

Low permeability concrete for prefabricated spring piles built in areas of splashes and tides using multiwall carbon nanotubes

Marco Nieto, Bachiller¹, Mary Galán, Bachiller¹, José Rodríguez, Doctor², Alexandra Hinostroza, Máster³

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201517166@upc.edu.pe, u201517129@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, jose.rodriguez@upc.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pcipahin@upc.edu.pe

Abstract– Due to the importance of the maritime structures, it is required that the concrete with which they are manufactured guarantees their impermeability against the waters of the sea, being the piles of the docks those that suffer different anomalies when being in direct contact with the sulfates and chlorides, that progressively degrade it mainly causing its cracking. Carbon Nanotubes (NTC) have a large specific surface that affects the cement matrix by modifying hydrated calcium silicates, producing greater cohesion and consequently increasing the compactness of concrete. The present work seeks to reduce the permeability of the concrete of the prefabricated piles of the springs located in areas of splashes and tides, studying for it different physical and mechanical properties and economic viability of concrete with NTC; The results indicate that settlement decreases, the compressive, tensile and flexural strengths increase, the water penetration depth decreases and the cost per m³ is higher.

Keywords-- Carbon nanotubes, breakwater piers, marine environment, prefabricated piles, concrete fissures.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.225>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Concreto de baja permeabilidad para pilotes prefabricados de muelles construidos en zonas de salpicaduras y mareas utilizando nanotubos de carbono de pared múltiple

Low permeability concrete for prefabricated spring piles built in areas of splashes and tides using multiwall carbon nanotubes

Marco Nieto, Bachiller¹, Mary Galán, Bachiller¹, José Rodríguez, Doctor², Alexandra Hinostroza, Máster³

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201517166@upc.edu.pe, u201517129@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, jose.rodriguez@upc.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pcipahin@upc.edu.pe

Resumen– Debido a la importancia de las estructuras marítimas se requiere que el concreto con el que se fabrican garantice su impermeabilidad frente a las aguas del mar, siendo los pilotes de los muelles los que sufren diferentes anomalías al estar en contacto directo con los sulfatos y cloruros, que lo van degradando progresivamente ocasionando principalmente su fisuración. Los Nanotubos de carbono (NTC) poseen una gran superficie específica que incide en la matriz de cemento modificando los silicatos de calcio hidratado, produciendo una mayor cohesión y consecuentemente el aumento de la compactación del concreto. El presente trabajo busca reducir la permeabilidad del concreto de los pilotes prefabricados de los muelles ubicados en zonas de salpicaduras y mareas, estudiando para ello diferentes propiedades físicas, mecánicas y la viabilidad económica del concreto con NTC; los resultados indican que el asentamiento disminuye, las resistencias a la compresión, tracción y flexión aumentan, la profundidad de penetración del agua disminuye, y el costo por m³ es mayor.

Keywords– Nanotubos de carbono, muelles espigón, ambiente marino, pilotes prefabricados, fisuras concreto.

Abstract– Due to the importance of the maritime structures, it is required that the concrete with which they are manufactured guarantees their impermeability against the waters of the sea, being the piles of the docks those that suffer different anomalies when being in direct contact with the sulfates and chlorides, that progressively degrade it mainly causing its cracking. Carbon Nanotubes (NTC) have a large specific surface that affects the cement matrix by modifying hydrated calcium silicates, producing greater cohesion and consequently increasing the compactness of concrete. The present work seeks to reduce the permeability of the concrete of the prefabricated piles of the springs located in areas of splashes and tides, studying for it different physical and mechanical properties and economic viability of concrete with NTC; The results indicate that settlement decreases, the compressive, tensile and flexural strengths increase, the water penetration depth decreases and the cost per m³ is higher.

Keywords– Carbon nanotubes, breakwater piers, marine environment, prefabricated piles, concrete fissures.

I. INTRODUCCIÓN

Las obras marítimas se caracterizan por su notable envergadura, longitud, gran profundidad y extraordinario requerimiento de materiales [1], a estas características, hay que incluirles en el diseño y su construcción, el ambiente marino donde se ubican. Los muelles son estructuras muy importantes para el transporte y desarrollo económico marítimo de un puerto, siendo los muelles de pilotes recomendados para los lugares donde se pretende disminuir la reflexión del oleaje [2]. Estos pilotes pueden ser fabricados in situ o prefabricados de: acero, concreto pretensado o concreto armado, siendo estos últimos más preferidos que los fabricados in-situ debido a la mayor calidad en el proceso de fabricación.

El concreto es un material heterogéneo elaborado con diferentes componentes que le confieren porosidad, la cual se incrementa en función de los vacíos intergranulares existentes en la matriz. Para el caso de una estructura marina se requiere que el concreto sea impermeable para que se comporte adecuadamente a lo largo de la vida del proyecto, sea menos vulnerable [3, 4] y presente mayor durabilidad ante la agresividad química de los componentes del agua marina.

La penetración de iones cloruro y sulfato es la principal causa de degradación prematura de las estructuras portuarias [5], su incidencia sobre los pilotes de concreto depende del nivel de profundidad en el que se encuentra. Así tenemos que, en la zona de salpicaduras los cloruros penetran por succión capilar; en zona de mareas los sulfatos ingresan por succión capilar; y en la zona sumergida la penetración tiene lugar por succión capilar e ingresan los sulfatos y cloruros.

En el caso de los pilotes de concreto armado la patología del concreto está relacionada con las fisuras, los agrietamien-

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.225>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

tos, los desprendimientos y los desconchamientos; estas manifestaciones patológicas se evidencian principalmente en zonas de salpicaduras y de mareas [6, 7]. Estas pueden ser disminuidas con la adición de puzolana artificial o natural [8]; en este sentido, una alternativa de solución podría ser utilizar los nanotubos de carbono (NTC) en el concreto debido a que poseen una muy alta superficie específica de sus nanopartículas.

