



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO
EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO AL
CONGELAMIENTO - DESHIELO EN PUNO, 2022

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JHON FREDDY CALLA PACOMPIA

Bach. HENRY SHUMAGER HUANCA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2023



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO AL CONGELAMIENTO - DESHIELO EN PUNO, 2022

AUTOR

JHON FREDDY CALLA PACOMPIA - HENRY SHUMAGER HUANCA MAMANI

RECuento de palabras

29917 Words

RECuento de caracteres

147913 Characters

RECuento de páginas

160 Pages

Tamaño del archivo

4.8MB

Fecha de entrega

Aug 30, 2023 8:10 PM GMT-5

Fecha del informe

Aug 30, 2023 8:12 PM GMT-5

● 15% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 13% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 10% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)
- Material citado

5-20


Ing. Emilio Castillo Aroni
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 920514



Ing. Samuel Huamani Cáceres
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2007537

[Resumen](#)



DEDICATORIA

A mi querida Madre ELASTINA (†), quien ahora vela por mí desde el cielo, cuya enseñanza y amor siguen siendo mi guía y mi consuelo.

A mi Padre MERCEDES, por su sacrificio y apoyo incondicional a lo largo de mi proceso de formación profesional.

A mi hermana LADY YULIANA, por sus consejos y su constante apoyo.

Y a todos los jóvenes que tienen interés por la investigación y que sueñan con un futuro próspero y esperanzador.

Jhon Freddy Calla Pacompia



DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo incondicional en mi formación profesional.

A la persona más fuerte y trabajador mi Padre Oscar, por su trabajo constante en el bienestar familiar.

A mi Madre Valeriana, por enseñarme el amor de familia.

A mis Hermanos Gonzalo, Gaby y Marco quienes me ayudaron en cada etapa de mi vida.

Henry Shumager Huanca Mamani



AGRADECIMIENTO

A Dios por darnos la fortaleza para concluir la investigación, a pesar de las adversidades encontradas en el camino.

A nuestra alma mater UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO, a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por brindarnos los conocimientos y habilidades valiosas que han sido fundamentales para nuestro desarrollo académico y profesional.

A nuestros padres y a nuestras familias por el apoyo incondicional, la paciencia y los valiosos consejos que nos han brindado.

A nuestro asesor de tesis, Dr. Samuel Huaquisto Cáceres, por ser nuestro guía en esta travesía.

A los miembros del jurado, Mg. Walter Hugo Lipa Condori, Mg. Gino Frank Laque Córdova y la Ing. Gleny Zoila de la Riva Tapia, por su compromiso y valiosa orientación que fueron vitales para el éxito de nuestra investigación.

A nuestros docentes por impartirnos sus conocimientos a lo largo de toda la carrera. A nuestros compañeros y amigos por estar siempre dispuestos a brindarnos su apoyo incondicional cuando lo necesitábamos.

Al Ing. Percy Arapa Mamani y al Laboratorio de Suelos, Pavimentos y Materiales ASAQALL INGENIEROS, su colaboración ha sido fundamental en nuestro proyecto, y gracias a su apoyo, hemos podido alcanzar nuestros objetivos de manera exitosa.

Agradecemos a todas las personas que, de alguna manera, nos brindaron su apoyo y aliento a lo largo de este recorrido.

Jhon Freddy Calla Pacompia

Henry Shumager Huanca Mamani



ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 19

ABSTRACT..... 20

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 21

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 22

1.2.1. Problema general 22

1.2.2. Problemas específicos..... 22

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 22

1.3.1. Hipótesis general 22

1.3.2. Hipótesis específicas..... 22

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO 23

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 24

1.5.1. Objetivo general 24

1.5.2. Objetivos específicos 24



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES	25
2.1.1. Antecedentes internacionales	25
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	26
2.1.3. Antecedentes locales.....	27
2.2. MARCO TEÓRICO.....	28
2.2.1. El concreto	28
2.2.2. Componentes del concreto.....	28
2.2.3. Propiedades del concreto	30
2.2.4. Concreto en clima frío	32
2.2.5. El clima en la región de Puno	33
2.2.6. Nanotubos de carbono	33

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO	37
3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO	38
3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	38
3.3.1. Tipo de investigación.....	38
3.3.2. Nivel de investigación	39
3.3.3. Diseño de investigación.....	39
3.3.4. Enfoque de la investigación.....	40
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.....	40
3.4.1. Población	40
3.4.2. Muestra	40



3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	43
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	43
3.6.1. Técnicas de recolección de datos.....	43
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos	43
3.6.3. Procedimiento de recolección de datos	44
3.6.4. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	45
3.7. MATERIALES EMPLEADOS.....	46
3.7.1. Cemento.....	46
3.7.2. Agregado fino y grueso	47
3.7.3. Nanotubos de carbono	49
3.7.4. Agua.....	50
3.8. ENSAYO DE LOS AGREGADOS.....	51
3.8.1. Ensayos para la obtención de las propiedades físicas de los agregados..	51
3.9. DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO	67
3.9.1. Diseño de mezcla - Método: Módulo de fineza.....	68
3.9.2. Diseño de mezcla corregido - Método: Módulo de fineza	77
3.9.3. Diseño de mezcla con adición de nanotubos de carbono	84
3.10. ELABORACIÓN DEL CONCRETO	85
3.10.1. Especímenes cilíndricas y prismáticas de concreto.....	86
3.10.2. Curado de los especímenes.....	87
3.11. ENSAYOS REALIZADOS.....	89
3.11.1. Ensayos en estado fresco del concreto	89
3.11.2. Ensayos en estado endurecido del concreto	90
3.12. DISEÑO ESTADÍSTICO Y PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	96
3.12.1. Análisis estadístico	96



3.12.2. Prueba de hipótesis 100

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO DEL CONCRETO	103
4.1.1. Ensayo de asentamiento.....	103
4.2. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO DEL CONCRETO	105
4.2.1. Resistencia a compresión del concreto	105
4.2.2. Resistencia a compresión del concreto expuesto al congelamiento-deshielo	113
4.2.3. Resistencia a flexión del concreto	122
4.2.4. Resistencia a flexión del concreto expuesto al congelamiento-deshielo	130
4.3. ANÁLISIS DE COSTOS DEL CONCRETO	138
4.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	141
4.4.1. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión	141
4.4.2. Análisis estadístico de la resistencia a la flexión.....	143
4.5. PRUEBA DE HIPÓTESIS	145
4.5.1. Resistencia a la compresión.....	146
4.5.2. Resistencia a la flexión	147
4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	149
V. CONCLUSIONES.....	153
VI. RECOMENDACIONES	155
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156
ANEXOS.....	160



TEMA: Tecnología del concreto

ÁREA: Construcciones y Gerencia

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de los materiales en la construcción

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 08 de septiembre de 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de nanotubos de carbono	34
Figura 2	Mapa de la región de Puno	37
Figura 3	Diagrama de flujo del procedimiento	45
Figura 4	Localización de la cantera Isla	48
Figura 5	Obtención de los agregados de la cantera Isla.....	48
Figura 6	Nanotubos de carbono	49
Figura 7	Muestras para contenido de humedad de los agregados fino y grueso	52
Figura 8	Obtención del estado SSS del agregado fino	55
Figura 9	Procedimiento para la determinación del peso específico del agregado fino.	56
Figura 10	Obtención del estado SSS del agregado grueso	58
Figura 11	Pesado de muestras en molde para ensayo de PUSS agregado fino y grueso	61
Figura 12	Proceso de tamizado de los agregados fino y grueso	64
Figura 13	Curva granulométrica del agregado fino	65
Figura 14	Curva granulométrica del agregado grueso.....	66
Figura 15	Elaboración del concreto en moldes cilíndricos y prismáticos	87
Figura 16	Curado de especímenes cilíndricas	88
Figura 17	Medición del asentamiento.....	90
Figura 18	Ensayo de la resistencia a la compresión	91
Figura 19	Diagrama para la prueba de flexión con carga en el punto central	93
Figura 20	Ensayo de la resistencia a la flexión.....	94
Figura 21	Muestras expuestas al congelamiento	96
Figura 22	Influencia del porcentaje de NTC en el asentamiento.....	104
Figura 23	Variación en la resistencia a la compresión	109



Figura 24	Curva de variación en la resistencia a la compresión.....	109
Figura 25	Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.05%	110
Figura 26	Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.1%	111
Figura 27	Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.3%	112
Figura 28	Variación en la resistencia a la compresión, expuesto al congelamiento- deshielo	118
Figura 29	Curva de variación en la resistencia a la compresión, expuesto al congelamiento-deshielo	118
Figura 30	Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.05% expuestos al congelamiento-deshielo	120
Figura 31	Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.1% expuestos al congelamiento-deshielo	121
Figura 32	Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.3% expuestos al congelamiento-deshielo	122
Figura 33	Variación en la resistencia a la flexión.....	126
Figura 34	Curva de variación en la resistencia a la flexión	126
Figura 35	Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.05%	128
Figura 36	Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.1%	129
Figura 37	Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.3%	130
Figura 38	Variación en la resistencia a la flexión del concreto expuestos al congelamiento-deshielo	133
Figura 39	Curva de variación en la resistencia a la flexión del concreto expuestos al congelamiento-deshielo	134
Figura 40	Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.05% expuestos al congelamiento y deshielo.....	135



Figura 41 Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.1% expuestos al congelamiento y deshielo.....	136
Figura 42 Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.3% expuestos al congelamiento y deshielo.....	137
Figura 43 Comparación del costo de concreto	140



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Trabajabilidad del concreto fresco.....	30
Tabla 2	Localización de las instalaciones de ASQALL INGENIEROS S.R.L.	38
Tabla 3	Cantidad de especímenes para las pruebas de resistencia a la compresión	42
Tabla 4	Cantidad de especímenes para las pruebas de resistencia a la flexión.....	42
Tabla 5	Operacionalización de variables	43
Tabla 6	Características químicas del cemento Rumi IP.....	46
Tabla 7	Características físicas del cemento Rumi IP	46
Tabla 8	Ubicación y coordenadas UTM de la cantera Isla	47
Tabla 9	Características de los nanotubos de carbono de pared múltiple	50
Tabla 10	Resultados del análisis físico-químico del agua	51
Tabla 11	Contenido de humedad del agregado fino	53
Tabla 12	Contenido de humedad del agregado grueso	53
Tabla 13	Peso específico y absorción del agregado fino	57
Tabla 14	Peso específico y absorción del agregado grueso	59
Tabla 15	Peso unitario suelto seco del agregado fino.....	62
Tabla 16	Peso unitario compactado seco del agregado fino	62
Tabla 17	Peso unitario suelto seco del agregado grueso.....	62
Tabla 18	Peso unitario suelto compactado del agregado grueso	63
Tabla 19	Granulometría del agregado fino	65
Tabla 20	Granulometría del agregado grueso	66
Tabla 21	Resumen de las propiedades de los agregados y del cemento.....	68
Tabla 22	Resistencia promedio requerida en Kg/cm ² y MPa	69
Tabla 23	Volumen unitario de agua.....	70
Tabla 24	Contenido de aire atrapado	70



Tabla 25 Relación agua – cemento (a/c).....	71
Tabla 26 Módulo de fineza de la combinación de los agregados	73
Tabla 27 Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión a los 28 días	77
Tabla 28 Cálculo de la desviación estándar	78
Tabla 29 Factor de corrección de la desviación estándar	79
Tabla 30 Diseños de mezcla final sin y con adición de nanotubos de carbono	84
Tabla 31 Coeficiente de variación y desviación estándar	100
Tabla 32 Resultados del asentamiento de mezcla de concreto	103
Tabla 33 Resistencia a compresión del concreto patrón (CP)	105
Tabla 34 Resistencia a compresión con 0.05% de nanotubos de carbono (CNTC 0.05%)	106
Tabla 35 Resistencia a compresión con 0.1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%)	107
Tabla 36 Resistencia a compresión con 0.3% de nanotubos de carbono (CNTC 0.3%)	108
Tabla 37 Resistencia promedio a compresión a los 7 y 28 días.....	108
Tabla 38 Resistencia a compresión del concreto patrón (CP) expuesto al congelamiento- deshielo	114
Tabla 39 Resistencia a compresión con 0.05% de nanotubos de carbono (CNTC 0.05%) expuesto al congelamiento-deshielo	115
Tabla 40 Resistencia a compresión con 0.1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%) expuesto al congelamiento-deshielo	116
Tabla 41 Resistencia a compresión con 0.3% de nanotubos de carbono (CNTC 0.3%) expuesto al congelamiento-deshielo	117



Tabla 42	Resistencia a la compresión promedio a los 7 y 28 días, expuesto al congelamiento-deshielo	117
Tabla 43	Resistencia a la flexión del concreto patrón (VP).....	123
Tabla 44	Resistencia a la flexión con 0.05% de nanotubos de carbono (VNTC 0.05%)	124
Tabla 45	Resistencia a la flexión con 0.1% de nanotubos de carbono (VNTC 0.1%)	124
Tabla 46	Resistencia a la flexión con 0.3% de nanotubos de carbono (VNTC 0.3%)	125
Tabla 47	Resistencia promedio a la flexión a los 14 y 28 días	125
Tabla 48	Resistencia a la flexión del concreto patrón (VP) expuesto al congelamiento- deshielo	131
Tabla 49	Resistencia a la flexión del concreto con 0.05% de nanotubos de carbono (VNTC 0.05%) expuesto al congelamiento-deshielo	131
Tabla 50	Resistencia a la flexión del concreto con 0.1% de nanotubos de carbono (VNTC 0.1%) expuesto al congelamiento-deshielo.....	132
Tabla 51	Resistencia a la flexión del concreto con 0.3% de nanotubos de carbono (VNTC 0.3%) expuesto al congelamiento-deshielo.....	132
Tabla 52	Resistencia promedio a la flexión del concreto a los 14 y 28 días, expuesto al congelamiento-deshielo	133
Tabla 53	Costo del concreto patrón para un metro cúbico	138
Tabla 54	Costo del concreto con adición de 0.05% de NTC para un metro cúbico ...	139
Tabla 55	Costo del concreto con adición de 0.1% de NTC para un metro cúbico	139
Tabla 56	Costo del concreto con adición de 0.3% de NTC para un metro cúbico	139



Tabla 57	Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la compresión a los 28 días de edad	142
Tabla 58	Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días de edad	143
Tabla 59	Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la flexión a los 28 días de edad	144
Tabla 60	Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días de edad	145
Tabla 61	Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días	146
Tabla 62	Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días.....	147
Tabla 63	Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la flexión a los 28 días.....	148
Tabla 64	Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días	149



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

NTC	: Nanotubos de carbono.
CP	: Concreto patrón.
CNTC 0.05%	: Concreto con 0.05% de nanotubos de carbono.
CNTC 0.1%	: Concreto con 0.1% de nanotubos de carbono.
CNTC 0.3%	: Concreto con 0.3% de nanotubos de carbono.
ECD	: Expuesto al congelamiento deshielo.
°C	: Grados Celsius.
T.^a	: Temperatura
ACI	: American Concrete Institute.
ASTM	: American Society of Testing Materials.
f'_c	: Resistencia de diseño a la compresión.
f'_{cr}	: Resistencia promedio de diseño a la compresión.
a/c	: Relación agua cemento.
NTP	: Norma Técnica Peruana.
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
H₀	: Hipótesis nula.
H_a	: Hipótesis alternativa.
TMN	: Tamaño máximo nominal del agregado.
SSS	: Peso de la muestra saturada superficialmente seca.
PUSS	: Peso unitario suelto seco del agregado.
PUCS	: Peso unitario compactado seco del agregado.



