



Cámara Mexicana de la
Industria de la Construcción



LA DURABILIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

FORO
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
EN LA CONSTRUCCIÓN DE
CARRETERAS

Ing Eduardo Hiriart

LA DURABILIDAD DEL CONCRETO HIDRÁULICO EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

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



MECANISMOS QUÍMICOS DE DETERIORO EN EL CONCRETO.

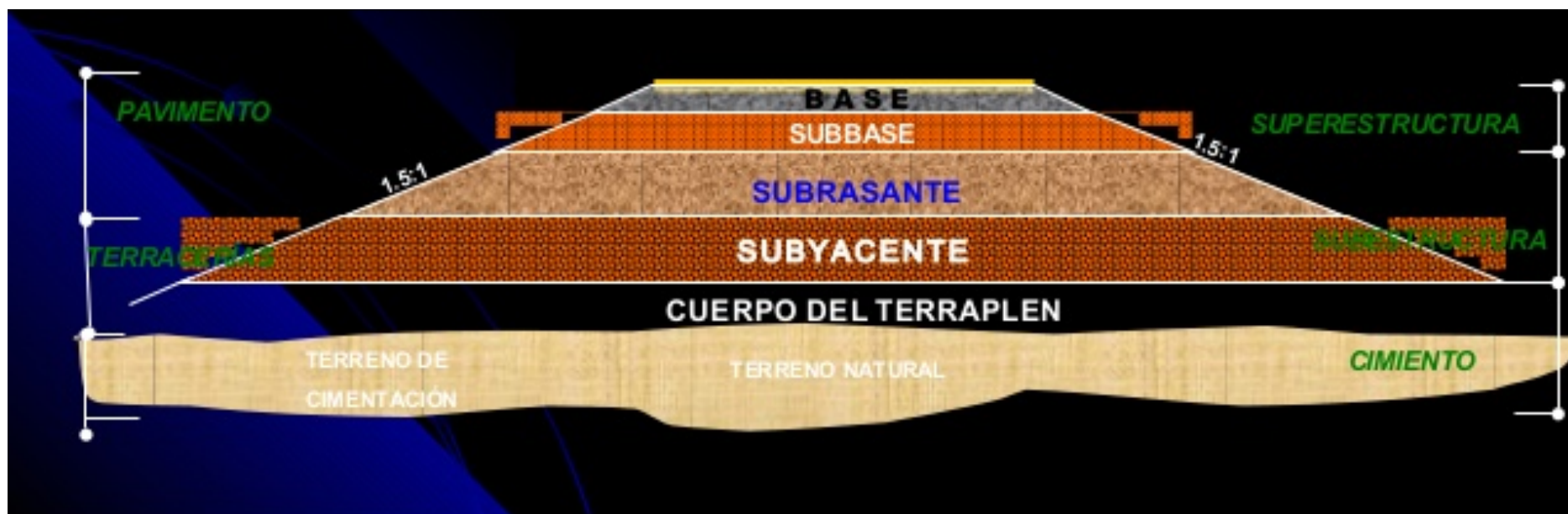
Ataques químicos por sulfatos o cloruros.

Reacción álcali-agregado.

Corrosión del acero de refuerzo.



SULFATOS EN LAS CAPAS INFERIORES AL PAVIMENTO





Cámara Mexicana de la
Industria de la Construcción

SCT
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



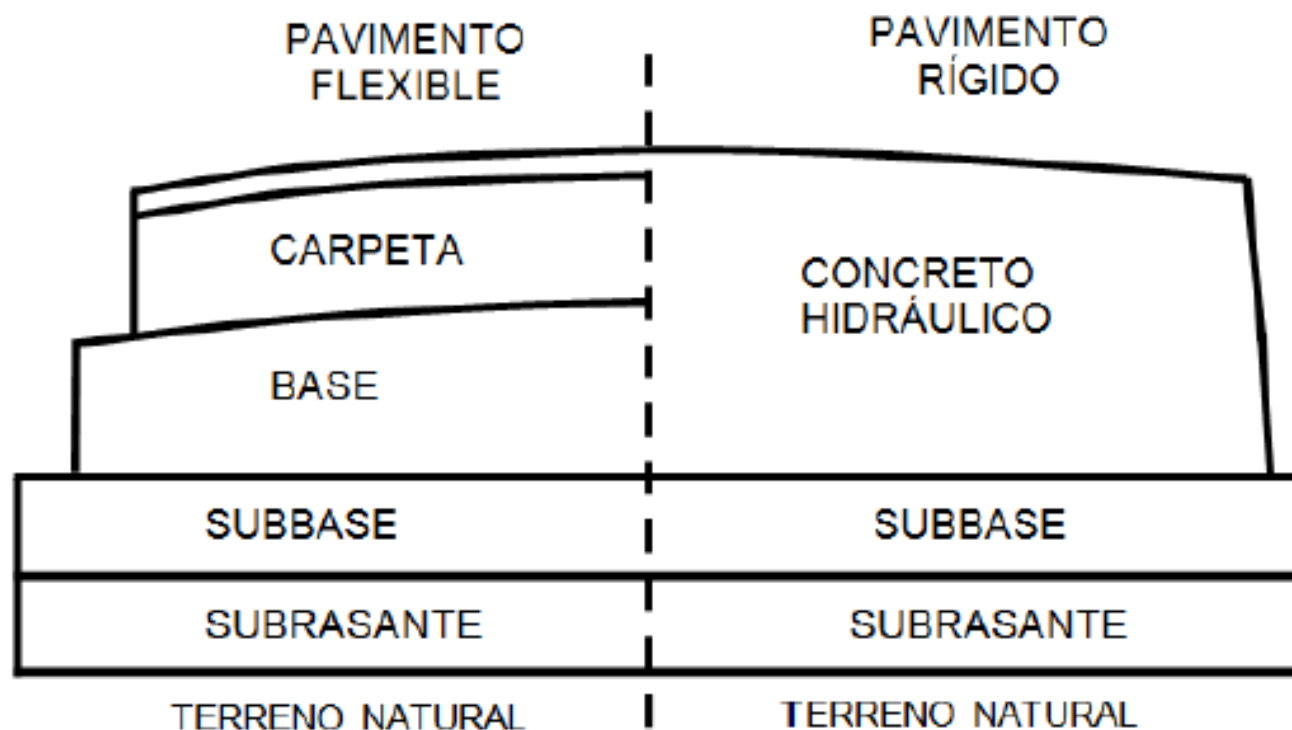
Concretos
MOCTEZUMA

FORO
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
EN LA CONSTRUCCIÓN DE
CARRETERAS