Los NTC son estructuras cilíndricas que poseen únicamente átomos de carbono [9, 10], son de 2 tipos: de pared simple, formados por una hoja de grafeno y de pared múltiple, compuestos por varias hojas de grafeno [11, 12]; pueden obtenerse por diferentes procesos, siendo los más utilizados la cámara de descarga de arco eléctrico, la deposición química de vapor y la ablación con láser [13, 14]. Presentan un buen comportamiento en sus propiedades mecánicas: resistencia a la compresión, tracción, flexión y permeabilidad; siendo ésta la que incide en la mejora de la estabilidad de volumen de los materiales cementantes. En la aplicación de NTC debemos evitar aglomerarlos porque reduce la rigidez elástica de los compuestos cementantes [15].

Algunas investigaciones sobre los NTC han sido reportadas por diferentes investigadores, la Ref. [16] indica que la adición de NTC al concreto reduce la absorción del agua por inmersión y menciona, también, que esta adición reduce su fluidez. En la Ref. [17], luego de estudiar el efecto del NTC sobre el concreto convencional manifiesta que existe un aumento en la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la tracción del 11.9%, 17.3% y 15.2% respectivamente. Asimismo, las Ref. [18, 19] indican que la adición del 0.5% de NTC por peso del cemento produce un aumento del 25% en la resistencia a la flexión y del 19% en la resistencia a la compresión. Por otro lado, la Ref. [20] utiliza el NTC como agregado en la nano-indentación de pastas de cemento, encontrando que con pequeñas cantidades de 0.05% NTC altamente dispersas se puede aumentar la cantidad de la rigidez de la estructura de la pasta de cemento (C-S-H) y disminuir la porosidad.

Son escasas las investigaciones en el campo económico sobre la utilización de los NTC en la fabricación del concreto, la Ref. [34] estudia el reemplazo del cemento por cenizas volantes (CV) y por NTC, para evaluar su costo/resistencia con respecto al NTC-0; encontrando que con 30% de CV se reduce el costo total del concreto en más del 15% y que el concreto con NTC es más caro, ambos, que el concreto con NTC-0.

En esta investigación se estudia el problema de la alta permeabilidad que presenta el concreto de los pilotes prefabricados de concreto armado de los muelles tipo espigón ubicados en zonas de salpicaduras y mareas en el ambiente marino. Para ello se ha estudiado el asentamiento, las resistencias a la compresión, tracción y flexión, la permeabilidad al agua, y el análisis de precios unitarios del concreto con NTC.

II. MATERIALES Y MÉTODO

2.1. Materiales.

a. Cemento: Se utilizó Cemento Andino Tipo V, según especificaciones dadas por [21, 22], sus características se muestran en la Tabla I.

b. Agregados: Los agregados gruesos y finos se obtuvieron naturalmente. Las características de los agregados se muestran en la Tabla II y sus curvas granulométricas en las Figuras 1 y 2 respectivamente.

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL CEMENTO ANDINO TIPO V

Propiedades	Cemento Andino Tipo V
Contenido al aire (%)	5.12
Densidad Específica (m ² /kg)	340.00
Densidad (g/ml)	3.15
MgO (%)	1.80
SO ₃ (%)	1.90
Pérdida al fuego (%)	1.50
Residuo insoluble (%)	0.60
Contenido de álcalis equivalentes (%)	0.39
Resistencia al Ataque de Sulfatos (%)	0.03

TABLA II
PROPIEDADES DEL AGREGADO GRUESO Y FINO

Propiedades	Agregado Grueso	Agregado Fino
Contenido de humedad (%)	0.29	1.76
Absorción (%)	0.69	1.22
Módulo de fineza	1/2"	2.8
Peso específico sss (g/cm ³)	2.67	2.63
Peso unitario suelto (g/cm ³)	1.57	1.61
Peso unitario compactado (g/cm ³)	1.69	1.84
Malla 200 (%)	0.68	5.38

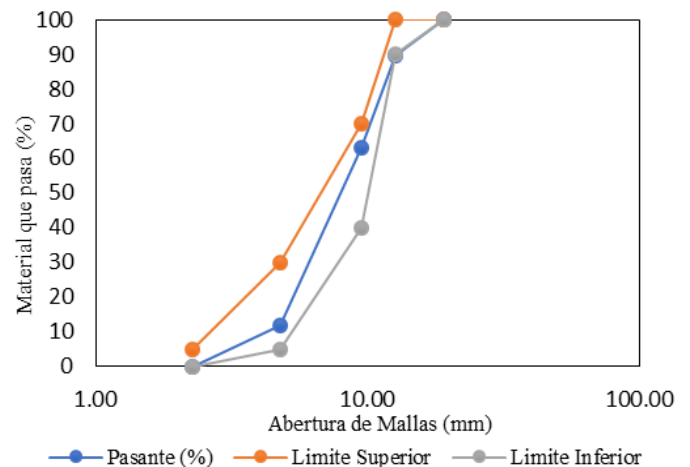


Fig 1: Granulometría del Agregado Grueso (AG)

