que se logre una temperatura adecuada de curado, sin que sean necesarias otras fuentes temporales de calor [20].

El concreto debe ser colocado a una temperatura adecuada y se debe tener en cuenta los elementos con los que se tendrá contacto (encofrados, acero de refuerzo y terreno), los cuales no deben estar congelados.

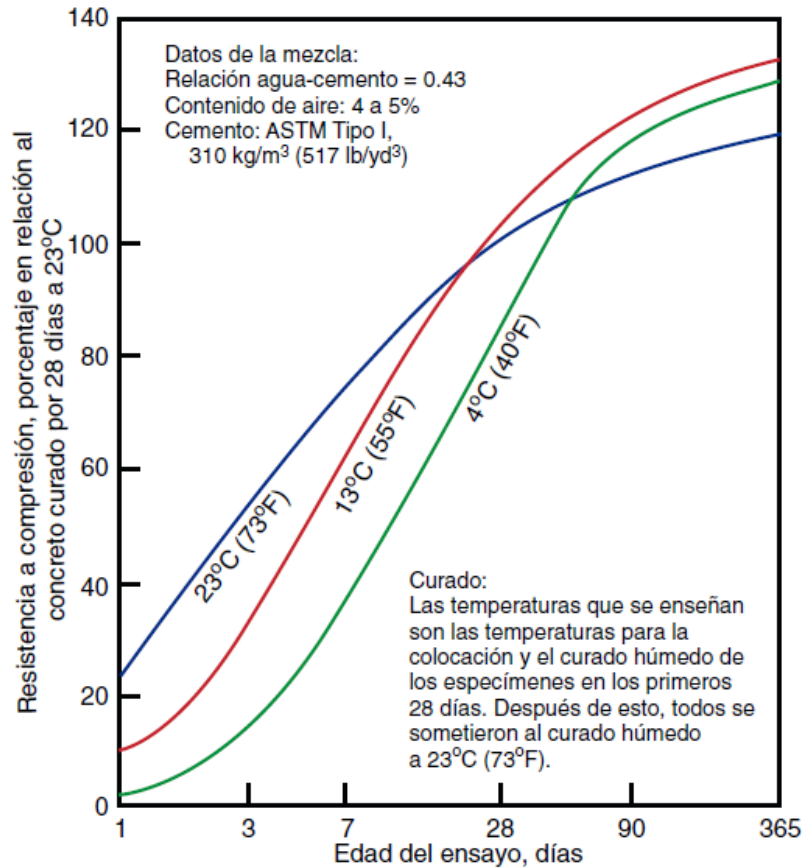


Figura 22: Efecto de las bajas temperaturas sobre la evolución de la resistencia a compresión (PCA)

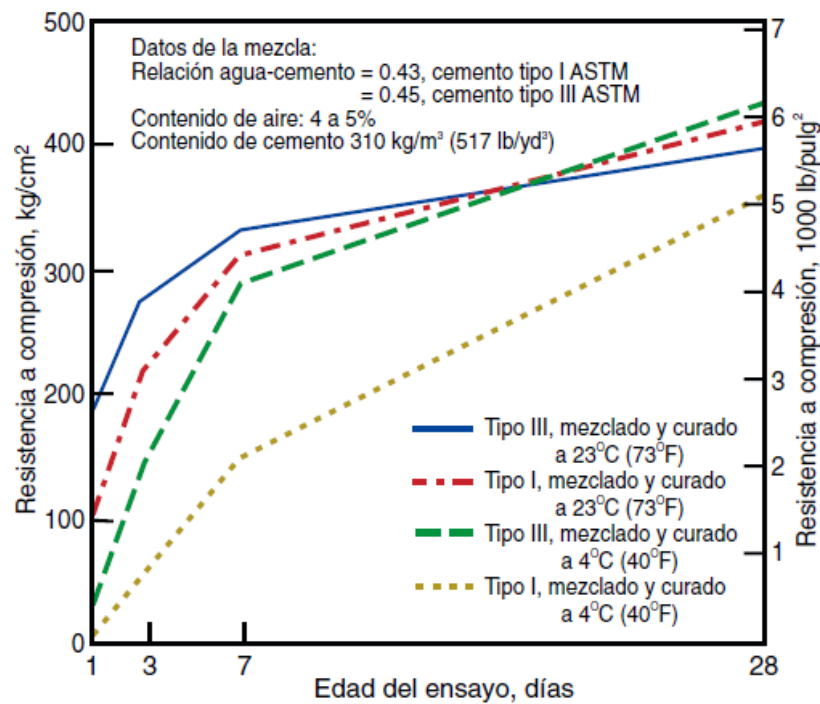


Figura 23: Comparación entre las resistencias tempranas de mezclas de concreto con cementos I y III, curados a 4°C y a 23°C (Klieger, 1958)

El concreto colocado durante clima frío debe desarrollar suficiente resistencia y durabilidad para satisfacer los requisitos de servicio previstos cuando se produce, coloca y protege adecuadamente. El grado de protección necesario aumenta a medida que desciende la temperatura ambiente [20].

Según el ACI 306, durante los periodos que no se definen como de clima frío, como el otoño o la primavera en climas fríos o el invierno en climas templados, se debe tomar precauciones para proteger todas las superficies de concreto contra el congelamiento inesperado durante al menos las primeras 24 horas posteriores a su colocación. El concreto protegido de esta manera estará a salvo de daños por congelación a una edad temprana. Sin embargo, la protección contra el congelamiento durante las primeras 24 horas no asegura una tasa satisfactoria de desarrollo de resistencia, particularmente cuando sigue un clima más frío. Se debe continuar con la protección y el curado durante el tiempo suficiente y a la temperatura recomendada por la Tabla 9 para producir la resistencia especificada para el desencofrado o la seguridad estructural.

Tabla 9: Recomendaciones de temperaturas del concreto (ACI 306)

Ítem	Temperatura Ambiente	Tamaño de la sección (espesor mínimo)			
		< 300 mm	300 a 900 mm	900 a 1800mm	> 1800 mm
1	-	Temperatura mínima del concreto al colocarlo y mantenerlo			
		13°C	10°C	7°C	5°C
		Temperatura mínima del concreto fresco durante el clima indicado*			
2	Mayor que -1°C	16°C	13°C	10°C	7°C
3	-18°C a -1°C	18°C	16°C	13°C	10°C
4	Menor que -18°C	21°C	18°C	16°C	13°C
5	-	Caída de temperatura gradual máxima permisible en las primeras 24 horas después del final de la protección			
		28°C	22°C	17°C	11°C

*Para climas más fríos, se proporciona un mayor margen de temperatura entre el concreto mezclado y la temperatura mínima requerida del concreto fresco en sitio.

Si se tiene una fundación de concreto, con un espesor de 1.5m. y se colocara concreto a una temperatura ambiental de 2°C, siguiendo lo indicado en la Tabla 9, el concreto fresco debe estar a una temperatura mínima de 10°C y curarlo a una Tmin de 7°C o en el caso que se tenga que vaciar una losa de concreto de 0.2m de espesor a una temperatura ambiental de -10°C, siguiendo lo indicado en la Tabla 9, el concreto fresco debe estar a una Tmin de 18°C y curarlo a una temperatura mínima de 13°C.

El agua de la mezcla debe estar disponible a una temperatura constante, regulada y en una cantidad que evite variaciones notorias en la temperatura del concreto entre tandas. La temperatura del concreto afecta la velocidad en la pérdida de asentamiento y esto puede afectar el desempeño de la mezcla.

Se ha reportado que el contacto prematuro de agua muy caliente con cantidades concentradas de cemento causa fraguado repentino y bolsas de cemento en los camiones mezcladores. Cuando se utilice agua a más de 80°C, será necesario ajustar el orden de mezclado de los ingredientes. Puede ser útil agregar el agua caliente y el agregado grueso antes que el cemento, y detener o retardar la adición de agua a medida que se carga el cemento y el agregado. [5]

Si se dosifica el cemento por separado del agregado, el mezclado puede ser complicado. Para facilitar el mezclado, se puede colocar $\frac{3}{4}$ del agua caliente en la mezcladora antes o durante la introducción de los agregados. Para evitar bolonería al final de la mezcladora, agregue primero el agregado grueso. Añadir el cemento después de los agregados y finalmente, colocar el $\frac{1}{4}$ restante del agua en la mezcladora a un ritmo moderado. [5]

Cuando los agregados están libres de hielo y grumos congelados, así mismo, la temperatura ambiente es moderada, entonces, la temperatura deseada del concreto durante el mezclado puede alcanzarse simplemente calentando el agua de la mezcla. Cuando las temperaturas del aire están constantemente por debajo de -4°C, normalmente también es necesario calentar los agregados (Por ejemplo: rociando el agregado con agua caliente). Rara vez es necesario calentar los agregados a temperaturas mayores a 15°C si el agua de la mezcla se calienta a 60°C. Si el agregado grueso está seco y libre de escarcha, hielo y/o grumos congelados, se pueden alcanzar temperaturas adecuadas del concreto recién mezclado aumentando la temperatura de la arena, que rara vez debe estar por encima de los 40°C, si el agua de la mezcla se calienta a 60°C. La temperatura de los agregados debe tomarse en la superficie, el centro y el fondo de la pila para luego promediarse y determinar el alcance de las medidas de calentamiento adicionales que deben considerarse. [5]

Cuando se proporciona un curado y una protección adecuada, pero no se toman medidas para determinar el nivel de desarrollo de la resistencia, es recomendable estimaciones conservadoras de la resistencia del concreto. La Tabla 10 se puede usar como una guía conservadora para determinar la duración recomendada de curado y protección a 10°C o 21°C para lograr diferentes porcentajes de la resistencia estándar de curado a los 28 días. [5]

Tabla 10: Duración de protección recomendada para el $\%f'_{cr}$ a 28 días con curado estándar (ACI 306)

% de resistencia a 28 días con curado estándar	A 10°C (días)			A 21°C (días)		
	Tipo de cemento			Tipo de cemento		
	I	II	III	I	II	III
50	6	9	3	4	6	3
65	11	14	5	8	10	4
85	21	28	16	16	18	12
95	23	35	26	23	24	20

5.1. Diseño de mezclas de concreto en climas fríos

Cuando se construye en climas fríos, es deseable tener una alta resistencia a edades tempranas a fin de reducir el periodo de tiempo durante el cual se requiere un microclima para generar calor. El sobre costo del concreto de alta resistencia inicial se compensa con la posibilidad de poder rotar más rápido los encofrados, ahorro debido a la disminución de tiempo usando un microclima, fraguado más rápido del concreto, lo cual permite el pronto uso de la estructura. El concreto de alta resistencia inicial se puede obtener con el uso de uno o la combinación de varios de los siguientes puntos:

- Cemento de alta resistencia inicial
- Cemento portland adicional (60 a 120 kg/m³)
- Aditivos acelerantes de fragua

No se debe usar aditivos acelerantes donde exista un alto potencial de corrosión (concreto armado), ni emplear acelerantes como sustitutos del curado adecuado o de la protección en contra de la congelación.