RESUMEN

La nanotecnología es una de las tecnologías nuevas que tiene varios usos en la industria de la construcción, en el contexto de esta tecnología se lleva a cabo la presente investigación que trata acerca del estudio del efecto de la adición de nanotubos de carbono en las propiedades del concreto expuesto al congelamiento-deshielo, que se presenta en Puno en época de heladas. La metodología de investigación es de tipo aplicada, un nivel explicativo y con diseño experimental; para dicho efecto se elaboraron 192 especímenes de concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$; los cuales fueron ensayados a compresión y flexión. Los resultados indican que la resistencia a la compresión a los 28 días presenta un aumento de 4.52%, 14.65% y 8.80%, para los porcentajes de 0.05%, 0.1% y 0.3% de NTC respectivamente; en cuanto a la resistencia a la flexión tuvo un incremento parcial desde 0.77% hasta 6.60%; y para los concretos expuestos al congelamiento-deshielo, la resistencia a la compresión tuvo un aumento de 7.04%, 17.39% y 5.52% para 0.05%, 0.1% y 0.3% de NTC, respectivamente a la edad de 28 días; así mismo, la resistencia a la flexión presentó un ligero aumento desde 1.57%, 3.90% y 4.84% para 0.05%, 0.1% y 0.3%, para obtener los resultados, se simuló el proceso de manera acelerada, sometiendo las muestras de concreto a ciclos de congelamiento durante la noche y el deshielo durante el día, de manera continua. Estos ciclos se llevaron a cabo en dos entornos diferentes: uno artificial (congeladora calibrada a $-16 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) y otro natural (ambiente). En cuanto al asentamiento se produce una disminución significativa y un incremento considerablemente del costo unitario de materiales.

Palabras Clave: Concreto, nanotubo de carbono, propiedades, congelamiento-deshielo.



ABSTRACT

Nanotechnology is one of the new technologies that has several uses in the construction industry, in the context of this technology, the present research is carried out about the study of the effect of the addition of carbon nanotubes in the properties of concrete exposed to freeze-thaw, which occurs in Puno during the frost season. The research methodology is applicative, explanatory and with an experimental design; 192 concrete specimens $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ were elaborated and tested in compression and flexion. The results indicate that the compressive strength at 28 days presents an increase of 4.52%, 14.65% and 8.80%, for the percentages of 0.05%, 0.1% and 0.3% of NTC respectively; as for the flexural strength, it had a partial increase from 0.77% to 6.60%; and for the concretes exposed to freeze-thaw, the compressive strength had an increase of 7.04%, 17.39% and 5.52% for 0.05%, 0.1% and 0.3% of NTC, respectively at the age of 28 days; likewise, the flexural strength presented a slight increase from 1.57%, 3.90% and 4.84% for 0.05%, 0.1% and 0.3%, to obtain the results, the process was simulated in an accelerated manner, subjecting the concrete samples to cycles of freezing during the night and thawing during the day, in a continuous manner. These cycles were carried out in two different environments: one artificial (freezer calibrated at $-16 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) and the other natural (ambient). In terms of settling, there is a significant decrease and a considerable increase in the unit cost of materials.

Keywords: Concrete, carbon nanotube, properties, freeze-thaw..



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es uno de los materiales más frecuentemente empleados en construcciones civiles y es esencial priorizar los procedimientos que garanticen su resistencia.

Además, durante la evolución histórica del concreto, se han llevado a cabo numerosas investigaciones con el objetivo de mejorar sus cualidades con la adición de fibras, cenizas, productos orgánicos, entre otros. Sin embargo, la adición de nanotubos de carbono propone una mejora en las propiedades del concreto, generando una revolución en la industria a nivel mundial, aunque todavía existen muchas incógnitas sobre este novedoso producto.

Por otro lado, los principales agentes de deterioro que afecta al concreto, es conocido como el ciclo de hielo-deshielo, ocurre durante las heladas y afecta tanto cualitativamente como cuantitativamente al concreto en sus propiedades físicas y mecánicas.

A medida que disminuye la temperatura, el hielo formado por agua en una cavidad capilar en el concreto ocupa un volumen mayor, debido a que el agua en estado líquido tiene una estructura relativamente compacta y densa, cuando se congela, las moléculas de agua comienzan a estabilizarse y adquieren una estructura cristalina que las hace separarse, con lo cual su densidad disminuye, reflejándose en un aumento del volumen.

Por ello, en la presente investigación se estudia el efecto de la adición de nanotubos de carbono en el concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y a su vez la exposición al congelamiento-deshielo, representado el clima de Puno en época de heladas, para



posteriormente proceder a comprobar y analizar si existe una mejora o no en el desarrollo de sus propiedades.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cómo influye la adición de nanotubos de carbono en las propiedades del concreto expuesto al congelamiento-deshielo en Puno?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influye la adición de nanotubos de carbono en la trabajabilidad del concreto en estado fresco?
- ¿Cómo influye la adición de nanotubos de carbono en la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto?
- ¿Cómo influye la adición de nanotubos de carbono en la resistencia a la compresión y la flexión del concreto expuesto al congelamiento-deshielo?
- ¿Cuál es el costo de producción entre el concreto convencional y el concreto adicionado con nanotubos de carbono?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

La adición de nanotubos de carbono influye positivamente en las propiedades del concreto expuesto al congelamiento-deshielo.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La adición de nanotubos de carbono mejora la trabajabilidad del concreto en estado fresco.



- El concreto con adición de nanotubos de carbono incrementa la resistencia a la compresión y flexión del concreto.
- La adición de nanotubos de carbono incrementa la resistencia a la compresión y flexión del concreto expuesto al congelamiento-deshielo.
- El costo de producción del concreto adicionado con nanotubos de carbono resulta mayor al concreto convencional.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Por los ciclos repetidos de hielo - deshielo es causa frecuente del deterioro del concreto en las regiones frías como Puno, por esta razón se ha buscado una forma alternativa de mejorar el comportamiento del concreto frente a la acción de hielo-deshielo. La adición de NTC mejora sus propiedades del concreto, no obstante, hay dudas de su comportamiento frente a ciclos de hielo-deshielo.

Actualmente los concretos no se componen únicamente de agregados, cemento y agua. En su lugar, se emplean diversas adiciones que forman parte de una mezcla de concreto convencional, que ha evolucionado gracias a la tecnología del concreto, ya que estas adiciones optimizan sus propiedades, permitiendo su aplicación en una variedad de usos.

La incorporación de NTC en el concreto se está investigando actualmente para aumentar su capacidad de soportar las tensiones y cargas a las que suele estar sometido en una construcción, con la adición de este material nanotecnológico en el concreto puede producir un concreto capaz de soportar tensiones y cargas significativas con un volumen menor que el concreto convencional.

Este estudio se enfocará en un tema que aún no ha sido tratado en investigaciones previas, sobre el comportamiento del concreto adicionado con NTC expuesto al



congelamiento-deshielo, que se presentan durante las heladas en la región de Puno, es por eso surge esta investigación y así obtener un registro de la información recolectada con el fin de evaluar el aporte de la adición de nanotubos de carbono.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la adición de nanotubos de carbono en las propiedades del concreto expuesto al congelamiento-deshielo.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar la trabajabilidad del concreto en estado fresco con la adición de nanotubos de carbono.
- Determinar la resistencia a la compresión y flexión del concreto con la adición de nanotubos de carbono.
- Determinar la resistencia a la compresión y flexión del concreto con la adición de nanotubos de carbono expuesto al congelamiento-deshielo.
- Determinar el costo de producción del concreto convencional y del concreto adicionado con nanotubos de carbono.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Antecedentes internacionales

Navarro & Forero (2017), en su investigación denominada “Mejoramiento de la resistencia a compresión del concreto con nanotubos de carbono”, tuvo como objetivo elaborar una mezcla de concreto con adición de nanotubos de carbono, para analizar el efecto en la resistencia a la resistencia del concreto. La metodología empleada cuenta con un método deductivo y tipo aplicativa. Se elaboraron especímenes de concreto con adición de nanotubos de carbono de 0.3% y 0.5% con respecto al peso del cemento y se incorporaron de manera directa en el momento del mezclado; los resultados obtenidos muestran un aumento 11.7% de la resistencia a la compresión con una proporción del 0.3% de nanotubos y un aumento de 10.2% de la resistencia con 0.5% de nanotubos de carbono.

Llanos (2017) en su investigación titulada “Los nanotubos de carbono como nueva alternativa de aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga o reducir fisuramiento en diseño de pavimentos rígidos con concreto hidráulico”, tuvo como objetivo diseñar una mezcla de hormigón con incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple, para analizar el efecto en la resistencia a la tracción de concreto por flexión y mejorar la durabilidad del hormigón al agrietamiento por fatiga. Se elaboraron viguetas de hormigón y se adiciono el NTCPM en porcentajes de 0.058%, 0.088%, 0.175%, 0.351% y 0.526%, llegando a la conclusión que los NTCPM cambian la estructura del hormigón convirtiéndole más resistente a la flexión por tracción llegando hasta 46.70% para PHs-f+%NCPM y 62.61% para NSS-f+%NCPM.



2.1.2. Antecedentes nacionales

Galán & Nieto (2021) en su investigación denominada “Propuesta de mejora de la permeabilidad del concreto expuesto a sulfatos mediante el uso de los nanotubos de carbono para obras portuarias, en la provincia constitucional del Callao, Perú”, tuvo como finalidad estudiar la influencia la adición de nanotubos de carbono en la permeabilidad y las propiedades mecánicas del concreto expuesto a sulfatos y cloruros. La metodología empleada cuenta con un método deductivo, tipo aplicado y con enfoque cuantitativa. La población está conformada por probetas cilíndrica y vigas, se elaboraron concretos con adición de nanotubos de carbono en porcentajes de 0.05% 0.10% y 0.15%; los resultados muestran una reducción en el asentamiento, así como un aumento en las resistencias a la compresión, tracción y flexión. Además, se observa una disminución en la profundidad de penetración del agua. Sin embargo, el costo por metro cúbico es más elevado.

Apaza & Quispe (2018) en su investigación “Mejoramiento de propiedades del concreto con adición de nanotubos de carbono”, su objetivo fue estudiar las mejoras que brinda los nanotubos de carbono en las propiedades del concreto. La metodología se basó en un estudio cuantitativo, con diseño experimental; se adicionaron los nanotubos en porcentajes de 0.05%, 0.10% y 0.15% a las mezclas elaboradas con cementos Yura y Wari. Llegando a la conclusión, que para la mezcla del concreto elaborado con cemento tipo IP de Yura, la adición de nanotubos de carbono en una cantidad óptima a nivel global mejora las propiedades mecánicas, al mismo tiempo resulta económicamente viable. Sin embargo, para los concretos que utilizan cemento tipo I de Wari, se encontró que la dosis óptima es del 0,10%. No obstante, esta opción resulta menos económica.

2.1.3. Antecedentes locales

Núñez & Mamani (2018) en su investigación denominada “Influencia del polipropileno y los aditivos incorporadores de aire sometido al congelamiento en las propiedades del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, en la zona Altiplánica 2017”, su propósito principal consistió en evaluar el efecto del polipropileno y de los aditivos incorporadores de aire en las propiedades del concreto en la región altiplánica de Puno, específicamente tras someterlo a ciclos de congelamiento. La metodología empleada fue de tipo correlacional, con un nivel explicativo y método de investigación cuantitativo. Se elaboraron especímenes cilíndricos y prismáticos de concreto con incorporación del polipropileno en un 0.6, 1.2, 1.8 y 2.4 kg/m^3 y aditivo incorporador de aire de 204.3 ml/m^3 . Los resultados conseguidos reflejan un aumento parcial en la resistencia a la compresión, además, se observó una mejora significativa en la resistencia a la flexión.

López & Mamani (2017) en su investigación denominada “Influencia del nanosílice y superplastificante en la durabilidad del concreto sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo de la ciudad de Puno”, tuvo como objetivo estudiar el efecto de la incorporación del nanosílice y superplastificante en la durabilidad del concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo. La metodología empleada fue de tipo correlacional-sincrónico-cuantitativo, de nivel exploratorio y con diseño experimental. A la mezcla se adicionó 0.5%, 1.0% y 1.5% de nanosílice en relación al peso del cemento; los resultados indican que la resistencia a la compresión más alta se dio con incorporación de 1.5% de nanosílice, mientras tanto, los que fueron sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo presentaron la resistencia a la compresión más alta también con incorporación de 1.5% de nanosílice, teniendo en cuenta que el congelamiento se dio durante 12 horas con temperaturas desde -8°C hasta -15°C y el deshielo también durante 12 horas de forma natural, así mismo, el concreto que presentó menos porosidad es con 1.0% de nanosílice



Ccopa (2017) en su investigación denominada “Efecto del grafeno como aditivo nanotecnológico en la resistencia del concreto”, cuya finalidad fue estudiar el efecto del grafeno en la resistencia del concreto colocado a 3800 m.s.n.m. La metodología empleada fue de tipo correlacional-explicativo con un nivel explicativo y con enfoque cuantitativo. Se elaboraron especímenes de concreto con adición de grafeno de 0.5%, 1% y 1.5% en relación del peso del cemento, llegando a la conclusión de que el grafeno mejora la resistencia a la compresión en un 26% y con una dosis optima de 0.5% de grafeno.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. El concreto

En el presente proyecto de tesis, uno de los objetos de estudio es el concreto. Por lo tanto, es imprescindible comprender plenamente su concepto, los diferentes factores que lo afectan y las propiedades que se están analizando.

“El concreto es un material constituido en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados, aire y opcionalmente aditivos, que inicialmente denota una estructura plástica y moldeable, y que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes, lo que lo hace un material ideal para la construcción” (Pasquel, 1998, p.44).

2.2.2. Componentes del concreto

2.2.2.1. Cemento

Abanto (2009), indica que “el cemento Portland es un producto de consumo comúnmente disponible, que, al mezclarse con agua, ya sea solo o combinado con arena, piedra u otros materiales similares, tiene la capacidad de reaccionar lentamente con el agua y transformarse en una masa endurecida. Esencialmente es un Clinker finalmente



molido, producido por la cocción a elevadas temperaturas, de mezclas que contienen cal, alúmina, fierro y sílice en proporciones determinadas” (p. 15).

2.2.2.2. Agregados

Los agregados se definen como los componentes inertes en el concreto que, al ser unidos por la pasta de cemento, forman la estructura que proporciona su resistencia característica y ocupan alrededor del 75% del volumen total del concreto; es por eso que tienen primordial importancia en el comportamiento final del concreto (Rivva, 2014).