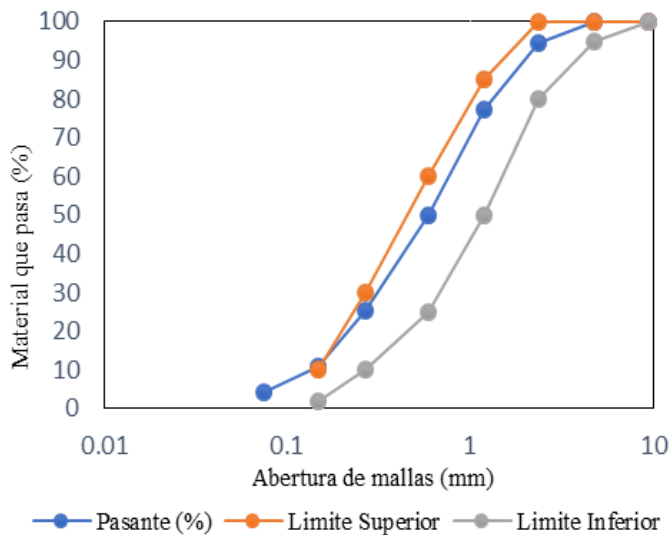


Fig 2: Granulometría del Agregado Fino (AF)



Fig. 3: Proceso de dispersión de NTC mediante la sonicación

c. Nano aditivo: Se utilizó nanotubos de carbono (NTC) de pared múltiple, el método de dispersión para su incorporación a la mezcla cementante fue la sonicación, utilizando el equipo sonicador/baño ultrasonido 5.6 L/ 1,5 GAL, 230 V, serie CPXH, el proceso seguido se muestra en la Figura 3. En la Tabla III y Figura 4 se muestran las características de los NTC.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS NANOTUBOS DE CARBONO

Tipo	Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple
Pureza (%)	>90
COOH Contenido (%)	1,55
Diámetro exterior (nm)	8 – 15
Diámetro interior (nm)	3 – 6
Longitud (um)	30 – 50
Superficie específica (m ² /g)	>200
Color	Negro
Densidad (g/cm ³)	0,1
Método de obtención	CVD



Fig.4: NTC de color negro

d. Aditivo: El superplastificante utilizado es CHEMA MEGAPLAST 1000M en líquido, con densidad 1.09 ± 0.01 gr/ml y pH: 6.0 ± 0.5

e. Agua: Para la elaboración de las mezclas se empleó agua potable que cumple con las características dadas en [23]

2.2. Método

Los ensayos realizados fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Tecnología del Concreto de la UPC-Villa. Para el diseño de mezclas del concreto se utilizó el método indicado en [24], el $f'_c = 410$ kg/cm², las diferentes mezclas elaboradas se muestran en la Tabla IV y representan:

NTC-0, sin adición de NTC (concreto patrón)

NTC-0.05 (con 0.05% de adición de NTC)

NTC-0.10 (con 0.10% de adición de NTC)

NTC-0.15 (con 0.15% de adición de NTC)

TABLA IV
DISEÑO DE MEZCLAS PARA 1M³ DE CONCRETO

Materiales	NTC-0	NTC-0.05	NTC-0.10	NTC-0.15
Cemento (Kg)	554.4	554.4	554.4	554.4
NTC (Kg)	0	0.28	0.55	0.83
AF (kg)	738.66	738.66	738.66	738.66
AG (Kg)	776.55	776.55	776.55	776.55
Agua (Kg)	227.18	227.18	227.18	227.18
Plastificante (Kg)	3	3	3	3
Total	2299.79	2300.07	2300.34	2300.62

En la Tabla V y Tabla VI se muestran los ensayos realizados, el número de probetas, las dimensiones de estas y las normas utilizadas.

TABLA V
EDAD DEL CONCRETO Y NORMAS SEGÚN LOS ENSAYOS REALIZADOS

Ensayos	NTC-0, NTC-0.05, NTC-0.10, NTC-0.15		Normas
Asentamiento	7	28	[25, 26]
Resistencia a la compresión	7	28	[27, 28]
Resistencia a la tracción	7	28	[27, 29]
Resistencia a la flexión	7	28	[30, 31]
Permeabilidad	-	28	[32]

TABLA VI
NÚMERO Y DIMENSIONES DE PROBETAS SEGÚN LOS ENSAYOS REALIZADOS

Ensayos	NTC-0		NTC-0.05		NTC-0.10		NTC-0.15		Dimensiones
	7	28	7	28	7	28	7	28	
Asentamiento	3	3	3	3	3	3	3	3	4''x 8''
Resistencia a la compresión	3	3	3	3	3	3	3	3	4''x 8''
Resistencia a la tracción	3	3	3	3	3	3	3	3	4''x 8''
Resistencia a la flexión	3	3	3	3	3	3	3	3	4''x 8''
Permeabilidad al agua	-	2	-	2	-	2	-	2	6''x 12''

Luego de la elaboración de las mezclas se procedió a curarlas por espacio de 7 y 28 días, para posteriormente ser ensayadas. Cabe mencionar que al adicionar los NTC no se ha descontado del peso de cemento debido a que las cantidades añadidas fueron mínimas.

III. RESULTADOS

3.1. Asentamiento

En la Figura 5, se muestra la influencia del porcentaje de adición de NTC sobre el asentamiento. En ella, se visualiza que al aumentar el porcentaje de adición de NTC el asentamiento disminuye, consiguiéndose los valores de 7.9cm, 7.6cm y 7cm para las mezclas NTC-0.05, NTC-0.10 y NTC-0.15 que equivalen a un 17.7%, 14.4% y 7% menos que la muestra NTC-0.