Terracerías



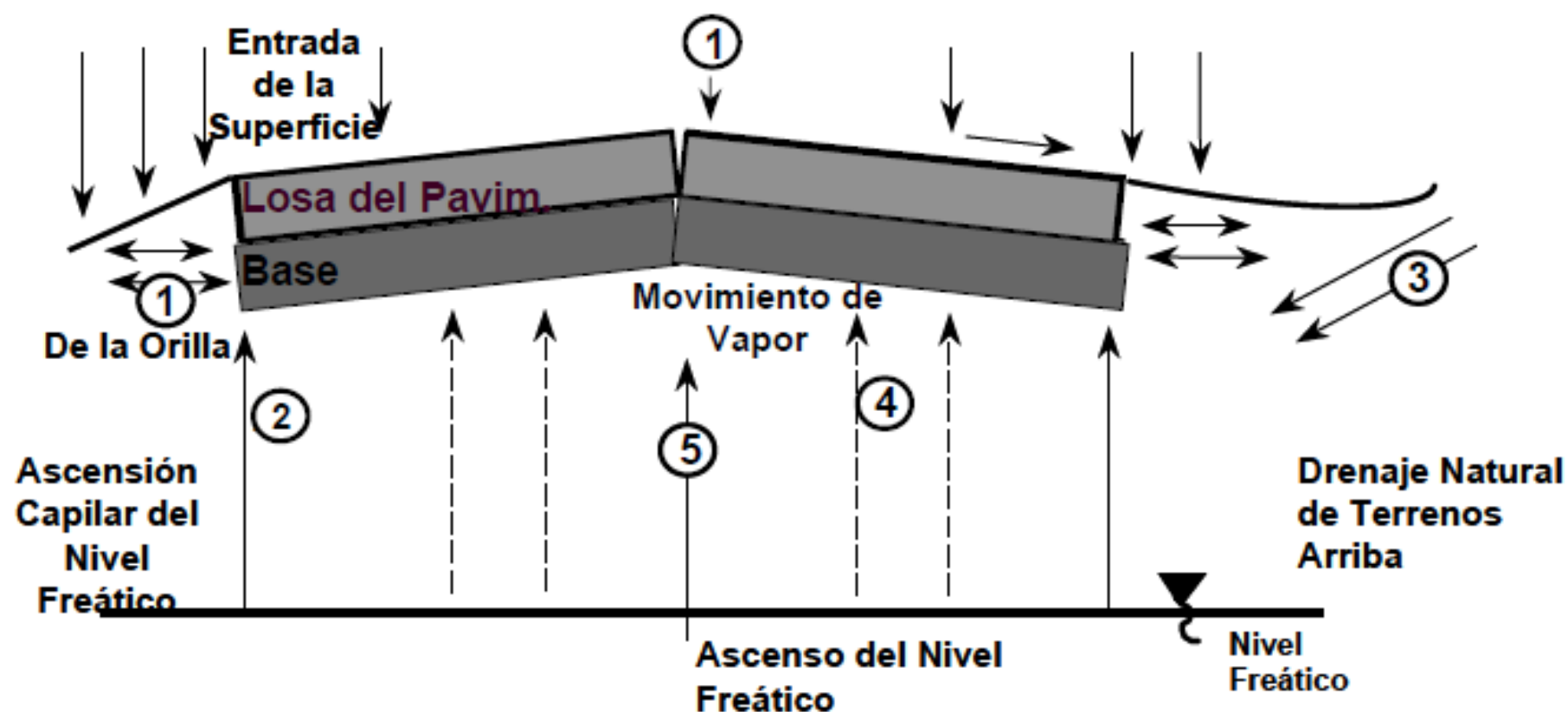
SULFATOS EN LAS CAPAS INFERIORES AL PAVIMENTO



Limos o arcillas orgánicas de alta plasticidad
Limos o arcillas orgánicas de baja plasticidad
Arcilla de alta plasticidad
Arcilla de baja plasticidad
Limo de alta plasticidad
Limo de baja plasticidad
Arena arcillosa
Arena limosa
Arena mal graduada
Grava arcillosa
Grava limosa
Grava mal graduada
Rocas



Avenidas para entrada de agua





Cámara Mexicana de la
Industria de la Construcción

SCT
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



Concretos
MOCTEZUMA

FORO
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
EN LA CONSTRUCCIÓN DE
CARRETERAS



COSTO DEL CICLO DE VIDA

Durabilidad de los proyectos

Es un aspecto cada vez más importante a nivel mundial.

Los diseños de los pavimentos rígidos se especifican para una vida útil :

- en México de **20 a 25** años.
- en Estados Unidos los están llevando a períodos de **30 a 40** años.
- en Europa no es raro que se diseñen para **50** años ó más.



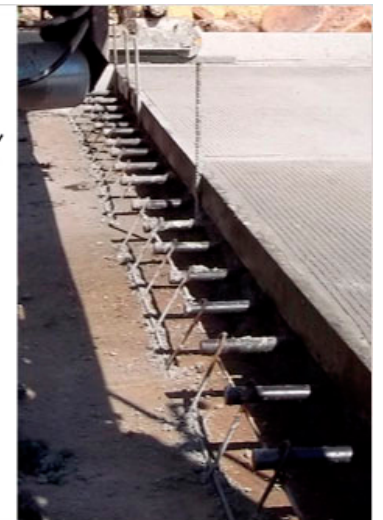
Cámara Mexicana de la
Industria de la Construcción



FORO
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN
EN LA CONSTRUCCIÓN DE
CARRETERAS



EL CONCRETO AFECTADO POR SULFATOS GENERA FISURAS QUE FACILITAN EL DETERIORO DEL ACERO



ACI 318 14

Categoría S – Exposición a sulfatos

Categoría	Severidad	Clase	Condición	
S Sulfato			SO_4 en el suelo, % en peso	SO_4 disuelto en agua, ppm
	No aplicable	S0	$\text{SO}_4 < 0.10$	$\text{SO}_4 < 150$
	Moderada	S1	$0.10 \leq \text{SO}_4 < 0.20$	$150 \leq \text{SO}_4 < 1500$ agua marina
	Severa	S2	$0.20 \leq \text{SO}_4 \leq 2.00$	$1500 \leq \text{SO}_4 \leq$ 10000
	Muy severa	S3	$\text{SO}_4 > 2.00$	$\text{SO}_4 > 10000$

Categoría S – Exposición a sulfatos

Clase de Exposición	Rel. a/mc máx.	f'_c min. MPa	Requisitos mínimos adicionales			
			Tipos de material cementante*			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157	
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0.50	28	II†‡	IP(MS), IS(<70) (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.45	31	V†	IP(HS), IS(<70) (HS)	HS	No se permite
S3	0.45	31	V puzolanas o escoria§	IP(HS) y puzolanas o escoria§ o IS(<70) (HS) y puzolanas o escoria§	HS y puzolanas o escoria§	No se permite

