



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO

Caso de Estudio de Puentes en Chile

Revisión histórica

Relator:

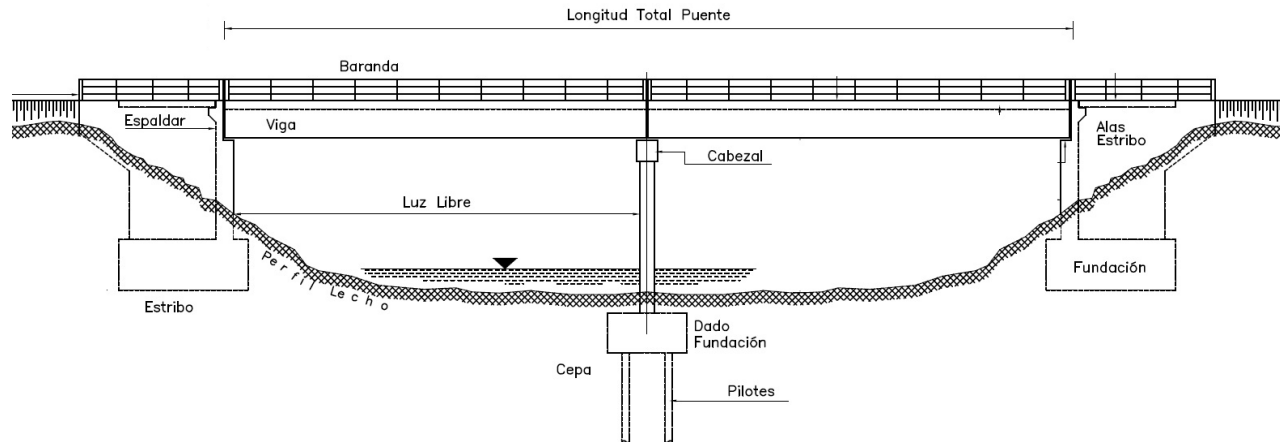
Dr. Ing. Matías A. Valenzuela



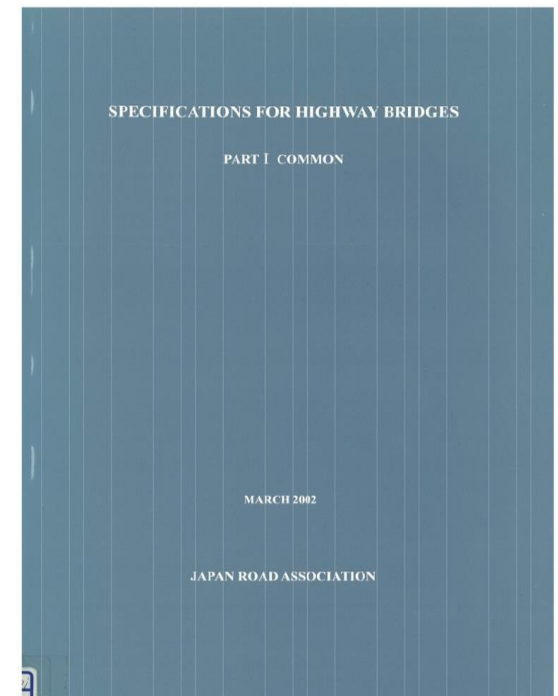
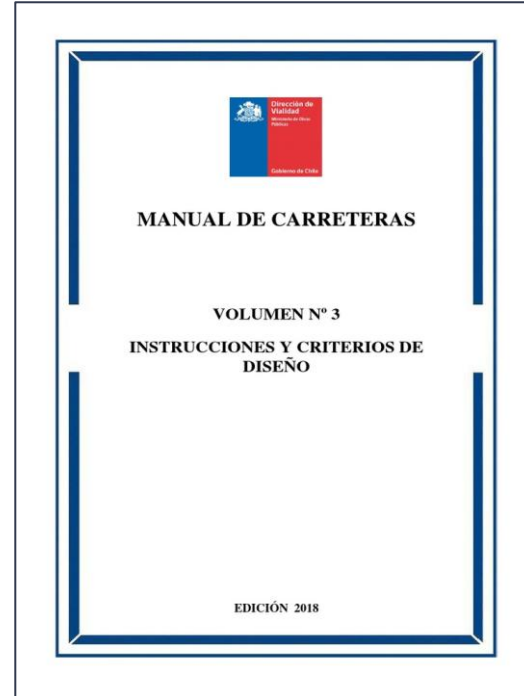
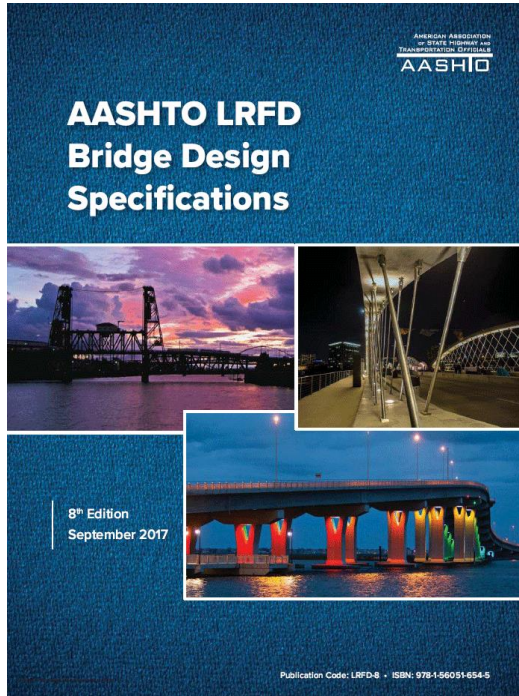
Montevideo
Agosto 2023

PUNTES TRADICIONALES

- Un puente es una estructura que permite cruzar un accidente geográfico como río, valle, cañón, carretera o línea férrea.
- Los puentes tradicionales son estructuras en general de hormigón armado, que se apoya sobre una o mas cepas y sus extremos sobre estribos.



PELIGRO SISMICO EN CHILE



EVOLUCIÓN NORMATIVA – INICIOS



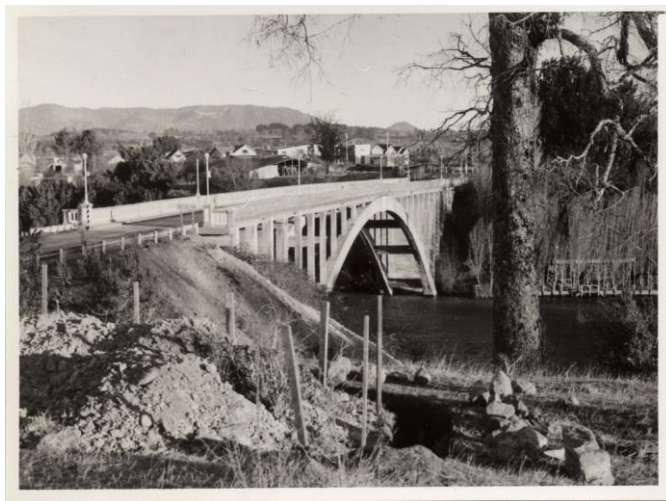
Terremoto de Quilpue de 1906
Fuente: bibliotecanacionaldigital.gob.cl



Terremoto de Talca de 1928
Fuente: <https://www.emol.com>

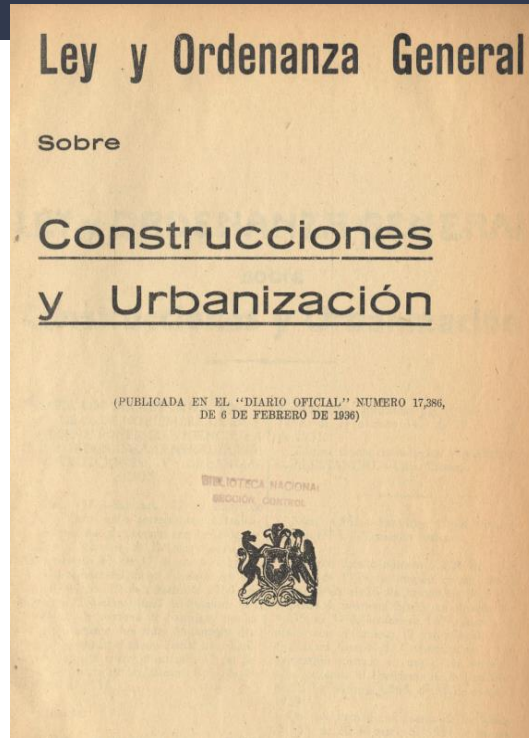
Puentes de Acceso a Villarrica

1910



Primer Puente Toltén en Villarrica, estructurado con un tramo central en arco de madera y tramos laterales tipo marco. Años más tarde, fue reemplazado por un puente de madera sobre pilotes rieles y posteriormente, por un arco de hormigón armado. Hoy se ha puesto en servicio un segundo puente en arco de hormigón armado.

EVOLUCIÓN NORMATIVA – 1920 a 1940



Ley de Ordenanza General de 1935
Fuente: memoriachilena.gob.cl

- Se convirtió en la guía de diseño de puentes de la década.
- Filosofía de diseño y construcción deficiente.
- Gran colapso de puente

Puentes de Hormigón Armado

1925 - 1950



En 1925, junto con la creación del Departamento de Caminos, comienza a masificarse el uso del hormigón armado en estructuras de puentes, ya sea en tipologías tipo marco o vigas con losa, con luces no mayores a 24 m.

Varias de estas estructuras aun prestan servicio.