Agregado grueso

Se refiere a la “fracción retenida en el tamiz N°4 (4.75mm), proveniente de la desintegración mecánica o natural de las rocas, y que cumple con los límites definidos en la norma ASTM C 33, el agregado grueso puede comprender grava, piedra triturada o chancada” (Abanto, 2009, p.26).

Agregado fino

Se clasifica como agregado fino a la arena o piedra natural que ha sido triturada en partículas pequeñas, las cuales pasan a través del tamiz 3/8” (9.52mm) pero quedan retenidas en el tamiz N° 200 (0.074mm), siguiendo las directrices establecidas en la norma ASTM C 33 (Abanto, 2009).

Sin embargo, la sección E-204 del Manual de Ensayo de Materiales del MTC (2016), nos indica que “en mezclas de agregados gruesos y finos, la muestra será separado en dos tamaños mediante el tamiz 4.75mm (N°4)”.

2.2.2.3. Agua

El agua de la mezcla del concreto tiene una interacción química con el cemento, lo que da lugar a la producción de un gel que permite que toda la masa adquiera propiedades que favorecen una buena manipulación en estado fresco (Oré, 2014).

El agua a emplear en la preparación y curado del concreto debe satisfacer los estándares establecidos en la norma NTP 339.088, teniendo como principal referencia la calidad del agua potable.

2.2.3. Propiedades del concreto

2.2.3.1. Propiedades en estado fresco

Trabajabilidad

“Es la propiedad del concreto en estado fresco la cual determina su capacidad para ser mezclado, manipulado, transportado, colocado y consolidado adecuadamente, con un mínimo de trabajo y un máximo de homogeneidad; así como para ser acabado sin que se presente segregación” (Oré, 2014, p. 12).

La consistencia viene definida por la cantidad de humedad alcanzado de la mezcla, determinada sobre todo por la cantidad de agua empleada y para medirlo se necesita un molde en forma de cono con bases circulares paralelas de 20 cm y 10 cm de diámetro y una altura total de 30 cm (Abanto, 2009).

Tabla 1

Trabajabilidad del concreto fresco

Consistencia	Asentamiento (mm)	Trabajabilidad	Método de compactación
Seca	0 a 50	Poco trabajable	Vibración normal
Plástica	75 a 100	Trabajable	Vibración ligera
Fluida	Mayor a 125	Muy trabajable	Chuseado

Nota: Recuperado de (Abanto, 2009).



2.2.3.2. Propiedades en estado endurecido

Resistencia a la compresión

Según Abanto (2009), puede ser definida como la capacidad máxima de resistencia frente a una carga axial de una probeta cilíndrica de concreto antes de experimentar una falla debido a la compresión. No obstante, en este proceso se aplica presión a las probetas de concreto mediante un equipo especialmente diseñado que lleva a cabo la compresión; esta acción proporciona las cargas adecuadas para que, al ocurrir la ruptura, sea pueda medir la resistencia bajo diversas cargas. La ejecución debe llevarse de acuerdo a las indicaciones establecidas de la norma ASTM C 39 .

Además Sota (2017), indica que “para calcular la resistencia a la compresión de la probeta, se divide la carga máxima alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección transversal de la probeta” (p. 31).

Resistencia a la flexión

Según Masías (2018), indica que “la resistencia a la flexión podría considerarse una medida indirecta de la resistencia a tracción del concreto” (p. 18). Teniendo en cuenta que se exponen las vigas a fuerzas de flexión, generalmente se evalúa la idoneidad del concreto para su uso en pavimentos.

“También denominado módulo de ruptura, es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada, para medir se aplica cargas en vigas con una sección transversal de 100 mm x 100 mm y la longitud de luz debe de ser tres veces su espesor como mínimo y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) o ASTM C 293 (cargada en el punto medio)” (National Ready Mixed Concrete Association [NRMCA], 2021).



Asimismo la NRMCA (2021), señala que el módulo de ruptura suele oscilar entre el 10% y el 20% de la resistencia a la compresión. En circunstancias, el valor del módulo de rotura al cargar una viga en los puntos tercios resulta inferior al valor obtenido al aplicar la carga en el punto medio, llegando incluso a una diferencia de hasta un 15%.

2.2.4. Concreto en clima frío

Las bajas temperaturas pueden afectar la resistencia del concreto de diversas maneras, dependiendo sobre todo de la edad de la muestra y del volumen de agua que pueda congelarse en su interior. En consecuencia, la gravedad de los daños en el concreto varía en función del momento en que se produzcan: en estado fresco, al principio de la fase de endurecimiento o después de que haya alcanzado una resistencia determinada.

Por otro lado, también hay otros factores que deterioran el concreto generalmente las reacciones químicas las cuales son: presencia de cloruros, sulfatos, ácidos, carbonatación y corrosión de la armadura.

La norma ACI 306, define el clima frío como un periodo cuando, por más de tres días consecutivos, se presentan las siguientes circunstancias:

- La temperatura ambiente promedio sea inferior a 5 °C.
- La temperatura ambiente sea menor a 10 °C durante más de media hora, en un período de 24 horas. La temperatura ambiente diaria, es el promedio entre la temperatura más alta y la más baja, durante el período comprendido entre medio día y media noche.

La disminución de la temperatura tiene un efecto significativo en el tiempo de fraguado del concreto, ya que cada reducción de 5°C incrementa aproximadamente en un tercio dicho tiempo. Las bajas temperaturas disminuyen el calor generado durante el proceso de hidratación, lo cual retrasa considerablemente el tiempo de fraguado del



concreto. Como resultado presenta una disminución en la resistencia a la compresión a edades tempranas, mientras que se produce un incremento en la resistencia a edades mayores (Chairmanetal, 1988).

2.2.5. El clima en la región de Puno

Durante todo el año, en zonas situadas por encima de los 3800 metros sobre el nivel del mar en la región de Puno, se registran bajas temperaturas, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, indica que en el año 2022 la temperatura más baja se presentó en la localidad de Mazocruz registrando una temperatura de -23.4°C , a este fenómeno de temperaturas extremadamente bajas se le conoce como heladas, las cuales caen por debajo de los 0°C .

La ciudad de Puno experimenta un clima semiseco y bastante frío, siendo mayo el mes en el que se presentan las primeras heladas, en el año 2022 la temperatura más baja registrada fue de -4°C presentándose en el mes de julio. “Las temperaturas no son tan bajas como en otras ciudades situadas a la misma altitud sobre el nivel del mar, esto se debe a la acción termorreguladora que ejerce el lago Titicaca” (López & Mamani, 2017 p. 55).

2.2.6. Nanotubos de carbono

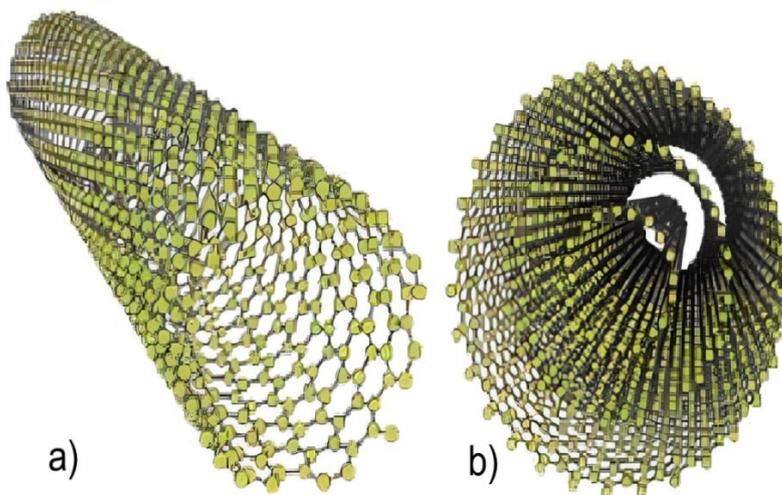
Es una estructura de forma tubular con tamaño de su diámetro de orden nanométrico (nm), donde un nanómetro es igual a 1 billonésima parte de un metro 1×10^{-9} , los nanotubos se pueden encontrar de diversos materiales como por ejemplo el silicio, nitruro de boro entre otros, generalmente se les llama así a los nanotubos de carbono (Navarro & Forero, 2017).

Al igual que el diamante, el grafito y los fullerenos, los nanotubos son una forma alotrópica del carbono. Esto significa que, aunque contienen el mismo elemento, en este

caso el carbono, su estructura molecular está dispuesta de forma diferente, lo que permite una variedad de presentaciones del carbono. Los nanotubos de carbono se pueden considerar como una lámina de grafito enrollada, dependiendo de tamaño de la lámina y la estructura interna de la misma se pueden presentar diversos tamaños y geometría interna de los nanotubos de carbono. Existen nanotubos los cuales se encuentran conformados por una sola capa de grafito y se denominan nanotubos de pared simple, también se pueden encontrar varios nanotubos dentro de más nanotubos, a estos se les conoce como nanotubos de pared múltiple, tal como se observa en la Figura 1.

Figura 1

Tipos de nanotubos de carbono



Nota: a) Nanotubos de pared simple b) Nanotubos de pared múltiple. Adaptado de:
<http://www.ub.edu>.

2.2.6.1. Propiedades

Las láminas de grafito pueden separarse fácilmente, pero cuando se doblan y se cierran dentro del tubo, la situación cambia por completo y la estructura de nanotubos se vuelve muy resistente. Con una sexta parte de su densidad y la mitad de la del aluminio,



su resistencia a la tensión es hasta 20 veces superior a la de los aceros más resistentes. Los nanotubos son muy rígidos, con módulos de Young cinco veces superiores a los del acero.

Son al menos tan eficaces como el cobre y el diamante, respectivamente, como conductores eléctricos y térmicos. Sin embargo, el diámetro, la longitud y la quiralidad de los nanotubos influyen en estas características. En concreto, se convierten en conductores, semiconductores, aislantes o superconductores según la forma de cierre de la lámina.

2.2.6.2. Aplicaciones

Las propiedades antes mencionadas de los nanotubos, junto con su ligereza, resultan muy prometedoras en diversos campos. Varias empresas ya comercializan nanotubos para su uso en electrónica, óptica, ciencia de los materiales o nanotecnología.

Para los componentes electrónicos (semiconductores) de escala nanométrica hay un gran interés, a pesar de que en la actualidad resulta imposible gestionar con precisión la disposición ordenada de miles de unidades. El diseño de ordenadores podría verse revolucionado por este tipo de componentes. Se utilizan en sensores, microscopios de barrido y pantallas planas.

Su uso en materiales compuestos como refuerzo estructural de otros polímeros es otro tema de investigación. Los palos de golf, las raquetas de tenis, los cuadros de bicicleta y los veleros utilizan actualmente fibras de carbono con resinas epoxi; los nanotubos podrían sustituirlas, ya que ofrecen una resistencia comparable o superior con un diámetro considerablemente entre 4 y 30 nm frente a 6 -10 μm de las primeras.



2.2.6.3. Implementación de nanotubos de carbono en el concreto

Cuando los nanotubos de carbono se mezclan con el concreto, su estructura ordenada y en forma de malla permite aumentar considerablemente sus propiedades mecánicas. De hecho, estos nanotubos pueden experimentar un aumento de hasta 20 veces o más en su resistencia y características mecánicas.

Las propiedades del concreto mejoran entre un 20 y un 50% cuando se añaden nanotubos en pequeñas cantidades (entre un 1 y un 5% del peso del cemento). Como resultado, aumenta la resistencia a la compresión y a la tracción del concreto, y disminuye en gran medida la cantidad de grietas que surgen de los poros del concreto ya que los enlaces atómicos de los nanotubos de carbono permiten rellenar los espacios del concreto y así evitar las micro fisuras.

La elaboración del concreto con nanotubos de carbono presenta inconvenientes, que varían en función del tamaño de los nanotubos, de cómo se dispersen en la mezcla del concreto con los demás materiales y de lo bien que se homogenicen.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

Este estudio se llevó a cabo en la ciudad de Puno, a orillas del lago Titicaca y situada a una altitud de 3827 m s. n. m., lo que resulta en una diversidad de climas. Se registra una temperatura promedio anual de alrededor de 9°C y la temperatura más baja registrada es de -15°C, las temperaturas pueden variar significativamente entre el día y la noche debido a la altitud y la ubicación geográfica.

Figura 2

Mapa de la región de Puno



Nota: Reproducida del mapa del departamento de Puno, INEI 2015.

La ejecución de la investigación fue efectuada en las instalaciones del laboratorio ASAQALL INGENIEROS S.R.L., se muestra la ubicación del dicho laboratorio en la Tabla 2.

Tabla 2

Localización de las instalaciones de ASAQALL INGENIEROS S.R.L.

Ubicación		Coordenadas UTM	
Dirección	: Jr. José María Eguren H-5B	Latitud:	
		15° 28' 29.96" S	Norte : 8288809
Distrito	: Juliaca		Este : 379540
Provincia	: San Román	Longitud:	Altitud : 3826 m s.n.m.
Región	: Puno	70° 07' 22.27" O	

Nota: Se muestra la ubicación del laboratorio ASAQALL INGENIEROS S.R.L., en Jr. José María Eguren H-5B en el distrito de Juliaca.

3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO

Este proyecto se llevó a cabo durante un lapso de unos 8 meses, desde principios de agosto de 2022 hasta de mayo de 2023, lo que incluyó el tiempo empleado en la elaboración del perfil de tesis. Durante la investigación, se recopilaron los datos más importantes para elaborar un documento conciso con la información más útil y apropiada.

3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. Tipo de investigación

De la investigación aplicada, (Salinas, 2012) indica “este tipo de investigación se abastece por el tipo básico o puro, ya que mediante la teoría se encarga de resolver problemas prácticos, se basa en los hallazgos, descubrimientos y soluciones que se planteó en el objetivo del estudio, normalmente este tipo de investigación se utiliza en la medicina o ingenierías”.



En el presente estudio el tipo de investigación es aplicada, porque el estudio tiene como objetivo obtener nuevos conocimientos con la finalidad de conocer el efecto de la adición de nanotubos de carbono en las propiedades del concreto expuesto al congelamiento - deshielo.

3.3.2. Nivel de investigación

Según Hernández et al. (2014) “la investigación explicativa tiene por objetivo determinar todas las causas de los fenómenos, eventos o sucesos que se van estudiar” (p. 108).

El nivel de investigación del presente estudio es explicativo, porque se establece una relación causa - efecto, al adicionar nanotubos de carbono en el concreto expuesto al congelamiento - deshielo, para posteriormente evaluar la influencia que tiene en las propiedades del concreto (la trabajabilidad, resistencia a la compresión y flexión).

3.3.3. Diseño de investigación

Según Arias (2020) “el diseño experimental es un proceso cuya principal característica es verificar cuantitativamente la causalidad de una variable sobre otra, ello implica la manipulación o el control de la variable independiente sobre la variable dependiente” (p. 46).

El diseño de investigación corresponde al experimental, dado que se manipula la variable independiente, que son los nanotubos de carbono, adicionándolos en diferentes proporciones en el concreto, para luego analizar el efecto en las variables dependientes que son la resistencia a la compresión, flexión y la trabajabilidad.

El diseño de investigación corresponde al experimental, dado que se manipula la variable independiente, en este caso son los nanotubos de carbono, adicionándolos en diferentes proporciones en el concreto. Una vez realizada esta modificación, se procede



a analizar los efectos producidos en las variables dependientes, que comprenden la resistencia a la compresión, la flexión y la trabajabilidad del concreto.