ASTM C 150	CEMENTOS I, II, III, IV, V
ASTM C 595	IS ESCORIA, SM ESCORIA MODIFICADO
	IS+ ESCORIA , IP PUZOLANICO, P PUZ EDAD X, PM PUZ MODIFICADO
ASTM C 1157	HE RESIST TEMP ALTA
	MS RESIST MODERADA A SULFATOS
	HS ALTA RESIST A SULFATOS
	MH MODERADO CALOR DE HIDRATACION
	LH BAJO CALOR DE HIDRATACION

ACI 318 14

**TABLA 4.5.1 — REQUISITOS PARA ESTABLECER LA
CONVENIENCIA DE LAS COMBINACIONES DE MATERIALES
CEMENTANTES EXPUESTOS A SULFATOS SOLUBLES EN AGUA**

Clase de exposición	Expansión máxima al ser ensayada usando ASTM C1012		
	A 6 meses	A 12 meses	A 18 meses
S1	0.10 por ciento		
S2	0.05 por ciento	0.10 por ciento*	
S3			0.10 por ciento

CAMBIO DE LONGITUD DE BARRAS DE MORTERO EXPUESTAS A UNA SOLUCIÓN DE SULFATO DE SODIO

ASTM C 1012

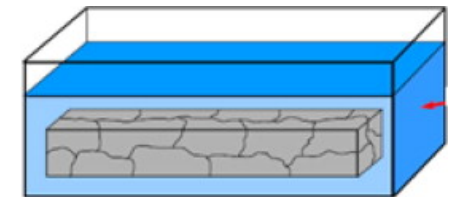
NMX C 418

Este método de ensayo cubre la determinación del cambio de longitud de barras de mortero sumergidas en una solución de sulfato de sodio. Las barras de mortero, elaborado en base a ASTM C 109 se curan hasta que se alcance una resistencia de 200 kg/cm² medida por la resistencia de cubos del mismo mortero, antes de sumergir las barras en la solución de sulfatos



**TABLA 4.5.1 — REQUISITOS PARA ESTABLECER LA
CONVENIENCIA DE LAS COMBINACIONES DE MATERIALES
CEMENTANTES EXPUESTOS A SULFATOS SOLUBLES EN AGUA**

Clase de exposición	Expansión máxima al ser ensayada usando ASTM C1012		
	A 6 meses	A 12 meses	A 18 meses
S1	0.10 por ciento		
S2	0.05 por ciento	0.10 por ciento*	
S3			0.10 por ciento



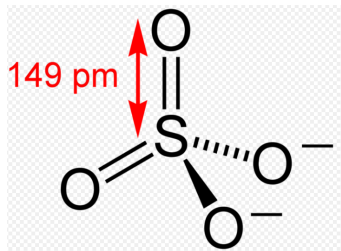
SULFATOS



Los sulfatos SO_4 son las sales o los ésteres del ácido sulfúrico. Contienen como unidad común un átomo de azufre con cuatro átomos de oxígeno.

Los ésteres son compuestos **orgánicos** derivados de petróleo o **inorgánicos** oxigenados en los cuales uno o más protones son sustituidos por grupos orgánicos.

Los compuestos **orgánicos** contienen siempre carbono (y muy a menudo hidrógeno formando enlaces Carbono-Hidrógeno), mientras que la mayoría de los compuestos **inorgánicos** No contienen carbono.



SULFATOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS

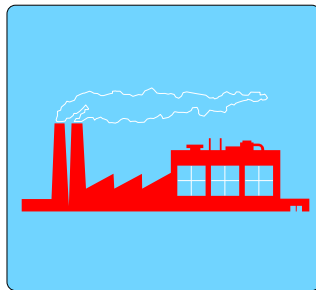
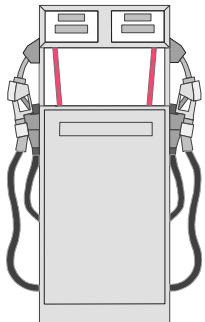
ORGÁNICOS

Metanol o alcohol metílico, Acetileno C_2H_2 , Acetato de etilo, Acetona, Formol, Glicerina, el petróleo, el aceite, los alcoholes



INORGÁNICOS

Cloruro de sodio, Ácido clorhídrico, Ácido Fosfórico, Hidróxido de sodio, Hidroxido de potasio, Ácido sulfúrico, Amoniaco, Ácido nítrico, Cloruro de plata, Sulfato de cobre, etc.



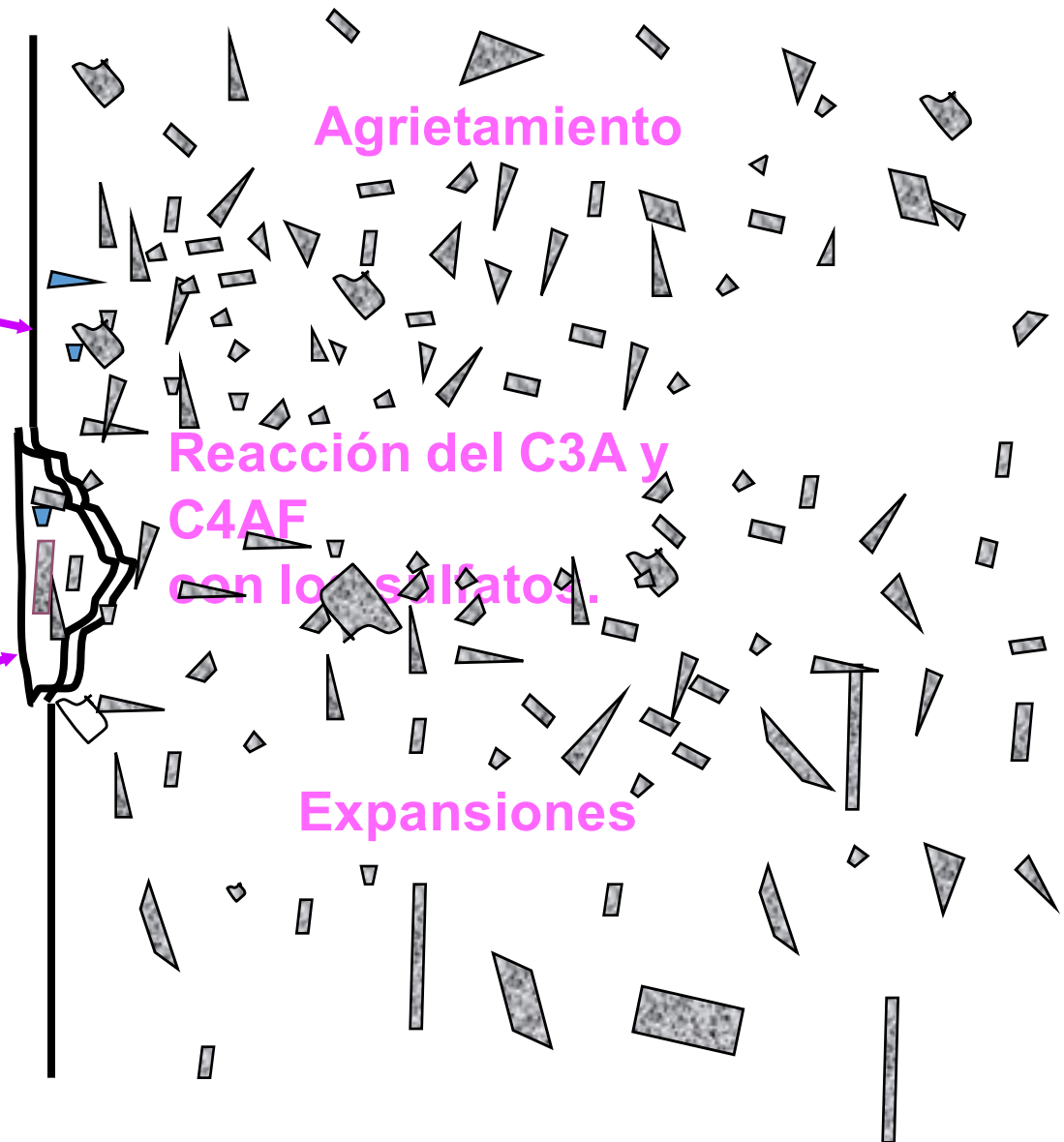
- Reacción del sulfato con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando sulfatos de calcio (yeso).
- Reacción del sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado, formando sulfoaluminato de calcio (etringita).