El aire incorporado debe usarse siempre que se vaya a construir en escenarios con climas donde existan épocas de heladas, esto para contrarrestar el efecto negativo que provoca el congelamiento-deshielo en la resistencia y durabilidad del concreto. El aire incorporado favorece la capacidad de absorber tensiones debidas a la formación de hielo dentro del concreto.

Que el concreto se dañe por causa de los ciclos de congelamiento y deshielo depende de la cantidad de agua presente en los poros de concreto en el momento del congelamiento (Powers 1975).

La cantidad de agua presente puede describirse en términos del grado de saturación del concreto. Si el grado de saturación es suficientemente alto, habrá suficiente agua en los poros para producir esfuerzos de tracción interna suficientemente grandes para causar fisuración cuando el agua se congela y se expande. No se necesita que la totalidad del miembro esté saturada para que sea susceptible de dañarse.

El ACI 318-19 y la E.060 brindan recomendaciones mínimas para el diseño de concreto que será expuesto a condiciones de congelamiento-deshielo (Categoría de exposición F según el ACI 318-19). La categoría de exposición F se subdivide en cuatro clases de exposición (Tabla 11).

Tabla 11: Características mínimas del concreto en función a la exposición de congelamiento-deshielo.

Clase	a/c máximo	f'c mínimo (MPa)	Condición
F0	N/A	17	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo
F1	0,55	24	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad
F2	0,45	31	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto frecuente con la humedad
F3	0,40	35	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto frecuente con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes

El concreto expuesto a congelamiento y deshielo clasificado con las clases de exposición F1, F2 o F3 debe tener aire incorporado, el contenido de aire debe cumplir lo indicado en la Tabla 12.

Tabla 12: Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo

TNM (mm)	Contenido de aire (%)	
	F1	F2 y F3
9,5	6,0	7,5
12,5	5,5	7,0
19,0	5,0	6,0
25,0	4,5	6,0
37,5	4,5	5,5
50,0	4,0	5,0
75,0	3,5	4,5

Tabla 13: Contenido total de aire incorporado en concreto lanzado expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo

Tipo de mezcla	Lugar del muestreo	Objetivos de contenido de aire buscado (%)		
		F1	F2	F3
Concreto lanzado mezcla húmeda	Antes de la colocación	5	6	6
Concreto lanzado mezcla seca	En el sitio	N/A	N/A	4,5

Para valores de $f'c \geq 35\text{MPa}$, se permite la reducción del contenido de aire en 1.0% a lo indicado en la Tabla 12 y Tabla 13.

La resistencia del concreto endurecido expuesto a ciclos de hielo y deshielo en condición húmeda se mejora mucho con el uso intencional de aire incorporado. Debido a que el agua de los concretos en medios húmedos se congela, se producen presiones osmótica e hidráulica en las capilaridades y poros de la pasta de cemento y en el agregado. Si la presión supera la resistencia a tracción de la pasta o del agregado, la cavidad va a dilatarse y romperse. El efecto acumulativo de los ciclos sucesivos de hielo – deshielo y la ruptura de la pasta y del agregado puede causar una expansión significativa y el deterioro del concreto.

Este deterioro es visible en forma de fisuras, descascaramiento y desmoronamiento (Figura 24). [20]

Las burbujas de aire proporcionan espacio necesario para que cuando el agua se congele e incremente el volumen, se libere la presión hidrostática en concreto. Mientras ocurre el deshielo, el agua deja las burbujas de aire retrocediendo a su espacio original y el sistema se prepara para el siguiente ciclo de congelamiento (Figura 25).



Figura 24: Pruebas de bloques de concreto después de 40 años de exposición a ciclos de hielo-deshielo (PCA)

Las presiones hidráulicas se causan por la expansión de 9% del agua congelada. En este proceso, los cristales de hielo en crecimiento sustituyen el agua que no se ha congelado. Si la saturación de los capilares es mayor que la saturación crítica (91.7% llenos de agua), las presiones hidráulicas se producirán a medida que progrese la congelación. Si el contenido de agua es menor, no habrá presión hidráulica. [20]

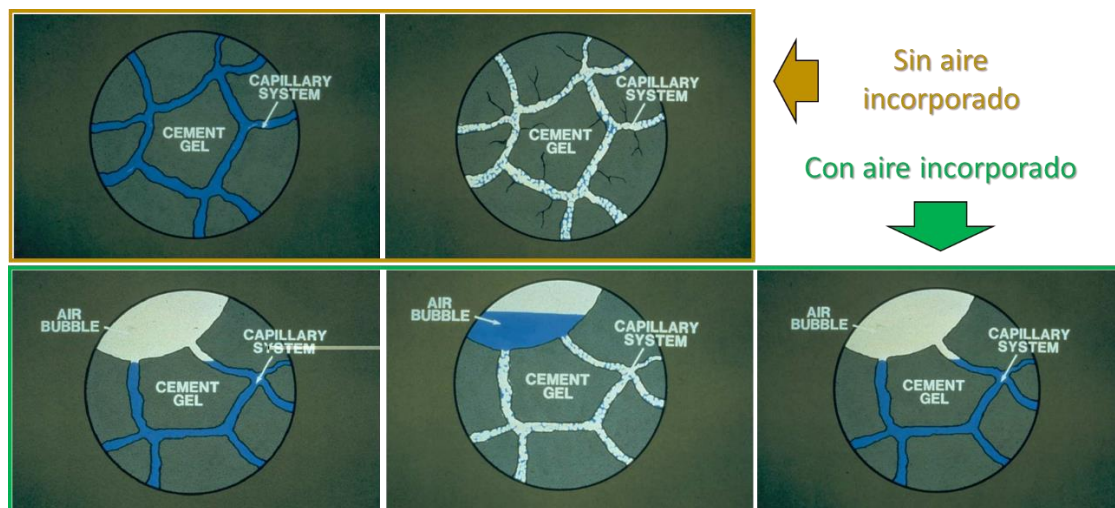


Figura 25: Mecanismo de funcionamiento del aire incorporado

Al incorporar 1% de aire en el concreto, esto provocara que la resistencia a compresión disminuya en 5%.

5.2. Ensayos de Control

En vaciados de concreto en climas fríos, se hace necesario utilizar termómetros para verificar y controlar la temperatura del concreto y la temperatura ambiental de curado (Figura 26). Luego que el concreto se haya endurecido, se puede controlar las temperaturas internas del concreto con Termocuplas (Sensores que sirven para medir temperatura – Ver ítem 3.2 de este documento).



Figura 26: Medida de temperatura en el concreto con termómetro digital

Para concretos que utilizaran aditivos con aire incorporado, es necesario medir el porcentaje de aire utilizando el método por presión, el cual se realiza siguiendo la ASTM C231 [31].



Figura 27: Olla Whashington para ensayo de contenido de aire en el concreto

Las probetas elaboradas bajo estos climas deben ser curadas en pozas temperadas a una temperatura de entre 21°C a 25°C y utilizando cal en una dosis de 3 gr. por litro de agua (NTP 339.033 / ASTM C31).

5.3. Microclimas y materiales aislantes

El uso de microclimas para controlar la temperatura de curado del concreto es una alternativa bastante efectiva para obtener concretos resistentes y durables en climas fríos. Estos microclimas pueden ser de lona, plástico, polietileno o algún material que funcione como aislante térmico, los cuales en su interior cuentan con calentadores (estufas) que generan calor y con esto una temperatura ambiente adecuada para el correcto curado de la estructura [20].



Figura 28: Microclima en estructura en construcción (PCA)



Figura 29: Calefactor de flama (PCA)

El calor y la humedad del concreto pueden ser mantenidos usando mantas aisladoras. Se puede determinar la eficiencia del aislamiento propuesto, utilizando un termómetro entre el concreto y el aislante. Si la temperatura registrada por el termómetro es menor a la indicada en la línea 1 de la Tabla 9, se debe aplicar un material aislante suplementario hasta cumplir con la temperatura mínima de curado.

El plástico, Tecnopor y la madera son materiales que pueden servir como aislantes de temperatura y humedad en climas fríos.



Figura 30: Pilas de cubiertas de aislamiento térmico (PCA)

En caso se requiera verificar la resistencia del concreto colocado in situ, la E.060 “Norma de Concreto Armado” [32] menciona algunos parámetros que se debe cumplir para validar el procedimiento de curado en obra. Estos lineamientos son:

- El curado de las probetas bajo condiciones de obra deberá realizarse en condiciones similares a las del elemento estructural al cual ellas representan, y estas deben moldearse al mismo tiempo y de la misma muestra de concreto que las probetas a ser curadas en laboratorio. Deben seguirse las indicaciones de “Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field” (ASTM C31M).
- Los procedimientos para proteger y curar el concreto deben mejorarse cuando la resistencia de las probetas cilíndricas curadas en la obra, a la edad de ensayo establecida para determinar f'_c , sea inferior al 85% de la resistencia de los cilindros correspondientes curados en laboratorio. La limitación del 85% no se aplica cuando la resistencia de aquellos que fueron curados en la obra exceda a f'_c en más de 3.5MPa.