3.3.4. Enfoque de la investigación

Como lo mencionan Hernández et al. (2014) “la investigación adopta un enfoque cuantitativo porque refleja las necesidades de estimar y medir el alcance de un problema o fenómeno de una investigación” (p. 5).

El enfoque de investigación adoptada es cuantitativo, ya que implica el uso de mediciones numéricas y análisis estadísticos para evaluar la hipótesis, con el propósito de identificar patrones de comportamiento y probar teorías.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.4.1. Población

De acuerdo con Fracica (1998), la población es “el conjunto de todos los elementos a los cuales se refiere la investigación. Se puede definir también como el conjunto de todas las unidades de muestreo” (p. 36). Así mismo, Jany (2005), indica que la población es “la totalidad de elementos o individuos que tienen ciertas características similares y sobre las cuales se desea hacer inferencia” (p. 48).

La población considerada en este estudio comprende muestras cilíndricas y prismáticas de concreto con una resistencia de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, uno consiste en el concreto normal/patrón (sin nanotubos de carbono), mientras que el otro incluye adiciones de nanotubos de carbono en proporciones del 0.05%, 0.1% y 0.3% con respecto al peso del cemento en su diseño.

3.4.2. Muestra

Según Hernández et al. (2014) “Para el proceso cuantitativo, la muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos y que tiene que



definirse y delimitarse de antemano con precisión, además de que debe ser representativo de la población” (p. 173).

El tipo de muestreo es no probabilístico - intencional, tomando en cuenta lo que la NTP (2013), indica: “El número de especímenes de prueba, usualmente son tres o más especímenes y deberán ser moldeados para cada edad y condiciones de prueba. Además, las edades de ensayo generalmente son 7 y 28 días para la resistencia a la compresión, o 14 y 28 días para la resistencia a la flexión”

Por tal motivo, en este estudio se han empleado 7 especímenes cilíndricas de concreto para cada condición, ensayados a los 7 y 8 días a pruebas de resistencia a la compresión. Además, se han evaluado 5 especímenes prismáticos para cada condición en pruebas de resistencia a la flexión a los 14 y 28 días. En conjunto, la muestra incluye un total de 192 especímenes de concreto.

Con el propósito de llevar a cabo los ensayos de resistencia a la compresión, se destinaron 112 especímenes cilíndricas de concreto con dimensiones de 4” x 8”. Los detalles sobre la distribución en términos de exposición, grupos y edades se encuentran detallados en la Tabla 3.

Tabla 3*Cantidad de especímenes para las pruebas de resistencia a la compresión*

Descripción	Tipo de muestra	Edad		Sub total
		7 días	28 días	
Sin exponer al congelamiento deshielo	Concreto patrón	7	7	56
	CNTC 0.05%	7	7	
	CNTC 0.1%	7	7	
	CNTC 0.3%	7	7	
Expuesto al congelamiento deshielo	Concreto patrón	7	7	56
	CNTC 0.05%	7	7	
	CNTC 0.1%	7	7	
	CNTC 0.3%	7	7	
TOTAL				112

Nota: La cantidad total es de 112 probetas cilíndricas de 4" x 8".

Asimismo, para llevar a cabo las pruebas orientadas a medir la resistencia a la flexión, se asignaron 80 especímenes prismáticos de concreto con dimensiones de 4" x 4" x 14". La asignación de estas muestras según la exposición, grupos y edades se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4*Cantidad de especímenes para las pruebas de resistencia a la flexión*

Descripción	Tipo de muestra	Edad		Sub total
		14 días	28 días	
Sin exponer al congelamiento deshielo	Concreto patrón	5	5	40
	VNTC 0.05%	5	5	
	VNTC 0.1%	5	5	
	VNTC 0.3%	5	5	
Expuesto al congelamiento deshielo	Concreto patrón	5	5	40
	VNTC 0.05%	5	5	
	VNTC 0.1%	5	5	
	VNTC 0.3%	5	5	
TOTAL				80

Nota: La cantidad total es de 80 especímenes prismáticas de 4" x 4" x 14".

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 5

Operacionalización de variables

VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS DE MEDIDA	ESCALA DE MEDICIÓN
<i>Independiente</i> Nanotubo de carbono	Dosificación con 0.05%, 0.1% y 0.3%	Balanza con precisión de 0.1 gr	Razón
<i>Dependiente</i> Propiedades del concreto	-Asentamiento -Resistencia a la compresión -Resistencia a la flexión	-Cono de Abrams. -Máquina de compresión -Máquina de ensayo de flexión	Razón
<i>Interviniente</i> Temperatura de congelamiento-deshielo	-T. ^a de congelamiento: $-16 \pm$ 2°C -T. ^a de deshielo: Ambiente	Termómetro	Intervalo

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

Durante el proceso de investigación, se emplearon dos técnicas para recopilar información, la observación directa y el análisis documental. La primera requiere estar presente en el lugar en el que ocurre el fenómeno y recopilar información de forma directa de los ensayos de laboratorio siguiendo las pautas de la norma ASTM, la Norma Técnica Peruana y otras normas; por otro lado, la segunda se basa en analizar y revisar textos escritos por terceros que contengan información relevante sobre los nanotubos de carbono y congelamiento-deshielo del concreto. Esto implica la revisión de tesis, artículos, revistas y cualquier otro documento que pueda ser útil para la investigación.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Dentro de los instrumentos empleadas para la ejecución de esta investigación, se incluyen:



3.6.2.1. Instrumentos documentales

- **Fichas de observación:** Se emplearon diversos formatos necesarios para la recolección de datos de acuerdo con cada tipo de prueba realizada en el laboratorio.
- **Normas:** Se han revisado las normas de ASTM, NTP, ACI y el Manual de Ensayos de Materiales del MTC, las cuales establecen las prácticas y técnicas adecuadas para realizar cálculos y ensayos de laboratorio.

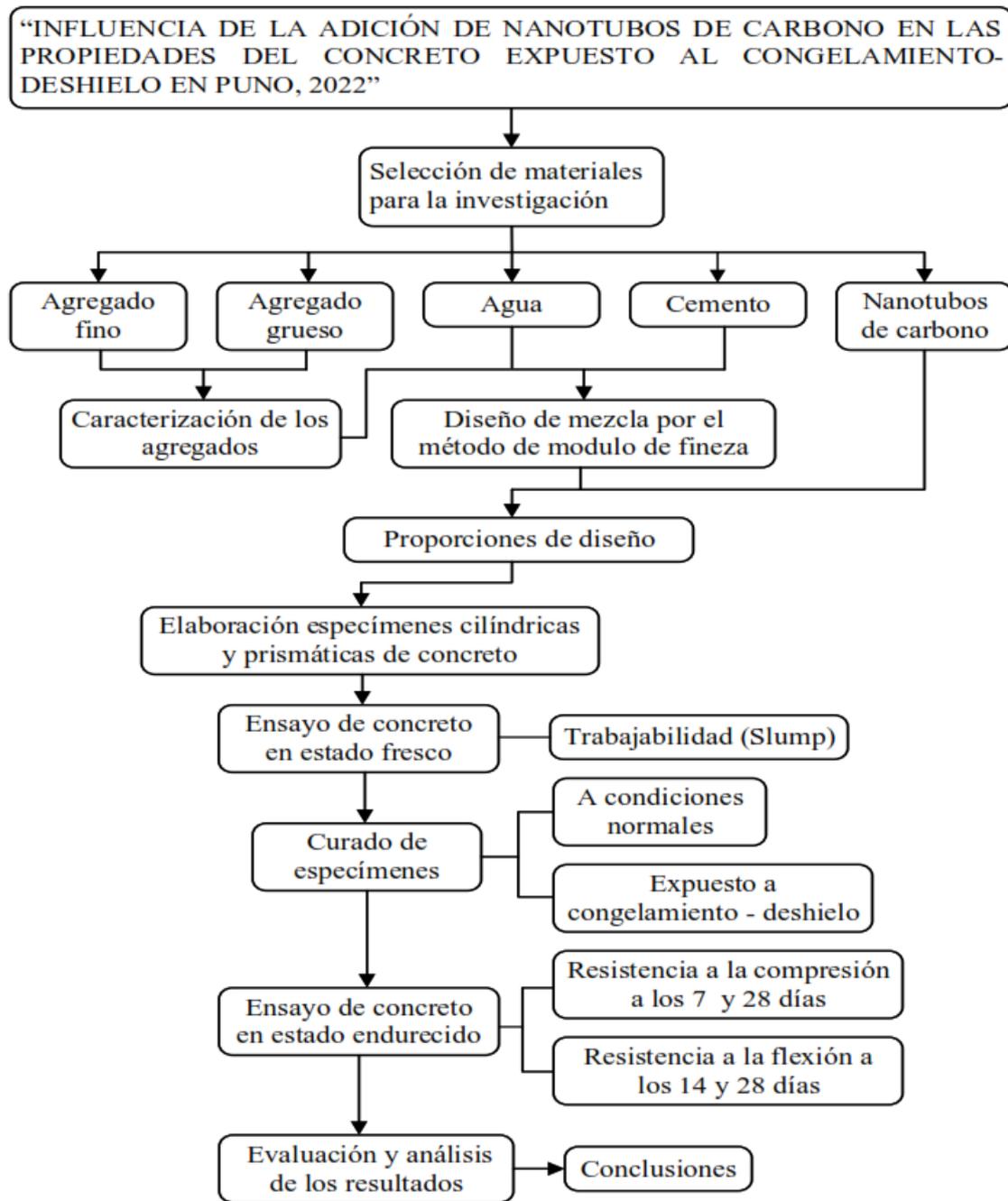
3.6.2.2. Instrumentos mecánicos

- **Equipos de laboratorio:** Maquinas de ensayos de compresión y flexión, máquina mezcladora, balanzas digitales, congeladora, horno eléctrico.
- **Herramientas manuales:** Cono de Abrams, moldes cilíndricos y prismáticos, tamices estandarizados, varilla compactadora, martillo de goma, cinta métrica, carretilla, cucharones, taras, moldes cilíndricos y prismáticos, vernier, bandejas, entre otros.

3.6.3. Procedimiento de recolección de datos

Figura 3

Diagrama de flujo del procedimiento



Nota: Se muestra el diagrama de flujo de procesos para recolección de datos.

3.6.4. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los datos han sido recopilados a partir de las fichas técnicas y verificados utilizando fórmulas, también el software Microsoft Office Excel 2019 para su

presentación gráfica y para hacer el análisis correspondiente (análisis estadístico y prueba de hipótesis).

3.7. MATERIALES EMPLEADOS

3.7.1. Cemento

Para llevar a cabo este estudio, se ha elegido utilizar el cemento Portland tipo IP de la marca Rumi. Esta elección se basa en su amplia utilización en la región de Puno, además de su conformidad con las normativas ASTM C595 y la NTP 334.090. El peso específico considerado es de 2.88 gr/cm³, tal como fue analizado por (Arapa & Mamani, 2018), con características químicas y físicas indicadas según su ficha técnica en la Tabla 6 y la Tabla 7 respectivamente.

Tabla 6

Características químicas del cemento Rumi IP

Requerimientos químicos	Rumi IP	ASTM C - 595 NTP 334.090
MgO (%)	1.99	6.00 máx.
SO ₃ (%)	1.75	4.00 máx.
Pérdida por ignición (%)	2.14	5.00 máx.

Nota: Obtenido de la ficha técnica del cemento Rumi IP y de la NTP 334.090 (2020).

Tabla 7

Características físicas del cemento Rumi IP

Requerimientos físicos	Rumi IP	NTP 334.090 ASTM C 595
Peso específico	2.85	-
Expansión en autoclave, %	-0.00	0.80 máx.
Tiempo de fraguado (Inicial), min	170	45 mín.
Tiempo de fraguado (Final), min	269	420 máx.
Contenido de aire del mortero, %	3.59	12 máx.

Nota: Obtenido de la ficha técnica del cemento Rumi IP y de la NTP 334.090 (2020).

3.7.2. Agregado fino y grueso

3.7.2.1. Ubicación y descripción de la cantera

Los materiales de agregado tanto gruesos como finos que se usaron en esta investigación se obtuvieron de la cantera Isla, localizada en la comunidad campesina de Isla que se encuentra aproximadamente a 11 kilómetros de la ciudad de Juliaca, como se indica en la Figura 4 y la Tabla 8. Esta cantera se eligió debido a que es fácilmente accesible, por estar cerca de la zona de estudio y por tener una buena calidad. Por estas mismas razones, la mayoría de las obras civiles en la localidad de Juliaca suelen utilizar los materiales de esta cantera para las construcciones. Normalmente la extracción de los agregados de las orillas del río Cabanillas se lleva a cabo de dos formas, uno que se realiza de forma manual y otro que se realiza con el uso de maquinaria. Además, en las zonas circundantes se puede encontrar vegetación como la paja y pasto.

El material extraído de la cantera Isla tiene características que hacen que sus agregados tengan una forma redondeada (canto rodado) esto se debe a la fuerza hidráulica, la erosión causada por las aguas pluviales y el transporte de los minerales, ya que la mayoría de ellos son de origen sedimentario.

Tabla 8

Ubicación y coordenadas UTM de la cantera Isla

Ubicación	Coordenadas geográficas	Coordenadas UTM
Dirección : Comunidad Campesina Isla	Latitud:	Norte : 8288129
Distrito : Juliaca	15° 28' 52.212" S	Este : 368476
Provincia : San Román	Longitud:	Altitud : 3839 m s.n.m.
Región : Puno	70° 13' 09.037" O	

Nota: La cantera se encuentra en la comunidad campesina de Isla.

Figura 4

Localización de la cantera Isla



Nota: Proximidad de la cantera Isla respecto a la ciudad de Juliaca. Obtenido de Google Earth Pro.

Figura 5

Obtención de los agregados de la cantera Isla



Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono para el desarrollo de presente estudio fue adquirido desde China, fabricados y suministrados por la empresa Suzhou Tanfeng Graphene Technology Co., Ltd.

Figura 6

Nanotubos de carbono



Se optó utilizar nanotubos de carbono de pared múltiple en lugar de nanotubos de pared simple debido a que la síntesis y producción del primero es más fácil y menos costosa en comparación con el segundo. Esto lo hace más económico y viable para su uso en aplicaciones futuras, con características indicadas en la Tabla 9.

Tabla 9

Características de los nanotubos de carbono de pared múltiple

Características de NTC			
Pureza	(%)	:	> 90
Diámetro exterior	(nm)	:	8 - 15
Diámetro interior	(nm)	:	3 - 6
Longitud	(μm)	:	30 - 50
Superficie específica	(m^2/g)	:	250 - 300
Color		:	Negro
Densidad aparente	(g/cm^3)	:	0,1
Densidad real	(g/cm^3)	:	2,1
Método de obtención		:	CVD

Nota: Obtenido de las especificaciones técnicas brindados por el fabricante.