Estas dos reacciones dan como resultado un incremento en el volumen de sólidos, causa de la expansión y descomposición de los concretos expuestos a soluciones de sulfatos.

ATAQUE POR SULFATOS

Solución de sulfatos
provenientes del medio
ambiente

Difusión de sulfatos a través
del sistema capilar del
concreto



CONCRETO EXPUESTO A SULFATOS ACI 318 14

S Sulfato			Sulfatos solubles en agua (SO₄) en el suelo, % en peso	Sulfato (SO₄) disuelto en agua, ppm
	No aplicable	S0	SO ₄ < 0.10	SO ₄ < 150
	Moderada	S1	0.10 ≤ SO ₄ < 0.20	150 ≤ SO ₄ < 1500 agua marina
	Severa	S2	0.20 ≤ SO ₄ ≤ 2.00	1500 ≤ SO ₄ ≤ 10000
	Muy severa	S3	SO ₄ > 2.00	SO ₄ > 10000

2 % sulfatos en el suelo
En 1000 g equivale a 20 g

10 000 ppm (1 % de 1 mil) de
sulfatos disueltos en agua
1 % de 1000 ml equivale a 10 ml



Instituto Mexicano del
Cemento y del Concreto, A.C.
Insurgentes Sur No. 1666, Col. Florida
Del. Álvaro Obregón
C.P. 01030, México, D.F.
Tel.: (01 55) 5322-5740, 5662-6696
Fax: (01 55) 5322-5742
imcy@imel.imcy.com
www.imcy.com

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUA				
Orden de Trabajo No.	30	Informe Técnico No.	021Q017	Hoja No. 1 de 2
Cliente: LATINOAMERICANA DE CONCRETOS SA DE CV				
Muestra No. Q103- UNA MUESTRA DE AGUA				
RESULTADOS DEL ANALISIS				
		Resultados expresados en mg/l (p.p.m.)	Especificación (Límites Máximos)	
			Cementos Ricos en calcio	Cementos Sulfato Resistentes
Color		AMARILLENTO		
Olor		INODORO		
Aspecto		TURBIO		
Sedimento (Impurezas en solución)		27 400	3 500 p.p.m.	4 000 p.p.m.
pH		7,7	No. menor de 6,0	No. menor de 6,5
Cloruros (Cl ⁻)		25 181	400 p.p.m.	600 p.p.m.
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)		3 626	3 000 p.p.m.	3 500 p.p.m.
Alcalinidad (CO ₃ ⁻²)		-	600 p.p.m.	600 p.p.m.
Alcalinidad (HCO ₃ ⁻)		187	600 p.p.m.	600 p.p.m.
Calcio (Ca ⁺²)		0		
Magnesio (Mg ⁺²)		431	100 p.p.m.	150 p.p.m.
Materia Orgánica (Oxígeno consumido en medio ácido)		7	150 p.p.m.	150 p.p.m.
Grasas y aceites		0	0 p.p.m.	-
Alcalis totales (Na ⁺)		702	300 p.p.m.	450 p.p.m.
Sólidos en suspensión (Limos y arcillas)		0	2 000 p.p.m.	2 000 p.p.m.
Observaciones: Los resultados son únicamente para la muestra recibida.				
El muestreo y procedencia fue responsabilidad del				
IMCYC () CLIENTE (X)				
Referencias: NMX-C-122-ONNOCCE-2004*				
* Fuera del alcance de acreditación				
Realizó: Alejandro Ibarra Barrantes Técnico Laboratorio Cemento		Revisó: Ing. Mario A. Hernández Hernández Gerente Técnico		Fecha de elaboración: 2017-02-16

Sulfatos en el agua
ppm

Resultados expresados en
mg/l (p.p.m.)

		Cementos Ricos en calcio		Cementos Sulfato Resistentes
Color		AMARILLENTO		
Olor		INODORO		
Aspecto		TURBIO		
Sedimento (Impurezas en solución)		27 400	3 500 p.p.m.	4 000 p.p.m.
pH		7,7	No. menor de 6,0	No. menor de 6,5
Cloruros	(Cl ⁻)	26 181	400 p.p.m.	600 p.p.m.
Sulfatos	(SO ₄ ⁻²)	3 626	3 000 p.p.m.	3 500 p.p.m.
Alcalinidad	(CO ₃ ⁻²)	-	600 p.p.m.	600 p.p.m.
Alcalinidad	(HCO ₃ ⁻)	187	600 p.p.m.	600 p.p.m.
Calcio	(Ca ⁺²)	0		
Magnesio	(Mg ⁺²)	431	100 p.p.m.	150 p.p.m.
Materia Orgánica		7	150 p.p.m.	150 p.p.m.
(Oxígeno consumido en medio ácido)				
Grasas y aceites		0	0 p.p.m.	-
Álcalis totales	(Na ⁺)	702	300 p.p.m.	450 p.p.m.
Sólidos en suspensión		0	2 000 p.p.m.	2 000 p.p.m.
(Limos y arcillas)				



Instituto Mexicano del
Cemento y del Concreto, A.C.
Insurgentes Sur No. 1846, Col. Florida
Del. Álvaro Obregón
C.P. 01030, México, D.F.
Tel. (01 55) 5322-5748, 5462-8604
Fax (01 55) 5322-5742
imcy@imci.com.mx
www.imcy.com