6. Colocación del concreto en climas cálidos

Según el ACI 305 [3], el clima cálido es cualquier combinación de las siguientes condiciones, que tiende a deteriorar la calidad del concreto recién mezclado o endurecido por la aceleración de la tasa de pérdida de humedad y la tasa de hidratación del cemento, o causando resultados perjudiciales de otro modo:

- Alta temperatura ambiental,
- Alta temperatura del concreto,
- Baja humedad relativa,
- Velocidad del viento, y
- Radiación solar.

Los efectos de la alta temperatura del aire, la radiación solar y la baja humedad relativa pueden ser más pronunciados con el aumento de la velocidad del viento. Los problemas potenciales del vaciado de concreto en clima cálido pueden ocurrir en cualquier época del año en climas cálidos, tropicales o áridos, y generalmente ocurren durante la temporada de verano en otros climas. La fisuración temprana debido a la contracción térmica es generalmente más severa en primavera y otoño. Esto se debe a que el diferencial de temperatura para cada período de 24 horas es mayor durante estas épocas del año. Las medidas de precaución requeridas en un día ventoso y soleado serán más estrictas que las requeridas en un día tranquilo y húmedo, incluso si las temperaturas del aire son idénticas.

El clima cálido podría causar los problemas indicados a continuación:

- Aumento de la demanda de agua en las mezclas de concreto
- Aceleración de la pérdida de revenimiento (asentamiento), llevando a la adición de agua en la obra
- Aumento de la tendencia de fisuración plástica
- Necesidad de curado temprano
- Dificultades en el control del aire incluido (incorporado)
- Aumento de la temperatura del concreto, resultando en pérdida de resistencia a lo largo del tiempo
- Aumento del potencial de fisuración térmica

Adicionar agua al concreto en la obra, podría afectar negativamente el comportamiento mecánico y la durabilidad del concreto, resultando en:

- Disminución de la resistencia, por el aumento de la relación agua-cemento (a/c)
- Disminución de la durabilidad, debido a la fisuración
- Aumento de la permeabilidad

- Apariencia no uniforme de la superficie
- Aumento de la tendencia por contracción de secado
- Disminución de la resistencia a abrasión, por la tendencia de rociar agua durante el acabado.

Es deseable una temperatura de concreto de entre 10°C a 15°C para maximizar las propiedades de la mezcla, sin embargo, este rango de temperatura no siempre es posible. La NTP 339.114-2022 y el ACI 305 limitan la temperatura del concreto fresco a 35°C durante su colocado.

Las precauciones se deben proponer con anticipación a fin de contrarrestar los efectos de las altas temperaturas cuando el concreto es colocado a una temperatura de entre los 25°C y 35°C.

En la mayoría de proyectos es bastante difícil limitar la temperatura máxima de colocación del concreto, esto debido a las características de los insumos y las condiciones climáticas de sitio. La temperatura límite que sirve satisfactoriamente en una obra, podría ser altamente restrictiva en otra. Así mismo, las condiciones atmosféricas, incluyendo la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento, junto con las condiciones de la obra, influyen en las precauciones necesarias.

Las siguientes precauciones reduce o evita los problemas potenciales de la colocación en clima cálido:

- Uso de materiales y dosificaciones que tengan un buen registro en condiciones de clima cálido.
- Enfriamiento del concreto o de uno o más ingredientes.
- Uso de un concreto con una consistencia que permita su rápida colocación y consolidación.
- Reducción al máximo del tiempo de transporte, colocado y acabado.
- Programación de la colocación del concreto para limitar la exposición a condiciones atmosféricas desfavorables. Colocar el concreto durante las noches se considera favorable.
- Utilizar métodos para evitar la rápida pérdida de humedad durante el colocado y acabado de concreto, como, por ejemplo, uso de las sombrillas o carpas para limitar el contacto del concreto con el viento y los rayos del sol.
- Aplicación temprana (después del acabado) de curadores químicos, los cuales formarán películas superficiales que retendrán la humedad.
- Realizar reuniones previas al inicio de la construcción, a fin de discutir las precauciones necesarias para cada estructura del proyecto.

6.1. Efecto de las altas temperaturas en el concreto

A medida que la temperatura del concreto aumenta, hay una pérdida de asentamiento que normalmente se compensa con la adición de agua al concreto en la obra. A mayores temperaturas, se necesitará una mayor

cantidad de agua para mantener el asentamiento constante. El aumento de la cantidad de agua debe ser proporcional al aumento de cemento a fin de mantener la relación a/c y con esto mantener sus propiedades mecánicas y de durabilidad [20].

La alta temperatura del concreto fresco aumenta la velocidad de fraguado y disminuye el tiempo disponible para el transporte, colocado y acabado. El tiempo de fraguado del concreto se podría reducir en 2 o más horas si la temperatura del concreto aumento en 10°C (Figura 31), esto es perjudicial debido a que el concreto debe mantenerse suficientemente plástico para permitir el colocado del concreto sin el desarrollo de juntas frías o discontinuidades. Los aditivos retardantes (ASTM C494 [33] / NTP 334.088 [34]) y aditivos de control de hidratación pueden compensar los efectos de la aceleración causados por las altas temperaturas. [20]

En climas cálidos, hay un aumento de la tendencia de formación de fisuras tanto antes como después del endurecimiento. La evaporación rápida del agua del concreto recién colocado puede causar fisuración por contracción plástica antes que la superficie endurezca. Las fisuras también pueden originarse por contracción de secado debido al aumento del contenido de agua, a la ausencia de juntas de contracción o a los cambios de volumen debido a efectos térmicos a medida que el concreto se enfría. [20]

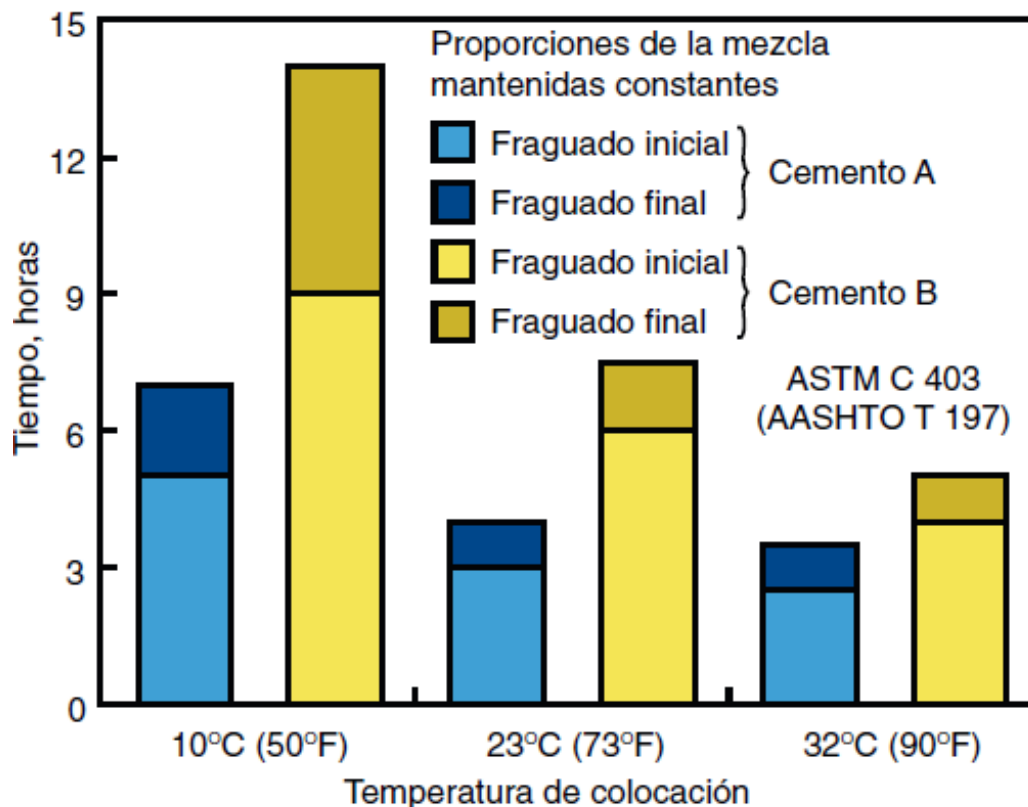


Figura 31: Efecto de la temperatura del concreto en el tiempo de fraguado (Burg, 1996)