Navarro & Forero (2017), adicionaron 0.3% y 0.5% de NTC al concreto y presentó un incremento de la resistencia a la compresión en un 11.7% con una dosis de 0.3% de NTC y 10.2% con 0.5% de NTC. También, Apaza & Quispe (2018), incorporaron 0.05%, 0.10% y 0.15% de NTC con respecto al peso del cemento, a las mezclas elaboradas con cementos Yura y Wari, presentando una mejora en las propiedades mecánicas.

Por lo tanto, los porcentajes de nanotubos de carbono adoptados para este estudio son 0.05%, 0.1% y 0.3% en relación al peso del cemento. Estos valores fueron establecidos en base a las conclusiones y recomendaciones derivadas de investigaciones previas.

3.7.3. Agua

El agua empleada en este estudio es potable y apta para el consumo humano. Se obtuvo de manera directa de las instalaciones del laboratorio de mecánica de suelos, pavimentos y materiales ASAQALL INGENIEROS S.R.L., proveniente de la red pública de la ciudad de Juliaca. Esta agua se utilizó en la elaboración y curado de los especímenes cilíndricos y prismáticos de concreto.



Según Yana (2022), el agua utilizada, proveniente de la red pública de la ciudad de Juliaca, cumple con los requisitos de la norma NTP 339.088, obteniéndose los siguientes resultados que muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

Resultados del análisis físico-químico del agua

Descripción	Limite permisible (máx.)	Resultados
	Según NTP 339.088	Según Yana (2022)
Sólidos en suspensión	5000 ppm	101 mg/l
Alcalinidad	1000 ppm	30 mg/l
Cloruros	1000 ppm	34 mg/l
Sulfatos	600 ppm	38 mg/l
Materia orgánica (DQO)	3 ppm	<3 mg/l
pH	5 a 8	7.4

Nota: El valor de pH es de esta dentro de los parámetros de la NTP 339.088.

3.8. ENSAYO DE LOS AGREGADOS

3.8.1. Ensayos para la obtención de las propiedades físicas de los agregados

3.8.1.1. Contenido de humedad de los agregados

Norma

MTC E 108, NTP 339.185, ASTM C 566

Equipos y materiales

- Balanza digital con precisión de 0.1 g
- Horno 105°C ± 5°C
- Recipientes debidamente codificados (taras)
- Bandejas

Descripción del proceso

- El material se cuartea con el fin de obtener una muestra representativa de aproximadamente 250 g. Esta muestra se coloca en recipientes que han sido codificados de manera adecuada y previamente tarados en la balanza.
- Se pesa, considerando tanto la tara como el material en estado húmedo. Posteriormente, se introduce en un horno a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un período de 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se deja enfriar y a continuación se procede a pesar el material, que en ese momento se encuentra completamente seco.
- Se recolectan tres muestras con el propósito de calcular un promedio y obtener un resultado más preciso.

Figura 7

Muestras para contenido de humedad de los agregados fino y grueso



Cálculos y resultados

$$W(\%) = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de la muestra seca}} * 100$$

Tabla 11

Contenido de humedad del agregado fino

Descripción	Unidad	Número de ensayos		
		T-1	T-2	T-3
Peso de la tara	g	31.10	31.2	31.50
Peso de tara + muestra húmeda	g	136.3	144.7	152.1
Peso de tara + muestra seca	g	132.70	141.00	148.30
Peso del agua	g	3.6	3.7	3.8
Peso de la muestra seca	g	101.6	109.8	116.8
Contenido de humedad (W)	%	3.54	3.37	3.25
Promedio cont. de humedad (W)	%		3.46	

Nota: Agregado obtenido de la cantera Isla.

Tabla 12

Contenido de humedad del agregado grueso

Descripción	Unidad	Número de ensayos		
		M-2	M-4	M-5
Peso de la tara	g	31.10	31.2	31.50
Peso de tara + muestra húmeda	g	229.40	196.4	213.6
Peso de tara + muestra seca	g	226.20	193.20	208.90
Peso del agua	g	3.20	3.2	4.7
Peso de la muestra seca	g	195.1	162	177.4
Contenido de humedad (W)	%	1.64	1.98	2.65
Promedio cont. de humedad (W)	%		2.09	

Nota: Agregado obtenido de la cantera Isla.

3.8.1.2. *Peso específico y absorción del agregado fino*

Norma

MTC E 205, NTP 400.022, ASTM C 128



Equipos y materiales

- Picnómetro
- Molde cónico (cono de absorción)
- Varilla metálica para compactar
- Equipo que proporcione calor a una intensidad moderada
- Pipeta
- Recipientes metálicos
- Balanza
- Cucharones

Descripción del proceso

- Se ha mezclado y se redujo la muestra característica pasante por la malla N.º 4 por el método de cuarteo hasta obtener aproximadamente 1 kg, la cual se ha secado en el horno eléctrico a 110°C.
- La muestra característica se colocó en un recipiente y se sumergió completamente en agua durante un período continuo de 24 horas, asegurando su saturación.
- Una vez saturado, se decantó cuidadosamente el agua procurando evitar perder material fino, posteriormente se inició el proceso de secado, colocando el material fino en un recipiente metálico y aplicando calor mediante una cocinilla, durante este proceso se mantuvo la homogeneidad y constancia en el calentamiento.
- La prueba se llevó a cabo colocando cuidadosamente la muestra en el molde cónico y compactándola sin mayor fuerza con 25 golpes sobre una superficie,

- retirando a continuación el cono verticalmente, verificando así la presencia de humedad superficial en la muestra; si se observa un ligero desmoronamiento de la muestra, ello indica que se ha obtenido el estado seco superficial saturado (SSS).
- Después de lograr el estado deseado (SSS), se tomó una cantidad apropiada de la muestra y se introdujo en el picnómetro; luego, se llenó el picnómetro con agua hasta aproximadamente el 90% de su capacidad; a continuación, se agitó el picnómetro para eliminar el aire atrapado, sometiéndola en un recipiente a una temperatura controlada (baño maría), por último, se llenó el picnómetro con agua hasta la marca de referencia.
 - Finalmente, se ha pesado el picnómetro lleno hasta la marca indicada y se procedió a pesar, se retiró el material y el agua contenida en el picnómetro a un recipiente para ser secado en el horno eléctrico a 110°C por un periodo 24 horas, una vez transcurrido ese tiempo se retira del horno y se determina el peso seco del material.

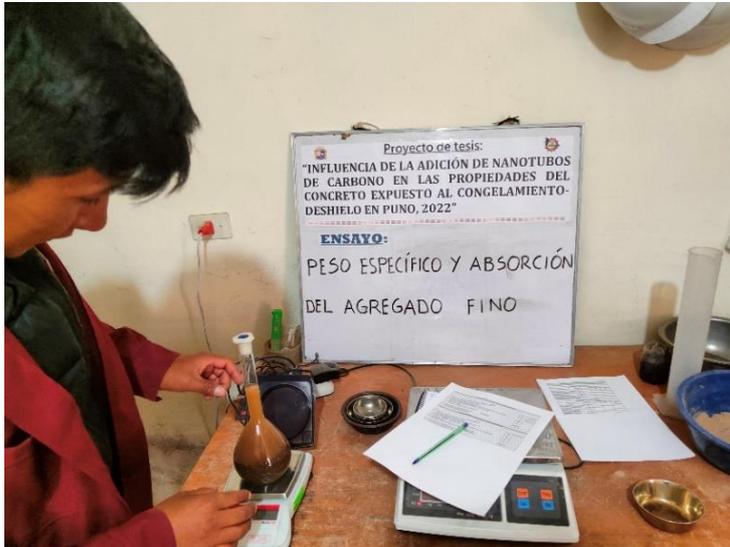
Figura 8

Obtención del estado SSS del agregado fino



Figura 9

Procedimiento para la determinación del peso específico del agregado fino



Cálculos y resultados

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Peso específico aparente (SSS)} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{Peso específico nominal} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Donde:

A: Peso seco de la muestra

B: Peso del picnómetro + agua

C: Peso del picnómetro + agua + muestra

S: Peso de la muestra saturada con superficie seca



Tabla 13

Peso específico y absorción del agregado fino

Datos			
1	Peso de la muestra superficialmente seca	500.00	g
2	Peso del picnómetro + peso del agua	671.30	g
3	Peso de la arena superficialmente seca + peso del picnómetro + peso del agua	975.80	g
4	Peso de la arena secada al horno + peso de la tara	642.60	g
5	Peso de la tara	159.80	g
6	Peso de la arena secada al horno (4-5)	482.80	g
Resultados			
1	Peso específico aparente $(6/(2+1-3))$	2.47	g/cm^3
2	Porcentaje de absorción $((1-6)/6)$	3.56	%

Nota: Datos y resultados del agregado fino de la cantera Isla.

3.8.1.3. Peso específico y absorción del agregado grueso

Norma

MTC E 206, NTP 400.021, ASTM C 127

Equipos y materiales

- Horno $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Balanza
- Probeta graduada
- Recipientes
- Tamiz de 4.75 mm (N°4)
- Franelas de tela para secado de muestra

Descripción del proceso

- Se ha mezclado y se redujo la muestra característica por el método de cuarteo hasta obtener aproximadamente 3 kg de acuerdo a la NTP 400.021, la cual se ha secado en el horno eléctrico a 110°C.
- La muestra se sumergió en agua durante un período de 24 horas; después de esta inmersión, se sacó del agua y se secó superficialmente con franelas hasta llegar a un estado saturado superficialmente seco (SSS).
- Después, se determinó el peso de la muestra, lo que resultó el peso del agregado grueso en su forma saturada superficialmente seca; posteriormente, se colocó una cantidad específica de la muestra en un recipiente sumergido en agua, empujando una balanza de alta precisión; se procedió a calcular el peso sumergido. Por último, la muestra se secó en un horno durante 24 horas para obtener el peso en estado seco.

Figura 10

Obtención del estado SSS del agregado grueso





Cálculos y resultados

Se calcularon con las siguientes fórmulas:

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico aparente (SSS)} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso específico nominal} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

A: Peso seco de la muestra al horno

B: Peso de la muestra saturado superficialmente seca (SSS)

C: Peso en el agua de la muestra saturada

Tabla 14

Peso específico y absorción del agregado grueso

Datos			
1	Peso de la muestra secada al horno	437.60	g
2	Peso de la muestra saturada superficialmente seca	447.10	g
3	Peso de la probeta aforado + peso del agua	596.70	g
4	Peso de la probeta + peso del agua + peso de la muestra saturada superf. seca	867.30	g
5	Peso de la tara	31.50	g
6	Peso de la muestra secada al horno + peso de la tara	469.10	g
Resultados			
1	Peso específico aparente $(1/(3+2-4))$	2.48	g/cm ³
2	Porcentaje de absorción $((2-1)/1)$	2.17	%

Nota: Datos y resultados del agregado grueso de la cantera Isla.



3.8.1.4. Peso unitario de los agregados

Norma

NTP 400.017, ASTM C 29

Equipos y materiales

- Balanza
- Martillo de goma
- Varilla de acero de 5/8"
- Recipientes de volúmenes adecuados
- Cucharón, bandejas, brochas

Descripción del proceso

- Para llevar a cabo el ensayo se usó un molde cilíndrico con dimensiones apropiadas; luego, se registró su peso y dimensiones para calcular el volumen; después, se seleccionó una muestra representativa utilizando el método de cuarteo.
- Para determinar el (PUSS) de los agregados, se siguió el siguiente procedimiento: se vertió la muestra en el molde cilíndrico usando un cucharón desde una altura que no excediera las 2 pulgadas; una vez que el molde estuvo lleno y rebosante, se enrasó con la varilla y se pesó el conjunto, incluyendo el molde y su contenido; este proceso se repitió en tres ocasiones.
- Asimismo, para calcular el (PUCS) de los agregados, se llevó a cabo el siguiente proceso: se dispuso el material en tres capas de igual volumen; compactando cada una de ellas con 25 golpes utilizando una varilla de 5/8", distribuida uniformemente en cada capa, se tuvo el cuidado de evitar golpear

la base del molde o alterar las capas inferiores; una vez que el molde estuvo lleno y rebosante, se enrasó con la varilla y se pesó el conjunto formado por el molde y el contenido de la muestra; este procedimiento se repitió ha repetido tres veces.

Figura 11

Pesado de muestras en molde para ensayo de PUSS agregado fino y grueso



Cálculos y resultados

Se calcularon con las siguientes fórmulas:

$$PUSS = \frac{\text{Peso de la muestra suelto}}{\text{Volumen del molde}}$$

$$PUCS = \frac{\text{Peso de la muestra compactada}}{\text{Volumen del molde}}$$

Los resultados del peso unitario en estado suelto y compactado de los agregados se presentan en las Tablas 15 a 18.

Tabla 15*Peso unitario suelto seco del agregado fino*

Descripción	Unidad	I	II	III
Peso del material + molde	g	16097	16078	16071
Peso del molde	g	9648	9648	9648
Peso del material	g	6449	6430	6423
Volumen del molde	cm ³	4041.95	4041.95	4041.95
Peso unitario	g/cm ³	1.596	1.591	1.589
Promedio	g/cm ³		1.59	

Nota: Para el cálculo de PUSS, se realizó 03 pruebas para obtener el promedio.

Tabla 16*Peso unitario compactado seco del agregado fino*

Descripción	Unidad	I	II	III
Peso del material + molde	g	16538	16570	16591
Peso del molde	g	9648	9648	9648
Peso del material	g	6890	6922	6943
Volumen del molde	cm ³	4041.95	4041.95	4041.95
Peso unitario	g/cm ³	1.705	1.713	1.718
Promedio	g/cm ³		1.71	

Nota: Para el cálculo de PUCS, se realizó 03 pruebas para obtener el promedio.

Tabla 17*Peso unitario suelto seco del agregado grueso*

Descripción	Unidad	I	II	III
Peso del material + molde	g	15783	15761	15774
Peso del molde	g	9648	9648	9648
Peso del material	g	6135	6113	6126
Volumen del molde	cm ³	4041.95	4041.95	4041.95
Peso unitario	g/cm ³	1.518	1.512	1.516
Promedio	g/cm ³		1.52	

Nota: Para el cálculo de PUSS, se realizó 03 pruebas para obtener el promedio.

Tabla 18

Peso unitario suelto compactado del agregado grueso

Descripción	Unidad	I	II	III
Peso del material + molde	g	16430	16475	16449
Peso del molde	g	9648	9648	9648
Peso del material	g	6782	6827	6801
Volumen del molde	cm ³	4041.95	4041.95	4041.95
Peso unitario	g/cm ³	1.678	1.689	1.683
Promedio	g/cm ³		1.68	

Nota: Para el cálculo de PUCS, se realizó 03 pruebas para obtener el promedio.