EVALUACION DE PARAMETROS POTENCIALMENTE AGRESIVOS			
Orden de Trabajo No.	30	Informe Técnico No.	021/2017
Hoja No.	1	de	2
Cliente: LATINOAMERICANA DE CONCRETOS SA DE CV			
Muestra No. Q104- UNA MUESTRA DE SUELO			
DETERMINACION DE CLORUROS, SULFATOS Y pH			
Determinación de Cloruros (CL ⁻)	0,57	%	
Determinación de Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	0,14	%	
Determinación del grado de Alcalinidad (pH)	8,0		
ESPECIFICACIONES EXTRAIDAS DE ACI 318			
Especificación para Sulfatos Soluble en Agua (SO ₄) en el Suelo % de Peso			
GRADO DE ATAQUE POR SULFATOS CONTENIDOS EN LA MUESTRA	PORCENTAJE DE SULFATOS		
No Aplicable	0,00 - 0,10		
Moderado	0,10 - 0,20		
Severo	0,20 - 2,00		
Muy Severo	más de 2,00		
ESPECIFICACIONES EXTRAIDAS DEL ACI 318 / ACI 201.2R			
Límites de Porcentaje de Cloruro % en Peso para Construcciones Nuevas			
TIPO DE ELEMENTO	CONTENIDO MAXIMO DE IONES DE CLORUROS %		
Concreto Preforzado	0,06		
Concreto Reforzado en Humedo en Servicio	0,08		
Concreto Reforzado en Seco Servicio	0,15		
Especificaciones para p.H.			
No Menor a 6,5			
Observaciones			
El muestreo y procedencia fue responsabilidad del IMCYC (), CLIENTE (X)			
Referencias: ASTM-C-114-11a*, ASTM C 1218/C 1218M-99(2005)*, ASTM D 1293-99(2005)*			
* Fuera del alcance de acreditación			
Realizó: Alejandro Ibarra Barrientos Técnico Laboratorio Cemento	Revisó: Ing. Mario A. Hernandez Hernandez Gerente Técnico	Fecha de elaboración: 2017-02-16	

Sulfatos en el suelo
% en peso

DETERMINACION DE CLORUROS, SULFATOS Y pH

Determinación de Cloruros (Cl^-)	0,57	%
Determinación de Sulfatos (SO_4^{2-})	0,14	%
Determinación del grado de Alcalinidad (pH)	8,0	

ESPECIFICACIONES EXTRAIDAS DE ACI 318

Especificación para Sulfatos Soluble en Agua (SO_4) en el Suelo % de Peso	
GRADO DE ATAQUE POR SULFATOS CONTENIDOS EN LA MUESTRA	PORCENTAJE DE SULFATOS
No Aplicable	0,00 - 0,10
Moderado	0,10 - 0,20
Severo	0,20 - 2,00
Muy Severo	más de 2,00

ESPECIFICACIONES EXTRAIDAS DEL ACI 318 / ACI 201.2R

Limites de Porcentaje de Cloruro % en Peso para Construcciones Nuevas	
TIPO DE ELEMENTO	CONTENIDO MAXIMO DE IONES DE CLORUROS %
Concreto Presforzado	0,06
Concreto Reforzado en Humedo en Servicio	0,08
Concreto Reforzado en Seco Servicio	0,15

CEMENTO RESISTENTE A SULFATOS

NMX C 414

El cemento CPC 40 RS debe tener expansiones
menores a 0.10 % a 1 año

TABLA 6. Especificaciones de los cementos con características especiales

Nomen- clatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos (máx. %)	Expansión por la reacción álcali agregado (máx. %)		Calor de hidratación (máx.) kJ/kg (kcal/kg)	
		1 Año	14 días	56 días	7 días	28 días
RS	Resistente a los Sulfatos	0,10	---	---	---	---
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado	---	0,020	0,060	---	---
BCH	Bajo Calor de Hidratación	---	---	---	250 (60)	290 (70)
B	Blanco	---	---	---	---	---



CEMENTO RESISTENTE A SULFATOS



CERTIFICADO DE CALIDAD



JULIO 2015

CPC 40 RS

(CEMENTO PORTLAND COMPUESTO CLASE 40, RESISTENTE A SULFATOS)

CUMPLE ESPECIFICACIONES DE NMX-C-414-ONNCCE-2014

CERTIFICACIÓN ONNCCE BDO-009.4-001/13

ESPECIFICACIONES FISICAS

MÁXIMO A 1 AÑO 0,10

VALOR OBTENIDO

*0,06 **

ENSAYES	ESPECIFICACIONES NMX-C-414-ONNCCE-2014	VALORES OBTENIDOS
TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL (MINUTOS) FINAL (MINUTOS)	MÍNIMO 45 MÁXIMO 600	108 230
ESTABILIDAD DE VOLUMEN EN AUTOCLAVE (%)	EXPANSIÓN MÁXIMA 0,8	
	CONTRACCIÓN MÁXIMA 0,20	-0,014
EXPANSIÓN POR SULFATO "RS" %	MÁXIMO A SEIS MESES 0,05 (ESPECIFICACIÓN INTERNA)	0,04 *
	MÁXIMO A 1 AÑO 0,10	0,06 *
BLAINE (cm ² /g)		3990
FINURA 45 μ (%)		98,6
RESISTENCIA A LA COMPRESION (N/mm ²)		
3 DIAS		28,9
28 DIAS	MÍNIMO 40	43,7

REACTIVIDAD ALCALI - AGREGADO

RAA

La RAA es un fenómeno químico, que se produce en el interior del concreto, debido a la reacción de la sílice de los agregados y los álcalis disueltos en la pasta de cemento hidratada.

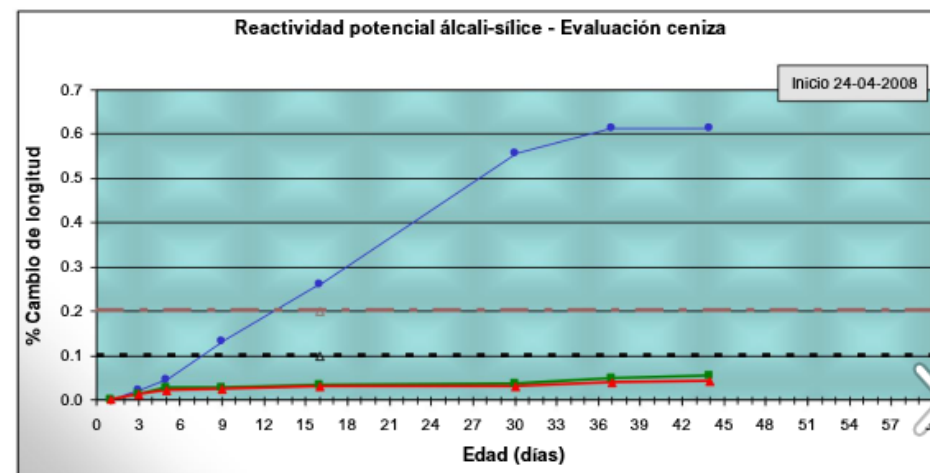
Esta reacción es lenta, pero en presencia de humedad y altas temperaturas aceleran el daño.