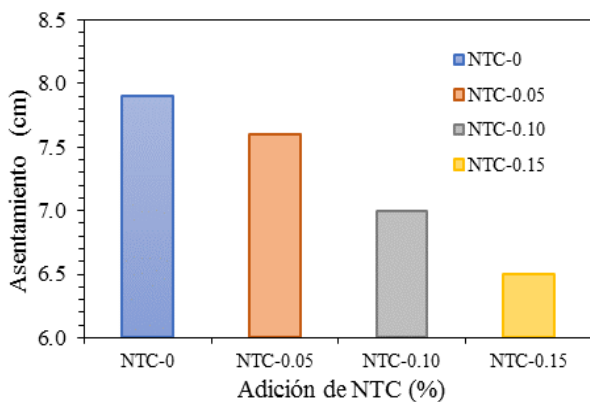


Fig.5: Influencia del porcentaje de adición de NTC sobre el asentamiento.

3.2. Resistencia a la compresión

En la Figura 6, se muestra la influencia de la edad de ensayo sobre la resistencia a la compresión para diferentes porcentajes de adición de NTC. En ella, se aprecia que al variar la edad de 7 a 28 días la resistencia a la compresión aumenta para las diferentes muestras de concreto, alcanzándose a la edad de 28 días para la muestra NTC-0.15 el valor de 463.9

Kg/cm² comparado con 410 Kg/cm² de la muestra NTC-0, lo que representa un 11.6 % más de resistencia.

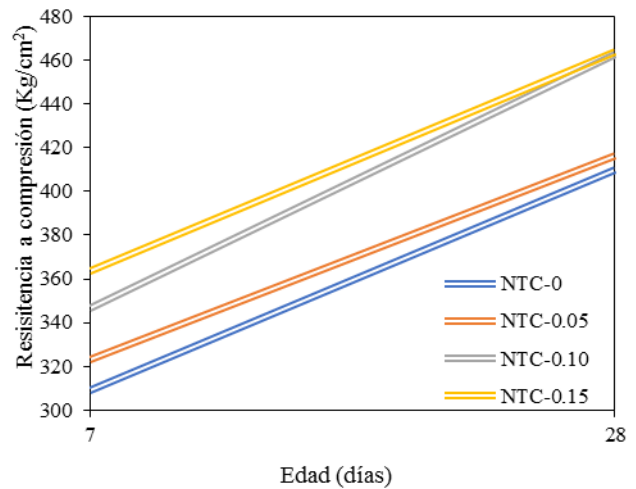


Fig. 6: Influencia de la edad de ensayo sobre la resistencia a la compresión.

3.3. Resistencia a la tracción

En la Figura 7, se muestra la influencia de la edad de ensayo en la resistencia a la tracción para diferentes valores de adición de NTC. En ella, se visualiza que al variar la edad de 7 a 28 días la resistencia a la tracción aumenta. para las diferentes muestras de concreto, así tenemos que para la edad de 28 días la resistencia a la tracción de la muestra NTC-015 es de 34.9 Kg/cm² y de 30.4 Kg/cm² para la muestra NTC-0, representando un incremento del 15%.

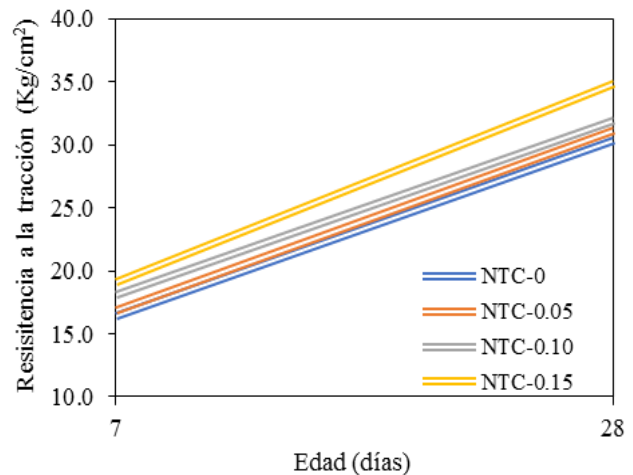


Fig. 7: Influencia de la edad de ensayo sobre la resistencia a la tracción.

3.4. Resistencia a la flexión

En la Figura 8, se muestra la influencia de la edad de ensayo en la resistencia a la flexión para diferentes porcentajes de adición de NTC. En ella, se ve que al variar la edad de 7 a

28 días la resistencia a la flexión aumenta para las diferentes muestras de concreto NTC, alcanzándose a la edad de 28 días para la muestra NTC-0.15 el valor de 75.6 Kg/cm² comparado con 68Kg/cm² de la muestra NTC-0, lo que representa un 11 % más de resistencia.

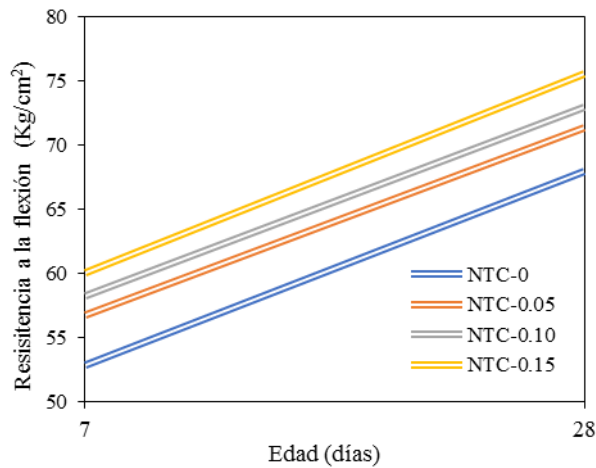


Fig. 8: Influencia de la edad de ensayo sobre la resistencia a la flexión

3.5. Permeabilidad al agua

En la Figura 9, se muestra la influencia de diferentes porcentajes de adición de NTC sobre la profundidad de penetración del agua en el concreto. En ella, se visualiza que al variar el porcentaje de adición de NTC la penetración del agua a los 28 días disminuye, consiguiéndose los valores de 4 cm, 2.1 cm y 0.8 cm para las mezclas NTC-0.05, NTC-0.10 y NTC-0.15 que equivalen a un 33%, 65% y 86% menos que la muestra NTC-0.