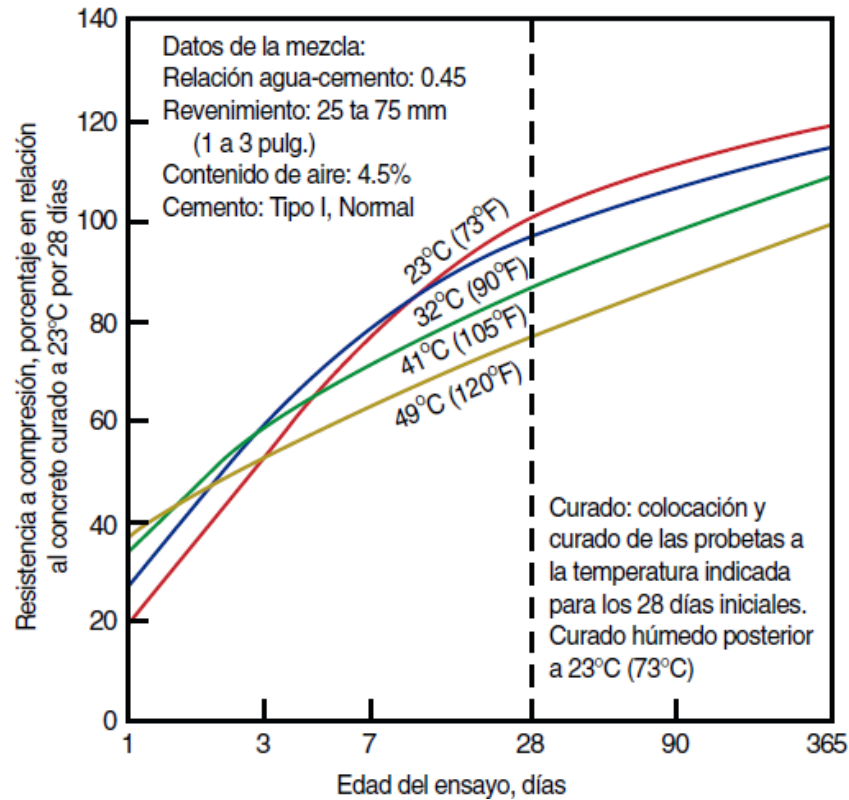


Figura 32: Efecto de las temperaturas elevadas del concreto sobre la resistencia a la compresión en el tiempo (Klieger, 1958)

La Figura 32 muestra el efecto de las altas temperaturas iniciales del concreto sobre la resistencia a la compresión. Las temperaturas del concreto en el momento de mezclado, colocación y curado fueron 23°C, 32°C, 41°C y 49°C. Después de 28 días las probetas recibieron curado húmedo a 23°C hasta las edades de ensayo de 90 días y un año. Los ensayos, usando concretos idénticos con la misma relación agua-cemento (a/c), muestran que a una mayor temperatura del concreto muestran resistencias tempranas mayores, sin embargo, en edades más avanzadas las resistencias son menores. [20]

6.2. Enfriamiento de los materiales del concreto

El método usual para el enfriamiento del concreto es la disminución de la temperatura de los materiales antes del mezclado. En climas cálidos, los agregados y el agua de la mezcla se deben mantener lo más frío posible, pues estos materiales tienen una mayor influencia sobre la temperatura final del concreto.

La Portland Cement Association (PCA) muestra expresiones para calcular la temperatura inicial del concreto fresco en función de las temperaturas de sus componentes según lo indicado en la ecuación 2 (NRMCA 1962).

$$T_o(^{\circ}C) = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w}{0.22(M_a + M_c) + M_w} \quad \dots \quad (2)$$

Donde:

- T_o : temperatura del concreto fresco ($^{\circ}C$)
- T_c : temperatura del cemento ($^{\circ}C$)
- T_w : temperatura del agua ($^{\circ}C$)
- T_a : temperatura de los agregados totales ($^{\circ}C$)
- M_c : peso del cemento (kg)
- M_w : peso del agua (kg)
- M_a : peso de los agregados totales (kg)

De todos los materiales en el concreto, el agua es el elemento más fácil de enfriar debido a que su proporción en el concreto es menor con respecto al resto de materiales, el agua fría va a producir una reducción moderada en la temperatura del concreto. Por lo que se debe usar agua para la mezcla de una fuente fría. El agua se debe almacenar en depósitos o tanques que no sean expuestos directamente a los rayos del sol. El agua se puede enfriar por refrigeración, nitrógeno líquido o hielo. Al enfriarse el agua cerca de $2^{\circ}C$ a $2,2^{\circ}C$, el concreto se enfría cerca de $0,5^{\circ}C$. Sin embargo, como el agua representa solo un pequeño porcentaje de la mezcla, es difícil bajar la temperatura del concreto más de $4,5^{\circ}C$, a través del enfriamiento del agua [20].



Figura 33: Enfriamiento del concreto utilizando nitrógeno líquido (Fuente: Internet - ARGOS).

En la Tabla 14 se muestra un ejemplo de calculo para determinar la temperatura inicial del concreto.

Tabla 14: Efecto de la temperatura de los materiales sobre la temperatura inicial del concreto

Material	Peso M (kg)	Calor especifico (kJ/kg.K)	Joules para variar la temperatura, 1 °C	Temperatura inicial del material T (°C)	Joules totales en el material
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
			(1) x (2)		(3) x (4)
Cemento	420 (Mc)	0,92	386	40 (Tc)	15456
Agua	160 (Mw)	4,184	669	35 (Tw)	23430
Agregados totales	1860 (Ma)	0,92	1711	35 (Ta)	59892
			Σ = 2767		Σ = 98778

$$\text{Temperatura inicial del concreto} = 98778/2767 = 35,7 \text{ °C}$$

Para disminuir 1°C en la temperatura inicial:

- La temperatura del cemento se debe reducir = $2767/386 = 7,2 \text{ °C}$
- la temperatura del agua se debe disminuir = $2767/669 = 4,1 \text{ °C}$
- los agregados se deben enfriar = $2767/1711 = 1,6 \text{ °C}$

De igual manera el uso de hielo en reemplazo del agua es una alternativa bastante común para reducir la temperatura del concreto. El hielo se puede usar como parte del agua de mezcla, siempre que se derrita completamente durante el mezclado. Cuando se adiciona hielo como parte del agua de la mezcla, se debe considerar el efecto del calor de fusión del hielo, esto modifica la ecuación para obtener la temperatura del concreto fresco; esta expresión modificada se muestra en la ecuación 3 [20] .

$$T_o(^{\circ}C) = \frac{0.22(T_a M_a + T_c M_c) + T_w M_w - 80 M_i}{0.22(M_a + M_c) + M_w + M_i} \dots \quad (3)$$

Donde:

- M_i : peso de hielo (kg) (NRMCA 1962 y Mindess, y Young 1981)
- Calor de fusion del hielo : 335 kJ/kg

El hielo molido (Figura 34) o en escamas es más eficiente que el agua fria para disminuir la temperatura del concreto. Las cantidades de hielo y agua no deben exceder los requerimientos de agua de la mezcla total. El volumen de hielo no debe reemplazar más del 75% del agua total de la mezcla. La reducción máxima de temperatura con el uso de hielo se limita a cerca de 11°C. En caso sea necesaria una reduccion de temperatura mayor, la inyección de nitrógeno líquido puede ser la mejor alternativa. La Tabla 15 muestra un ejemplo de cálculo de temperatura del concreto fresco cuando se adiciona 60kg. de hielo ($M_i=60\text{kg}$) [20].

Tabla 15: Efecto del hielo (60kg) sobre la temperatura del concreto

Material	Peso M (kg)	Calor especifico (kJ/kg.K)	Joules para variar la temperatura, 1 °C	Temperatura inicial del material T (°C)	Joules totales en el material
	1	2	3	4	5
			(1) x (2)		(3) x (4)
Cemento	420 (Mc)	0,92	386	40 (Tc)	15456
Agua	100 (Mw)	4,184	418	35 (Tw)	14644
Agregados totales	1860 (Ma)	0,92	1711	35 (Ta)	59892
Hielo	60 (Mi)	4,184	251	0 (Ti)	0
Σ = 2767					
Menos	60 (Mi) x calor de fusión, (335 kJ/kg) =				-20100
					Σ = 69892

Temperatura del concreto = $69892/2767 = 25,3\text{ °C}$



Figura 34: Introducción de hielo en la mezcla de concreto (Fuente: Youtube)

Los agregados tienen un efecto marcado sobre la temperatura del concreto fresco debido a que representan del 70% al 85% del peso total del concreto. Para bajar la temperatura del concreto en $0,5\text{ °C}$ se hace necesaria una reducción de la temperatura del agregado de solamente $0,8\text{ °C}$ a $1,1\text{ °C}$. Hay muchos métodos sencillos para mantener el agregado a baja temperatura. Las reservas de los agregados se deben proteger del sol y se deben mantener húmedas a través de rociado con agua (no rociar con agua salada). El rociado del agregado se debe ajustar para prevenir grandes variaciones en el contenido de humedad de la superficie y así causar una pérdida de asentamiento uniforme [20].

La temperatura del cemento tiene solo un pequeño efecto en la temperatura del concreto debido a su bajo calor específico y su relativa pequeña proporción en el concreto. Un cambio de temperatura del cemento de 5°C generalmente cambiará la temperatura del concreto en 0,5°C. Como el cemento pierde calor lentamente durante su almacenamiento, aún puede estar caliente al momento de la entrega. Dado que la temperatura del cemento afecta en cierto grado la temperatura del concreto fresco, algunas especificaciones presentan límites para su temperatura al momento de emplearlo (entre 66°C a 82°C según el ACI 305). Sin embargo, es preferible especificar la temperatura del concreto fresco a limitar la temperatura de sus ingredientes individuales (Lerch 1955) [20].

6.3. Uso de materiales cementicios suplementarios

En climas cálidos, es recomendable usar adiciones cementicias como las puzolanas, cenizas volantes y escoria de alto horno. Estos materiales generalmente bajan la velocidad de fraguado y la pérdida de asentamiento. Sin embargo, será necesario cuidados adicionales durante el acabado debido a que la velocidad de exudación puede ser menor que la tasa de evaporación, provocando fisuración por contracción plástica. Las adiciones cementicias son necesarias en mezclas de concreto que serán usadas para vaciados de concretos masivos.