3.8.1.5. Análisis granulométrico

Normativa

MTC E204, NTP 400.012, ASTM C136

Equipos y materiales

- Balanzas con precisión de 0.1g y 0.5 g
- Serie de tamices normalizados
- Recipientes
- Horno eléctrico a 110 °C
- Cepillo metálico

Descripción del proceso

- El material fue separado utilizando la malla N°4, donde lo retenido fue considerado como agregado grueso y lo que pasó a través de la malla se consideró como agregado fino; luego, se obtuvo la muestra característica mediante el método de cuarteo, con el objetivo de conseguir aproximadamente 5 kg de agregado grueso y al menos 300 g de agregado fino, de acuerdo con

- la (NTP 400.012, 2018). Esta muestra fue sometida a un proceso de secado en el horno eléctrico a una temperatura de 110°C.
- Después de obtener las muestras secadas en el horno, se registró el peso inicial de cada una; éstas fueron vertidas en los diversos tamices normalizados y se comenzó a agitar y girar los tamices con ligeros movimientos constantes hasta llegar a pesos constantes para cada uno respectivamente.
 - Por último, se pesaron los pesos retenidos en cada tamiz, completando así la serie de pasos necesarios.

Figura 12

Proceso de tamizado de los agregados fino y grueso



Cálculos y resultados

Tabla 19

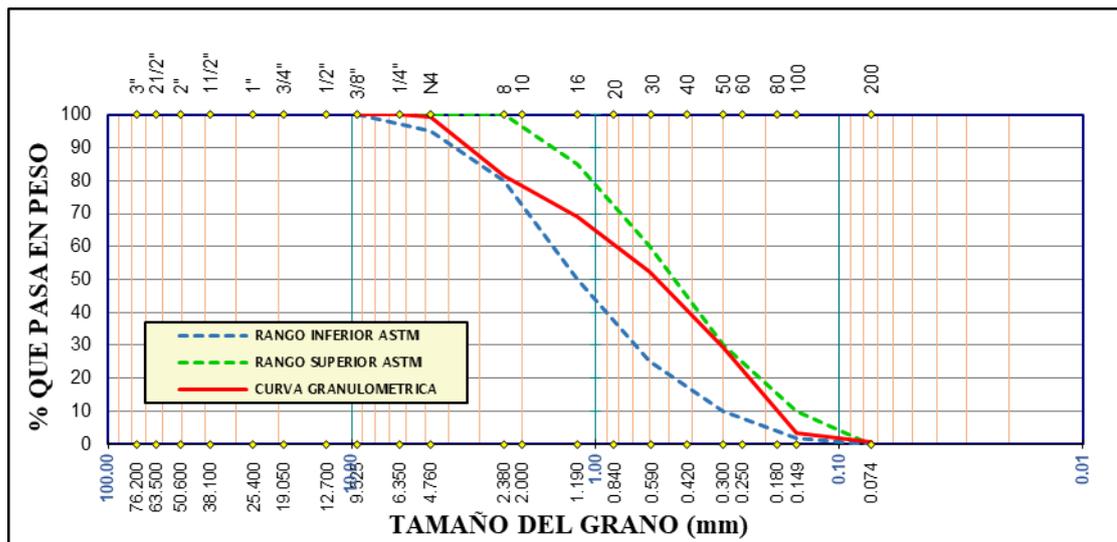
Granulometría del agregado fino

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido	% peso retenido	% retenido acumulado	% que pasa
N°4	4.76	9.30	0.47	0.47	99.53
N°8	2.36	360.60	18.03	18.50	81.50
N°16	1.19	246.50	12.33	30.83	69.17
N°30	0.6	340.60	17.03	47.86	52.14
N°50	0.3	450.90	22.55	70.41	29.59
N°100	0.149	528.00	26.41	96.82	3.18
N°200	0.074	51.30	2.57	99.38	0.62
< N°200		12.30	0.62	100.00	0.00
Peso final total		1999.50	g		
Peso inicial		2000	g		
Pérdida		0.025	%		

Nota: El % de perdida es de 0.025% < 0.3% entonces el resultado es aceptable, según la NTP 400.012.

Figura 13

Curva granulométrica del agregado fino



Nota: La granulometría del agregado fino está dentro de los límites de la norma ASTM C 33.

Tabla 20

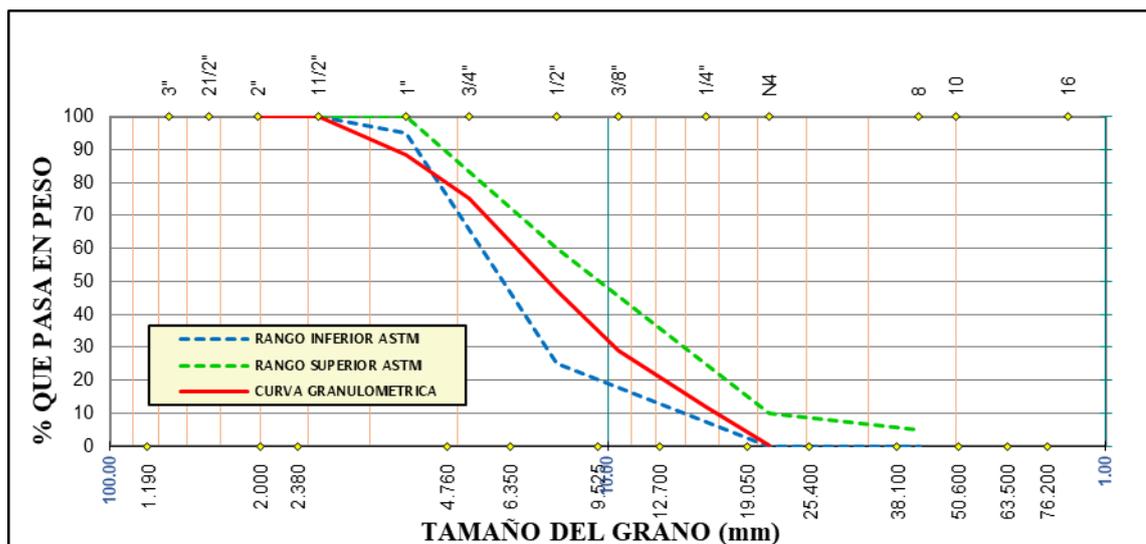
Granulometría del agregado grueso

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido	% peso retenido	% retenido acumulado	% que pasa
11/2"	38.1	0	0	0	100
1"	25.4	1388	11.58	11.58	88.42
3/4"	19.05	1585	13.22	24.80	75.20
1/2"	12.7	3363	28.06	52.86	47.14
3/8"	9.525	2174	18.14	71.00	29.00
1/4"	6.35	2061	17.20	88.19	11.81
N°4	4.76	1376	11.48	99.67	0.33
N°8	2.36	39	0.33	100.00	0.00
Peso inicial total		11986	g		
Peso final		12000	g		
Pérdida		0.12	%		

Nota: El % de pérdida es de 0.12% < 0.3% entonces el resultado es aceptable, según la NTP 400.012.

Figura 14

Curva granulométrica del agregado grueso



Nota: La granulometría del agregado grueso está dentro de los parámetros del Huso N° 57, establecidos por la norma ASTM C 33.



3.8.1.6. Módulo de fineza de los agregados

Norma

NTP 400.011

Descripción del proceso

- Con los datos recabados de la granulometría de los agregados, continuamos calculando los módulos de fineza. Esto implica sumar los porcentajes acumulados retenidos en las mallas de tamaños 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100, y dividir el resultado entre 100.

Cálculos y resultados,

Módulo de fineza del agregado fino:

$$m_f = \frac{\sum \% \text{ Ret. Acum. (3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N° 4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100)}}{100}$$
$$m_f = \frac{0.47 + 18.50 + 30.83 + 47.86 + 70.41 + 96.82}{100}$$
$$m_f = 2.65$$

Módulo de fineza del agregado grueso:

$$m_g = \frac{\sum \% \text{ Ret. Acum. (3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N° 4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100)}}{100}$$
$$m_g = \frac{24.80 + 71 + 99.67 + 5 \times 100}{100}$$
$$m_g = 6.95$$

3.9. DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO

Una vez establecidas las propiedades de cada componente del concreto, pueden combinarse en proporciones adecuadas para cumplir las especificaciones requeridas

(resistencia a la compresión, flexión y trabajabilidad) y comportarse con éxito en los escenarios a los que se verán sometidos, tal como indica (Isidro ,2017).

Con la intención de lograr una mezcla óptima que combine adecuadamente los agregados grueso y fino, se llevó a cabo el diseño de la mezcla utilizando el método del Módulo de Fineza, considerando los valores individuales de módulo de fineza de cada uno.

Se optó por una resistencia a la compresión de diseño de 210 kg/cm², ya que esta cifra es comúnmente usada como referencia para evaluar la resistencia en construcciones civiles.

3.9.1. Diseño de mezcla - Método: Módulo de fineza

Tabla 21

Resumen de las propiedades de los agregados y del cemento

Descripción	Unidad	Agregado fino	Agregado grueso	Cemento
Tamaño máximo nominal	Pulg.	--	1 "	--
Peso unitario suelto seco	kg/m ³	1592	1515	--
Peso unitario compactado	kg/m ³	1712	1683	--
Peso específico	g/cm ³	2.47	2.48	2.88
Contenido de humedad	%	3.46	2.09	--
Absorción	%	3.56	2.17	--
Módulo de fineza	--	2.65	6.95	--

Para ejecutar dicho proceso, la secuencia fue la siguiente:

3.9.1.1. Cálculo de la resistencia promedio requerida

Al no contar con una base de datos de la desviación estándar. Para hallar dicha resistencia, se utilizó la Tabla 22.

Tabla 22*Resistencia promedio requerida en Kg/cm² y MPa*

$f'c$ (kg/cm ²)	$f'cr$ (kg/cm ²)	$f'c$ (MPa)	$f'cr$ (MPa)
Menos de 210	$f'c + 70$	$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7.0$
210 a 350	$f'c + 84$	$21 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8.5$
sobre 350	$f'c + 98$	$f'c > 35$	$f'cr = 1.10 f'c + 5.0$

Nota: Recuperado de (RNE, 2022) - E 060 y (Rivva L 2014).

Entonces, para para el desarrollo de esta investigación, cuya resistencia de diseño corresponde a 210 kg/cm², de acuerdo a la Tabla 22 corresponde a un factor de 84 kg/cm², resultando para este caso una resistencia promedio de 294 kg/cm².

3.9.1.2. Tamaño máximo Nominal del agregado

Para la presente investigación se ha considerado el tamaño máximo nominal correspondiente a 1", por tal motivo el tamaño máximo corresponde a 1 ½".

3.9.1.3. Selección de la medida del asentamiento

Debido a que uno de nuestros objetivos se basa en garantizar una adecuada trabajabilidad, el diseño de mezcla se realizó con una consistencia plástica, teniendo un revenimiento de 3 a 4 pulgadas.

3.9.1.4. Volumen unitario del agua

Para la determinación de este valor, se apoya en los valores establecidas por el ACI 211 (Rivva, 2014).

Tabla 23*Volumen unitario de agua*

Asentamiento	Agua en l/m ³ , para los tamaños máximos nominales de agregado y consistencia indicados							
	3/8 "	1/2 "	3/4 "	1 "	1 1/2 "	2 "	3 "	6 "
	Concretos sin aire incorporado							
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	---

Nota: Recuperado de (Rivva, 2014).

Entonces, para el caso en análisis considerando el asentamiento en un rango de 3" a 4", un TMN de 1", rigiéndonos en la Tabla 23 se tiene un volumen unitario de 193 l/m³.

3.9.1.5. Selección del contenido del aire

Al seleccionar el porcentaje del contenido de aire, se consideraron los valores presentados en la Tabla 24.

Tabla 24*Contenido de aire atrapado*

Tamaño máximo nominal	Aire atrapado
3/8 "	3.0%
1/2 "	2.5%
3/4 "	2.0%
1 "	1.5%
1 1/2 "	1.0%
2 "	0.5%
3 "	0.3%
6 "	0.2%

Nota: Recuperado de (Rivva, 2014)

De acuerdo a la Tabla 24, corresponde un 1.5% de aire atrapado en la mezcla para un TMN de 1”.

3.9.1.6. Relación agua / cemento

Para garantizar la durabilidad del concreto depende en gran medida de las condiciones de exposición. Por lo tanto, la selección de la relación a/c se ajusta a estas condiciones, siguiendo los valores detallados en la Tabla 25.

Tabla 25

Relación agua – cemento (a/c)

f' cr (28 días)	Relación a/c de diseño en peso	
	Concretos sin aire incorporado	Concretos con aire incorporado
150	0.8	0.71
200	0.7	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.4
400	0.43	---
450	0.38	---

Nota: Recuperado de (Rivva, 2014)

Para el valor de la resistencia promedio requerida (f'cr) de 312 kg/cm², de la Tabla 25 para concreto sin aire incorporado, interpolando se obtiene el valor de la relación a/c siendo 0.558.

3.9.1.7. Cálculo del factor cemento

$$FC = \frac{\text{Vol. unitario de agua}}{\text{Relación a/c}} = \frac{193 \text{ l/m}^3}{0.558} = 345.631 \text{ kg/m}^3$$



3.9.1.8. Cálculo del volumen absoluto de pasta

Se determina los volúmenes unitarios de los componentes de la pasta mediante la siguiente expresión:

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Factor cemento}}{P_e \text{ del cemento}} = \frac{345.631 \text{ kg/m}^3}{2880 \text{ kg/m}^3} = 0.121$$

$$\text{Agua} = \frac{\text{Vol. unit. agua}}{P_e \text{ del agua}} = \frac{193 \text{ l/m}^3}{1000 \text{ l/m}^3} = 0.193$$

$$\text{Aire} = \% \text{ de aire atrapado} = 1.5\% = 0.015$$

Por lo tanto:

$$\text{Vol. abs. de la pasta} = 0.121 + 0.193 + 0.015$$

$$\text{Vol. abs. de la pasta} = 0.329$$

3.9.1.9. Cálculo del volumen absoluto del agregado

$$\text{Vol. abs. de agregado} = \text{Vol. total} - \text{Vol. abs. de la pasta}$$

$$\text{Vol. abs. de agregado} = 1 - 0.329$$

$$\text{Vol. abs. de agregado} = 0.671$$

3.9.1.10. Cálculo del módulo de fineza de la combinación de agregados

Una vez que se haya calculado el volumen absoluto de los agregados en su totalidad, se vuelve esencial determinar los volúmenes absolutos de los agregados independientemente. Este proceso requiere el cálculo del módulo de fineza de la combinación de agregados (m), utilizando los valores detallados en la Tabla 26.

Tabla 26*Módulo de fineza de la combinación de los agregados*

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Módulo de fineza de la combinación de agregados que da las mejores condiciones de trabajabilidad para los contenidos de cemento en sacos/m ³ indicados			
	6	7	8	9
3/8 "	3.96	4.04	4.11	4.19
1/2 "	4.46	4.54	4.61	4.69
3/4 "	4.96	5.04	5.11	5.19
1 "	5.26	5.34	5.41	5.49
1 1/2 "	5.56	5.64	5.71	5.79
2 "	5.86	5.94	6.01	6.09
3 "	6.16	6.24	6.31	6.39

Nota: Recuperado de (Rivva, 2014)

La Tabla 26 presenta los valores de (m), los cuales proporcionan condiciones ideales de trabajabilidad en relación con el contenido del cemento expresados en bolsas por metro cúbico (bolsas/m³). Con el propósito de realizar el diseño de mezcla en el contexto de esta investigación, se tiene:

$$\text{N}^{\circ} \text{ de bolsas de cemento por m}^3 = \frac{345.631 \text{ kg/m}^3}{42.5 \text{ kg}} = 8.13$$

De esta manera, al interpolar los valores conforme a la Tabla 26, se determina que para una relación de 8.13 bolsas/m³, se obtiene un módulo de fineza (m) de 5.421.