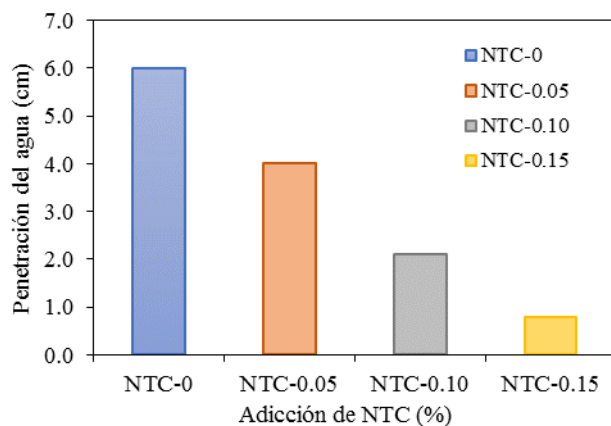


Fig. 9: Influencia del porcentaje de adición de NTC sobre la profundidad de penetración de agua.

3.6. Valoración económica

En las tablas VII, VIII y IX se muestran los análisis de precios unitarios para la elaboración de 1 m³ de tres tipos de concretos: NTC-0, NTC-0.15 y con cenizas volantes para un

30% de adición (CV-30), habiéndose escogido la CV por sus propiedades puzolánicas similares al NTC. Para los dos primeros, los precios unitarios se obtuvieron de [33] y en el NTC-0.15 se incluyó el transporte de 1 Kg de NTC desde Nanjing-China a Lima-Perú por el importe de \$49.92 USD; y para el tercero los precios se obtuvieron de [34]. En las Tablas mencionadas se observa que los costos unitarios totales para 1 m³ son de \$113.01 USD para NTC-0, \$238.595 USD para NTC-0.15 y \$54.70 USD para CV-30; representando el costo del NTC-015 y CV-30 un 111% más y un 51.6% menos que el NTC-0.

TABLA VII
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS POR M³ DE CONCRETO NTC-0

Descripción	Costo unitario por m ³ de concreto NTC-0			
	Unidad	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de obra				
Operario	h-h	0.1	22.91	2.291
Peón	h-h	2	16.37	32.74
Materiales				
Cemento portland tipo V	Bls	13	23.05	299.65
Piedra chancada de 1/2"	m ³	0.276	54.15	14.95
Arena gruesa	m ³	0.290	42.37	12.29
Aditivo plastificante líquido	Gln	0.86	19.92	17.13
Agua	m ³	0.2	5.68	1.14
Equipo, Herramientas				
Mezcladora de concreto	h-m	0.8	11.25	9
Herramientas manuales	-	0.03	35.03	1.05
Total				S/390.23 (\$113.01)

TABLA VIII
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS POR M³ DE CONCRETO NTC-0.15

Descripción	Costo unitario por m ³ de concreto NTC-0.015			
	Unidad	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra				
Operario	h-h	0.1	22.91	2.29
Peón	h-h	2	16.37	32.74
Materiales				
Cemento portland tipo V	Bls	13	23.05	299.65
Nanotubos de Carbono	Kg	0.832	450	374.4
Piedra chancada de 1/2"	m ³	0.276	54.15	14.95
Arena gruesa	m ³	0.29	42.37	12.29

Aditivo plastifi- cante líquido	Gln	0.86	19.92	17.13
Agua	m ³	0.2	5.68	1.14
Equipo, Herramientas				
Mezcladora de concreto	h-m	0.8	11.25	9
Sonicador	h-m	3	20	60
Herramientas manuales	-	0.03	35.03	1.05
Total				S/823.38 (\$238.59)

TABLA VIX
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS POR M³ DE CONCRETO
CON CV-30

Descripción	Costo unitario por m ³ de concreto con CV			
	Unidad	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra				
Operario	h-h	0.1	22.91	2.291
Peón	h-h	2	16.37	32.74
Materiales				
Cemento Portland (OPC)	Blis	5.93	12.55	74.39
Ceniza volante (30%)	Kg	108.00	0.11	12.07
Agregado Grue- so Natural (50%)	m ³	0.226	41.49	9.36
Agregado Grue- so Reciclado (50%)	m ³	0.232	25.78	5.97
Arena Gruesa	m ³	0.243	49.88	12.14
Plastificante Líquido	Gln	1.25	18.77	23.44
Agua	m ³	0.180	3.11	0.56
Equipo, Herramientas				
Mezcladora de concreto 20-35 HP	h-m	0.8	18.44	14.75
Herramientas Manuales	-	0.03	35.03	1.05
Total				188.77 (\$54.70)

III. ANÁLISIS

4.1. Asentamiento

La Ref. [35], realiza el estudio del asentamiento de dos mezclas de concreto con NTC y una mezcla de concreto convencional (0%), empleando las cantidades de 0.3% de adición de NTC con dispersión y 0.3% sin dispersión. Los resultados revelan que el asentamiento disminuye con el incremento de la adición de NTC y el tipo de dispersión, obteniendo los valores

de 18 cm y 7 cm para la mezcla de 0.3% de NTC con dispersión y 0.3% NTC sin dispersión, comparados con el asentamiento de 20 cm para 0% que equivale a los porcentajes de disminución 15 % y 65%.

En otro estudio, la Ref. [36] evalúa el asentamiento de 5 mezclas de pasta de cemento con adiciones de 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% y 0.5% sobre el concreto convencional (0%). Los resultados indican que el asentamiento disminuye al aumentar el porcentaje de NTC, obteniéndose los asentamientos de 13.5 cm, 13 cm, 11cm, 10 cm y 4.2 cm, que equivalen a las disminuciones en porcentajes del 8.7%, 12%, 25.6%, 32.4%, % con respecto al asentamiento del 0%.