6.4. Uso de aditivos para mantener la trabajabilidad

En climas cálidos, debido a la alta temperatura ambiente y la alta temperatura de los componentes del concreto, las mezclas son propensas a perder trabajabilidad a mayor velocidad que en climas templados, es por ello que es recomendable usar aditivos para mejorar la trabajabilidad del concreto durante su transporte, colocación y acabado. Estos aditivos pueden ser plastificantes / superplastificantes (ASTM C494 Tipo A) que le darían mayor trabajabilidad a la mezcla de concreto o el uso de aditivos mantensores de fragua (ASTM C494 Tipo B), el cual mantiene trabajable el concreto por un mayor periodo de tiempo. Estos aditivos producen los siguientes efectos:

- Retención prolongada de asentamiento
- Control en la dosificación de agua
- Tiempos de fraguados controlados
- Optimización de la cantidad de cemento
- Mejor trabajabilidad en el tiempo
- Flexibilidad en la programación de las operaciones de vaciado y acabado

La Figura 35 muestra la evaluación de la pérdida de asentamiento del concreto fresco cuando se utiliza hielo y cuando se utilizan aditivos como parte del diseño para mantener su trabajabilidad, de aquí notamos la mejor eficiencia para mantener la trabajabilidad la podríamos lograr con aditivos.

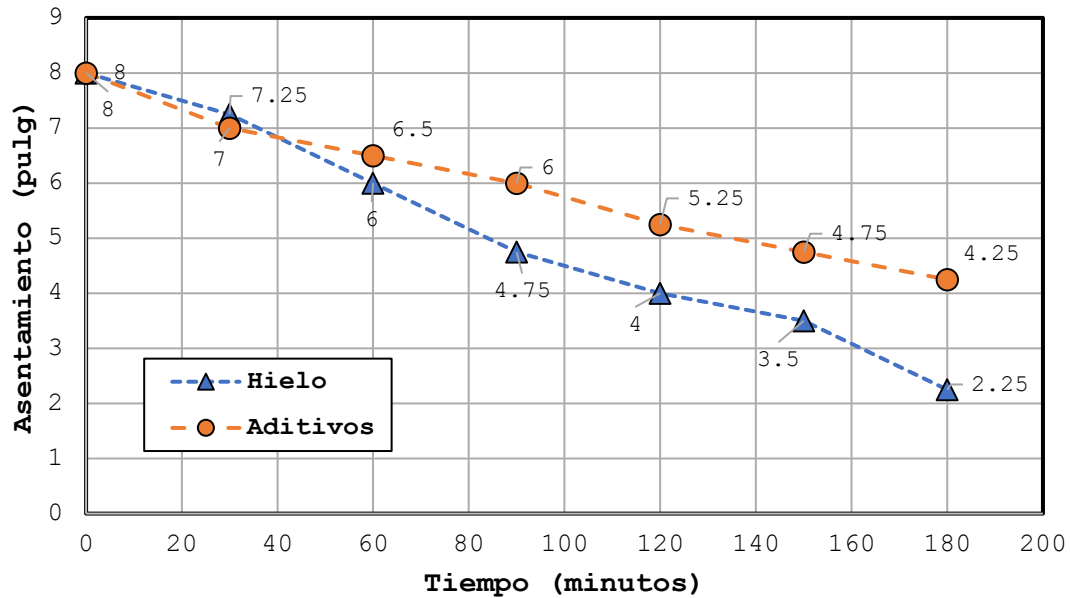


Figura 35: Pérdida de asentamiento del concreto usando aditivos (Fuente: ARGOS)

6.5. Preparación antes del colocado

Antes de colocar el concreto en climas cálidos, se deben tomar algunas precauciones para mantener o reducir la temperatura del concreto. Estas precauciones implican equipos de transporte y colocado, que permitan el rápido manejo del concreto en el sitio. Usar mantas húmedas sobre los camiones mezcladores o pintarlos de blanco para reducir el aumento de temperatura del concreto producido por los rayos del sol, son alternativas bastante utilizadas [20].

Se sugiere rociar con agua fría los encofrados, armaduras y subrasantes antes de la colocación del concreto, esto con el fin de enfriar las superficies de contacto y aumentar la humedad relativa del entorno, esto disminuye el aumento de la temperatura del concreto y minimiza la tasa de evaporación del agua del concreto. Es importante notar que no debe haber agua libre ni charcos en los encofrados o subrasante en el momento de la colocación del concreto.

Programar los vaciados de concreto en las noches o en las mañanas (al amanecer) resulta en menor contracción térmica y menos fisuración de las losas y pavimentos rígidos.

6.6. Transporte, colocado y acabado

Durante climas cálidos, es recomendable transportar y colocar el concreto lo más rápido posible. Cualquier retraso contribuirá a la pérdida de asentamiento y al aumento de la temperatura del concreto, por lo cual, se debe disponer de la mano de obra y equipos necesarios para manipular y colocar el concreto cuando este llegue a la obra [20].

La ASTM C94-16 [21] y la NTP 339.114 [35] indica “La descarga del concreto será completada dentro de 1 1/2h o antes que el tambor haya girado 300 revoluciones, lo que ocurra primero, después de la introducción del agua de mezclado al cemento y a los agregados o la introducción del cemento a los agregados. Estas limitaciones pueden ser obviadas por el comprador si el concreto tiene un asentamiento tal, que después de 1 1/2h o después de que se haya alcanzado el límite de 300 revoluciones, este puede ser colocado sin la adición de agua a la tanda. El clima cálido o bajo condiciones que contribuyan al rápido endurecimiento del concreto, el comprador podrá especificar un tiempo menor de 1.5 horas”.

Como el fraguado es más rápido en climas cálidos, se debe tomar precauciones adicionales para colocar el concreto y prevenir las juntas frías.

6.7. Fisuración por contracción plástica

La fisuración por contracción plástica (Figura 36) ocurre cuando el agua se evapora de la superficie más rápido que la aparición de agua por exudación, pues crea un secado rápido y tensiones de tracción, resultando en fisuras cortas e irregulares. A continuación, se presentan las condiciones que aumentan la evaporación de la humedad y la posibilidad de la fisuración por contracción plástica:

- Alta temperatura ambiental
- Alta temperatura del concreto
- Baja humedad
- Alta velocidad del viento

La longitud de las fisuras es generalmente de 50 a 1000mm y si espacian de manera irregular de 50 a 700mm. El ábaco mostrado en la Figura 37 es útil para determinar cuándo se deben tomar precauciones.

Cuando la tasa de evaporación excede 1 kg/m²/h, es necesario tomar medidas preventivas tales como el uso de protectores superficiales (plástico) sobre el concreto. En mezclas de concreto que contengan puzolana (Cemento IP), la fisuración puede ocurrir cuando la tasa de evaporación exceda 0.5 kg/m²/h. El concreto con humo de sílice es especialmente propenso a la fisuración por contracción plástica, pues la

tasa de exudación es normalmente solo 0.25 kg/m²/h. Por lo tanto, cuando la velocidad de evaporación es baja, es esencial la protección contra el secado prematuro. En cierto momento del endurecimiento, la tasa de exudación llega a cero y la superficie empieza a secar con una tasa de evaporación mucho más baja que las típicamente especificadas de 1 kg/m²/h. En estos casos, se hace necesaria la protección sin importar el tipo de concreto [20].



Figura 36: Fisura típica por contracción plástica (PCA)

A continuación, se listan algunas consideraciones que minimizan la fisuración por contracción plástica, esto se debe realizar durante la construcción:

- Humedecer los agregados que estén secos y sean absorbentes.
- Reducir la temperatura del concreto a través del enfriamiento de los agregados y del agua de la mezcla.
- Humedecer la subrasante y los encofrados antes de la colocación del concreto.
- Utilizar parabrisas temporales para reducir la velocidad del viento sobre la superficie de concreto.
- Utilizar sombrillas temporales para reducir la temperatura sobre la superficie del concreto.
- Proteger el concreto con cubiertas temporales, tales como los forros de polietileno, para evitar el aumento de temperatura por los rayos solares y la pérdida de humedad superficial.
- Adicionar fibras plásticas a la mezcla de concreto para ayudar a disminuir la formación de fisuras por contracción plástica.
- Aplicación de películas para retener la humedad (curado químico) luego del acabado del concreto.
- Reducir el tiempo entre la colocación y el inicio del curado.

- Realizar vaciados de concreto en las noches o en horarios donde la temperatura ambiental y del concreto sean menores.