3.9.1.11. Cálculo del valor R_f

Según Rivva (2014), este valor se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

- r_f : % del agregado fino en relación al volumen absoluto de agregado



- m: Módulo de fineza de la combinación de agregados
- m_f : Módulo de fineza del agregado fino
- m_g : Módulo de fineza del agregado grueso

$$r_f = \frac{6.95 - 5.421}{6.95 - 2.65} \times 100$$

$$r_f = 35.6\%$$

Por lo tanto:

$$r_g = 1 - r_f$$

$$r_g = 1 - 35.6 = 64.4 \%$$

3.9.1.12. Cálculo de volúmenes absolutos del agregado

Para determinar los volúmenes absolutos del agregado fino como del agregado grueso, mediante la siguiente expresión:

$$A. \text{ fino} = r_f \times \text{Vol. absoluto del agregado}$$

$$A. \text{ fino} = 0.356 \times 0.671 = 0.239$$

$$A. \text{ grueso} = r_g \times \text{Vol. absoluto del agregado}$$

$$A. \text{ grueso} = 0.644 \times 0.671 = 0.432$$

3.9.1.13. Cálculo de los pesos secos de los agregados

$$A. \text{ fino} = \text{Vol. abs. agregado fino} \times P_e \text{ del ag. fino}$$

$$A. \text{ fino} = 0.239 \times 2470 \text{ kg/m}^3 = 590.33 \text{ kg/m}^3$$

$$A. \text{ grueso} = \text{Vol. abs. agregado grueso} \times P_e \text{ del ag. grueso}$$

$$A. \text{ grueso} = 0.432 \times 2480 \text{ kg/m}^3 = 1071.36 \text{ kg/m}^3$$



3.9.1.14. Corrección por humedad del agregado

Pesos húmedos:

$$\text{A. fino} = \text{Peso seco} \times (1 + w\%) = 590.33 \times (1 + 3.46/100)$$

$$\text{A. fino} = 610.76 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{A. grueso} = \text{Peso seco} \times (1 + w\%) = 1071.33 \times (1 + 2.09/100)$$

$$\text{A. grueso} = 1093.72 \text{ kg/m}^3$$

Humedad superficial del agregado:

$$\text{A. fino} = w\% - \text{Absorción} = 3.46 - 3.56 = -0.1\%$$

$$\text{A. grueso} = w\% - \text{Absorción} = 2.09 - 2.17 = -0.08\%$$

Aporte de humedad:

$$\text{A. fino} = \text{Peso seco} \times \text{humedad} = 590.33 \times (-0.1/100)$$

$$\text{A. fino} = -0.59 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{A. grueso} = \text{Peso seco} \times \text{humedad} = 1071.33 \times (-0.08/100)$$

$$\text{A. grueso} = -0.86 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{Total} = (-0.59) + (-0.86) = -1.45 \text{ lt/m}^3$$

Agua efectiva:

$$\text{Agua efectiva} = 193.00 - \text{Aporte humedad}$$

$$\text{Agua efectiva} = 193.00 - (-1.45) = 194.45 \text{ lt/m}^3$$

Pesos corregidos:

$$\text{Cemento} = 345.87 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agregado fino} = 610.73 \text{ kg/m}^3$$



$$\text{Agregado grueso} = 1093.73 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} = 194.45 \text{ lt/m}^3$$

3.9.1.15. *Proporciones de la mezcla*

$$\frac{345.63}{345.63} ; \frac{610.76}{345.63} ; \frac{1093.72}{345.63} / \frac{194.45}{\frac{345.63}{42.5}}$$

$$1 ; 1.77 ; 3.16 / 23.8 \text{ lt/bolsa}$$

3.9.2. Diseño de mezcla corregido - Método: Módulo de fineza

3.9.2.1. Cálculo de la resistencia promedio requerida

Para corregir el diseño de las mezclas, se dispone de una base de datos que incluye los resultados de la rotura de 24 probetas cilíndricas, los cuales están presentados en la Tabla 27.

Tabla 27

Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión a los 28 días

N°	Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	
					Diseño	Alcanzada
1	DE - 01	28	16537	81.71	210	202.39
2	DE - 02	28	17518	84.79	210	206.60
3	DE - 03	28	18713	84.79	210	220.70
4	DE - 04	28	16387	82.03	210	199.77
5	DE - 05	28	17747	86.76	210	204.55
6	DE - 06	28	17274	86.76	210	199.10
7	DE - 07	28	18477	87.75	210	210.56
8	DE - 08	28	17339	87.09	210	199.09
9	DE - 09	28	16458	86.76	210	189.70
10	DE - 10	28	19852	87.42	210	227.09
11	DE - 11	28	20038	86.59	210	231.41
12	DE - 12	28	19551	86.76	210	225.35
13	DE - 13	28	18563	87.58	210	211.95
14	DE - 14	28	19114	86.76	210	220.31
15	DE - 15	28	19372	87.75	210	220.76
16	DE - 16	28	18721	86.76	210	215.78
17	DE - 17	28	18406	87.09	210	211.34
18	DE - 18	28	17890	86.76	210	206.20
19	DE - 19	28	17561	88.08	210	199.38
20	DE - 20	28	17783	86.76	210	204.97
21	DE - 21	28	17661	88.25	210	200.12
22	DE - 22	28	16079	87.91	210	182.90
23	DE - 23	28	16823	87.75	210	191.72
24	DE - 24	28	16301	87.75	210	185.77

Tabla 28

Cálculo de la desviación estándar

Nº	X_i	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$	Nº	X_i	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
1	202.39	-4.59	21.06	13	211.95	4.97	24.71
2	206.60	-0.38	0.14	14	220.31	13.33	177.70
3	220.70	13.72	188.25	15	220.76	13.78	189.90
4	199.77	-7.21	51.98	16	215.78	8.80	77.45
5	204.55	-2.43	5.90	17	211.34	4.36	19.01
6	199.10	-7.88	62.09	18	206.20	-0.78	0.61
7	210.56	3.58	12.82	19	199.38	-7.60	57.75
8	199.09	-7.89	62.25	20	204.97	-2.01	4.04
9	189.70	-17.28	298.58	21	200.12	-6.86	47.05
10	227.09	20.11	404.43	22	182.90	-24.08	579.83
11	231.41	24.43	596.85	23	191.72	-15.26	232.85
12	225.35	18.37	337.47	24	185.77	-21.21	449.85
	n	=	24				
	ΣX_i	=	4967.51				
	$\bar{X} = \Sigma X_i/n$	=	206.98				
	$\Sigma(x_i - \bar{X})^2$	=	3902.57				
	δ	=	13.03			kg/cm ²	

De la Tabla 28, el valor de la desviación estándar (δ) es de 13.03 kg/cm²

El Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE ,2022), indica el factor de ajuste para la desviación estándar cuando se tienen menos de 30 pruebas, se encuentra especificado en la Tabla 29.

Tabla 29*Factor de corrección de la desviación estándar*

Nº de ensayos	Factor de corrección
Menos de 15	Usar Tabla 23
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

Nota: Recuperado de (RNE, 2022)

De la Tabla 29, obtenemos el factor de corrección de la desviación estándar para 24 muestras, interpolando corresponde el valor de 1.04. Entonces, el valor de la desviación estándar corregido (δ') será de 13.55 kg/cm².

Cuando se dispone de datos para determinar la desviación estándar, se procede a realizar el cálculo mediante las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34 \delta' \quad \rightarrow \quad f'_{cr} = 312 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33 \delta' - 35 \quad \rightarrow \quad f'_{cr} = 290.6 \text{ kg/cm}^2$$

Optamos por el mayor valor de la resistencia promedio requerida (f'_{cr}) que es 312 kg/cm².

3.9.2.2. Tamaño máximo Nominal del agregado

Para la presente investigación se ha considerado el tamaño máximo nominal correspondiente a 1", por tal motivo el tamaño máximo corresponde a 1 ½".



3.9.2.3. Selección de la medida del asentamiento

Debido a que uno de nuestros objetivos se basa en garantizar una adecuada trabajabilidad, el diseño de mezcla se realizó con una consistencia plástica, teniendo un revenimiento de 3" a 4".

3.9.2.4. Volumen unitario del agua

Para el caso en análisis considerando el asentamiento en un rango de 3" a 4", un TMN de 1", rigiéndonos en la Tabla 23, se tiene un volumen unitario es de 193 l/m³.

3.9.2.5. Selección del contenido del aire

De acuerdo a la Tabla 24, corresponde un 1.5% de aire atrapado en la mezcla para un TMN de 1".

3.9.2.6. Relación agua / cemento

Para garantizar la durabilidad del concreto depende en gran medida de las condiciones de exposición. Por lo tanto, la selección de la relación a/c se ajusta a estas condiciones, siguiendo los valores detallados en la Tabla 25. Para el valor de la resistencia promedio requerida (f'_{cr}) de 312 kg/cm², interpolando se obtiene el valor de la relación a/c siendo 0.533.

3.9.2.7. Cálculo del factor cemento

$$FC = \frac{\text{Vol. unitario de agua}}{\text{Relación a/c}} = \frac{193 \text{ l/m}^3}{0.533} = 361.97 \text{ kg/m}^3$$

3.9.2.8. Cálculo del volumen absoluto de pasta

Determinamos los volúmenes unitarios de los componentes de la pasta mediante la siguiente expresión:



$$\text{Cemento} = \frac{\text{Factor cemento}}{P_e \text{ del cemento}} = \frac{361.97 \text{ kg/m}^3}{2880 \text{ kg/m}^3} = 0.126$$

$$\text{Agua} = \frac{\text{Vol. unit. agua}}{P_e \text{ del agua}} = \frac{193 \text{ l/m}^3}{1000 \text{ l/m}^3} = 0.193$$

$$\text{Aire} = \% \text{ de aire atrapado} = 1.5\% = 0.015$$

Por lo tanto:

$$\text{Vol. abs. de la pasta} = 0.126 + 0.193 + 0.015$$

$$\text{Vol. abs. de la pasta} = 0.334$$

3.9.2.9. Cálculo del volumen absoluto del agregado

$$\text{Vol. abs. agregado} = \text{Vol. total} - \text{Vol. abs. pasta}$$

$$\text{Vol. abs. agregado} = 1 - 0.334$$

$$\text{Vol. abs. agregado} = 0.666$$

3.9.2.10. Cálculo del módulo de fineza de la combinación de agregados

La Tabla 26 presenta los valores de (m), los cuales proporcionan condiciones ideales de trabajabilidad en relación con el contenido del cemento expresados en bolsas por metro cúbico (bolsas/m³). Con el propósito de realizar el diseño de mezcla en el contexto de esta investigación, se tiene:

$$\text{N}^\circ \text{ de bolsas de cemento por m}^3 = \frac{361.97}{42.5} = 8.52$$

De esta manera, al interpolar los valores conforme a la Tabla 26, se determina que para una relación de 8.52 bolsas/m³, se obtiene un módulo de fineza (m) de 5.451.

3.9.2.11. Cálculo del valor R_f

Este valor se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

$$r_f = \frac{6.95 - 5.451}{6.95 - 2.65} \times 100$$

$$r_f = 34.86\%$$

Por lo tanto:

$$r_g = 1 - r_f$$

$$r_g = 1 - 34.86\% = 65.14\%$$

3.9.2.12. Cálculo de volúmenes absolutos del agregado

Para determinar los volúmenes absolutos del agregado fino como del agregado grueso, mediante la siguiente expresión:

$$A. \text{ fino} = r_f \times \text{Vol. absoluto del agregado}$$

$$A. \text{ fino} = 0.348 \times 0.666 = 0.232$$

$$A. \text{ grueso} = r_g \times \text{Vol. absoluto del agregado}$$

$$A. \text{ grueso} = 0.651 \times 0.666 = 0.434$$

3.9.2.13. Cálculo de los pesos secos de los agregados

$$A. \text{ fino} = \text{Vol. abs. agregado fino} \times P_e \text{ del ag. fino}$$

$$A. \text{ fino} = 0.232 \times 2470 \text{ kg/m}^3 = 573.04 \text{ kg/m}^3$$

$$A. \text{ grueso} = \text{Vol. abs. agregado grueso} \times P_e \text{ del ag. grueso}$$

$$A. \text{ grueso} = 0.434 \times 2480 \text{ kg/m}^3 = 1076.32 \text{ kg/m}^3$$



3.9.2.14. Corrección por humedad del agregado

Pesos húmedos:

$$A. \text{ fino} = \text{Peso seco} \times (1 + w\%) = 573.04 \times (1 + 3.46/100)$$

$$A. \text{ fino} = 592.87 \text{ kg/m}^3$$

$$A. \text{ grueso} = \text{Peso seco} \times (1 + w\%) = 1076.32 \times (1 + 2.09/100)$$

$$A. \text{ grueso} = 1098.82 \text{ kg/m}^3$$

Humedad superficial del agregado:

$$A. \text{ fino} = w \% - \text{Absorción} = 3.46 - 3.56 = -0.1 \%$$

$$A. \text{ grueso} = w \% - \text{Absorción} = 2.09 - 2.17 = -0.08 \%$$

Aporte de humedad:

$$A. \text{ fino} = \text{Peso seco} \times \text{humedad} = 590.33 \times (-0.1/100)$$

$$A. \text{ fino} = -0.59 \text{ lt/m}^3$$

$$A. \text{ grueso} = \text{Peso seco} \times \text{humedad} = 1071.33 \times (-0.08/100)$$

$$A. \text{ grueso} = -0.86 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{Total} = (-0.59) + (-0.86) = -1.45 \text{ lt/m}^3$$

Agua efectiva:

$$\text{Agua efectiva} = 193.00 - \text{Aporte humedad}$$

$$\text{Agua efectiva} = 193.00 - (-1.45) = 194.45 \text{ lt/m}^3$$

Pesos corregidos:

$$\text{Cemento} = 361.10 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agregado fino} = 592.85 \text{ kg/m}^3$$



$$\text{Agregado grueso} = 1098.80 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} = 194.45 \text{ lt/m}^3$$

3.9.2.15. Proporciones de la mezcla

$$\frac{361.10}{361.10} ; \frac{592.85}{361.10} ; \frac{1098.80}{361.10} / \frac{194.45}{\frac{361.10}{42.5}}$$

$$1 ; 1.64 ; 3.03 / 22.95 \text{ lt/bolsa}$$

3.9.3. Diseño de mezcla con adición de nanotubos de carbono

Luego de completar el diseño corregido y el procedimiento detallado, así como de obtener las dosificaciones de los materiales, se procede a realizar el cálculo de la cantidad de cada componente en peso necesario para la mezcla de concreto. Este proceso se lleva a cabo tanto para la fabricación de los especímenes cilíndricos de 4" x 8" destinados a la prueba de resistencia a la compresión como para los especímenes prismáticos de 4" x 4" x 14" utilizados en la prueba de resistencia a la flexión. Además, la incorporación de NTC se efectuó en proporciones de 0.05%, 0.1% y 0.3% en relación al peso del cemento, tal como se detalla en la Tabla 30.