Los resultados mostrados muestran la misma tendencia de disminución del asentamiento que los estudiados, donde su comportamiento se debe a que el área específica del nanotubo le permite tener mayor capacidad de absorción del agua, que al aumentar la cantidad de nanotubo en la mezcla se produce la pérdida de asentamiento [37].

4.2. Resistencia a la compresión

La Ref. [38] estudia la variación del 0.0015% y 0.012% del NTC en la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, obteniendo como mejor resultado el valor de 640 Kg/cm² para 0.012% en contra del valor de 569.6 Kg/cm² para la muestra sin adición de NTC, lo que indica el incremento de 11% la resistencia a la compresión.

Por otro lado, la Ref. [39] investiga diferentes dosificaciones de NTC en la pasta de cemento, utilizando los valores de 0.01%, 0.02%, 0.1%, 0.2% para determinar la resistencia a la compresión a los 28 días: Los resultados expresan que con la dosificación de 0.2% de NTC se alcanza la mayor resistencia de 420Kg/cm² comparada con 167 Kg/cm² alcanzada para la dosificación sin adición de NTC, lo que representa un incremento de resistencia a la compresión del 51.4% en la pasta de cemento.

Los resultados expuestos, presentan una igual tendencia de aumento de resistencia que los mostrados en el presente trabajo. Este comportamiento, según lo indicado en la Ref. [40], está relacionado con el efecto positivo del NTC sobre la hidratación del cemento a edades tempranas.

4.3. Resistencia a la tracción.

En la Ref. [38] se estudia la variación del 0.0015% y 0.012% del NTC en la resistencia a la tracción del concreto a los 28 días, obteniendo para el valor de 0.012% la resistencia de 38 Kg/cm² y de 32 Kg/cm² para la muestra sin adición de NTC, lo que indica una resistencia mayor del 11%.

Asimismo, la Ref. [41] analiza la incidencia del 0.05% y 0.1% de NTC en el concreto para las edades de 7 y 28 días, obteniendo que con 0.1% de NTC se alcanza la mayor resistencia de 39 Kg/cm² en contra de 30 Kg/cm² obtenida para la muestra sin adición de NTC, lo que representa un incremento de resistencia del 27%.

Los resultados mostrados, tienen igual tendencia de incremento de resistencia que los mostrados en el presente estu-

dio. Este comportamiento, según lo indicado por la Ref. [42] está relacionado con la mejora de las propiedades mecánicas del concreto por la adición del NTC, produciendo un compuesto más denso con mayor resistencia y capacidad de deformación.

4.4. Resistencia a la flexión.

En la Ref. [43] se estudia la variación del 0.5% y 0.7% del NTC de pared múltiple en la resistencia a la flexión a los 28 días, obteniendo como mejor resultado el valor de 54.6 Kg/cm² para 0.7% en contra del valor de 37.5 Kg/cm² para la muestra sin adición de NTC, lo que indica el incremento de la resistencia a la flexión de 45.6% en el concreto.

Por otro lado, la Ref. [44] investiga diferentes dosificaciones de NTC, utilizando los valores de 0.15%, y 0.25% para determinar la resistencia a la flexión del concreto a los 28 días. Los resultados expresan que con la dosificación de 0.2% de NTC se alcanza la mayor resistencia de 420Kg/cm² comparada con 167 Kg/cm² alcanzada para la dosificación sin adición de NTC, lo que representa un incremento de resistencia a la flexión de 51.4%.

Los resultados expuestos, presentan una igual tendencia de aumento de resistencia que los mostrados en el presente trabajo. Este comportamiento, según lo indicado por [45], se atribuye a la reactividad química del NTC con la matriz que produce un nanocompuesto mejorado en sus propiedades mecánicas de resistencia.

4.5. Permeabilidad al agua

La Ref. [46], realiza el estudio de la penetración al oxígeno del concreto a la edad de 28 días de dos mezclas de concreto con NTC y una mezcla de concreto convencional (0%), empleando las cantidades de 0.2% y 0.5% NTC. Los resultados revelan que la profundidad al oxígeno decrece con el incremento de la adición de NTC, obteniendo los valores de 5.1 cm y 2.5 cm para las mezclas de 0.2% de NTC y 0.5% NTC, comparados con la profundidad al oxígeno de 8.8 cm para 0% que equivale a los porcentajes de disminución del 42 % y 71%.

En otro estudio, la Ref. [44] evalúa el efecto de los NTC sobre el coeficiente de permeabilidad del concreto para 4 mezclas con adiciones de 0.03%, 0.08%, 0.15% y 0.25% por peso del cemento sobre el concreto convencional (0%). Los resultados indican que el coeficiente de permeabilidad disminuye al aumentar el porcentaje de NTC, obteniéndose reducciones del 78%, 72%, 45% y 64% con respecto al concreto con 0%.

Los resultados mostrados muestran la misma tendencia de disminución de la penetración al oxígeno y del coeficiente de permeabilidad al agua que los estudiados, donde su comportamiento se debe a que las nano partículas al dispersarse uniformemente en la matriz de cemento la hacen más homogénea y compacta con lo cual reducen el paso del agua a través del concreto [46].

4.6. Valoración económica

El mayor costo del NTC-015 con respecto al NTC-0 se debe a la dificultad en la producción masiva del NTC, en su pureza y en la capacidad para controlar de forma exacta sus características y propiedades [47]. Esto puede ser un obstáculo para usarlo en el compuesto cementicio, sin embargo, se cree que con el aumento de la demanda y el potencial escalamiento en el método de obtención a nivel industrial será más accesible [48].

