

Durability of concrete in the coastal zone of Peru: Chimbote Case

Marco Antonio Cerna Vasquez, Magíster¹

¹Universidad Nacional del Santa (UNS), Perú. marco.cerna.vasquez@gmail.com

Abstract – Concrete durability in coastal environments is a critical concern for civil engineering, especially in a country like Peru, where the coastline extends over 2,400 kilometers and presents specific challenges due to climatic and geographic characteristics. This research focuses on the behavior of concrete when mixtures with type I and type V cement are used, evaluating their performance under severe exposure conditions and different curing methods that affect the structures and proposing solutions based on laboratory tests. For the sample considered, several standard tests were performed, such as settlement (12), unit weight (12), capillary suction (16), porosity (16) and compressive strength (180) in compliance with ASTM standards; as well as special tests such as sulfate resistance (48) and air permeability - Torrent (16) based on the Swiss SIA standard. The results indicate that mixes with type V cement, designed to resist the action of sulfates, show superior performance in terms of durability compared to mixes using type I cement, especially under dry curing. However, the tests also reveal that standard curing offers significant additional protection, improving resistance to sulfate ingress and the formation of chemical attack products within the concrete matrix. Finally, this research contributes to the achievement of Sustainable Development Goal (SDG) 9, as improving the properties of concrete and increasing its resistance to aggressive agents such as seawater and sulfates will lead to a better use of resources, contributing to the reduction of operating costs and a more efficient use of materials.

Keywords - Cement types, durability, expansion, permeability, sulphates

Durabilidad del concreto en la zona costera del Perú: Caso Chimbote

Marco Antonio Cerna Vasquez, Magíster¹

¹Universidad Nacional del Santa (UNS), Perú. marco.cerna.vasquez@gmail.com

Resumen – La durabilidad del concreto en ambientes costeros es una preocupación crítica para la ingeniería civil, especialmente en un país como Perú, donde la costa se extiende a lo largo de más de 2,400 kilómetros y presenta desafíos específicos debido a las características climáticas y geográficas. Esta investigación se centra en el comportamiento del concreto cuando se utilizan mezclas con cemento tipo I y tipo V, evaluando su desempeño bajo condiciones de exposición severas y diferentes métodos de curado que afectan a las estructuras y proponiendo soluciones basadas en pruebas de laboratorio. En cuanto a la muestra considerada se realizaron diversos ensayos estándar como asentamiento (12), peso unitario (12), succión capilar (16), porosidad (16) y resistencia a la compresión (180) en cumplimiento a normativa ASTM; así como ensayos especiales como resistencia a los sulfatos (48) y permeabilidad al aire – Torrent (16) en base a la norma suiza SIA. Los resultados indican que las mezclas con cemento tipo V, diseñadas para resistir la acción de los sulfatos, muestran un desempeño superior en términos de durabilidad comparado con las mezclas que utilizan cemento tipo I, especialmente bajo curado en ambiente seco. Sin embargo, las pruebas también revelan que el curado estándar ofrece una protección adicional significativa, mejorando la resistencia al ingreso de sulfatos y la formación de productos de ataque químico en el interior de la matriz del concreto. Por último, esta investigación contribuye al logro del objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9, ya que al mejorar las propiedades del concreto y aumentar su resistencia a los agentes agresivos como el agua de mar y los sulfatos, se logrará un mejor aprovechamiento de los recursos, contribuyendo a la reducción de costos operativos y al uso más eficiente de materiales.

Palabras clave – Durabilidad, expansión, permeabilidad, sulfatos, tipos de cemento

I. INTRODUCCIÓN

El concreto es el insumo más utilizado por el hombre a nivel mundial y que tiene diversas aplicaciones en el ámbito técnico y social, ya que cuantiosas estructuras que observamos diariamente no existirían [1]. Por lo cual, en la actualidad se observa una exigencia mayor en cuanto a las consideraciones del diseño de mezclas de concreto en función a los requerimientos técnicos y usos solicitados por el cliente.

En Canadá, se ha estimado un presupuesto de 5000 millones de dólares canadienses hasta inicios del siglo XXI para la reparación de edificaciones atacados por corrosión. De igual forma, en la región de Quebec, aproximadamente 4250 infraestructuras ya presentaban problemas de deterioro en la mitad de su vida útil estimada, y en ciertos casos, riesgos de colapso debido a su estado avanzado de deterioro [2]. En nuestro país, desde hace muchas décadas se presenta un

problema adicional llamado autoconstrucción, que es una causal directa de la seguridad y vida útil de una edificación. Según los estudios realizados por [3] manifiesta que “en el Perú el 80% de viviendas son construcciones informales y de ese porcentaje, la mitad son altamente vulnerables a un terremoto de alta intensidad. En las zonas periféricas de las ciudades esta cifra llega al 90%”. A este inconveniente que aqueja al Perú, se le suma la amplia geografía y diversa zona costera. Es alarmante que estas edificaciones de concreto están siendo sometidas a esfuerzos que solicitan un máximo comportamiento.

El estudio realizado por [4] ha demostrado que las estructuras de concreto reforzado expuestas al mar pueden sufrir un deterioro acelerado debido a la corrosión de las barras de refuerzo, lo que puede resultar en una reducción de la resistencia y una disminución de la vida útil de la estructura. Por otro lado, la exposición de las construcciones de concreto a sulfato de sodio y magnesio puede afectar significativamente su durabilidad. Estos iones pueden reaccionar con los componentes del concreto, especialmente con el cemento, lo que puede provocar la expansión y la disgregación del material.

La durabilidad del concreto tiene muchos enfoques a estudiar. Entre los que destacan la expansión lineal que, en presencia de agentes agresivos, puede provocar tensiones internas que conduzcan a fisuras y grietas. La permeabilidad del concreto, ya que al tener valores altos puede permitir la entrada de agentes agresivos como agua, cloruros y sulfatos. De igual forma, la resistencia tanto a compresión, tracción, flexión y abrasión son aspectos clave que influyen en la capacidad del concreto para soportar cargas y resistir agentes agresivos.