La degradación se presenta como fisuras, expansiones, deformaciones excesivas, reducción de la resistencia y de la vida útil de la estructura.



ASTM C 1260 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”

Sobre un mortero similar al descrito en la ASTM C 227 se fabrican viguetas que son sumergidas durante 16 días a 80 ° C en una solución de NaOH (1 N). Este método acelerado es el más usado en la actualidad.



Las zonas establecidas son:

0.0% - 0.1% = Inocuo

0.1% - 0.2% = Potencialmente reactivo

➤ 0.2% = Reactivo

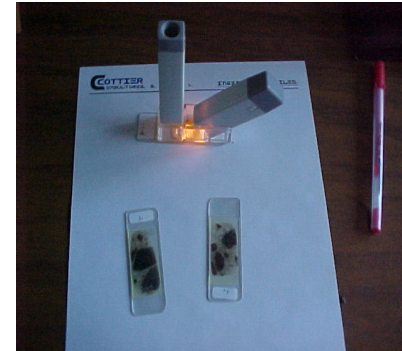
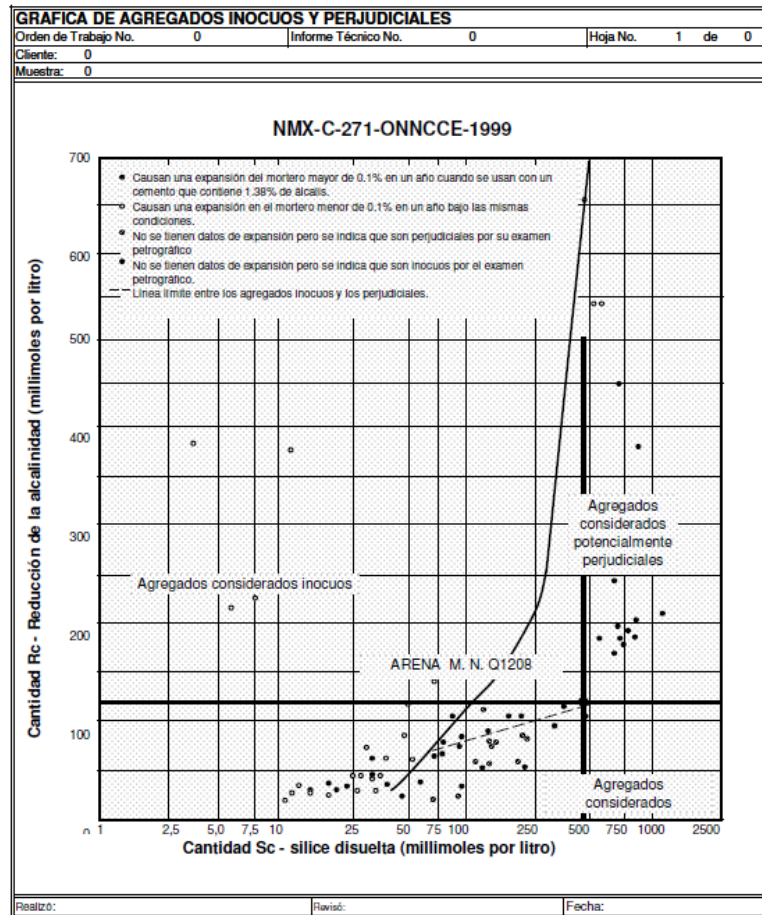
AGREGADOS REACTIVOS

Tabla 5.1 – Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados

Sustancia reactiva	Composición química	Naturaleza física
Ópalo	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amorfa
Calcedonia	SiO_2	Microcristalina a criptocristalina; generalmente fibrosa
Ciertas formas de cuarzo	SiO_2	(a) Microcristalina a criptocristalina; (b) Cristalina, pero intensamente fracturada, bajo tensión y/o llena de inclusiones
Cristobalita	SiO_2	Cristalina
Tridimita	SiO_2	Cristalina
Riolita, dacita, latita o andesita	Silíceos, con proporciones menores de Al_2O_3	Vítrea o criptocristalina
Vidrio o productos de la devitrificación criptocristalina	FeO_{22} , tierras alcalinas y álcalis	Materiales como la matriz de las rocas volcánicas o los fragmentos de las tufas
Vidrios silíceos sintéticos	Silíceos, con proporciones menores de álcalis, alúmina, otras sustancias o todo lo anterior	Vítrea

SiO_2 Dióxido de Silicio

EXAMEN PETROGRÁFICO, PRUEBA QUÍMICA Y PRISMAS

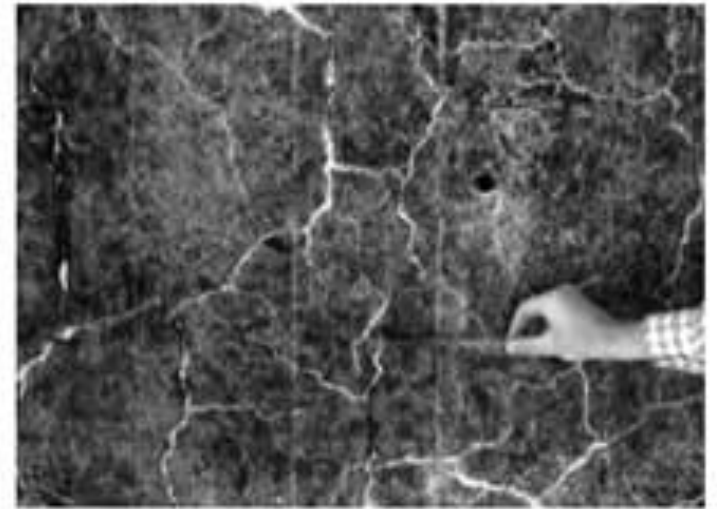




a)

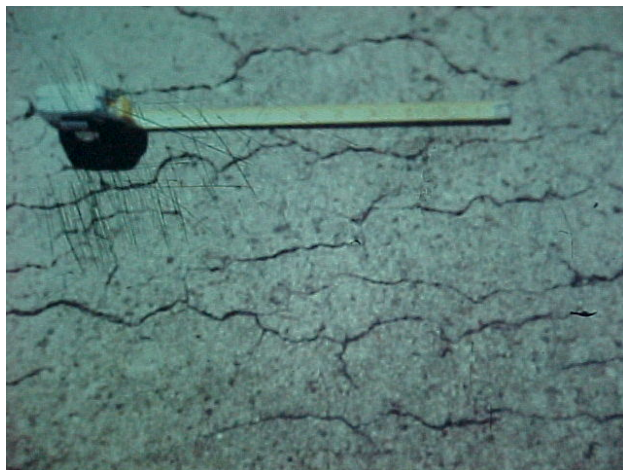


b)



c)