EVOLUCION NORMATIVA – 1940 a 1960



American Association of State Highway and
Transportation Officials
Fuente: transportation.org



Deutsches Institut für Normung
Fuente: din.de

Puentes en arco de Hormigón Armado

1930 - 1950



En esta década se diseñan y construyen varios puentes con esta tipología, algunos de los cuales aun se encuentran en buenas condiciones de serviciabilidad.

El puente en la fotografía, Toltén en Villarrica, tiene un vano principal de 72 m. y una altura de 15 m. sobre el cauce.

Puentes Colgantes con tablero de madera

1940 - 1967



A partir de 1940, se diseñan y construyen algunos puentes colgantes con tablero de madera, con luces entre 40 y 50 m.

Luego de producido el terremoto que afectó al sur de Chile en mayo de 1960, en el marco de la Alianza para el Progreso, se repusieron varios puentes utilizando esta tipología.

Puentes Colgantes con viga atiesadora

1961 - 1966



Entre los años 1961 y 1966, se construye el puente colgante Presidente Ibáñez en la ciudad de Puerto Aysén, que con sus 210 metros, es hasta hoy el puente con mayor luz libre en Chile.

Luego, en la década de los 90 se construyeron otros puentes de este tipo en la Región de Aysén

EVOLUCION NORMATIVA – 1970 a 1980

- En 1970 surge la primera versión del Manual de Carreteras.
- Influenciados por la AASHTO 1973.
- Relevancia en el uso de vigas metálicas.
- Surgimiento de las vigas postensadas



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION DE VIALIDAD

Manual de Carreteras 1970
Fuente: portal.ondac.com

Puentes con vigas metálicas doble T

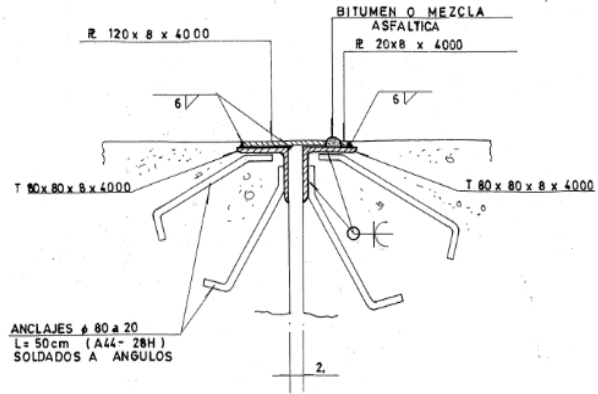
1940 - 1980



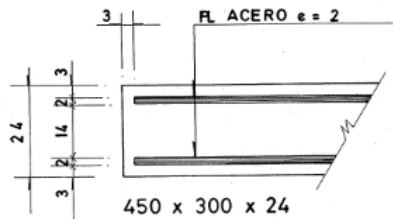
En las cuatro décadas siguientes irrumpen con fuerza las superestructuras con vigas metálicas y tablero de madera o con losa colaborante de hormigón armado.

Se diseñan puentes con tramos simplemente apoyados, con vigas continuas o tornapuntas, con vanos de hasta 50 m.

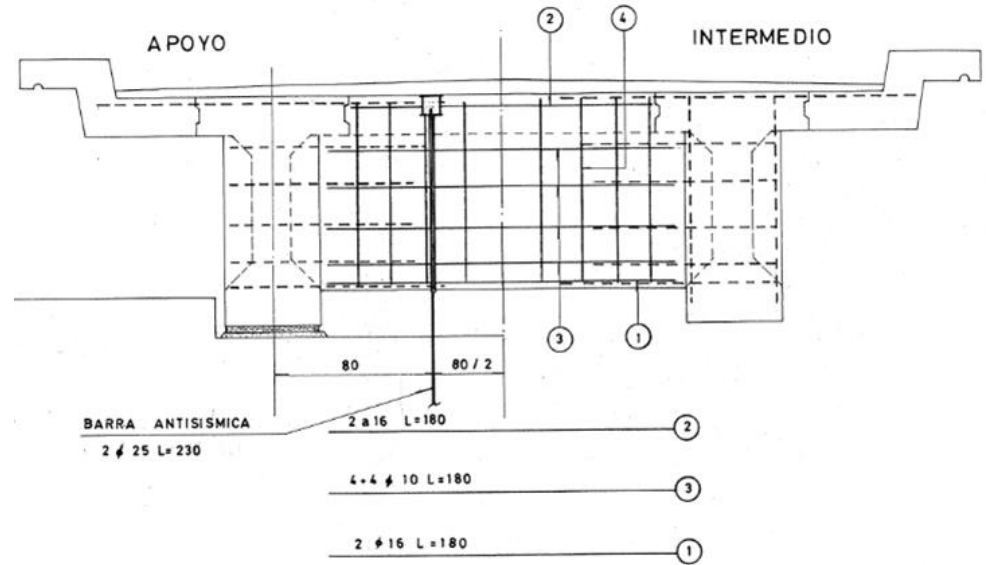
EVOLUCION NORMATIVA – 1980 a 1990



DETALLE TIPICO CANTONERA



DETALLE PLACA NEOPRENE
(DUREZA 60° SHORE)



DETALLE TIPICO TRAVESAÑO Y BARRA ANTISISMICA

Sección transversal Puente "Águila Sur Nro. 1"

Fuente: MOP

EVOLUCION NORMATIVA – 1980 a 1990

- Se comprobó el buen desempeño de las vigas postensadas.
- Deficiencias en criterios de construcción, principalmente en la implementación de los apoyos elastoméricos.
- Falta de longitud de desarrollo para apoyo en vigas.



Puente sobre el río Maipo
Fuente: Booth 1985

Puentes de hormigón preesforzado



1980 -2010

En los años 60 se construyen algunos puentes con vigas pretensadas (Maipo, Juan Pablo II, Manuel Rodríguez), pero no es sino hasta 1980 que se masifica el uso de vigas postensadas con losa colaborante de hormigón armado. También en los años setenta y ochenta se construyen un par de puentes con vigas cajón postensadas.

EVOLUCION NORMATIVA – 1990 al 2000



Manual de Carreteras 2002

Fuente: MOP

- Introducción de las empresas concesionarias extranjeras.
- En el 2002 aparece la nueva versión del Manual de Carreteras.
- Norma influenciada por la AASHTO 1996.
- Por primera vez se establecen requerimientos de diseño sísmico para puentes.
- Se comprobó los criterios de diseño presentados en 1985.

Puentes con vigas pretensadas

1990



Ya en la última década del siglo XX se comienza a adoptar el concepto de prefabricación, bastante masificado en países desarrollados

Se construye mayoritariamente con vigas pretensadas fabricadas en planta, lo que permite reducir plazos de ejecución y por ende, costos

Puentes de suspensión atirantados

1990



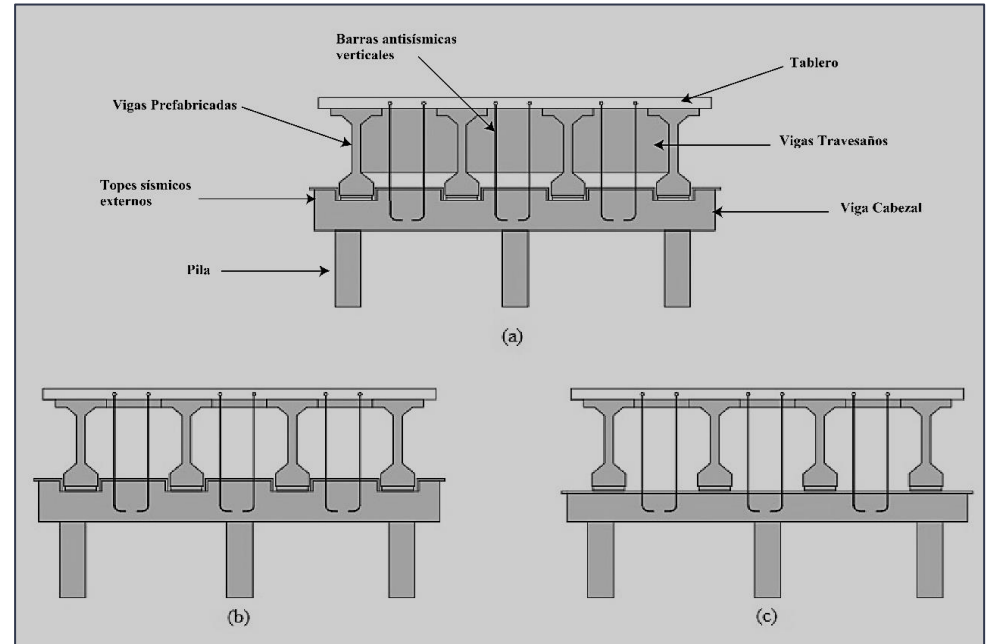
Puente Yelcho en el camino Chaitén-Puerto Cárdenas, con un tramo central de 150 m.



Pasarela Peatonal Huérfanos en Santiago Centro, con un tramo central de 57 m.