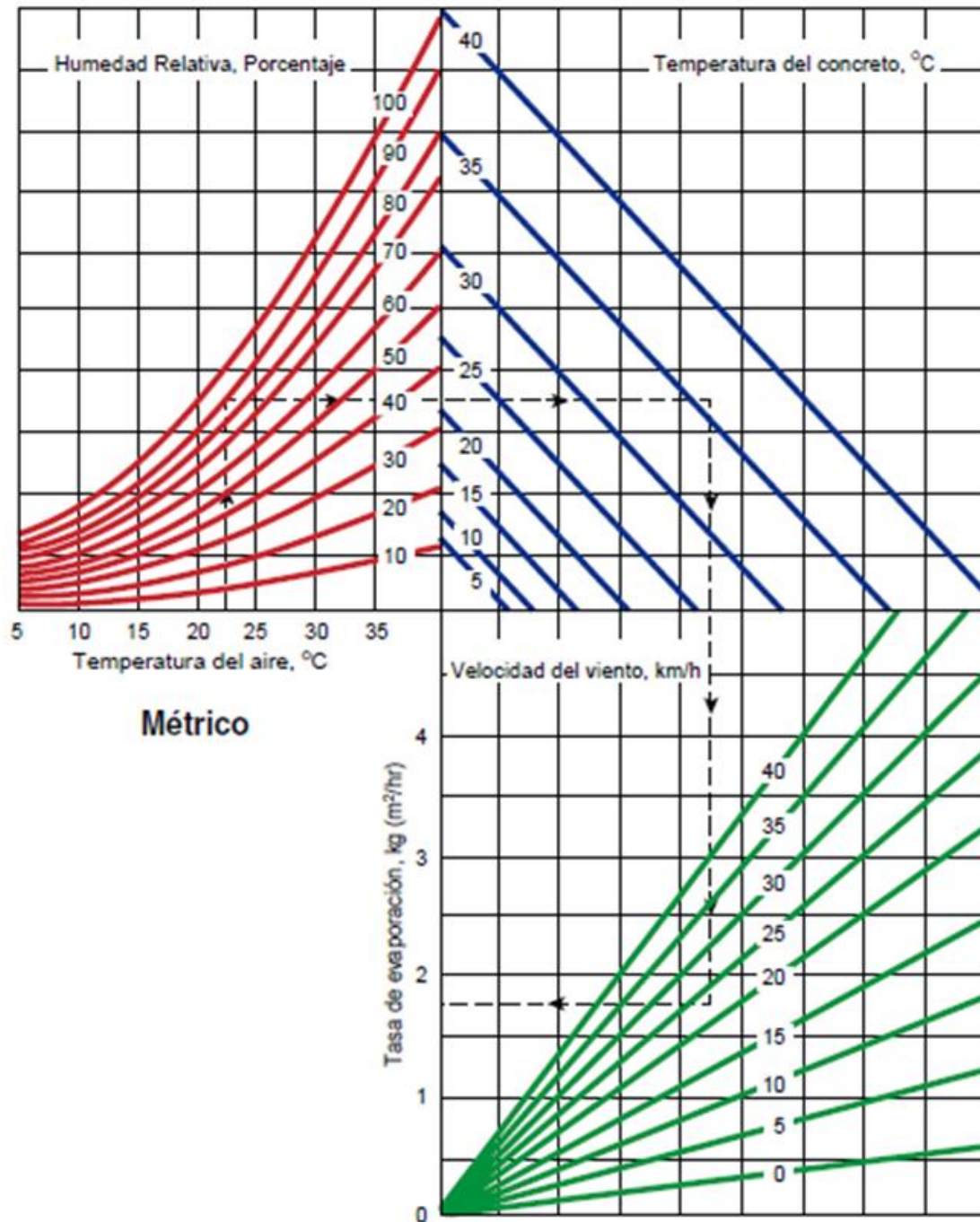


Figura 37: Efecto de las temperaturas del concreto y del aire, humedad relativa y velocidad del viento sobre la tasa de evaporación de la humedad en la superficie del concreto (ACI 305).

La ecuación para determinar la velocidad de evaporación superficial del concreto fresco es la siguiente:

$$E = 5([T_c + 18]^{2.5} - r \cdot [T_a + 18]^{2.5})(V + 4) \cdot 10^{-6}$$

Donde:

- E = Tasa de agua evaporada ($\text{kg/m}^2/\text{h}$)
- T_c = Temperatura del concreto ($^{\circ}\text{C}$)
- r = Humedad relativa del aire alrededor del concreto ($\%/100$)
- T_a = Temperatura del aire alrededor del concreto (la temperatura del aire se mide a un nivel de aproximadamente 1.2m a 1.8m sobre la superficie de evaporación en el lado de barlovento y protegido de los rayos del sol) ($^{\circ}\text{C}$)
- V = Velocidad media del viento, medida a 50 centímetros sobre la superficie de evaporación (km/h)

Si $E \geq 0.5 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ hay riesgo potencial de fisuración por contracción plástica, es recomendable analizar la posibilidad de tomar algunas precauciones mencionadas anteriormente.

Si $E \geq 1.0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ es muy probable que se producirá fisuración por contracción plástica, es recomendable analizar la posibilidad de tomar algunas precauciones mencionadas anteriormente.

6.1. Curado y protección

El curado y la protección del concreto son más importantes en climas cálidos que en climas templados. En climas cálidos se deben retirar los encofrados tan pronto como sea posible sin causar daños en el concreto. En concreto endurecido y sobre superficies planas, el agua de curado no puede estar 11°C más fría que el concreto, esto minimizará la fisuración causada por tensiones térmicas debido a diferencias de temperatura entre el concreto y el agua [20].

La necesidad de curado húmedo es mayor durante las primeras horas después del acabado. Para prevenir el secado de las superficies expuestas, el curado húmedo debe comenzar tan pronto como se haya acabado las operaciones de colocación del concreto y debe continuar por lo menos por 24 horas. En climas cálidos es preferible realizar el curado utilizando agua de manera continua durante todo el periodo de curado, sin embargo, si el curado húmedo no podría realizarse después de las 24 horas, el concreto se debe utilizar algún curador químico (formador de membrana) y proteger la superficie con plástico [20].

7. Casos prácticos de colocación de concreto en territorio nacional

A continuación, se muestran algunos casos de colocación del concreto donde se dan recomendaciones mínimas para realizar el diseño de mezcla, colocación, vibrado y curado del concreto bajo diferentes climas en el Perú. La Figura 38 muestra un diagrama de flujo con las pautas mínimas para la colocación, vibrado y curado del concreto en diferentes tipos de clima.

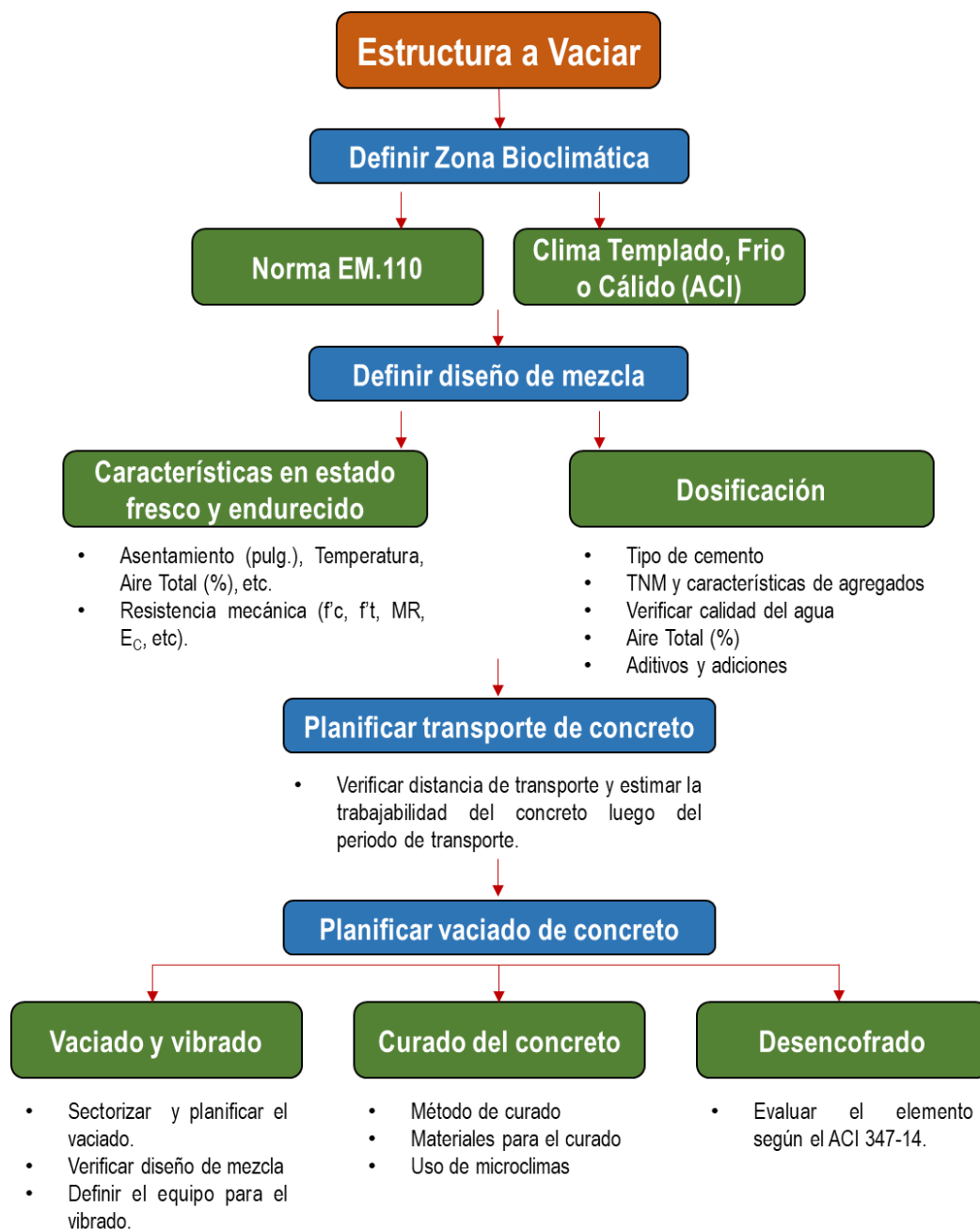


Figura 38: Diagrama de flujo para realizar la colocación del concreto

A fin de dar un costo estimado del Precio Unitario del concreto según cada requerimiento, la Tabla 16 muestra costos referenciales de los ingredientes del concreto.

Tabla 16: Costo referencial de los componentes del concreto

Materiales	Costo (S/.)
Cemento (bolsa 42,5kg)	29
Agua (m³)	6
Arena (m³)	50
Piedra (m³)	60
Ad. Incorporador de Aire (lt)	17,2
Ad. Plastificante (lt)	9,8
Ad. Super Plastificante (lt)	11,9
Ad. Mantensor (lt)	8,6

A fin de relacionar los bioclimas presentes en el Perú y los procedimientos de colocación de concreto establecidos y aceptados en las normas nacionales e internacionales, se usará la Tabla 4.

7.1. Caso N°1: Clima Templado

Vaciado de columnas de concreto armado ($f'_c=21\text{MPa}$) en Lima, las dimensiones del elemento son las siguientes: 0.40m x 0.50m x 3.2m de alto. El departamento de Lima se clasifica en la zona bioclimática de DESERTICO COSTERO según la EM.110.