Con el tiempo los criterios para realizar un buen diseño de mezcla se han robustecido con la inclusión de los parámetros de durabilidad. Ya no basta con seleccionar una buena distribución de agregados, ni obtener altas resistencias, ahora pensamos en tecnologías adicionales que nos ayuden a mejorar la reología, las propiedades mecánicas de nuestro concreto y nos permitan reducir al máximo los problemas más frecuentes en las estructuras, por ejemplo, las filtraciones [5].

Existen diversas investigaciones sobre durabilidad del concreto, los cuales se ha tomado como base para consolidar esta propuesta. En China, se propone el evaluar la durabilidad

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

y la resistencia del concreto bajo condiciones extremas de erosión durante un período de 240 días, ya que se obtuvo que el concreto con la proporción optimizada de 20% de ceniza voladora, 7.5% de polvo de escoria y 5% de metacaolín, presentó una resistencia a la corrosión superior al 10% en comparación con las mezclas no optimizadas; alcanzando un coeficiente de resistencia de compresión de 1.079 después de 240 días de exposición al sulfato y, la permeabilidad del concreto optimizada fue significativamente menor (hasta un 50.36%) en comparación con las muestras de control [6].

De igual forma, en el país de Egipto, se procedió a evaluar el rendimiento a largo plazo del concreto frente a los efectos del ataque de sulfatos, considerándose dieciocho mezclas de concreto con contenidos de cemento de 250, 350 y 450 kg/m³, respectivamente, y se utilizó sílice fumada (SF) en todas las mezclas. Se observó que el cemento de horno de alto horno (BFC) mostró la mejor resistencia al ataque de sulfatos, con una pérdida de resistencia de solo un 3% cuando la relación agua/cemento fue de 0.4 y, Las mezclas con BFC y CEM I-SR5 también mostraron menor cambio de masa. Esto llevaría a indicar que los cementos BFC y CEM I-SR5 fueron los más eficaces, mientras que el cemento Portland ordinario mostró el mayor deterioro [7].

En Iraq, para un artículo científico se elaboraron trece diferentes mezclas de concreto, todas con una relación agua/cemento entre 0.30 a 0.35, siendo evaluados por resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, sorptividad, absorción de agua y penetración de agua bajo presión. En cuanto a los resultados, los contenidos del 25% de FA y 15% de SF logrando un incremento del 93% en comparación con el diseño patrón, en cambio con el aditivo impermeabilizante (WP) se presentó una reducción significativa de la resistencia a la compresión en un 25%. En cuanto a la durabilidad, todas las mezclas con aditivos con excepción WP mostraron una disminución en la tasa de absorción de agua, lo que indica una mejora en la impermeabilidad del concreto [8].

En Suiza, se realizó una investigación experimental donde se utilizó shotcrete producido con diferentes tipos de cemento (CEM I, CEM II, CEM III) y aceleradores basados en álcali y sin álcali, además, se llevó a cabo un test de resistencia al sulfato que incluyó ciclos de secado e inmersión en una solución de sulfato de sodio. Las muestras de shotcrete fueron sometidas a pruebas de expansión por sulfato, absorción de agua, porosidad y análisis morfológicos utilizando técnicas como la difracción de rayos X (XRD) y la termogravimetría (TGA). Entre los resultados más destacados, se mostraron que el uso de aceleradores sin álcali disminuyó la porosidad y la permeabilidad del shotcrete, lo que resultó en una menor expansión por sulfato en comparación con los aceleradores a base de álcali. Sin embargo, el shotcrete fabricado con CEM III/B mostró una notable resistencia al sulfato debido a su

microestructura densa, mientras que el CEM I con un 8% de humo de sílice mostró una mayor expansión por sulfatos cuando se usaron aceleradores sin álcali, especialmente con una relación agua/cemento más alto (0.48) [9].

Por lo descrito, se entiende que el diseño tradicional de mezclas de concreto ya no es suficiente para enfrentar los desafíos de durabilidad en ambientes agresivos, como los que se presentan en zonas costeras. Por ello, es fundamental desarrollar nuevos enfoques para optimizar los diseños de mezclas de concreto, con el objetivo de obtener infraestructuras más resistentes y duraderas. El objetivo de esta investigación es determinar el comportamiento físico y mecánico de concretos expuestos a condiciones de agua de mar y los sulfatos, analizando varias aristas como el cemento, la exposición y la relación agua-cemento, con énfasis en la mejora de la resistencia. De esta forma, se contribuye al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9, promoviendo infraestructuras sostenibles y resilientes. Este enfoque permitirá el diseño de infraestructuras más duraderas, lo que mejorará la calidad de vida de las personas al ofrecerles entornos más seguros, funcionales y adaptados a las condiciones extremas del medio ambiente.

II. MATERIALES Y METODOS

A. Agregado y cemento

La unidad de estudio fue el concreto fabricado para zona costera de Chimbote, es por ello que se analizaron la totalidad de materiales pétreos (agregado fino y grueso) de la provincia del Santa (Cantera Chero, Cantera Besique, Cantera Dorado, Cantera Coscomba, Cantera Dulong y Cantera La Sorpresa). Cabe mencionar que, los ensayos indicados se repitieron 02 veces. Las principales propiedades de los agregados se muestran en la Tabla I y II.