EVOLUCION NORMATIVA – 2000 al 2010

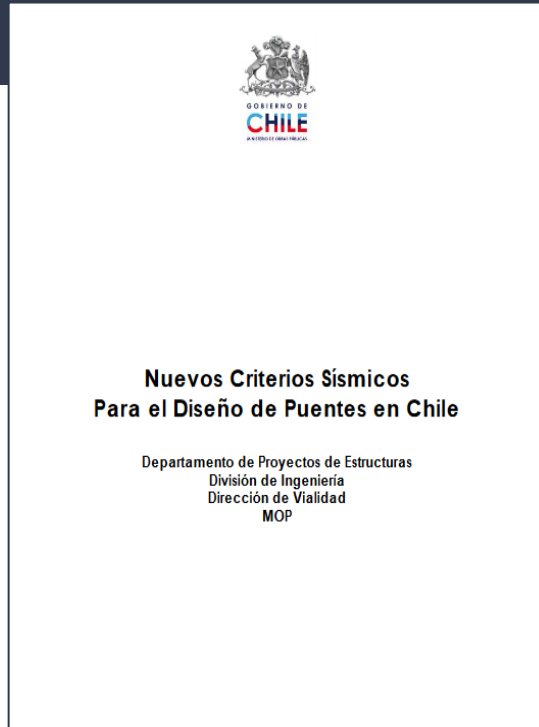
- Las concesiones extranjeras realizaron modificaciones a las normativas vigentes.
- Se buscaba reducir tiempos de construcción y costos de construcción.
- Se presentaron problemas constructivos después del terremoto del Maule.



Secciones típicas en puentes chilenos

Fuente: Kawashima et al., 2011; J. Wilches et al., 2021

EVOLUCIÓN NORMATIVA – 2010 en adelante



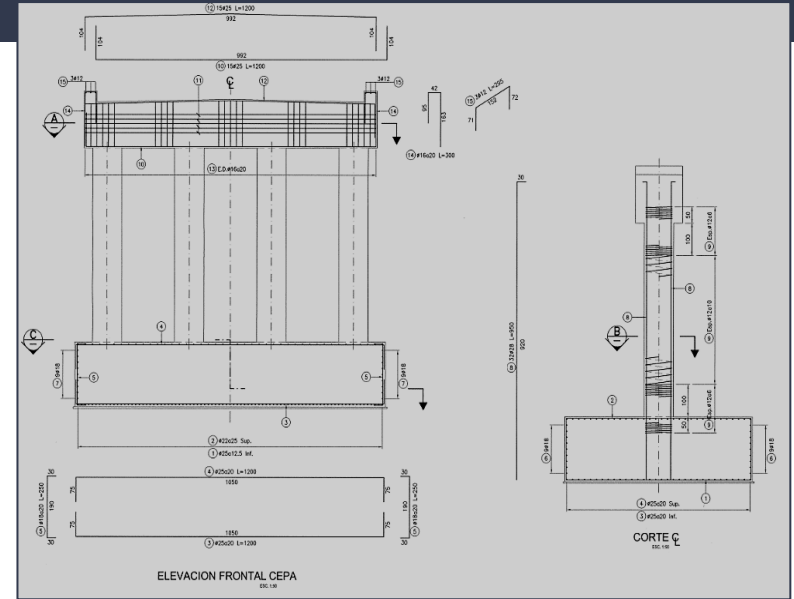
Nuevos criterios sísmicos para el diseño de puentes chilenos 2010
Fuente: MOP

- Después del terremoto del Maule del 2010, el MOP emitió actualizaciones a la normativa vigente.
- Las últimas modificaciones a la normativa se dieron en el 2017 y 2019.
- Modificaciones influenciadas por la AASHTO 2011, AASHTO LRFD 2011 y JRA 2012.

Socavación y condición sísmica

Evolution of piers

	Dominant Type	Transverse Section	Foundation Type
1920-1940	Wall	Rectangular	Direct
1940-1950	Wall	Rectangular	Direct
1950-1960	Wall	Rectangular	Box/Piles
1960-1970	Wall	Rectangular	Piles
1970-1980	Wall	Rectangular	Box
1980-1990	Columns	Circular	Box/Piles
1990-2000	Wall	Semicircular	Piles



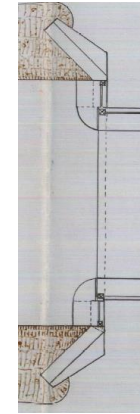
Configuración de cepas tipo pila del puente "Cárcamo".
Fuente: MOP.

Valenzuela et al. (2022) State of the art of typologies of piers and abutments of existing Chilean road bridges, considering the risk of scour

Socavación y condición sísmica

Evolution of abutments

	Dominant Type	Foundation Type	Geometry of Foundation
1920-1940	45° Wing Wall	Direct	Type C
1940-1950	90° Wing Wall	Direct	Type C and rectangular
1950-1960	45° and 90° Wing Wall	Box	Type C
1960-1970	90° Wing Wall	Direct	Type C
1970-1980	90° Wing Wall	Direct	Type C
1980-1990	90° Wing Wall	Direct	Rectangular
1990-2000	90° Wing Wall	Direct	Rectangular



Elevation and view of solid wall abutment with 45° wings floor drawing, 1936 Pocuro Bridge

Valenzuela et al. (2022) State of the art of typologies of piers and abutments of existing Chilean road bridges, considering the risk of scour

Cepa pila pilote



Puentes con Interés Particular

Cau Cau



de 54 metros de altura

Puentes con Interés Particular

Canal de Chacao



ANTECEDENTES GENERALES

- ❑ El proyecto consiste en la Construcción de un Puente Colgante sobre el Canal de Chacao en la Región de Los Lagos.
- ❑ Consta de tres Torres o Pilas Principales, que alcanzan alturas aproximadas de 199 (m): Norte, 175 (m): Central y 157 (m): Sur sobre el n.m.m.
- ❑ Vida útil de 100 años.
- ❑ Este puente, unirá la zona comprendida entre Punta Coronel, en la comuna de Calbuco (continente) y la Punta San Gallán, en la comuna de Ancud (Isla Grande de Chiloé). Tiempo de viaje: 3 min.
- ❑ Actualmente el tiempo de viaje entre ambas zonas es de 40-50 min.
- ❑ La longitud total del Puente es de 2.754 metros entre anclajes.



ANTECEDENTES GENERALES



Sector norte



Ubicación del
Puente y sus
Accesos



Sector sur

REQUISITOS EXPLÍCITOS (Licitación)

- Ubicación y Alineamiento.
- Puente Colgante.
- Apoyo en Roca Remolinos – Canal de Chacao.
- 4 Pistas de Tráfico.
- Durabilidad (100 años).
- Calidad de la Estructura.
- Facilidad de Operación & Mantenimiento.

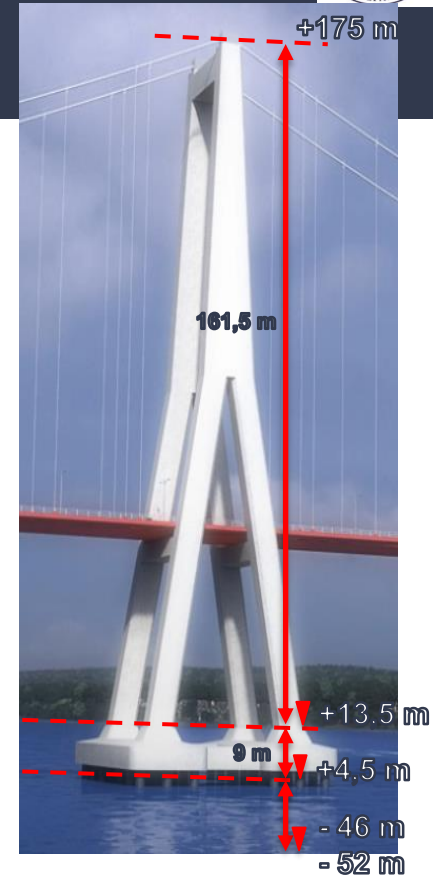
EFFECTOS EXTERNOS (Colaterales)

- Mejorar Conectividad del País.
- Desarrollo Económico Local.
- Absorber Tecnología y Know-How.
- Generación Empleos (1000 trabajadores promedio mensual).



CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL PUEBTE

- ❑ Puente Colgante de Doble Vano (Asimétrico): 1.055 m (vano sur) y 1.155 m (vano norte).
- ❑ Tres Torres de Hormigón (dos de ellas en agua), Sección Cajón Hueca – espesor variable en altura.
- ❑ Torre Central en “Y” invertida en Roca Remolinos, y dos Torres normales.
- ❑ Fundación de Pilotes Sección Mixta en Pilas Off-Shore Hormigón Armado: Camisas de Acero y Terreno Natural.
- ❑ 4 Carriles de Tráfico sin Acceso Peatonal ni Bicicletas. Calzada Unidireccional (2 pistas por sentido).
- ❑ Tablero Ortotrópico Sección Aerofoil de Acero.
- ❑ Cable y Tablero Deshumidificado.



CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL PUEBLO

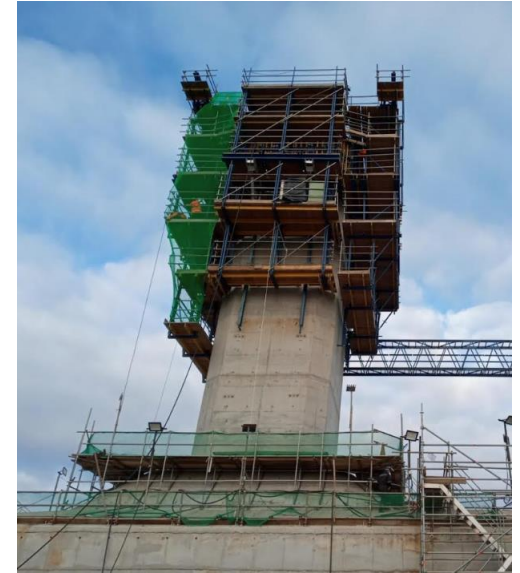
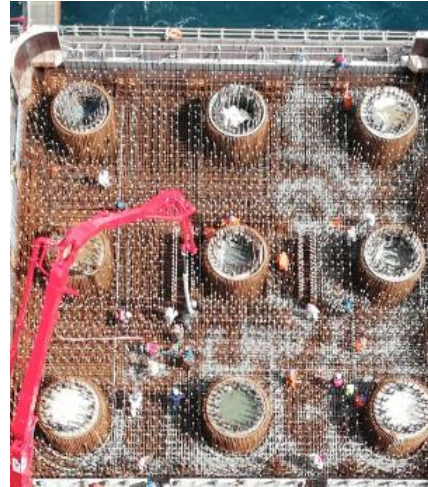
PRINCIPALES PROVEEDORES	ACERO DE REFUERZO (% Suministrado)	PILOTES PILA CENTRAL
		PILOTES PILA NORTE
		ENCEPADO Y ELEVACIONES PILA CENTRAL, NORTE Y SUR
	ACERO ESTRUCTURAL (% Suministrado)	PILOTES PILA CENTRAL
		PILOTES PILA NORTE
	HORMIGONES (% Suministrado)	PILOTES PILA CENTRAL, NORTE Y SUR
		ENCEPADO Y ELEVACIÓN PILA CENTRAL, NORTE Y SUR
MOLDAJES (% Suministrado)	ENCEPADOS PILA CENTRAL, NORTE Y SUR	
MOLDAJES & ACS – TREPANTES (% Suministrado)	ELEVACIONES PILA CENTRAL, NORTE Y SUR	
CANTIDADES PRINCIPALES	EXCAVACIONES	549.571 m3
	ACERO DE REFUERZO	31.380.033 kg
	ACERO ESTRUCTURAL	7.608.000 kg
	HORMIGONES	133.180 m3 (333.950.000 kg)
	CABLE PRINCIPAL	9.621.000 Kg
		5.828 ml
		349.680 ml
TABLERO Y ARROSTRAMIENTOS	20.713.000 kg	
	364.456 m2	



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO

Elementos Críticos

MACIZOS Y PILAS



DEFINICION HORMIGON MASIVO

ACI-116:

Concrete, mass - *hormigón masivo* – cualquier volumen de hormigón cuyas dimensiones son lo suficientemente grandes como para que sea necesario considerar la generación de calor provocada por la hidratación del cemento y el consiguiente cambio de volumen y tomar medidas a fin de minimizar la fisuración.

NCh-170 (1985):

No se define directamente → Elemento cuya dimensión menor sea mayor a 80 cm.

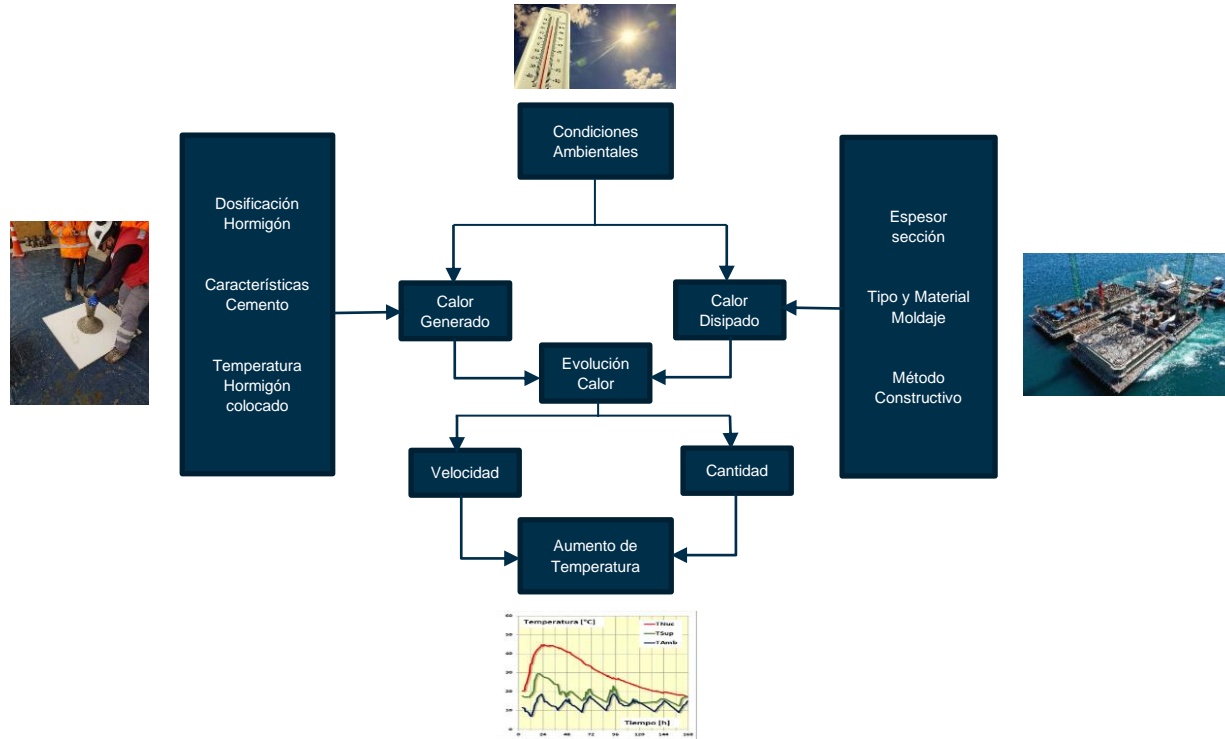


Elementos con dimensión menor > 0,80 m

Hormigón con alto contenido de cemento (>350 kg/m³)

Colocación de grandes volúmenes de hormigón

AGRIETAMIENTO TERMICO



MEDIDAS GENERALES

Materiales y proporción de mezcla:

- Disminuir dosis de cemento.
- Aumentar $T_{máx}$ del árido → reducir requerimiento de cemento.
- Mayor compactación → reducir requerimiento de cemento.
- Cemento con adición de puzolanas o escoria.
- Cemento con baja cantidad de C_3A y C_3S .
- Bajar razón W/C.

Metodologías Constructivas:

- Usar hormigón normal, pero con control de disipación de calor (uso de materiales aislantes).
- Pre-enfriamiento de los materiales componentes (uso de hielo, nitrógeno líquido o riego de áridos).
- Post-enfriamiento del hormigón (uso de cañerías con nitrógeno líquido u otros sistemas de refrigeración).
- Hormigonar de noche.
- Construir en capas o secciones menores.
- Hormigón rodillado (represas).



MEDIDAS ESPECÍFICAS

Especificaciones Técnicas

Materiales – Cemento:

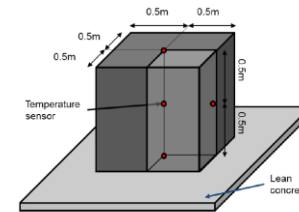
- Cemento Siderúrgico con alto contenido de escoria (69%)
- Baja razón W/C: 0,37-0,4

Control de Temperatura:

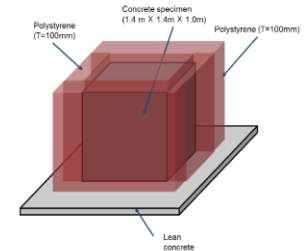
- $T^{\circ}\text{Máx} < 75^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{\text{sup-nuc}} < 20^{\circ}\text{C}$

PARÁMETROS DETERMINADOS

- Resistencia a la compresión (G35)
- Incremento Adiabático de Temperatura (maqueta)
- Módulo elástico (modelo código ACI)
- Retracción autógena
- Creep
- Coeficiente de expansión térmica



[Sensor location]



[Semi-Adiabatic condition]

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

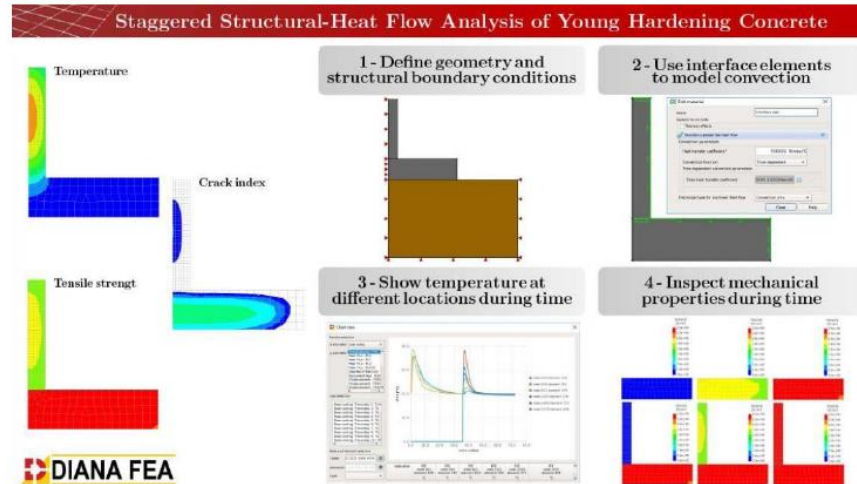


- Análisis Térmico
- Resultados Prueba de Simulación
- Resultados Análisis de Tensión Térmica
- Plan de Monitoreo de Temperatura
- Medidas Contingencia para Control Térmico

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

○



Análisis gradual de flujo de la temperatura estructural del hormigón endurecido tempranamente (Ejemplo)