Información necesaria:

- Características del concreto.
 - Para columnas se sugiere un asentamiento mínimo (slump) de 8pulg.
 - Determinar la temperatura del concreto fresco (para fines de ejemplo, se asume $\cong 23^\circ\text{C}$).
- Definir la zona bioclimática según la EM.110 (Tabla 2) y en función a la zona bioclimática, recopilar la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento (Tabla 3).
 - Lima se encuentra en la Zona Bioclimática: DESERTICO COSTERO
 - La zona Bioclimática definida como DESERTICO COSTERO tiene las siguientes características climáticas:
 - Temperatura media anual: 18 a 19°C
 - Humedad Relativa media > 70%
 - Velocidad del viento: 4 – 11 m/s
 - Altitud: 0 a 2000 msnm.

- Es recomendable obtener estos parámetros en sitio (con medidas en campo) para poder planificar cada vaciado de concreto.

Procedimiento:

- Planificar la colocación del concreto (disponer de personal, habilitación de encofrados y aceros, secuencia de vaciado y acceso de los camiones mezcladores a la sección a vaciar).
- Líneas abajo se muestra un diseño de mezcla tentativo de un concreto de $f'_c=21\text{MPa}$ (diseño por resistencia), el cual va a requerir de una validación del concreto en estado fresco y endurecido antes de comenzar con la producción.

Tabla 17: Diseño de mezcla referencial de concreto en climas templados

Materiales	Peso (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Costo (S/.)
Cemento	292	0,0943	199,5
Agua	190	0,1900	1,14
Arena	995	0,3755	33,2
Piedra	858	0,3178	36,8
Ad. plastificante	2,9	0,0024	23,8

- TNM: $\frac{3}{4}$ pulg.
- Aire: 2%
- Costo referencial de concreto por m³: S/. 294.3
- Aditivo plastificante ASTM C494 Tipo A
- En climas templados como Lima, no se tienen a priori consideraciones especiales para el diseño de concreto o su proceso de colocación y curado (Seguir sugerencias del capítulo 4 de este manual).
- Sellar los espacios libres entre la base del encofrado y la superficie horizontal de concreto antes de iniciar con el vaciado a fin de evitar fuga de lechada de cemento y ocasionar cangrejas.
- Planificar el vaciado de las columnas en capas, se sugiere comenzar con una capa inferior de máximo 0.30m (para disminuir la segregación en la base de la columna) para luego continuar con capas de 0.60m de alto.
- Una vez acabado con la colocación y acabado del concreto, se sugiere proteger la estructura con mantas para curar el concreto expuesto durante el primer día. Luego del desencofrado de los paneles verticales (Según indicación del ACI 347-14), se sugiere curar el concreto inicialmente con agua para luego aplicarle un curador de membrana (químico) en la superficie. El curado del concreto debe ser constante por un periodo mínimo de 7 días.

- En época de verano, las condiciones ambientales se pueden asemejar a un clima cálido, por lo cual se debe evaluar de manera permanente los parámetros de temperatura ambiental, velocidad del viento y humedad relativa, con el objetivo de tomar medidas preventivas adecuadas.

7.2. Caso N°2: Clima cálido

Vaciado de losa de concreto armado contra terreno en Lambayeque de 0.20m de espesor y un área en planta de 20m x 30m. El departamento de Lambayeque se clasifica en la zona bioclimática de DESÉRTICO según la EM.110.

Información necesaria:

- Características del concreto.
 - Para losas contra terreno se sugiere un asentamiento (slump) de 4pulg. a 6pulg, sin embargo, es necesario evaluar si es necesario colocar un aditivo mantensor de fragua o darle mayor trabajabilidad al concreto para evitar juntas frías, esto en función a la pérdida de trabajabilidad de la mezcla.
 - En climas cálidos, se sugiere utilizar un cemento o cementante de moderado o bajo calor de hidratación para disminuir la temperatura del concreto y reducir el riesgo de fisuración (ítem 6.3).
 - Determinar la temperatura del concreto fresco (para fines de ejemplo, se asume $\cong 30^{\circ}\text{C}$).
- Definir la zona bioclimática según la EM.110 (Tabla 2) y en función a la zona bioclimática, recopilar la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento (Tabla 3).
 - Lambayeque se encuentra en la Zona Bioclimática: DESERTICO
 - La zona Bioclimática definida como DESERTICO tiene las siguientes características climáticas:
 - Temperatura media anual: 24°C
 - Humedad Relativa media: 50% a 70%
 - Velocidad del viento: 4 – 11 m/s
 - Altitud: 400 a 2000 msnm.
 - Es recomendable obtener estos parámetros en sitio para poder planificar cada vaciado de concreto.

Procedimiento:

- Planificar la colocación del concreto (disponer de personal, habilitación de encofrados y aceros, secuencia de vaciado y acceso de los camiones mezcladores a la sección a vaciar).

- Líneas abajo se muestra un diseño de mezcla tentativo de un concreto de $f'_c=28\text{MPa}$ (diseño por resistencia), el cual va a requerir de una validación del concreto en estado fresco y endurecido antes de comenzar con la producción.

Tabla 18: Diseño de mezcla referencial de concreto en climas cálidos

Materiales	Peso (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Costo (S/.)
Cemento	345	0,1114	235,7
Agua	190	0,1900	1,14
Arena	939	0,3542	31,3
Piedra	858	0,3178	36,8
Ad. Plastificante	4,1	0,0035	33,7
Ad. Mantensor	3,5	0,0031	27,0

- TNM: $\frac{3}{4}$ pulg.
- Aire: 2%
- Costo referencial de concreto por m³: S/. 365.7
- Aditivo plastificante ASTM C494 Tipo A)
- Aditivo mantensor de fragua ASTM C494 Tipo B)
- El uso de hielo para enfriar el concreto fresco o de aditivos para mejorar su desempeño, debe ser evaluado en campo para cada diseño en particular. Así mismo, en caso el concreto este expuesto a condiciones especiales (exposición a sulfatos y/o cloruros), el diseño debe darse de acuerdo a lo indicado en el capítulo 19 del ACI 318-19.
- En climas cálidos como Lambayeque, se sugiere realizar la evaluación del riesgo de fisuración por contracción plástica. Para esto utilizamos el Abaco del ACI 305 mostrado en la Figura 37, los parámetros ambientales y de concreto mostrados a continuación:
 - Temperatura media anual: 25°C
 - Humedad Relativa media: 70%
 - Velocidad del viento: 8 m/s (29 km/h)
 - Temperatura del concreto: 30°C
- La tasa de evaporación resulta ser 1.4 kg/m²/hr, (Figura 39) el cual implica un riesgo de fisuración por contracción plástica (>1.0 kg/m²/hr). En este caso existe riesgo de fisuración, por lo cual, se sugiere disminuir la temperatura del concreto fresco y/o proteger la sección a vaciar con alguna carpa a fin de disminuir la velocidad de viento en contacto con el concreto durante el vaciado.
- Es recomendable tener especial precaución en el curado así como realizarlo tan pronto sea posible. Una alternativa viable es aplicar curador químico inmediatamente después de haber realizado el acabado del concreto para finalmente proteger la superficie con algún plástico, luego

del primer día de curado, se podría retirar el plástico para curar el concreto por el método de inundación con agua.

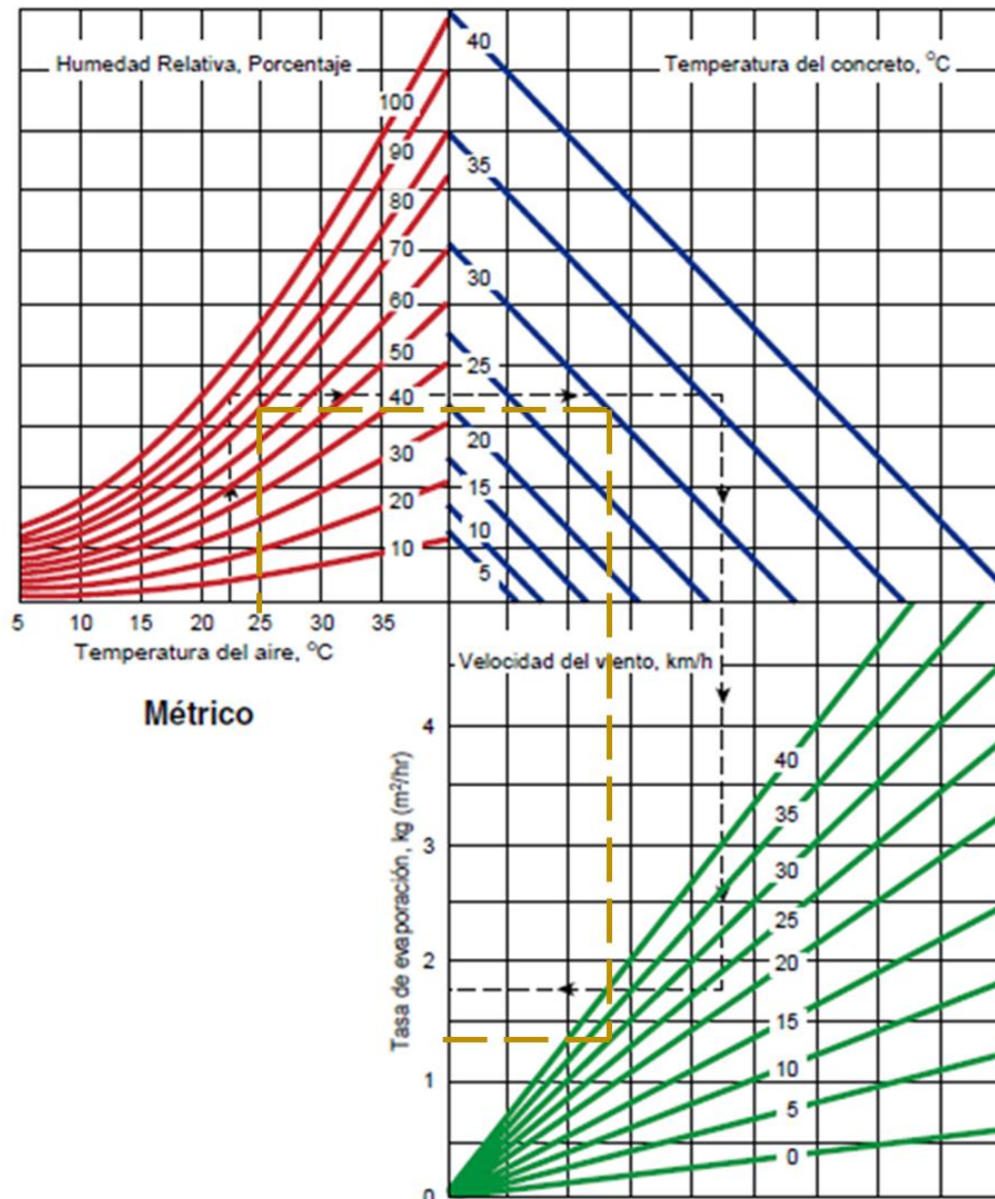


Figura 39: Evaluación de la tasa de evaporación

7.3. Caso N°3: Clima frío

Vaciado de losas de concreto armado de 0.30m de espesor en Puno, que servirán como base de canales que transportará agua. El departamento de Puno se clasifica en la zona bioclimática de ALTO ANDINO o NEVADO según la EM.110.