TABLA I
PROPIEDADES DE AGREGADOS FINOS EN ZONA COSTERA

Cantera seleccionada	A	B	C
Módulo de fineza	2.62	2.76	2.64
Tamaño máximo	3/8"	3/8"	3/8"
Humedad (%)	0.20	0.30	0.60
PUS (kg/m ³)	1550	1552	1679
PUC (kg/m ³)	1732	1725	1910

Chero: A, Coscomba: B, Besique: C

En cuanto al agregado fino, según lo indicado por la normativa peruana el módulo de fineza tiene que estar dentro del rango obligatorio de 2.3 – 3.1, ya que indica que los agregados tienen una distribución de tamaños adecuada para

producir una mezcla de concreto con buena trabajabilidad y resistencia para lograr una mezcla con propiedades de trabajabilidad óptimas. En nuestra investigación se determinó que las canteras Chavarry, Besique y Chero cumplen con esta exigencia [10].

TABLA II
PROPIEDADES DE AGREGADOS GRUESOS EN ZONA COSTERA

Cantera seleccionada	A	B	D	E	F
Huso	67	67	57	57	57
Humedad (%)	0.30	0.30	0.10	0.30	0.20
Absorción (%)	1.30	1.60	1.50	1.80	1.60
PUS (kg/m ³)	1500	1436	1415	1399	1412
PUC (kg/m ³)	1646	1628	1567	1560	1558

Chero: A, Coscomba: B, Dorado: D, Dulong: E, Sorpresa: F

En cuanto al agregado grueso, los husos de los agregados se refieren a los rangos de tamaños de partículas permitidos para los agregados finos y gruesos. En este caso, al analizar las 6 canteras seleccionadas, se observa que la mayoría no han cumplido la exigencia normativa, siendo favorable para la gradación obligatoria en solo las canteras Chero y Chavarry [11].

Con este primer filtro se continuo con los requisitos complementarios para agregados durables, realizándose el ensayo de contenido de sales solubles en agregados y método de resistencia a la abrasión de agregados. Cabe mencionar que los ensayos se repitieron tres veces, presentándose los promedios a continuación en la tabla III y IV.

TABLA III
CONTENIDO DE SALES SOLUBLES DE AGREGADO FINO Y GRUESO

Tipo	Agregado Fino	Agregado Grueso
Cantera Chero	0.0960 %	0.0272 %
Cantera Chavarry	0.0725 %	0.0431 %

TABLA IV
ENSAYO DE ABRASIÓN DE AGREGADO GRUESO

Tipo	Agregado Grueso
Cantera Chero	28.00
Cantera Chavarry	32.00

En lo que corresponde al contenido de sales solubles los valores obtenidos para los agregados finos y gruesos para las 2 canteras, están por debajo del 0.5% que indica la normativa vigente del Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC].

De igual forma, en la resistencia mecánica de los agregados – Abrasión, los valores no superan la máxima pérdida de 50% [12]. Estas 2 canteras cumplen los ensayos de control de calidad para agregados finos y gruesos para los casos de requisitos obligatorios y complementarios. Pero, desde un punto de vista económico y social, se optó por utilizar el agregado de la Cantera Chero que tiene su zona de acopio general dentro de la ciudad; en cambio la cantera Chavarry se encuentra a 25 minutos de la ciudad de Chimbote.

Los cementos considerados en la investigación son el Tipo I y Tipo V, que cumple con la norma ASTM C 150 y NTP 334.009. Estos fueron seleccionados para evaluar la resistencia a condiciones especiales porque el concreto será diseñado para la zona costera del Perú. En la tabla V se presentan los diseños de mezclas considerados por kg/m³.

TABLA V
DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON A/C 0.45 Y 0.65

Material	a/c 0.45 Tipo I	a/c 0.45 Tipo V	a/c 0.65 Tipo I	a/c 0.65 Tipo V
Cemento Portland I	463	463	320	320
Agua	225	225	227	227
Agregado Fino	514	531	634	645
Agregado Grueso	1051	1051	1051	1051
Total	2253	2270	2232	2243

B. Características del agua de mar: Bahía de Chimbote

En esta segunda parte de la investigación se seleccionaron diversas zonas de la costa de la Bahía de Chimbote y Samanco, las cuales fueron el Malecón Grau (Urb. La Caleta), Malecón Grau (Urb. El Trapecio), Playa Dorado y Playa Besique, con las cuales abarcamos la totalidad del área en estudio (Figura 1). Este enfoque permite un análisis representativo de las características químicas del agua de mar en la zona costera, asegurando que los resultados obtenidos sean relevantes y aplicables.

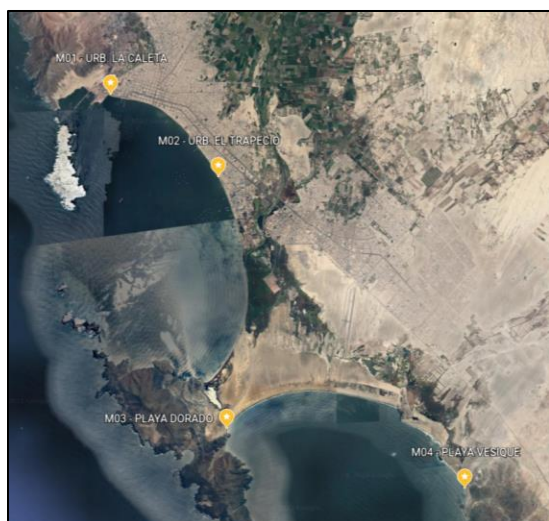


Fig. 1 Plano de ubicación de las muestras de agua de mar.

La toma de muestras fue realizada bajo los lineamientos y precauciones necesarias para la conservación lo mejor posible de las muestras de agua, todo ello indicado en la NTP 339.070. Se realizaron 2 ensayos físicos y químicos para las 4 zonas de estudios (Figura 2), teniendo como metodología empleada al ensayo de concentración de pH: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H⁺ BS y ensayo de concentración de sulfatos: MEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500 SO₄-4.