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

○

Parámetros de entrada para el Análisis de Tensión Térmica

Propiedades	Referencias	Valores de entrada	
Aumento de la Temperatura Adiabática	Prueba de simulación	Véase la Figura 6	
Peso unitario, w (kg/m ³)	Diseño mezcla CBB	2,450	
Coefficiente de Expansión Térmica	ACI 207.2R	10.2×10^{-6}	
Calor específico (kJ/kg ^o C)	ACI 207.2R	0.94	
Conductividad (W/m ^o C)	JSCE	2.70	
Coefficiente de convección (W/m ² oC)	JSCE	Superficie desnuda	14.0
	ACI 306R	Manta (5 – 15 mm)	2.9 – 8.0
	CIRIA	Madera contrachapada de 18 mm de espesor con velocidad del viento, 3 m/seg	4.6
Difusividad (m ² /h)	ACI207.2R	$h^2 = \frac{K}{C_h \times \rho}$ <p>where</p> <p>h^2 = diffusivity, ft²/h (m²/h); K = conductivity, Btu/ft-h-°F (kJ/m-h-°C); C_h = specific heat, Btu/lb-°F (kJ/kg-°C); and ρ = density of the concrete, lb/ft³ (kg/m³).</p>	

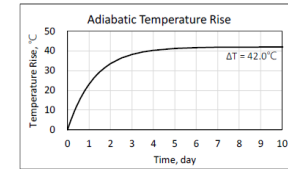


Figura 6: Curva de Aumento de la Temperatura Adiabática

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

Tabla 4: Propiedades Mecánicas del Hormigón [7, 8]

Propiedades	Referencias	Valor de Entrada
Resistencia a compresión a 28 días, $(f_c)_{28}$ (MPa)	-	35
Ecuación de predicción de resistencia a compresión, $(f_c)_t$ (MPa)	ACI 209R-92	$(f_c)_t = \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} (f_c)_{28}$ donde, $\alpha = 4.0, \beta = 0.85$
Ecuación de predicción del módulo de Young', E_{ct} (MPa)	ACI 209R-92	$E_{ct} = 0.043 [w^3 (f_c)_t]^{1/2}$
Ecuación de predicción de la tensión de tracción dividida f_t' (MPa)	ACI 318-11	$f_t' = 0.56 \sqrt{(f_c)_t}$

donde, w : peso unitario del hormigón (kg/m^3)

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

- Retracción Autógena (Modelo CEB MC 90-99 de ACI 209.2R)

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{caso}(f_{cm28})\beta_{as}(t)$$

Donde,

$$\varepsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} \left(\frac{f_{cm28}/f_{cmo}}{6 + f_{cm28}/f_{cmo}} \right)^{2.5} \times 10^{-6} \quad \beta_{as}(t) = 1 - \exp \left[-0.2 \left(\frac{t}{t_1} \right)^{0.5} \right]$$

$$f_{cmo} = 10 \text{ MPa}, \quad t_1 = 1 \text{ day}$$

Tabla 5: Coeficientes de acuerdo a los modelos CEB MC90 y CEB MC 90-99

Type of cement according to EC2	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
SL (slowly-hardening cements)	800	3	0.13
N or R (normal or rapid hardening cements)	700	4	0.12
RS (rapid hardening high-strength cements)	600	6	0.12

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

Tabla 6: Temperatura Ambiental Mensual en Chile

Mes	Temperatura Diaria Promedio, °C											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura Promedio	15.3	14.8	13.2	11.3	9.4	7.9	7.6	7.8	8.8	10.7	12.3	14
Temperatura Mínima	10.8	10.5	9.1	7.7	6.2	5.1	4.6	4.3	5.0	6.5	8.1	9.6
Temperatura Máxima	19.8	19.2	17.3	14.9	12.6	10.8	10.6	11.3	12.6	14.9	16.5	18.4

Tabla 7: Datos de Entrada de Temperaturas Ambiente

Estación	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Colocación del Hormigón (°C)
Más cálida (Enero)	15.3 ± 4.5	25 (20°C solo para la capa 7 del encepado)
Más fría (Agosto)	7.8 ± 3.5	20 (15°C solo para la capa 7 del encepado)

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

○

Modelación FEM

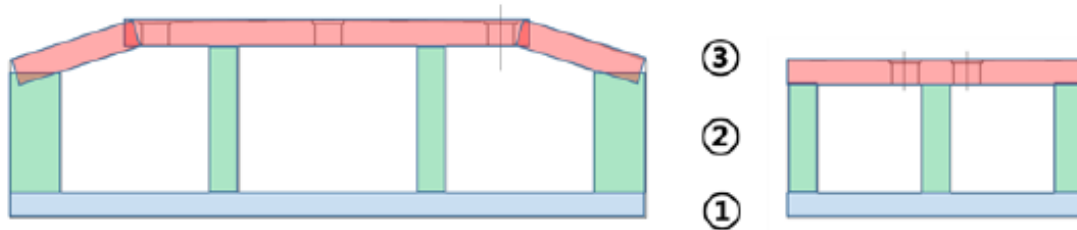
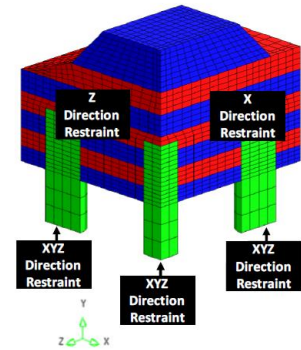


Figura 8: Secuencia de construcción para las vigas de amarre



(a) Modelo de 1/4 del encepado y condiciones de borde

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

○

Resultados Monitoreo de Temperatura (Modelo)

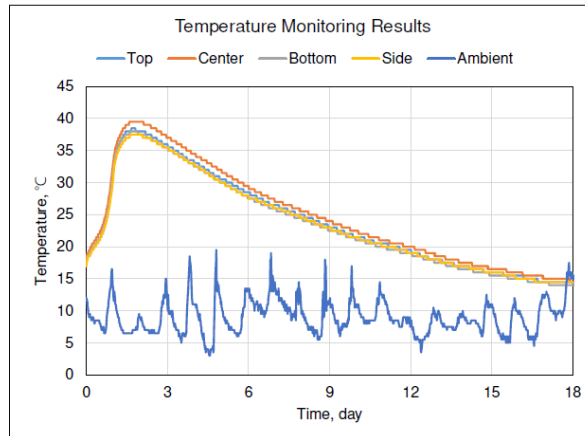


Figura 12: Resultados del Monitoreo de Temperatura de la Prueba de Simulación

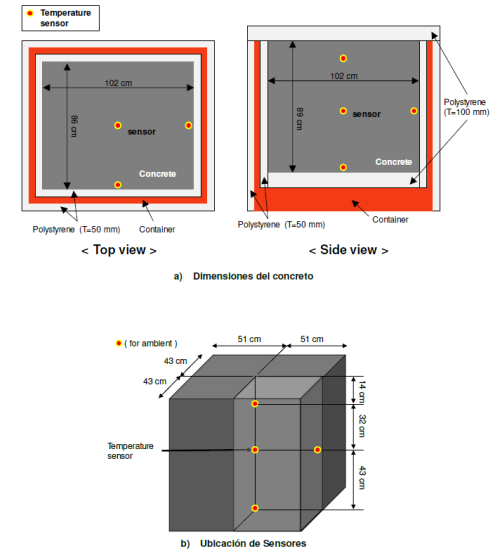


Figura 5: Procedimiento de Prueba de Aumento de la Temperatura Adiabática

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Análisis Térmico

- Análisis Térmicos FEM repetitivos → se modifican ligeramente los datos de entrada del Aumento de Temperatura Adiabática

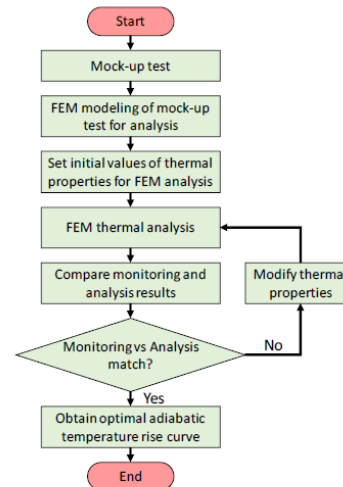


Figura 13: Procedimiento del Método Predictivo

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Resultados Prueba de Simulación

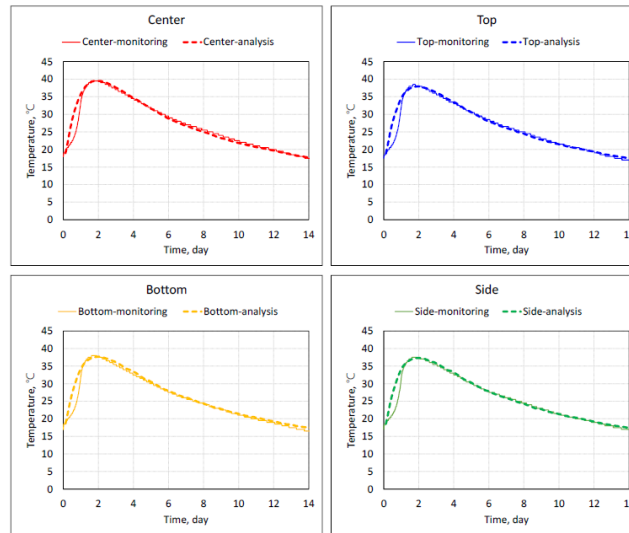


Figura 14: Resultados de Temperatura – Monitoreo vs Análisis

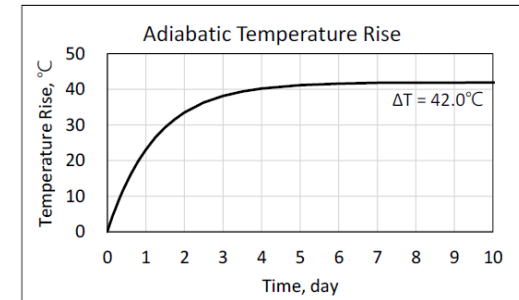

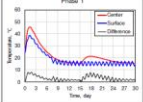

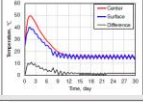

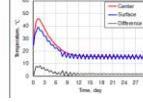


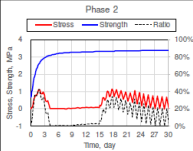
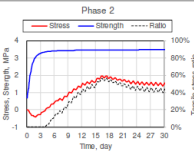
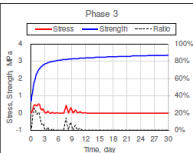
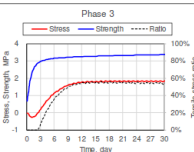
Figura 15: Curva de Aumento Adiabático de la Temperatura obtenida de la Prueba de Simulación