En cuanto al menor costo de la CV-30 con respecto al NTC-0, podemos indicar que este se debe a la diferencia de los componentes del concreto, estando influenciados principalmente por las cantidades, tipos y procedencia de cada uno de ellos.

IV. CONCLUSIONES

La adición de NTC disminuye la alta permeabilidad de las estructuras, lo que incide en la baja penetración de agua bajo presión y el aumento de su vida útil.

La disminución del asentamiento produce una consistencia más seca que incide directamente en la trabajabilidad de la mezcla, la cual mejora con buena dispersión de los NTC.

La resistencia a la compresión, al aumentar, produce una mejora de la estabilidad del volumen de los materiales cementantes a edades muy tempranas.

El aumento de la resistencia a la tracción promueve la disminución de la porosidad y la mayor resistencia a las grietas y fractura del concreto.

El incremento de la resistencia a la flexión conduce a un mejor comportamiento de las propiedades del concreto con adición de NTC.

La profundidad de agua bajo presión disminuye, esto contribuye a una estructura de alta densidad y mejora sus propiedades físicas y mecánicas.

El mayor costo del NTC en el concreto disminuirá a mediano y largo plazo debido a la amplia investigación y diversas aplicaciones que están realizándose en diversas áreas.

REFERENCIAS

- [1] V. Negro, et al, Espaldones en hormigón en masa y armado. El camino hacia la estética en las obras marítimas. *XIV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, Alicante 24-25 Mayo, 2017, pp. 1-11. http://oa.upm.es/48601/1/INVE_MEM_2017_263857.pdf
- [2] Ministerio de Fomento, Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas. 1era. ed. Puertos del Estado, Madrid, 2008, p. 1-327.
- [3] J. Cai, et al, Durability of Concrete Bridge Structure under Marine Environment. *Journal of Coastal Research*, vol. 83, no. 429, 2018, pp. 429-435. <https://doi.org/10.2112/si83-072.1>
- [4] A. Guo, et al, Structural strength deterioration of coastal bridge piers considering non-uniform corrosion in marine environments. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 17, no. 2, 2018, pp. 429-444. <https://doi.org/10.1007/s11803-018-0451-z>
- [5] A. Costa and J. Appleton, Chloride penetration into concrete in marine environment-Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Materials and Structures*, vol. 32, no. 4, 1999, pp. 252-259. <https://doi.org/10.1007/BF02479594>
- [6] A. Del Valle, et al, Degradación por corrosión de un muelle del pacífico mexicano, *Ingeniería de Construcción*, vol. 191, no. 21, Diciembre, 2006,