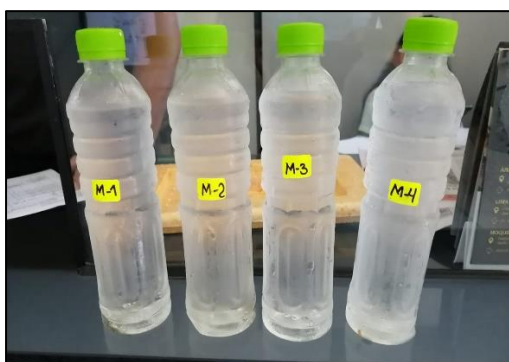


Fig. 2. Muestra de 4 zonas de agua de mar

TABLA VI
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE AGUA DE MAR

Muestras	Ensayos	
	Sulfatos (mg/L)	pH
M-1: Malecón Grau (Urb. La Caleta)	3390	7.71
M-2: Malecón Grau (Urb. El Trapecio)	3290	7.46
M-3: Playa El Dorado	3380	8.09
M-4: Playa Besique	3288	7.95

Para tener una óptima de calidad de agua, la NTP 399.088 exige que el pH del agua debe estar entre 5.8 y 8.2, ya que valores fuera de este rango ocasionarían efectos adversos a la durabilidad y resistencia del concreto; en este caso, las 4 muestras cumplen esta recomendación normativa. En cambio, en cuanto a los límites químicos para el agua referido en ASTM C94 en todos las muestras superan el valor de 3000, siendo esto perjudicial para el concreto. De manera general en la tabla VI, se aprecia que las características de sulfatos y pH son muy similares, es por ello que, se utilizó para los posteriores ensayos del concreto, el agua de mar de Malecón Grau (Urb. La Caleta).

C. Normativa y ensayos utilizados

En cuanto a los ensayos de concreto se realizaron 180 probetas para resistencia a la compresión (NTP 339.034) para evaluarse a 365 días y 48 especímenes para expansión lineal (SIA 262) analizados por 12 semanas. De manera complementaria se realizaron 48 discos de concreto para permeabilidad al aire (SIA 262 - Permeator) y 48 discos de concreto para succión capilar (ASTM C-1585), entre los más importantes.

Se destaca que el ensayo de resistencia a los sulfatos (expansión) comienza a los 28 días después de la elaboración de concreto y tuvo una duración completa de 84 días, divididos en tres ciclos de saturación, secado y exposición, de igual forma, la resistencia a la compresión se evaluados por rotura de probetas desde 28 días a 270 días (Figura 09).

D. Procedimiento

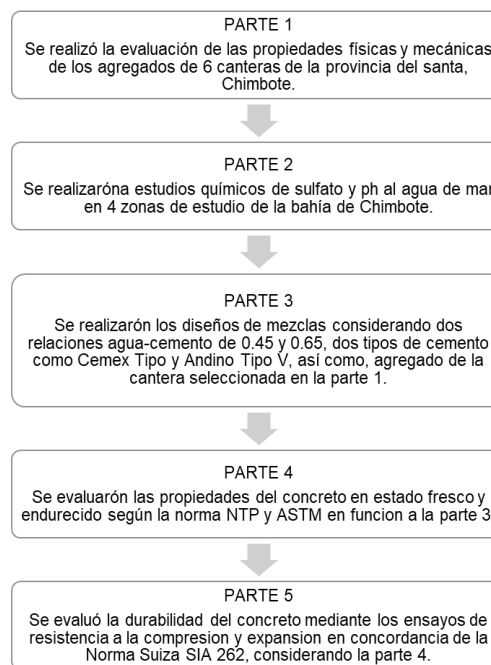


Fig. 3 Procedimiento de la investigación.

E. Metodología

Después de conocer las características de los agregados fino y grueso de la Cantera Chero y considerando los 02 cementos mas comerciales en la zona costera, se procedió a determinar los 4 diseños de mezclas, siguiendo la metodología del ACI 211.1. Es adecuado resaltar, que se tuvo en cuenta una resistencia de concreto patrón de 295kg/cm² (a/c=0.45) y 159 kg/cm² (a/c=0.65) con un asentamiento requerido de 5" a 6". Para la evaluación del concreto fresco y endurecido se ha utilizado 02 tipos de cemento (Tipo I Cemex y Tipo V Andino), 02 tipos de exposición (agua de mar y sulfato sódico) y 02 tipos de curado (curado estándar y ambiente seco)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Succión Capilar

Los investigadores del LEMIT (Laboratorio de entrenamiento multidisciplinario para la investigación tecnológica) afirman sobre la sortividad o velocidad de absorción capilar que "es una propiedad hidráulica fácilmente mensurable, que caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar" [13]. Se recalca que se consiguió un valor óptimo de 1.330mm para el diseño de mezcla con Andino Tipo V, curado agua con cal y una relación a/c 0.45, y un valor elevado de 2.294mm para un concreto con cemento Andino Tipo V, curado en ambiente seco y relación a/c 0.65.

Estos resultados (Figura 4) tienen relación con lo indicado por [14] que investigaron cómo diferentes relaciones agua/cemento afectan la succión capilar del concreto. Se encontraron resultados claros que indican que una menor relación agua/cemento reduce significativamente la succión capilar. Con una relación agua/cemento de 0.4, la absorción capilar fue de 2.8 mm/s0.5, mientras que con una relación de 0.5, aumentó a 4.1 mm/s0.5 y con 0.6, alcanzó los 5.5 mm/s0.5.

En función a estos resultados sugieren que reducir la relación agua/cemento mejora la densidad del concreto y disminuye su capacidad de absorber agua por capilaridad, lo cual es fundamental para la durabilidad del material.

B. Porosidad

De los resultados obtenidos, evaluando la relación a/c de 0.65 y comparándose por los tipos de curado en ambiente seco y agua con cal, se presenta un aumento del 6.68% con cemento Tipo I y de 3.87% con cemento tipo V. Al contrario, considerando la relación a/c de 0.45, se presenta valores mayores de aumento del 9.40% y 13.29% respectivamente (Tabla VII).