Información necesaria:

- Características del concreto.
 - Para losas contra terreno se sugiere un asentamiento (slump) de 4pulg. a 6pulg.
 - En climas fríos, se sugiere utilizar un cemento de alto calor de hidratación.
 - En climas fríos se debe diseñar el concreto por durabilidad considerando los parámetros establecidos en la Tabla 11.
 - Considerar el uso de aditivo incorporador de aire en caso existan temporadas de heladas en el lugar donde se colocará el concreto (Tabla 12).
- Definir la zona bioclimática según la EM.110 (Tabla 2) y en función a la zona bioclimática, recopilar la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento (Tabla 3).
 - Puno se encuentra en la Zona Bioclimática: ALTO ANDINO o NEVADO
 - La zona Bioclimática definida como ALTO ANDINO o NEVADO tiene las siguientes características climáticas:
 - Temperatura media anual: 6°C (ALTO ANDINO) o < 0°C (NEVADO)
 - Humedad Relativa media: 30% - 50%
 - Velocidad del viento: 6 – 9 m/s
 - Altitud: 4000 a 4800 msnm (ALTO ANDINO) o > 4800 msnm (NEVADO).
 - Es recomendable obtener estos parámetros en sitio para poder planificar cada vaciado de concreto.

Procedimiento:

- Planificar la colocación del concreto (disponer de personal, habilitación de encofrados y aceros, secuencia de vaciado y acceso de los camiones mezcladores a la sección a vaciar).
- Considerando una exposición moderada al efecto hielo-deshielo se podría tomar en cuenta las siguientes características para el diseño de mezcla:
 - Relación agua/cemento: 0.45
 - TNM: ¾ pulgada
 - Slump: 6 pulgadas
 - Aire total por m³ de concreto: 5%
- Líneas abajo se muestra un diseño de mezcla tentativo de un concreto de $f_c=28\text{MPa}$ (diseño por durabilidad), el cual va a requerir de una validación del concreto en estado fresco y endurecido antes de comenzar con la producción.

Tabla 19: *Diseño de mezcla referencial de concreto en climas fríos*

Materiales	Peso (kg/m³)	Volumen (m³)	Costo (S/.)
Cemento	400	0,1290	272,9
Agua	180	0,1800	1,08
Arena	845	0,3190	28,2
Piedra	858	0,3178	36,8
Ad. Super plastificante	4,8	0,0040	47,7
Ad. Incorporador de aire	0,16	0,0001	2,5

- Costo referencial de concreto por m³: S/. 389.2
- Aditivo super plastificante ASTM C494 Tipo F
- Aditivo incorporador de aire ASTM C260
- En climas fríos como Puno, se sugiere utilizar micro climas para aumentar la temperatura del concreto durante su colocación y curado, para esto es necesario cumplir lo indicado en la Tabla 9. Para fines de evaluación, los parámetros ambientales y de concreto son los mostrados a continuación:
 - Temperatura media anual: -2°C
 - Humedad Relativa media: 40%
 - Velocidad del viento: 7 m/s (25 km/h)
 - Temperatura del concreto: 10°C
- Tomando en cuenta los parámetros ambientales y de concreto considerados para el análisis, será necesario cumplir lo siguiente:
 - Temperatura del concreto $\geq 16^{\circ}\text{C}$; será necesario calentar algún o algunos componentes del concreto (en principio se sugiere calentar el agua y/o agregados) para obtener la temperatura mínima requerida.
 - Temperatura de colocado y curado $\geq 10^{\circ}\text{C}$; será necesario considerar un micro clima que envuelva la estructura a vaciar y utilizar calentadores / estufas para aumentar la temperatura del entorno hasta llegar al mínimo requerido.
 - Se debe curar el concreto por un periodo mínimo de 10 días o hasta que el concreto llegue a un $0.70f_c$ (Según el ACI 308R). La evolución de la resistencia del concreto colocado en la estructura, se puede evaluar ensayando probetas colocadas al lado del elemento vaciado y curándolo a las mismas condiciones que la estructura.
 - La caída máxima permisible de temperatura luego del periodo de curado es 22°C , esto se puede registrar con termocuplas (sensores de temperatura) colocadas en el interior del concreto.
- Los controles de temperatura se deben realizar con termómetros (para temperaturas ambientales y del concreto fresco) y/o termocuplas (para temperaturas del concreto endurecido).

8. Referencias bibliográficas

- [1] Ministerio de Educación, «Guía de aplicación de arquitectura bioclimática en locales educativos». 2008.
- [2] P. Ministerio de Vivienda, «EM.110 CONFORT TERMICO Y LUMINICO CON EFICIENCIA ENERGETICA». 13 de mayo de 2014.
- [3] C. 305 ACI, «ACI 305R-99 Hot Weather Concreting». 1999.
- [4] ACI Committee 318, «ACI 318-19 "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural"», 2019.
- [5] C. 306 ACI, «ACI 306R-10 Guide to Cold Weather Concreting». 2010.
- [6] MVCS, «Normatividad para edificaciones bioclimaticas en el Perú», Perú.
- [7] C. A. Flores C. y J. C. Gonzales R., «Determinar curva de extrapolacion de resistencia cilindrica de concreto con respecto a las variaciones de la temperatura aplicando el metodo de madurez», Valencia, España, 2010.
- [8] C. C1074, «ASTM C1074 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method», ASTM International, USA.
- [9] INACAL, «NTP 339.217 HORMIGON (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez».
- [10] MANUEL URIEL ASPILCUETA ASENCIOS, «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO ESTIMADA A PARTIR DE LA UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ», Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2015.
- [11] M. C. Cortes Belches, «Estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez para la habilitacion al transito en el proyecto vía alterna del sur (VAS), GUATEMALA», Universidad Rafael Landivar, Guatemala, 2016.
- [12] O. Aguilar Beltran, E. Rodriguez Mejia, y M. Sermeño Monge, «Determinación de la resistencia del concreto a edades tempranas bajo la norma ASTM C1074, en viviendas de concreto coladas en el sitio», Universidad de el salvador, El Salvador, 2009.
- [13] M. Salgado y J. Bornand, «Opportunities and application of maturity concept in concrete pavements», Chile.
- [14] ACI, «ACI 304R-00 Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete». 2000.
- [15] ACI, «ACI 309R-05 Guide for Consolidation of Concrete». 2005.
- [16] C. 308 ACI, «ACI 308R-08 Guide to Curing Concrete». 2008.
- [17] C. 224 ACI, «ACI 224.3R-95 Joints in Concrete Construction». 1995.
- [18] C. 360 ACI, «ACI 360R-10 Guide to Design of Slabs on Ground». 2010.
- [19] C. C685, «ASTM C685 Standard Specification for Concrete Made by Volumetric Batching and Continuous Mixing», ASTM International, USA.
- [20] M. L. Wilson y P. D. Tennis, *Design and Control of Concrete Mixtures*, 17 Edition. USA, 2021.
- [21] C94 Committee, «ASTM C94 Specification for Ready-Mixed Concrete», ASTM International. doi: 10.1520/C0094_C0094M-16.
- [22] ACI, «ACI 347R-14 Guide to formwork for concrete». 2014.
- [23] ACI 212.3R-16 *Report on chemical admixtures for concrete*. Detroit, Mich.: American Concrete, 2016.
- [24] ACI, «ACI 116R-00 Cement and Concrete Terminology».
- [25] C. C125, «ASTM C125 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates», ASTM International.
- [26] ACI Committee 308, «ACI 308R-01 R08 "Guide to curing concrete"». 2008.
- [27] C. C803, «ASTM C803 Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete», ASTM International, USA.
- [28] C. C900, «ASTM C900 Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete», ASTM International, USA.
- [29] C. C873, «ASTM C873 Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds», ASTM International, USA.

- [30] ACI, «ACI 228.1R-19 Methods to Estimate In-Place Concrete Strength». 2019.
- [31] C. C231, «ASTM C231 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method», ASTM International, USA.
- [32] MVCS, «Norma E.060 Concreto Armado». Peru, 2009.
- [33] C. C494, «ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete», ASTM International, USA.
- [34] INACAL, «NTP 339.088 HORMIGON (CONCRETO). Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos».
- [35] INACAL, «NTP 339.114 CONCRETO. Concreto premezclado. Requisitos». 2022.

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO EN CLIMAS DE CONDICIONES ESPECIALES

Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción – SENCICO

Av. De la Poesía 351

Lima 41, Perú

Teléfono: (511) 2116300

www.sencico.gob.pe

GERENCIA DE INVESTIGACIÓN Y NORMALIZACIÓN

Documento elaborado por:

Dr. Pablo Jhoel Peña Torres

Primera Edición: junio 2023

Lima, Perú

2023