- pp. 193-204. Retrieved from <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/10173/000467381.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] N. Vindas, Inventario de daños en la infraestructura portuaria de Puerto Limón y propuesta de procedimientos constructivos para su reparación, Tesis Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, 2010, pp. 1-106. Retrieved from <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3220/1/31365.pdf>
- [8] Vindas Natalia (2010), Los inicios de las obras de hormigón en contacto con el agua, Tesina de Especialidad, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, p. 1-111. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/16246/Memoria.pdf>
- [9] N. Flores, et al, Aplicación de nanotubos de carbono multicapa (MWCNT) en nueve maderas tropicales de Costa Rica y su impacto en la resistencia mecánica. vol. 44, no. 2, 2019, pp. 88-93. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Roger_Roque/publication/332709056_Application_of_multilayer_carbon_nanotubes_MWCNT_on_nine_tropical_wood_of_Costa_Rica_and_their_impact_on_mechanical_resistance/links/5dd28a23299bf1b74b4bb81f/
- [10] M. Lariza, et al, Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Rev. Mex. Cs. Farmacéut.*, vol. 43, no. 3, 2012, pp. 9-18. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcf/v43n3/v43n3a2.pdf>
- [11] M. Galicia, M. Aguirre, J. León, Modificación de Grafito con CNT y biopelículas electroactivas marinas: Caracterización Electroquímica. 2017, pp. 10-12. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Monica_Galicia/publication/313970103_Modificacion_de_Grafito_con_CNT_y_biopelículas_electroactivas_marinas_Caracterización_Electroquímica/links/58b05ee192851cf7ae8ba5cb/
- [12] M. Andrade, et al, Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Rev Mex Cienc Farm.*, vol. 43, no. 3, 2012, pp. 9-18. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcf/v43n3/v43n3a2.pdf>
- [13] M. O'Connell, "Carbon Nanotubes. Properties and Applications". Ed. Taylor and Francis. Boca Raton, Florida. 2006, pp. 1-16. Retrieved from http://macbeth.if.usp.br/~gusev/Carbon_Nanotube2.pdf
- [14] M. Kumar and Y. Ando, Deposición química de vapores de nanotubos de carbono: una revisión sobre el mecanismo de crecimiento y la producción en masa. *Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 10, no. 6, 2010, pp. 3739-3758. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Yoshinori_Ando/publication/42804843_Chemical_Vapor_Deposition_of_Carbon_Nanotubes_A_Review_on_Growth_Mechanism_and_Mass_Production/links/0fcfd50809726e590a00000/
- [15] J. Pan, and L. Bian, Influence of agglomeration parameters on carbon nanotube composites, *Acta Mechanica*, vol. 228, no. 6, 2017, pp. 2207-2217. <https://doi.org/10.1007/s00707-017-1820-9>
- [16] C. Marcondes, Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. *Alconpat*, vol. 5, no. 2, 2015, pp. 97-114. Recuperado en 10 de febrero de 2020, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/alconpat/v5n2/2007-6835-ralconpat-5-02-00097.pdf>
- [17] Y. Wang, et al, The Effect of the Diameter of Carbon Nanotube on the Mechanical and Electrical Properties of Cement Mortar. *Key Engineering Materials*, vol. 730, 2017, pp. 479-485. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.730.479>
- [18] S. Shah, et al, Durability of Cement-Based Materials and Nano-particles: A Review. *Nanotechnology in Construction*, 2015, pp. 15-24, https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_2
- [19] G. Li, Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 5, 2007, pp. 377-382. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011>
- [20] M. Konsta-Gdoutos, et al, Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 2, 2010, pp. 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.007>
- [21] NTP 334.009, Cementos. Cemento Portland. Requisitos. Modificación 1. 1a ed, INACAL, Lima, Perú, 2019.
- [22] ASTM C150: Standard specification for Portland cement. Philadelphia, 1998.
- [23] NTP 339.088, Concreto. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos. 3a ed, INACAL, Lima, Perú, 2015.
- [24] American Concrete Institute. Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete: ACI 211.1-91, American Concrete Institute, 1991.
- [25] ASTM C-143, Standard method for settlement of concrete with hydraulic cement, American Society for Testing and Materials, Easton, 1998.
- [26] NTP 339.035, Concreto. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland, 4a. ed, INACAL, Lima, Perú, 2015.
- [27] ASTM C-39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, Philadelphia, 2012.
- [28] NTP 339.034, Concreto. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. 4a ed, INACAL, Lima, Perú, 2015.
- [29] NTP 339.084, Concreto. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a tracción simple del concreto por compresión diametral de una probeta cilíndrica. Lima, 3a ed, INACAL, Perú, 2012.
- [30] ASTM C-78, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). In *American Society for Testing and Materials*, vol. 100, pp. 19428-2959, 2010.
- [31] NTP 339.078, Concreto. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo, 3a ed, INACAL, Lima, Perú, 2015.
- [32] NTC 4483, Método para determinar la permeabilidad del concreto al agua, Bogotá, Colombia, 1998.
- [33] Luis Ureta, *Costos Perú.*, vol. 2, no 304, 2020, pp.1-59. Retrieved from <https://download1319.mediafire.com/rsxw81deyqzg/sdqood1ve9bgmnd/Suplemento+Tecnico+304.2-Mar+%281%29.pdf>
- [34] Nawaz, MA, Qureshi, LA, Ali, B. et al. Mecánica, durabilidad y rendimiento económico del hormigón que incorpora cenizas volantes y áridos reciclados. *SN Appl. Sci.* 2, 162 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-1960-8>
- [35] C. Marcondes, et al, Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. *Alconpat*, vol 5, no. 2, 2015, pp. 97-114.
- [36] M. Medeiros, et al, Portland cement composites with carbon nanotubes (CNT) addition: Properties in freshly state and compressive strength. *Matéria*, vol. 20, no. 1, 2015, pp. 127-144. <https://www.scielo.br/pdf/rmat/v20n1/1517-7076-rmat-20-01-00127.pdf>
- [37] O. Reales, et al, The Role of Surface Area and Compacity of Nanoparticles on the Rheology of Cement Paste 25.3. *Special Publication*, vol. 320, no.3, 2017, pp. 25-1. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2s2.085043401666&p artnrID=40&md5=c3d4b05cf9944b90083d14b519a115a2>
- [38] L Bodnarova, and T. Jarolim, Study the effect of carbon nanoparticles in concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 385, no. 1, 2018, p.012016, IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/385/1/012006/pdf>
- [39] F. Al-Mufadi, and H. Sherif, Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on Sensing Crack Initiation and Ultimate Strength of Cement Nanocomposites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 2, 2019, pp. 1403-1413. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3546-y>
- [40] A. Hawreen, and J. Bogas, Capillary Absorption and Oxygen Permeability of Concrete Reinforced with Carbon Nanotubes. *Advances in Civil Engineering Materials*, vol. 8, no. 3, 2019, pp. 307-326. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180156>
- [41] A. Hawreen, J. Bogas and R. Kurda, Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 10, 2019, pp. 8361-8376. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04096-y>
- [42] M. Mohsen, et al, Carbon Nanotube Effect on the Ductility, Flexural Strength, and Permeability of Concrete. *Journal of Nanomaterials*, vol. 2019, pp. 8. <https://doi.org/10.1155/2019/6490984>
- [43] J. Esmaceli and A. Mohammadjafari, Increasing flexural strength and toughness of cement mortar using multi-walled Carbon nano-

- tubes. *International Journal of Nano Dimension*, vol. 5, no. 4, 2014, pp. 399-407. <https://doi.org/10.7508/IJND.2014.04.012>
- [44] S. Daghash, et al. Improving impact resistance of polymer concrete using CNTs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, no. 4, 2016, pp. 539-553. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0165-4>
- [45] A. Hawreen, and J. Bogas, Capillary Absorption and Oxygen Permeability of Concrete Reinforced with Carbon Nanotubes. *Advances in Civil Engineering Materials*, vol. 8, no. 3, 2019, pp. 307-326. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180156>.
- [46] P. Dalla, et al, Effect of carbon nanotubes on chloride penetration in cement mortars. *Applied Sciences*, vol. 9, no. 5, 2019, p. 1032.
- [47] M. Martínez, J. Ganzer, M. Cosme, Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono. *Fundación Madrid para el Conocimiento*. https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT11_nanotubos.pdf
- [48] P. Ludvig, J. Calixto, L. Ladeira, I. Gaspar, Using converter dust to produce low cost cementitious composites by in situ carbon nanotube and nanofiber synthesis. *Materials*, 2011, vol. 4, no 3, pp. 575-584. <https://doi.org/10.3390/ma4030575>