TABLA VII
PORCENTAJE VACIOS DE CONCRETO CON A/C 0.45 Y 0.65

Nº	Tipo de concreto	Vacios % - 01	Vacios % - 02	Prom %
1	Cemento Tipo I / Agua con cal Relación a/c=0.45	8.43	8.37	8.40
2	Cemento Tipo I / Ambiente seco Relación a/c=0.45	8.95	9.42	9.19
3	Cemento Tipo V / Agua con cal Relación a/c=0.45	8.26	8.30	8.28
4	Cemento Tipo V / Ambiente seco Relación a/c=0.45	9.14	9.62	9.38
5	Cemento Tipo I / Agua con cal Relación a/c=0.65	10.05	10.36	10.21
6	Cemento Tipo I / Ambiente seco Relación a/c=0.65	9.40	9.75	9.57
7	Cemento Tipo V / Agua con cal Relación a/c=0.65	10.26	9.86	10.06
8	Cemento Tipo V / Ambiente seco Relación a/c=0.65	10.33	10.58	10.45

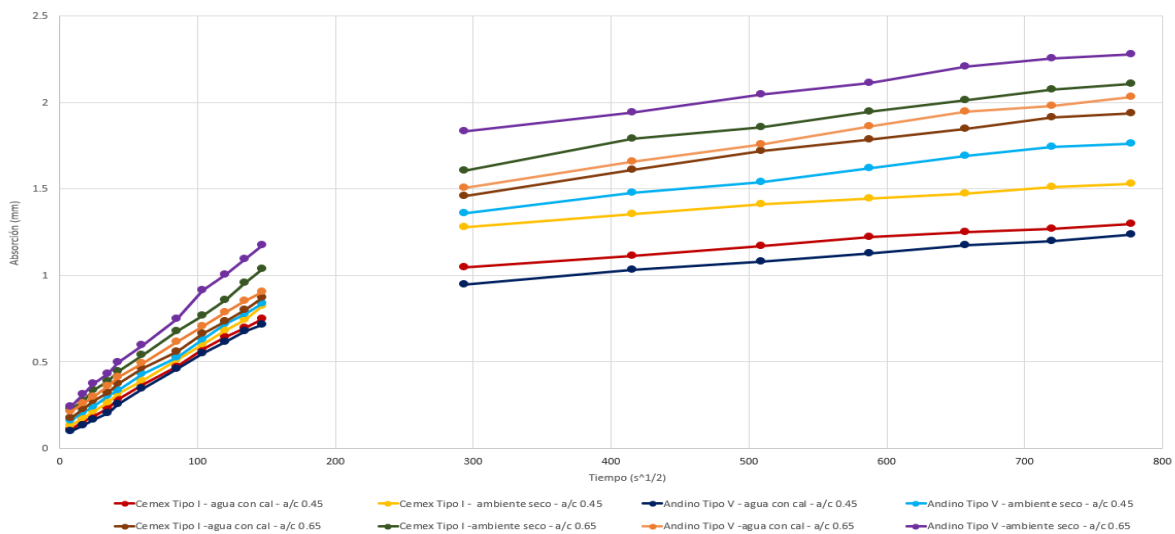


Fig. 4 Comparativo de succión capilar del concreto expuesto a condiciones especiales

En la investigación de [15] sobre la relación de la resistencia y la permeabilidad del concreto, se indica que en el caso de los cilindros curados en laboratorio, siete de las nueve losas tenían un porcentaje de vacíos inferior al límite del 12,5% especificado por el KDOT (Kansas Department of Transportation).

Así como [16] encontró que, al reducir la relación agua-cemento de 0.45 a 0.35, la porosidad del concreto poroso disminuyó en un 30%; consolidando ello con [17] que resalta la influencia de las relaciones agua-cemento de 0.40 y 0.70 al evidenciarse una diferencia del 10% en la porosidad del concreto. Todo ello es congruente con nuestro trabajo ya que evidencia que el uso de adiciones minerales y la reducción de la relación agua-cemento son estrategias efectivas para disminuir la porosidad y mejorar la durabilidad del concreto, especialmente en ambientes agresivos.

C. Permeabilidad

De los resultados de la tabla VIII, se puede evidenciar que los diseños de concreto con relación a/c de 0.65 presentan valores en el rango de ALTA y MUY ALTA permeabilidad, que facilita el ingreso de sustancias dañinas que pueden causar procesos de corrosión, carbonatación, ataque por sulfatos y otras formas de deterioro del concreto. Muy al contrario, se visualiza un buen comportamiento en el concreto con una relación de a/c menor (0.45), con valores kt entre BAJA y MODERADA; destacándose que el uso del tipo de cemento V y con el curado estándar, proporciona una calidad de recubrimiento muy buena según los criterios establecidos en la norma SIA 262.

TABLA VIII
PERMEABILIDAD DEL CONCRETO CON A/C 0.45 Y 0.65

Nº	Tipo de concreto	kt (10-16 m ²)	Clasificación IRAM
1	Cemento Tipo I	0.170	Moderada
	Relación a/c=0.45	0.880	
	Curado agua con cal	0.810	
	24h en molde y	0.532	
	27d en ambiente seco	0.790	
2	Cemento Tipo I	0.410	Moderada
	Relación a/c=0.45	0.330	
	Curado agua con cal	0.087	
	24h en molde y	0.300	
	27d en condición estándar	0.600	
3	Cemento Tipo V	0.110	Baja
	Relación a/c=0.45	0.077	
	Curado agua con cal	0.092	
	24h en molde y	0.068	
	27d en ambiente seco	0.110	
4	Cemento Tipo V	0.040	Baja
	Relación a/c=0.45	0.062	
	Curado agua con cal	0.056	
	24h en molde y	0.062	
	27d en condición estándar	0.058	
		0.036	