REACTIVIDAD ALCALI AGREGADO



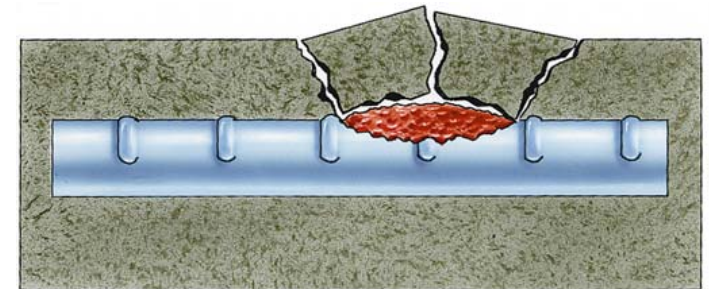
Carbonatación

Causas de la corrosión

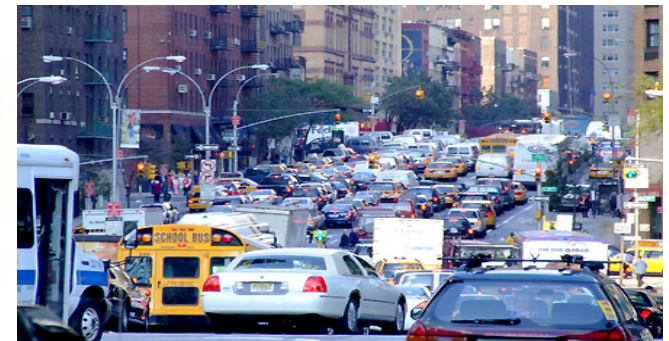
El bióxido de carbono CO_2 de la atmósfera reacciona con el hidróxido de calcio Ca OH_2 del concreto para formar carbonato de calcio Ca O_3 , que al llegar al acero de refuerzo queda a merced de agentes corrosivos como el agua, oxígeno y cloruros.

Cementos con alto C_3A bajan mas rápido el PH del concreto ($\text{C}_3\text{A} > 7\%$)

Disminución del pH cuando los gases ácidos de la atmósfera (CO_2 , SO_2 , NO_2) se disuelven en la solución de poro del concreto.



CO_2 dióxido de carbono SO_2 dióxido de azufre NO_2 dióxido de nitrógeno



Causas de corrosión

Cloruros (Cl^-)

Endógenos: Ingredientes del concreto

Exógenos: Cloruros del medio ambiente que penetran al concreto y al acero por difusión del ion cloruro Cl^-

Límites máximos de cloruros endógenos en el concreto

Umbral de riesgo: 0.3 % de cloruros solubles en agua del cemento en masa

Ej . 300 kg de cemento $300 \times 0.003 = 0.9 \text{ kg (Cl)}/\text{m}^3$ de concreto

IONES CLORURO EN EL CONCRETO

ASTM C 1218
CLORUROS EN EL
CONCRETO

TABLA 4.4.1 — CONTENIDO MÁXIMO DE IONES CLORURO PARA LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DEL REFUERZO

Tipo de elemento	Contenido máximo de iones de cloruro (Cl^-) solubles en agua en el concreto, porcentaje en peso de cemento
Concreto preesforzado	0.06
Concreto reforzado que en servicio estará expuesto a cloruros	0.15
Concreto reforzado que en servicio estará seco o protegido contra la humedad	1.00
Otras construcciones de concreto reforzado	0.30

Ej. 0.15 % de cloruros

En 300 kg equivale a 450 g

Protección del acero de refuerzo

Para condiciones ambientales muy agresivas, es necesario la aplicación de métodos de protección adicional.

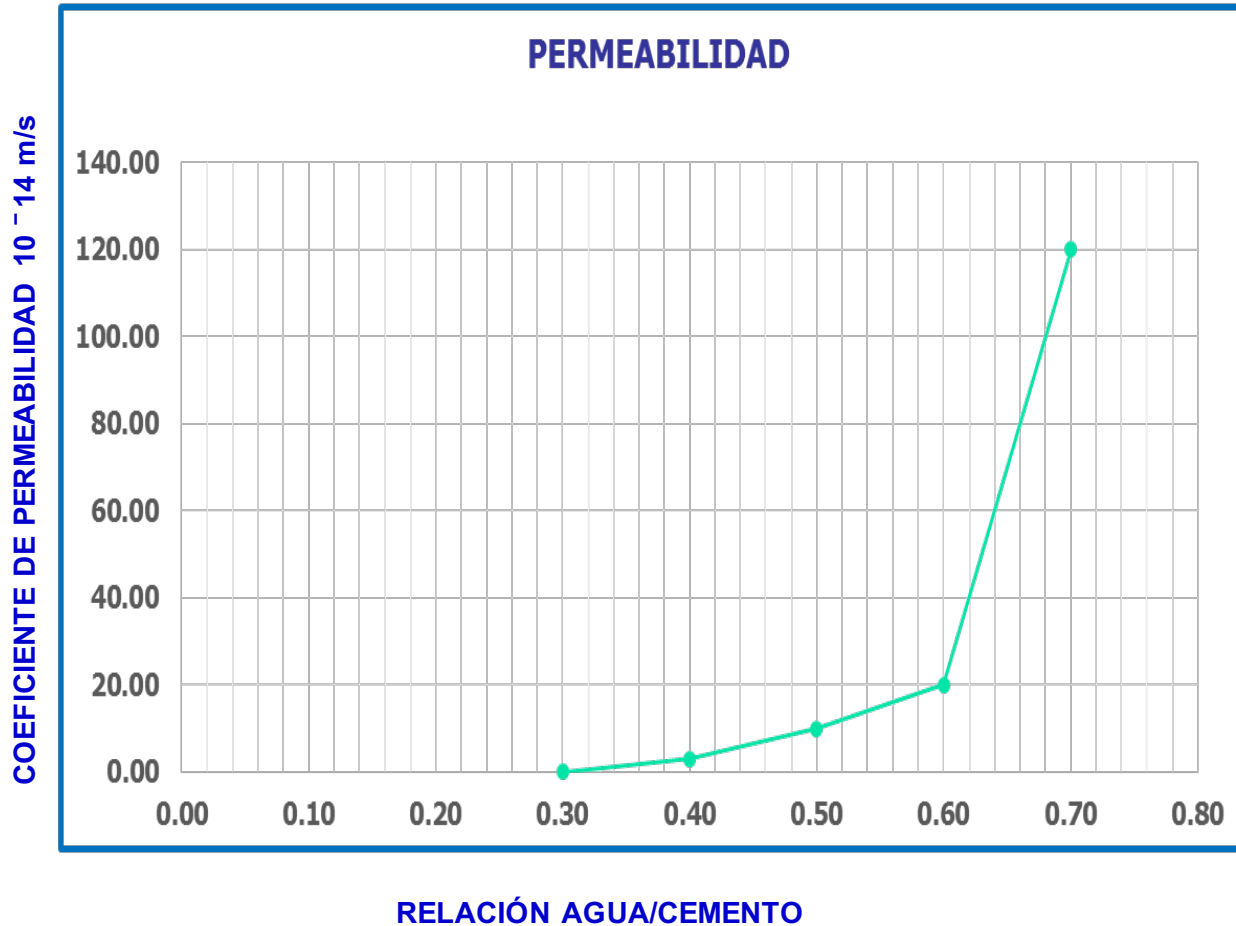
Acero galvanizado

Recubrimiento epoxi

Acero inoxidable.