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Resultados Análisis de Tensión Térmica (Temperatura y tensión) por elemento

Tabla 11: Resultados del análisis de temperatura en la viga de amarre longitudinal – condición más cálida

Condición Ambiental (°C)	Etapas	Temperatura de Colocación (°C)	Condición de Curado	Temp. Máxima (°C)	Diferencial Máximo (°C)	Temperatura en el Entorno	Variación de Temperatura
15.3 ± 4.5	1	25	Manta de 10 mm por 7 días	45.7	8.2		
15.3 ± 4.5	2	25	Sin curado térmico	49.5	10.8		
15.3 ± 4.5	3	25	Manta de 10 mm por 7 días	45.8	8.3		

Condición Ambiental (°C)	Etapas	Máxima Relación de Esfuerzos	Restricción Interna	Restricción Externa
15.3 ± 4.5°C	2	57%		
15.3 ± 4.5°C	3	56%		

Análisis por cada etapa para condición más cálida y más fría → $T_{máx} < 75°C$ y $\Delta T < 20°C$

→ $f_{ctmáx} < f_{ct'}$ → $f_{ctmáx} / f_{ct'} < 1$ → No hay riesgo de agrietamiento

PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN

Plan de Monitoreo de Temperatura

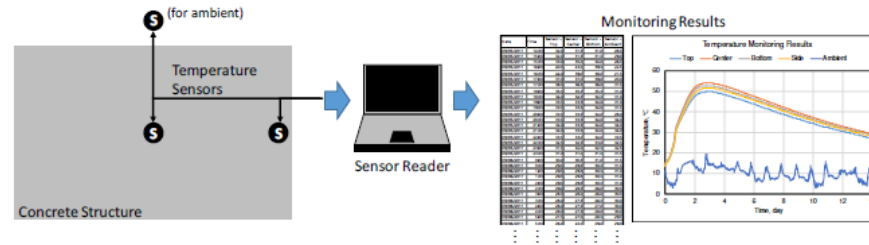
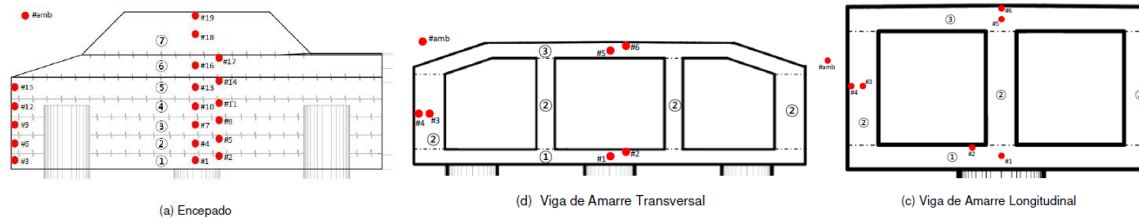


Figura 16: Esquema de Monitoreo de Temperatura



PLAN DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA HORMIGÓN



Medidas Contingencia para Control Térmico

- Si $T_{\text{máx}} > 75^{\circ}\text{C}$ → Aplicar método de curado adicional (manta de curado adicional).
- Si $\Delta T > 20^{\circ}\text{C}$ → Agregar mantas térmicas y enviar datos a especialista.
- Periodo de curado y retiro de moldaje podría determinarse considerando los resultados de monitoreo del hormigón.



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO

Durabilidad

REQUISITOS DEL PROYECTO

- **VIDA ÚTIL = 100 AÑOS**

¿CÓMO SE LOGRA ESTO?



CONCEPTOS DE DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL

Durabilidad - Definición ACI:

Habilidad del hormigón para **resistir** la acción de la **intemperie**, el **ataque químico** y cualquier proceso o condición de la estructura que produzca **deterioro** en el hormigón.

Vida Útil - Definición ACI:

La vida útil de una **estructura** corresponde a “El período de tiempo en el cual ella realiza su función, sin mantenimiento o reparación imprevista o extraordinaria”.

Objetivo:

vida útil de servicio = vida útil de diseño

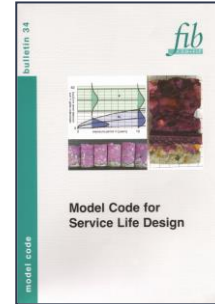
METODOLOGÍA DE DISEÑO POR DURABILIDAD

Metodologías existentes

- **FIB Bulletin 34**
- LIFE-365
- STADIUM
- Modelos *In-house*

Criterios de selección

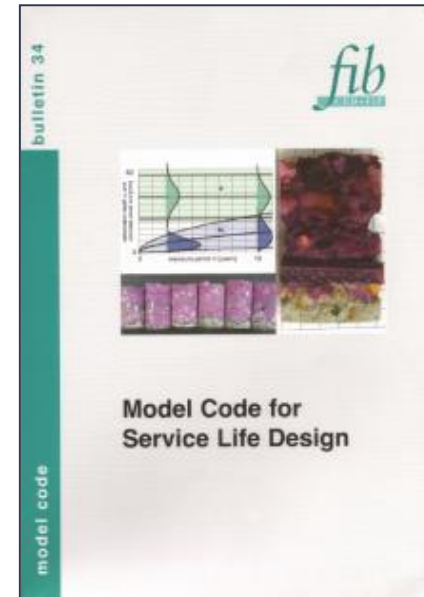
- Método científico
- Metodología validada y verificada
- Definición de variables cuantificables
- Parámetros de entrada cuantificables
- Ensayos sencillos y económicos que se puedan implementar fácilmente durante la construcción



METODOLOGÍA DE DISEÑO POR DURABILIDAD

Fib Bulletin 34 "Model Code for Service Life Design"

- International Federation for Structural Concrete (*Fib*)
- Una metodología de diseño de vida de servicio basada en la fiabilidad
- *ISO 16204:2012 Service Life Design of Concrete Structures*



METODOLOGÍA DE DISEÑO POR DURABILIDAD

Etapas de la Metodología del Fib Bulletin 34 "Model Code for Service Life Design"



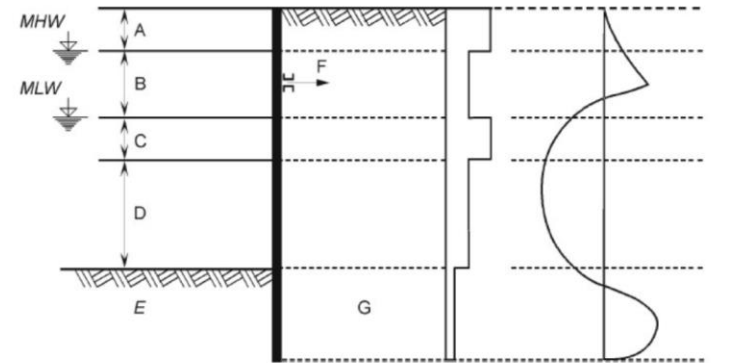
CONDICIONES DE EXPOSICIÓN

Variables:

- Clima
- Química del Suelo y Agua Marina
- Niveles de Agua Marina y Temperatura del Mar

Áreas de corrosión de acero en ambiente marino:

- Zona atmosférica
- Zona de Salpicadura (A)
- Zona intermareal (B)
- Zona de agua baja (C)
- Zona de inmersión permanente (D)
- Zona enterrada (E o G)



a) Vertical zoning of sea water aggressivity

b) Corrosion rate distribution at side exposed to sea water

c) Typical bending moment distribution

A	Zone of high attack (splash zone);	B	Intertidal zone;
C	Zone of high attack (Low water zone);	D	Permanent immersion zone;
E	Buried zone (Water side);	F	Anchor;
G	Buried zone (Soil side)		
MHW	Mean high water;	MLW	Mean low water

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN

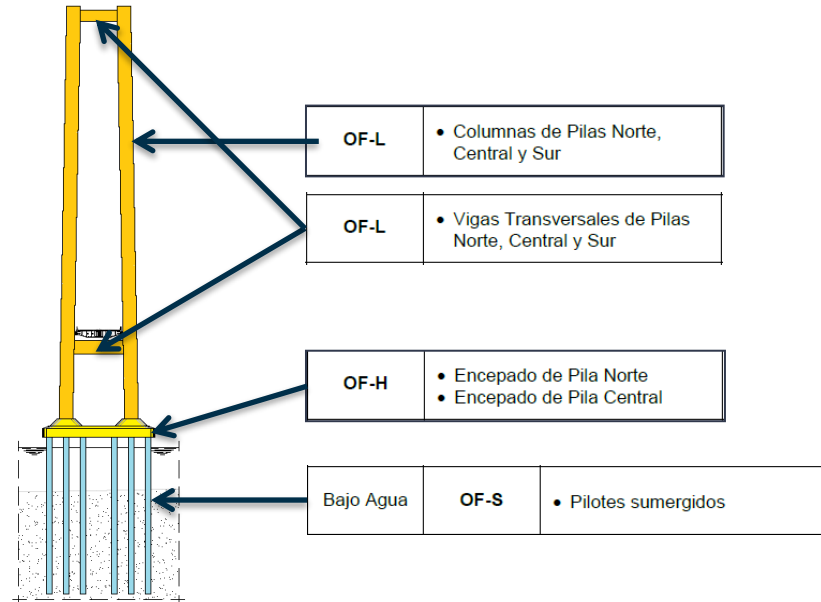
Para el acero:

Zona		Relativa a NMM
Zona Atmosférica		Sobre +3.60M
Salpicadura (Superior)		+3.60M
Intermareal		+1.51M
Bajo nivel de agua		-1,57M
Inmersión permanente		-3,50M
Salpicadura (Inferior)	Central	-4.10m
	Norte	-3.90m
Lateral de agua enterrada	Pila Central	-8.0M
Lateral de suelo enterrado	Pila Norte	-23.5M

Para el hormigón:

Designación de Exposición	Descripción de Exposición	Estructuras
OF-H	Alta Mar	<ul style="list-style-type: none"> • Encepado de la pila central • Encepado de pila norte
OF-L	Baja Mar	<ul style="list-style-type: none"> • Pata de la pila norte • Pata de la pila central • Pata de la pila sur • Cepa de aproximación sur • Muro de estribo • Tablero de aproximación sur
OF-I	Mar Interior	<ul style="list-style-type: none"> • Cara interior de todas las estructuras
OF-S	Zona marina sumergida	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotes en la pila central • Pilotes en la pila norte • Pilotes en la ribera norte y sur
ON-U	Subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> • Bloque de anclaje (exterior) • Encepados en la pila sur y viaducto sur

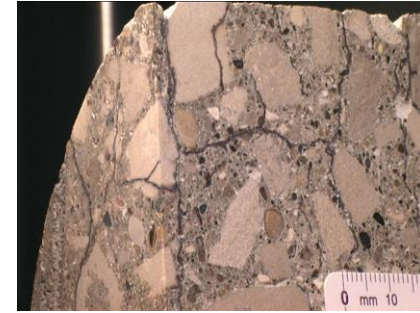
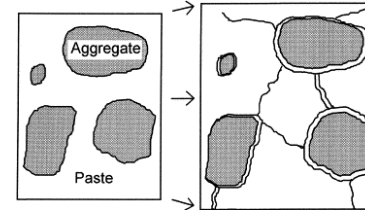
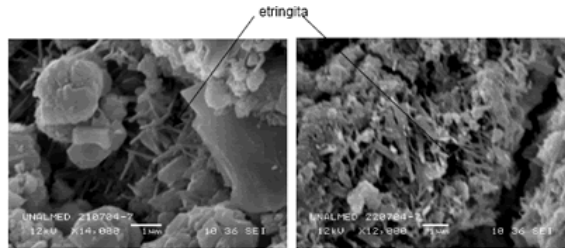
TIPOS DE HORMIGÓN SEGÚN ZONAS DE EXPOSICIÓN



MECANISMOS DE DETERIORO

Formación de Etringita tardía (Delayed Ettringite Formation - DEF)

- Alta temperatura durante el fraguado ($>70^{\circ}\text{C}$)
- Exposición a la humedad durante el uso
- Alto contenido de sulfato en el hormigón
- Uso de cemento con alto contenido de sulfatos o alta finura
- Agrietamiento preexistente / ataque de sulfatos

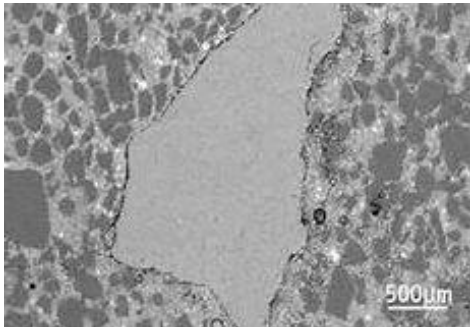


**Uso de cemento con Escoria reduce el calor generado durante el fraguado
→ Menor agrietamiento → Menor ingreso de sulfatos → Menor riesgo de DEF**

MECANISMOS DE DETERIORO

Ataque de Sulfatos

- Sulfatos presentes en el suelo / agua subterránea reaccionan con hidratos del cemento → se produce yeso y etringita → fisuras
- Sulfatos pueden ser de origen interno o externo
- DEF es un caso especial de ataque por sulfatos interno
- Contenido de C_3A en el cemento → propicia el ataque de sulfatos



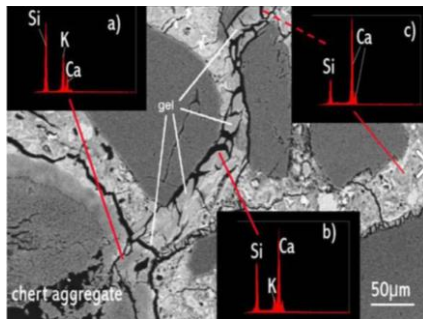
Uso de cementos con bajo contenido de C_3A

Incorporar Escoria → “diluye” la concentración de C_3A

MECANISMOS DE DETERIORO

Reacción Álcali-Sílice

- Áridos con sílice amorfa reaccionan con los álcalis presentes en el cemento (K_2O , Na_2O , $Ca(OH)_2$) y producen un gel de álcalis expansivo más silicatos.
- El gel reacciona con el agua y aumenta de volumen, provocando tensiones internas y el posterior agrietamiento y ruptura de la pasta de cemento.



MECANISMOS DE DETERIORO

Reacción Álcali-Sílice



No usar áridos potencialmente reactivos



- **Ánálisis petrográfico (ASTM C 295)** → detecta presencia de componentes potencialmente reactivos.
- **Método químico (ASTM C 285)** → determina sílice disuelta y reactividad alcalina.
- **Método prismas de mortero (ASTM C 227)** → se analiza la expansión del mortero con los áridos y el cemento a utilizar.

Si expansion $>0,05\%$ a 3 meses ó $>0,10\%$ a 6 meses → ÁRIDO REACTIVO

MECANISMOS DE DETERIORO

Permeabilidad a Cloruros

Diseño de mezcla → hormigón “menos permeable” a cloruros

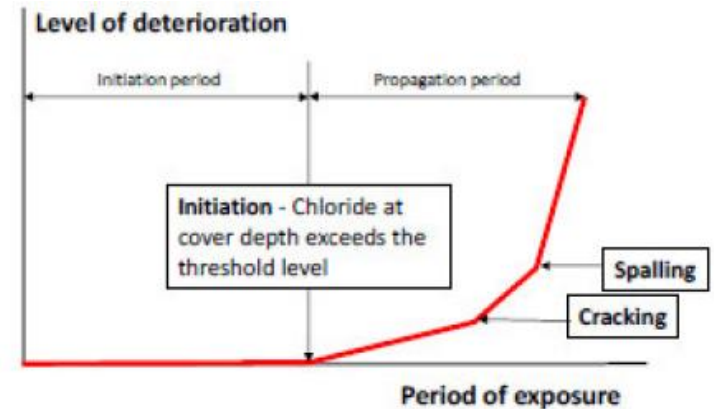


Diseño del recubrimiento adecuado



MECANISMOS DE DETERIORO

- Despasivación del refuerzo:
 - El umbral crítico de cloruro se alcanza en el refuerzo.
- Estado límite de serviciabilidad:
 - 10% de probabilidad de que la corrosión se inicie dentro de la vida útil
 - 90% de probabilidad de que no!



MECANISMOS DE DETERIORO

Parámetros	Media	Desviación Estandar	Tipo de Distribución
Concentración de cloruro en superficie OF-H : Alta mar OF-L : Baja mar OF-I : Marea Interior OF-S : Zona marítima sumergida ON-U : Subsuelo	3.8% por wt. de aglutinante 1.0% por wt. de aglutinante 0.8% por wt. de aglutinante 6.0% por wt. de aglutinante 4.0% por wt. de aglutinante	0.2*media	normal
Concentración crítica de cloruro OF-H : Alta mar OF-L : Baja mar OF-I : Marea Interior OF-S : Zona marítima sumergida ON-U : Subsuelo	0.5% por wt. de aglutinante 0.5% por wt. de aglutinante 0.5% por wt. de aglutinante 1.2% por wt. de aglutinante 1.2% por wt. de aglutinante	0.2*media	Normal
Concentración inicial de cloruro	0.1% por wt. de aglutinante	0.2*media	Normal
Coefficientes de Difusión ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	2.0~6.0	0.2*media	Normal

MECANISMOS DE DETERIORO

Factores de antigüedad	0.3 ~ 0.5	0.2*media	Registro normal
Cubierta de Hormigón (mm)			
OF-H : Alta mar	75, 100	0.1*media	Registro normal(*)
OF-L : Baja mar	60, 75		
OF-I : Marea Interior	40, 50		
OF-S : Zona marítima sumergida	100		
ON-U : En tierra bajo suelo	75, 100		
Vida operativa objetivo	100 años		
Índice de confiabilidad objetivo (β)	1.3		