5	Cemento Tipo I	5.800	Muy Alta
	Relación a/c=0.65	11.000	
	Curado agua con cal	10.700	
	24h en molde y	13.000	
	27d en ambiente seco	2.900	
6	Cemento Tipo I	1.900	Alta
	Relación a/c=0.65	6.300	
	Curado agua con cal	19.000	
	24h en molde y	3.600	
	27d en condición estándar	1.600	
7	Cemento Tipo V	3.500	Alta
	Relación a/c=0.65	3.300	
	Curado agua con cal	2.500	
	24h en molde y	1.800	
	27d en ambiente seco	1.800	
8	Cemento Tipo V	1.800	Alta
	Relación a/c=0.65	0.950	
	Curado agua con cal	1.600	
	24h en molde y	1.100	
	27d en condición estándar	1.800	
		0.700	



Fig. 5. Uso del Permeabilímetro de Torrent en concreto

Este estudio se valida con lo expuesto por [18] que indica que al usar un alto consumo de cemento y relaciones a/c menores a 0.45, la permeabilidad del concreto disminuye considerablemente; y de acuerdo a la agresividad del sitio se recomienda el uso de cemento resistente a los sulfatos (tipo V) o un cemento puzolánico (tipo IP). También, el equipo investigador [19] recalcan que los valores de Kt de los diseños de mezclas de concreto con a/c 0.40 y 0.50 presentan valores parecidos, pero significativamente diferentes a los diseños de 0.60 y 0.70; y [20] afirma que aun cuando se utilicen agregados altamente porosos, la permeabilidad disminuye hasta valores aceptables, cuando el concreto se mantuvo húmedo por 180 días. Los valores del presente estudio con a/c 0.45 confirman lo indicado por los autores anteriores. Todo ello, indica la necesidad de optimizar la formulación del concreto, por ejemplo, ajustando la relación agua/cemento, el tipo de cemento o incorporando aditivos, con el fin de obtener una estructura de poros más densa y menos permeable.

D. Resistencia a la compresión

La muestra de concreto con mayor resistencia corresponde al cemento tipo V con a/c de 0.45 y una exposición estándar (agua con cal) con un valor promedio de 500kg/cm², en cambio el menor valor obtenido es 289kg/cm² para el cemento tipo I con a/c 0.65 y exposición con sulfato (Figura 6).



Fig. 6. Ensayo de resistencia a la compresión en concreto a 360 días

comportamiento satisfactorio; así como, las probetas expuestas a 60 meses en una disolución de sulfatos presentan un comportamiento diferenciado en concordancia a su contenido de aluminato tricálcico. Todo ello, evidencia que la utilización del cemento tipo V brinda un comportamiento ideal para la zona costera del Perú, por su menor contenido de aluminato tricálcico. Cabe destacar que, en la norma europea ya se ha incluido de manera reglamentaria el uso de tres tipos de cemento en función a la cantidad de C3A.

E. Resistencia a los sulfatos (expansión)

En la figura 9 se presenta un gráfico de cambio de longitud y tiempo de exposición a los sulfatos para las 8 condiciones indicadas (figura 8). Los ensayos han demostrado que el cemento Tipo V presenta una menor expansión en comparación con el cemento I cuando se expone a sulfatos, considerando el curado estándar y curado al medio ambiente. Esto consolida los estudios anteriores, ya que el cemento tipo V, al tener un bajo contenido de C3A, es más resistente a los sulfatos y con menor expansión del concreto.

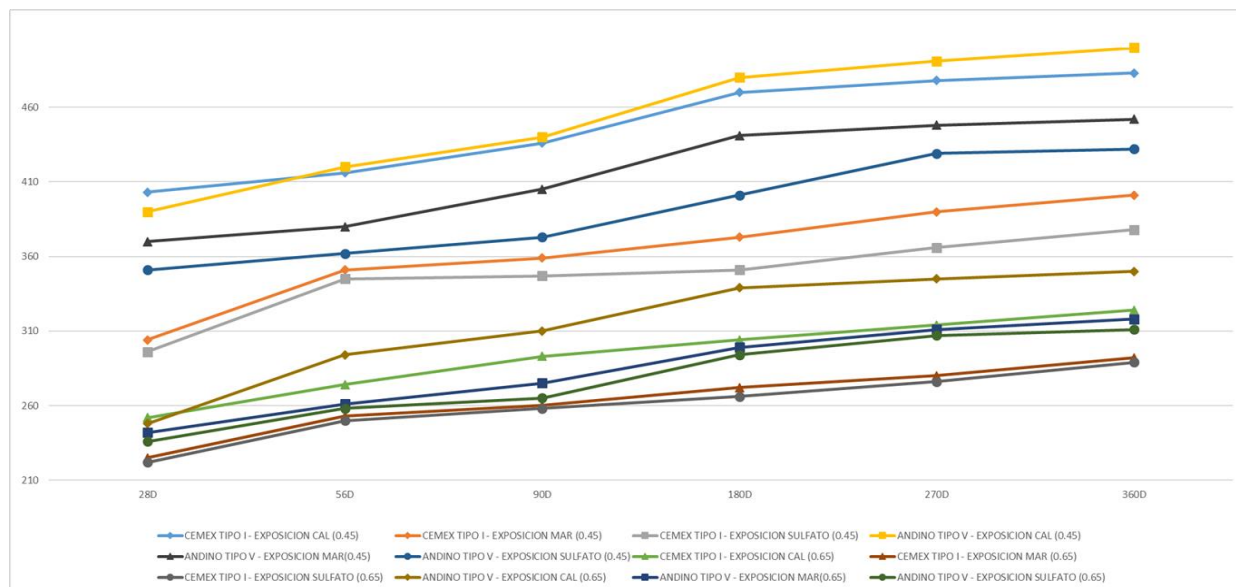


Fig. 7 Comparativo de resistencia a la compresión con a/c 0.45 y 0.65 con exposiciones especiales