Permeabilidad del concreto



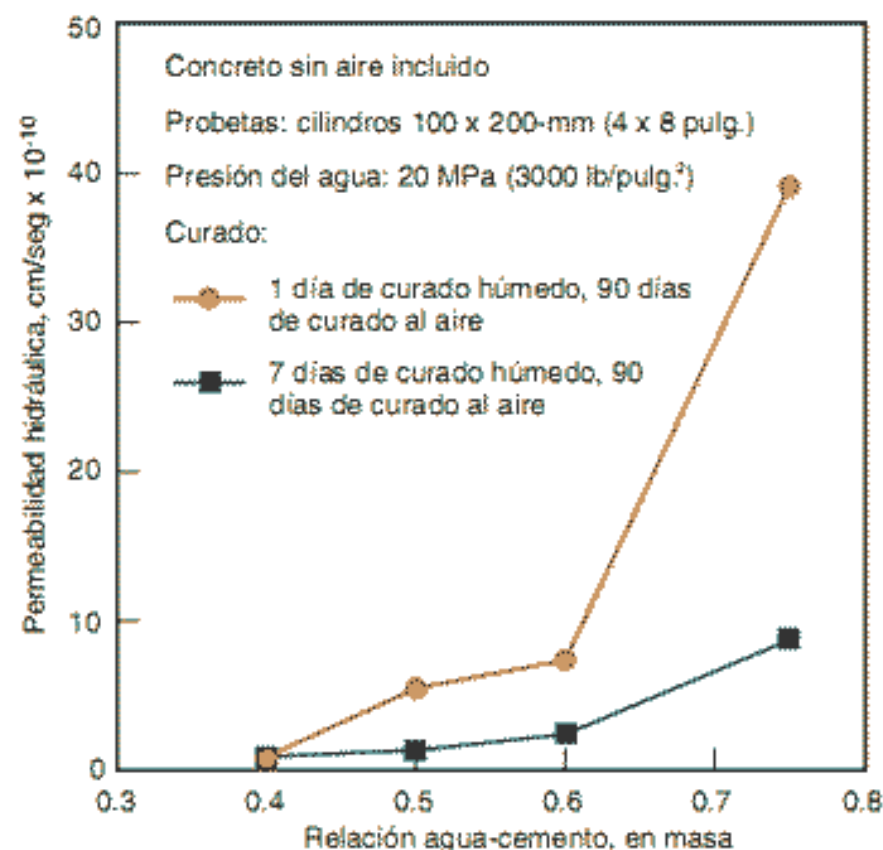
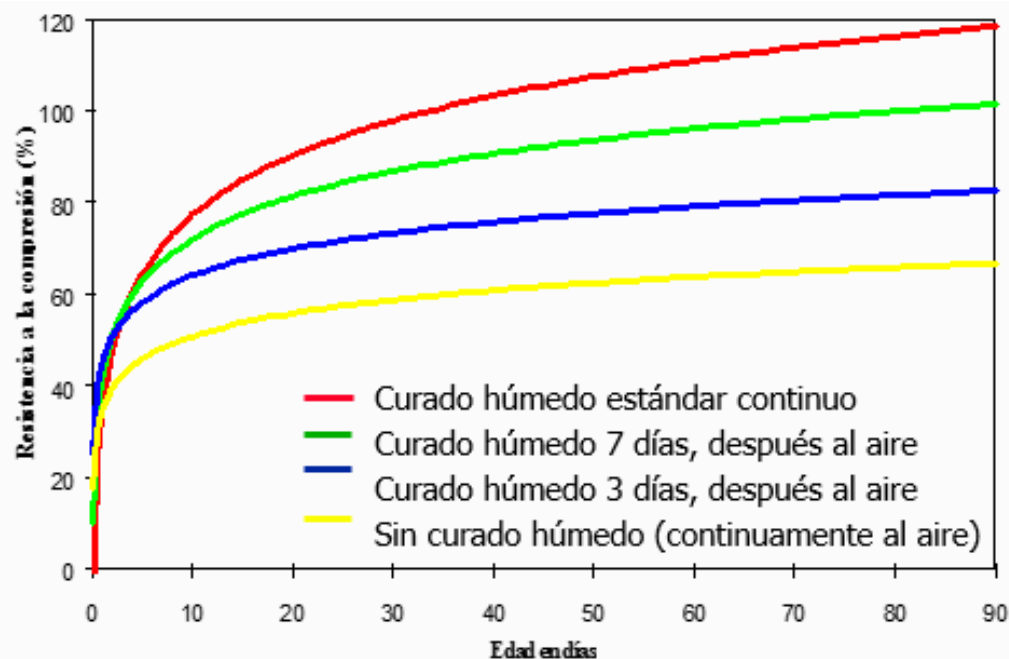
**Relación agua libre /
cemento**

$$180 / 280 = 0.64$$

$$180 / 320 = 0.56$$

$$180 / 390 = 0.46$$

Efecto del curado en la resistencia y en la permeabilidad



Prueba de la Permeabilidad del ion cloruro en el concreto

ASTM C 1202



Permeabilidad del concreto

Table 1. Comparison of RCP Results with Ponding Tests (AASHT (Whiting 1981).

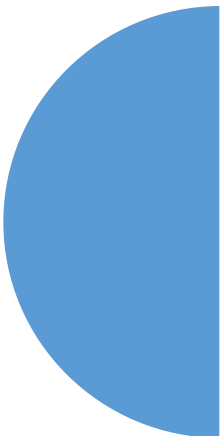
Chloride Permeability	Charge (Coulombs)	Type of Concrete
High	> 4,000	High water-to-cement ratio (>0.6) conventional Portland cement concrete
Moderate	2,000-4,000	Moderate water-to-cement ratio (0.4-0.5) conventional Portland cement concrete
Low	1,000-2,000	Low water-to-cement ratio (<0.4) conventional Portland cement concrete
Very Low	100-1,000	Latex modified concrete, internally sealed concrete
Negligible	<100	Polymer impregnated concrete, polymer concrete

VIDA UTIL DE LAS ESTRUCTURAS

TIPO DE ESTRUCTURA

VIDA UTIL DE PROYECTO

Pistas de aeropuertos	30-50
Puentes	120
Presas	100-200
Edificios	60-100
Obras portuarias	80-120
Fabricas	25-50
Oficinas y casas	50-100



**GRACIAS POR
SU ATENCIÓN**