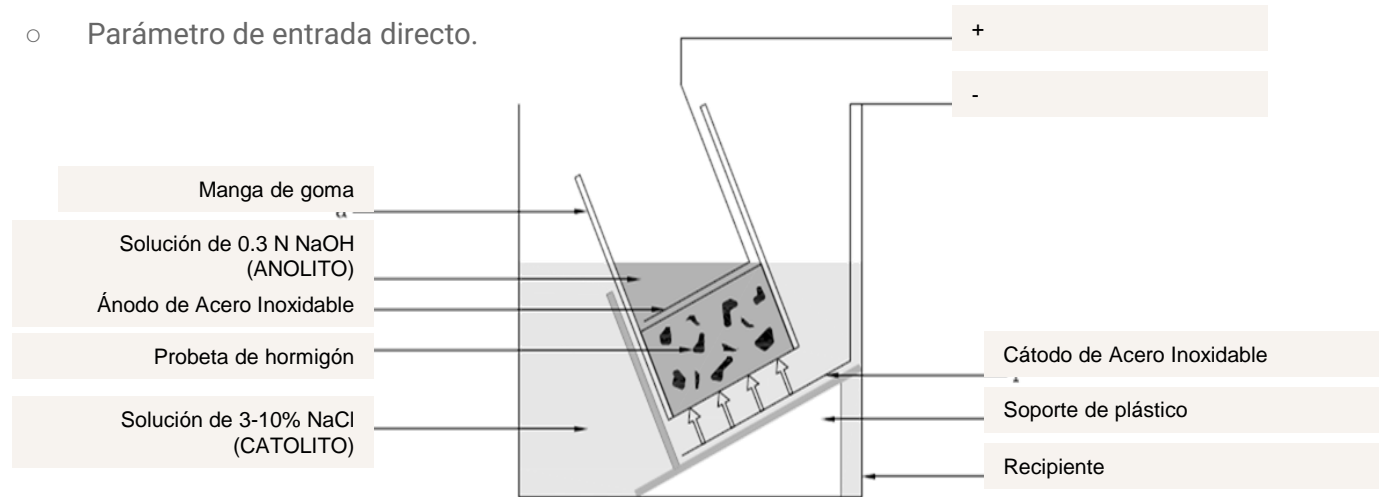
MECANISMOS DE DETERIORO

Tabla 8.2-3 Clases de Hormigón, Requisitos de Durabilidad

N°	Ubicación del Hormigón	Clase de Exposición	Elementos de la Estructura	Max. Coeficiente Migración ¹ [10 ⁻¹² m ² /s] para factor de edad		Recubrimiento ² del Hormigón [mm]
				0.40	0.50	
1	Bajo Agua	OF-S	<ul style="list-style-type: none"> Pilotes en pila norte y central 	N.A ³	N.A ³	100
2	HPC Marítimo de Alto Desempeño	OF-H	<ul style="list-style-type: none"> Encepado de Pila Norte Encepado de Pila Central 	3.0	4.0	100
3		OF-L	<ul style="list-style-type: none"> Patas de la pila norte, central y sur 	5.0	6.0	75
4	Terrestre sobre Nivel de Suelo	OF-L	<ul style="list-style-type: none"> Tablero de Viaducto de Acceso Sur 	3.5	5.0	60
5		OF-L	<ul style="list-style-type: none"> Muro de estribo Cepas del viaducto Sur 	3.5	5.0	75
6	Terrestre bajo Nivel de Suelo	ON-U	<ul style="list-style-type: none"> Bloque de Anclaje Norte Bloque de Anclaje Sur Encepados en pila sur y cepas del viaducto sur Estribos bajo tierra 	3.5	5.0	75
			<ul style="list-style-type: none"> Pilotes en cepas del viaducto sur Pilotes en Estribo Norte Pilotes en Pila Sur Pilotes en Estribo Sur 	3.5	5.0	100
7	Pobre		<ul style="list-style-type: none"> Hormigón pobre para sellos, rellenos y emplantillados 			

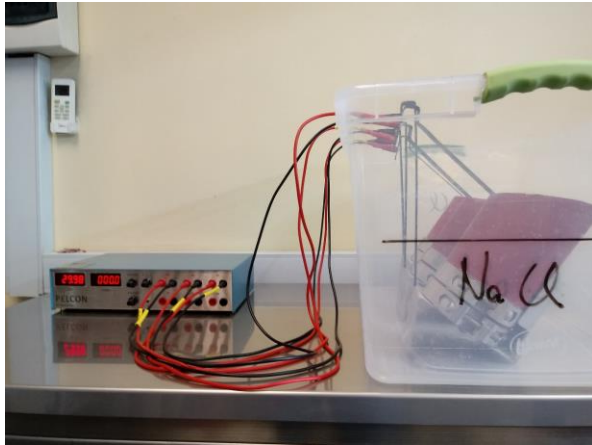
ENSAYO MIGRACIÓN CLORUROS

- Fib Model Code está basado en **NT Build 492: Rapid Chloride Migration Test**
 - Mide el Coeficiente de Migración del hormigón a los 28 días.
 - Parámetro de entrada directo.



ENSAYO MIGRACIÓN CLORUROS

NTBuild 492



ENSAYO MIGRACIÓN CLORUROS

NTBuild 492

NORDTEST METHOD

NT BUILD 492 7

APPENDIX 1

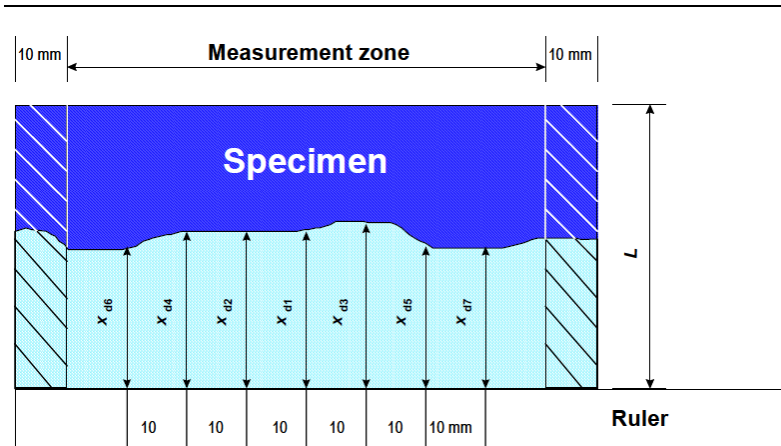


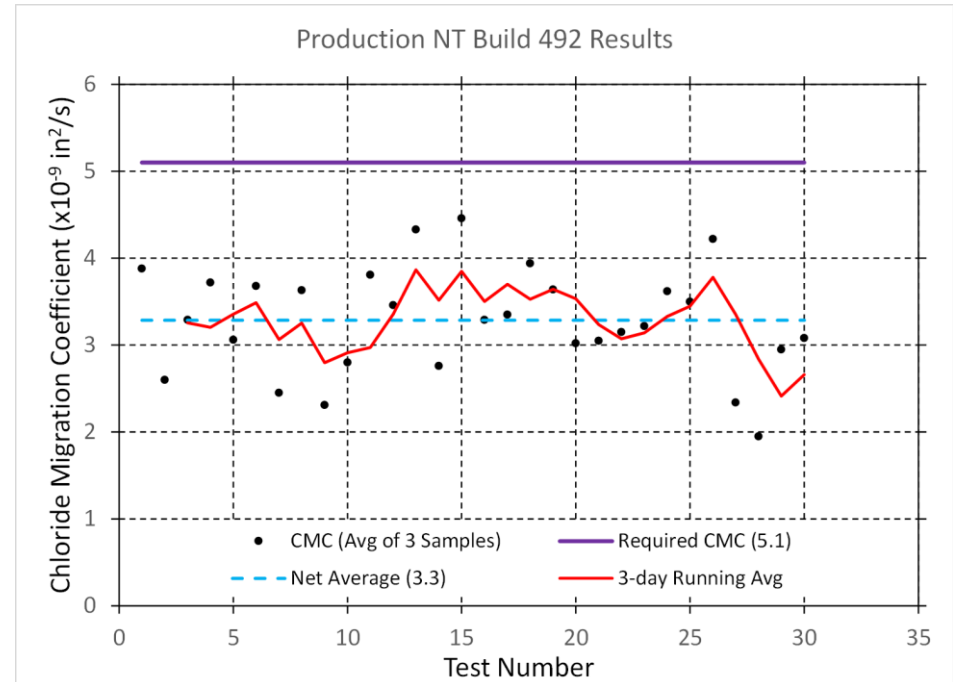
Fig. 5. Illustration of measurement for chloride penetration depths.



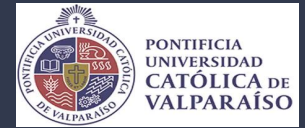
ENSAYO MIGRACIÓN CLORUROS

NTBuild 492

- Ensayo realizado durante la precalificación y producción
- Importante seguir EXACTAMENTE el procedimiento de ensayo
- Variabilidad inherente en los resultados de ensayo



Comentarios finales



Existen 4 principales desafíos en Ingeniería de Puentes en Chile, relacionados con el Hormigón:

- 1) Actualización y estandarización del Manual de Carreteras Vol 5. respecto al AASHTO LRFD, y normativas internacionales
- 2) Estudio de hormigones para zonas de alta vulnerabilidad sísmica y con cuantías elevadas → Ductilidad
- 3) Implementación de hormigones en masa y estandarización de procedimientos térmicos
- 4) Aplicación y extensión de criterios de durabilidad para puentes con más de 50 años de vida útil.



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO

Caso de Estudio de Puentes en Chile

Revisión histórica

Relator:

Dr. Ing. Matías A. Valenzuela
matias.valenzuela@pucv.cl



Montevideo
Agosto 2023