Se encuentran diversas relaciones en los resultados (Figura 7) como es el caso de [21] que indican que, el cemento con resistencia media a los sulfatos (Tipo II) presenta un buen comportamiento en ambientes marinos y pobremente en ambientes con alta concentración de sulfatos evaluados a 180 días de exposición. De igual forma, [22] indica que los concretos ante el ataque de la solución de sulfatos considerando agregados reciclados y relaciones agua-cemento altas proporcionan mejores comportamientos. De igual forma, un importante estudio de [23] resalta que, probetas elaboradas con cemento SR (resistencia a los sulfatos) conservadas durante 5 años en una concentración de agua de mar evidencian un



Fig. 8. Muestras de concreto según Norma SIA

Se destaca que el concreto con cemento tipo V con a/c 0.45 y curado estándar presenta un valor menor de expansión de ΔL (‰) de 0.382, evaluado a los 84 días según la normativa suiza SIA. Por el contrario, utilizando el cemento tipo I con a/c 0.65 y curado en ambiente seco se tiene un valor máximo de expansión de ΔL (‰) de 1.032. Al compararse estos 02 tipos de condiciones evaluadas se tiene una diferencia proporcional de 2.70 veces.

En cuanto a la expansión del concreto según la normativa de resistencia de sulfatos (SIA 262- Anexo D), se indica que los mayores valores encontrados son con el diseño de mezclas a/c 0.65 y utilizando Cemex Tipo I. Se encontró un óptimo comportamiento con valores ínfimos (0.382‰ y 0.400‰) en lo que respecta Cemex Tipo V con relación a/c 0.45.

En función a los resultados se puede inferir que las mezclas con cemento tipo V, diseñadas para resistir la acción de los

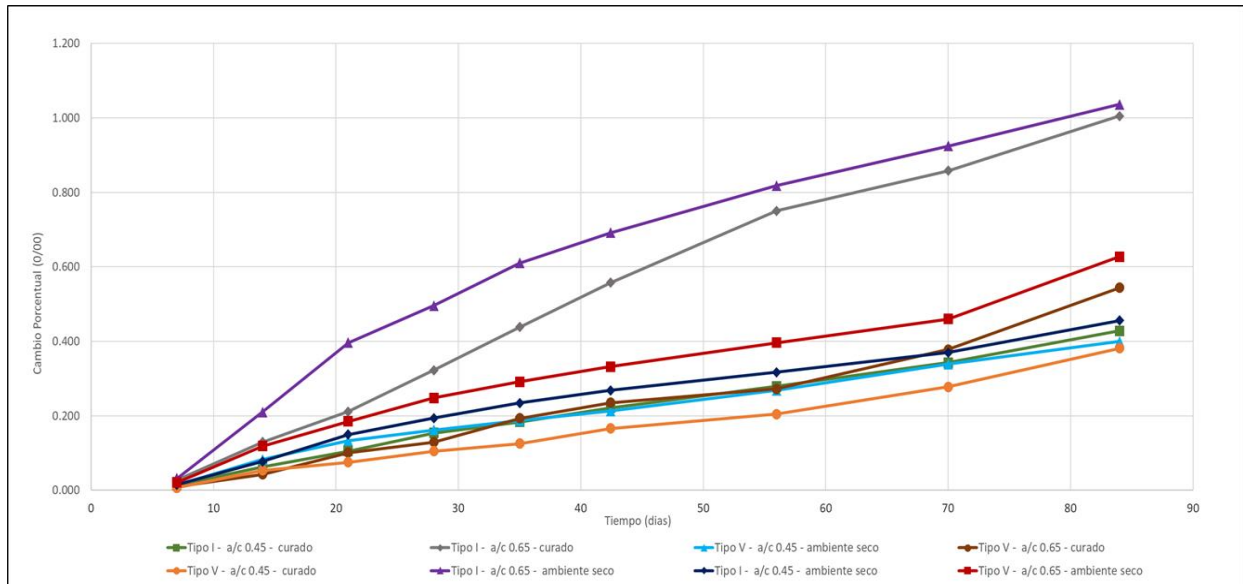


Fig. 10. Comparativo de ensayo de expansión (resistencia de sulfatos) con a/c 0.45 y 0.65

De igual forma, en la investigación de [24], se consideraron diseños de mezclas con relaciones a/c entre 0.47 a 0.49, sin acelerante, con acelerante alcalino (CSA) y acelerante sin álcalis (CSA-SA) evaluados en laboratorio y campo; encontrándose que las probetas con CSA curadas a sulfato, presentan una rápida expansión y una alta penetración de sulfato, provocando un ablandamiento y la desintegración casi completa de las muestras; pero, las muestras referenciales (no aceleradas) no mostraron ningún daño notable y esto se relaciona con una expansión casi nula (<0.5 ‰). Todo lo indicado, se relaciona con esta investigación que presenta valores acordes con lo anterior (0.40–0.456 ‰). Cabe destacar que, la temperatura elevada y ambientes de sulfato agresivo, benefician el crecimiento de etringita ocasionando la formación de grietas y fisuras que afectan considerablemente la durabilidad.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En cuanto a la resistencia a la compresión, es claro mencionar que la mayor afectación al concreto se presentó con la exposición a sulfatos usando el Cemex Tipo I. Se evidencia un notorio comportamiento de la resistencia con el uso de Cemex Tipo V con relación a/c 0.45 en comparación a a/c 0.65 presenta una diferencia de 39.67% (143kg/cm²). El máximo valor obtenido (500kg/cm²) fue con el diseño de mezclas con cemento tipo V con a/c 0.45 y exposición estándar.

sulfatos, muestran un desempeño superior en términos de durabilidad comparado con las mezclas que utilizan cemento tipo I. En concordancia a los ensayos de concreto fresco y endurecido evaluados, se propone para la zona costera de Chimbote, considerarse un diseño óptimo con una relación a/c 0.45 y cemento estándar Tipo V.

Se recomienda que en futuros estudios de investigación se enfoque en la optimización de aditivos y modificadores para concreto, como el uso de nanomateriales, fibra de carbono o materiales reciclados, que puedan aumentar la resistencia del concreto sin afectar su sostenibilidad. Es necesario el desarrollo y puesta en marcha de modelos predictivos de durabilidad que posibiliten anticipar el comportamiento del hormigón en base a las variables ambientales particulares de cada zona costera. Estos modelos pueden ser útiles para elegir el material apropiado para diversos proyectos y perfeccionar el diseño de mezcla, lo que disminuirá los gastos de mantenimiento a largo plazo

REFERENCIAS

- [1] Peña, K. (2021). Coursera. Recuperado el 09 de Abril de 2023, de <https://www.coursehero.com/file/122761655/LA-UTILIZACION-DE-CONCRETOS-EN-LAS-CONSTRUCCIONESdocx/>

- [2] Rhazi, J. (2012). Notas del Curso Técnicas de Control no destructivas e Instrumentación de Infraestructuras. Quebec, Canada: Universidad de Sherbrooke.
- [3] Camara Peruana de la Construcción [CAPECO]. (23 de Junio de 2021). RPP. Obtenido de <https://rpp.pe/economia/economia/el-80-de-las-viviendas-en-el-peru-son-informales-y-serian-vulnerables-ante-un-terremoto-noticia-1343757?ref=rpp>
- [4] Ebensperger, L., & Donoso, J. (2019a). XV Congreso Latino-Americano de Patología de Construcción (CONPAT). Metodología integral de diagnóstico de estructuras de concreto reforzado. Chiapas: XV Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción.
- [5] Euclid Chemical. (Junio de 2020). Eucconcreto. Obtenido de https://www.toxement.com.co/media/4331/eucoconcreto_junio_2020-comprimido.pdf
- [6] Din, Z., Yao, Z., Hu, K., & Fang, Y. (2024). Development of high-performance fiber-reinforced concrete for drilling wellbore walls in highly mineralized strata and its sulfate attack resistance. *Materials Research*, 11. doi:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ad6821>
- [7] Tahwia, A., Fouda, R., Elrahman, M., & Youssf, O. (2023). Long-Term Performance of Concrete Made with Different Types of Cement under Severe Sulfate Exposure. *Materials*, 16(240). doi:doi.org/10.3390/ma16010240
- [8] Saif, S., Kassim, M., & Salman, G. (2023). Concrete Mix Strength and Permeability with Various Supplementary Cementitious Materials. *The International Conference on Geosynthetics and Environmental Engineering (ICGWEE)*, 427(02005). doi:doi.org/10.1051/e3sconf/202342702005
- [9] Kaufmann, J., Loser, R., Winnefeld, F., & Leemann, A. (2021). Sulfate resistance and phase composition of shotcrete. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109(103760). doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103760>
- [10] Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2021a). Agregados para concreto: Requisitos (NTP 400.037). Lima.
- [11] ASTM International [ASTM]. (2018a). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (ASTM 532). West Conshohocken.
- [12] ASTM International. (2018a). Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken.
- [13] Taus, V. (2003). Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, 10, 7-16. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/153563620.pdf>
- [14] Monteiro, P., & Mehta, K. (2013). *Concrete: Structure, Properties, and Materials* (Cuarta Edición ed.). Berkeley: McGraw-Hill.
- [15] O'Reilly, M., Darwin, D., Sperry, J., & Browning, J. (2017). Variation of concrete strength, permeability, and porosity due to specimen type, season, and age. (T. K. (K-TRAN), Ed.) *Structural Engineering and Engineering Materials* (120). Obtenido de <https://kuscholarworks.ku.edu/bitstream/handle/1808/25724/SM%20Report%20No.%20120.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [16] Velez, L. (Diciembre de 2010). Permeabilidad y Porosidad en Concreto. *Tecnológicas*(25), 169-187.
- [17] Sólis-Carcaño, R., & Moreno, E. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 21(3). Obtenido de <https://ve.scielo.org/pdf/rfiucv/v21n3/art04.pdf>
- [18] Farfan, J. (2002). Durabilidad de concretos estructurales. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TE501000307161>
- [19] Alcocer-Fraga, M., & Sólis-Carcaño, R. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Revista Ingeniería, investigación y tecnología*, 20(4). doi:<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039>
- [20] Solís-Carcaño, R., Moreno, E., & Serrano-Zebadua, C. (2013). Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. *Concreto y cemento: Investigación y desarrollo*, 4(2), 15-25. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-30112013000100002&lng=es&nrm=iso
- [21] Di Pace, G., & Yepes, L. (2020). Ataque de sulfatos a los compuestos cementicios. *Experiencias Concretas*(09). Obtenido de <https://pysconcreto.com.pe/wp-content/uploads/2020/03/Nº9-Ataque-de-sulfatos-a-los-compuestos-cementicios-2.pdf>
- [22] Garzón, W. (2013). Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado. Bogotá. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11912/garzonpirewilliam.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [23] Lopez Sanchez, P. (2015). Estudio sobre la durabilidad de los nuevos tipos de cemento para la evaluación del comportamiento de morteros y hormigones frente a la agresión química de los sulfatos y del agua de mar. Madrid.
- [24] Paglia, C., Wombacher, F., Bohni, H., & Sommer, M. (2002). An evaluation of the sulfate resistance of cementitious material accelerated with alkali-free and alkaline admixtures laboratory vs field. *Cement and Concrete Research*, 665-671. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00739-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00739-6)