Tabla 30

Diseños de mezcla final sin y con adición de nanotubos de carbono

Materiales	Unidad	Concreto patrón	Adicionado con nanotubos de carbono		
		CP	0.05%	0.1%	0.3%
Cemento	kg/m ³	361.10	361.10	361.10	361.10
Agregado fino	kg/m ³	592.85	592.85	592.85	592.85
Agregado grueso	kg/m ³	1098.80	1098.80	1098.80	1098.80
Agua efectiva	lt/m ³	194.48	194.48	194.48	194.48
Nanotubos de carbono	kg/m ³	-	0.181	0.362	1.083

Nota: La adición de NTC se da en relación al peso del cemento.



3.10. ELABORACIÓN DEL CONCRETO

Para la elaboración del concreto normal/patrón y concreto adicionado con nanotubos de carbono, el procedimiento se basa en la norma (ASTM C 31, 2009) y es el siguiente:

- Inicialmente, se requiere disponer de los materiales necesarios para la elaboración del concreto. Posteriormente, se lleva a cabo la medición precisa de las proporciones indicadas en la dosificación, en el caso específico de los NTC, se emplea una balanza de precisión para este material con el fin de aumentar la exactitud.
- Se humedece el interior de la mezcladora con agua, esto se hace con el propósito de evitar que la mezcladora absorba el agua de diseño.
- En la primera mezcla, se colocaron todo el agregado grueso en la mezcladora junto con una parte del agua, luego se añadió el cemento y se mezclaron por 30 segundos.
- Seguidamente se agregó el agua restante en conjunto con los NTC (según el caso), el ciclo de mezclado duró aproximadamente 2 minutos.
- Finalmente, se agregó el agregado fino y se mezcló por 2 minutos más antes de verter la mezcla en los moldes de ensayo correspondientes.
- NOTA: La dispersión del NTC fue efectuada de forma manual agregándolas directamente en la mezcla del concreto, esto se hizo con la intención de simular condiciones reales de construcción. Por otro lado, se observó que cuando se agregó los NTC en la mezcla, se requirió prolongar el tiempo de mezclado para lograr una distribución más uniforme de dicho material en el concreto.



3.10.1. Especímenes cilíndricas y prismáticas de concreto

Normativa

NTP 39.033, ASTM C-192

Equipos y materiales

- Balanza
- Mezcladora de 4.5 p³
- Moldes cilíndricos de 4" x 8"
- Moldes prismáticos de 4" x 4" x 14"
- Varilla metálica lisa con punta redondeada de diámetro de 3/8" y longitud de 30 cm.
- Mazo de goma.
- Carretilla tipo buggy.
- Pala, cucharón, plancha metálica, etc.

Descripción del proceso

- Colocamos los moldes sobre una superficie plana, horizontal y rígida.
- El interior de los moldes debe de estar limpio y lubricados ligeramente con un desmoldante para evitar la adherencia del concreto.
- Se vierte la mezcla de concreto en los moldes, se llena la primera capa de concreto aproximadamente hasta la mitad del molde. A continuación, se chusea 25 veces en forma helicoidal con una varilla de 3/8", luego se golpea 12 veces alrededor del molde con el martillo de goma. Por último, se completa

el llenado de la segunda capa realizando el mismo procedimiento que se hizo en la primera capa.

- Finalmente, se realiza el enrase de la superficie superior de los moldes empleando una plancha metálica, con el objetivo de conseguir un acabado liso y uniforme.

Figura 15

Elaboración del concreto en moldes cilíndricos y prismáticos



3.10.2. Curado de los especímenes

Después de la elaboración, los especímenes cilíndricos y prismáticos utilizadas para los ensayos de caracterización, han sido desencofrados de los moldes a las 24 horas del vaciado.

Posteriormente, los especímenes que no fueron expuestos al congelamiento - deshielo se introdujeron en una poza de curado hasta el momento realizar los ensayos respectivos.

Por otro lado, los especímenes que estuvieron sujetos a la exposición de congelamiento-deshielo fueron retirados de los moldes y colocados en una poza de curado durante el día, mientras que durante la noche fueron colocados en la congeladora previamente calibrada. Este proceso de curado se mantuvo hasta el momento en que fue

necesario realizar los ensayos. Adicionalmente, se continuó introduciendo los especímenes en la congeladora por las noches, hasta que se les requieran realizar los ensayos de compresión y flexión del concreto.

De acuerdo con la (NTP 339.183, 2013), indica que “se requiere sumergir las muestras en agua o en un ambiente con un 95% de humedad relativa y a una temperatura mínima de 23 ± 2 °C”. Sin embargo, en esta investigación no se ha cumplido dicha condición de temperatura. En su lugar, se ha optado utilizar el agua proveniente de la red pública para el proceso de curado, se ha intentado mantener la temperatura del agua de curado a 13°C en la medida de lo posible, dado que estas temperaturas son típicas de Puno.

Figura 16

Curado de especímenes cilíndricos





3.11. ENSAYOS REALIZADOS

3.11.1. Ensayos en estado fresco del concreto

3.11.1.1. Ensayo de asentamiento en el cono de Abrams

Normativa

NTP 339.035, MTC E 705, ASTM C 143

Equipos y materiales

- Cono de Abrams
- Varilla Lisa de 5/8"
- Herramientas manuales

Descripción del proceso

- Se prepara el cono, limpiando, lubricando el interior y fijando a una base plana y resistente, pisando las aletas para mantenerlo inmóvil.
- Tomar una muestra representativa del concreto fresco y mezclarla bien, asegurándose de que la muestra no tenga exceso de aire.
- Llenar el cono en tres capas iguales y compactar cada capa con 25 golpes verticales distribuidos uniformemente con una varilla lisa de 5/8".
- Al retirar el cono, levantarlo verticalmente y sin girarlo para evitar que el concreto se deforme.
- Medir la distancia desde la parte superior del cono hasta la parte superior de la muestra de concreto con una regla graduada o flexómetro. Esta medida se conoce como el slump del concreto.
- Repetir el procedimiento al menos dos veces más para obtener un promedio del slump del concreto.

Figura 17

Medición del asentamiento



3.11.2. Ensayos en estado endurecido del concreto

3.11.2.1. Ensayo de resistencia a compresión

En este ensayo, se aplica una carga axial a una muestra de concreto hasta que falle, lo que permite obtener su resistencia a la compresión. Según Abanto (1994), la resistencia a la compresión del concreto se refiere a la carga máxima que soporta la muestra por unidad de área antes de sufrir la falla a la compresión (fisuración, fractura).

Normativa

NTP 339.034, MTC E 704, ASTM C 39

Equipos y materiales

- Máquina de prueba
- Almohadillas de neopreno
- Platos metálicos de rotura

Descripción del proceso

- Retirar los especímenes que serán sometidos a ensayos de compresión de la poza de curado.

- Colocar un código de identificación a los especímenes que serán ensayados.
- Tomar medidas de diámetro y altura de los especímenes en diferentes sitios para así obtener con precisión el diámetro y altura promedio.
- Preparar la máquina de ensayo con las placas de compresión superior e inferior, calibrar la máquina y ajustar la velocidad de carga.
- Colocar la muestra de concreto en posición vertical entre las placas de compresión y asegurar que la carga se aplique axialmente en el centro de la muestra.
- Aplicar una carga axial a la muestra de concreto a una velocidad especificada hasta su falla, registrando la carga.

Figura 18

Ensayo de la resistencia a la compresión



Cálculos y resultados

Según la norma (ASTM C 39, 2018), la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{P}{A} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \quad ; \quad A = \frac{\pi \times \phi^2}{4}$$



Donde:

$f'c$: Resistencia de rotura a la compresión del concreto (kg/cm^2)

P: Máxima carga aplicada (kg)

ϕ : Diámetro del espécimen cilíndrica (cm)

A: Área promedio del espécimen (cm^2)

3.11.2.2. Ensayo de resistencia a flexión con carga puntual en el centro de luz

Normativa

NTP 339.079, ASTM C 293

Equipos y materiales

- Máquina de prueba
- Placa de metal con dos soportes de tipo barra, posicionados en los extremos de la base de la viga
- Placa metálica con un apoyo tipo barra, ubicado en el punto central y colocado en la parte superior de la viga

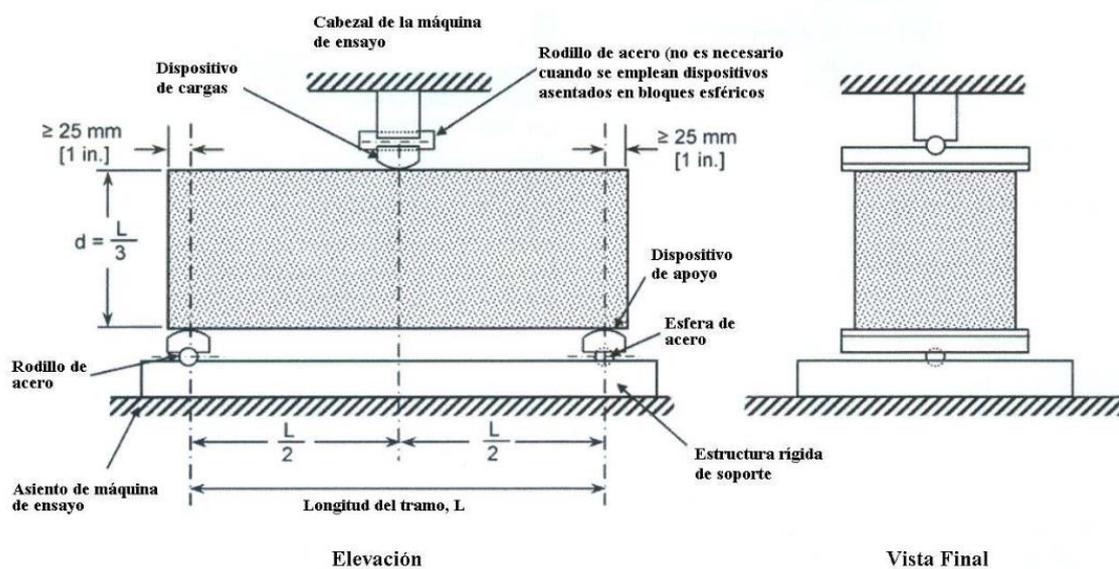
Descripción del proceso

- Retirar los especímenes que serán sometidos a ensayos de flexión de la poza de curado.
- Colocar un código de identificación a los especímenes prismáticos que serán ensayados.
- Tomar varias medidas a lo largo de cada dimensión de los especímenes en diferentes sitios para así obtener un promedio.

- Se debe preparar el equipo necesario para el ensayo.
- Se debe colocar el espécimen prismático o viga simple de concreto en la máquina de ensayo, apoyada en dos puntos a una distancia conocida entre ellos, y centrada en la zona de carga, tal como se observa en la figura XX.
- Se debe aplicar una carga sobre el punto medio de la muestra, a una tasa constante y uniforme, hasta que la muestra falle.
- Cuando el espécimen haya alcanzado su punto de ruptura, se debe registrar el valor máximo de carga, además de verificar y tomar nota de la posición de la línea de fractura, ya que esta última será fundamental para determinar la resistencia a la flexión.

Figura 19

Diagrama para la prueba de flexión con carga en el punto central



Nota: Reproducido de (ASTM C 293, 2003).

Figura 20

Ensayo de la resistencia a la flexión



Cálculos y resultados

Según la ASTM C 293 (2003), el módulo de rotura de los especímenes prismáticos se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$R = \frac{3 P L}{2 b d^2}$$

Donde:

R: Resistencia a la flexión (kg/cm²)

P: Carga aplicada (Kg-f)

L: Luz o longitud entre soportes (cm)

b: Ancho promedio de la viga (cm)

d: Espesor promedio de la viga (cm)

3.11.2.3. Ensayo del concreto expuesto al congelamiento-deshielo

En Puno, se experimentan fenómenos climáticos cíclicos, como el ciclo de congelamiento-deshielo, durante las épocas de heladas. Las temperaturas varían, lo que



afecta directamente la calidad del concreto utilizado en la construcción de estructuras en esta región.

El ensayo se realizó siguiendo las pautas establecidas en la norma (ASTM C 666, 2017), centrándose únicamente en la etapa de congelamiento y deshielo del concreto; no se incluyó el análisis de factores como la disminución del módulo de elasticidad o los cambios en las dimensiones después de un cierto número de ciclos. En lugar de eso, se utilizaron medidas de la resistencia a la compresión y a la flexión para evaluar los daños del concreto.

- **Etapa de congelamiento**

En esta etapa, se recreó una condición climática artificial para simular temperaturas bajo cero, utilizando una congeladora calibrada con una temperatura de $-16 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para generar un efecto de deterioro acelerado. Esta fase se llevó a cabo durante la noche y tuvo una duración de 12 horas, inmediatamente después de 24 horas una vez desencofrados, donde se elaboraron especímenes cilíndricos y prismáticos de dimensiones 4" x 8" y 4" x 4" x 14" respectivamente. Tras su exposición en la congeladora, los especímenes eran trasladados a una poza de curado para dar continuidad al ciclo de congelamiento-deshielo.

- **Etapa de deshielo**

Esta etapa se llevó a cabo durante el día para simular las condiciones climáticas naturales, reflejadas por la temperatura ambiente. Esta etapa, con una duración de 12 horas, completa un ciclo completo. El proceso de deshielo se iniciaba al retirar las probetas de la congeladora y transferirlas a una poza de curado.

Después de eso, se procedió a realizar ensayos destinados a evaluar la resistencia a la compresión después de 7 y 28 días. De manera similar, se evaluó la resistencia a la flexión en dos momentos específicos, a los 14 y 28 días.

Equipos y materiales

- Congeladora con una capacidad de almacenamiento de 480 litros
- Termostato calibrado a $-16 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Figura 21

Muestras expuestas al congelamiento



3.12. DISEÑO ESTADÍSTICO Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

3.12.1. Análisis estadístico

La realización de un análisis estadístico es fundamental para evaluar los resultados y garantizar la fiabilidad de los valores obtenidos en las pruebas y se utilizan parámetros estadísticos para una evaluación precisa de los resultados, en una investigación se analizan los diversos estadísticos con datos agrupados para obtener de manera más precisa la distribución de frecuencias y encontrar las diversas medidas; además, observar la distribución de los datos y obtener una representación gráfica precisa de la campana de Gauss (Isidro, 2017, p. 36).

En los apartados subsiguientes, se expondrán los análisis estadísticos que mostrarán de manera más precisa la distribución de frecuencias; junto a esto, se presentarán las medidas de tendencia central y dispersión, lo cual desempeñará un papel esencial en el logro de una comprensión más rigurosa.

3.12.1.1. Rango de datos (R_x)

Huanca & Auquitias (2021) definen al rango, como la diferencia entre el valor máximo de la variable en la distribución y el valor mínimo de la misma variable en dicha distribución, se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_x = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

3.12.1.2. Número de intervalos clases (K)

Según Huanca & Auquitias (2021), indican que la regla de Sturges, propuesta por Herbert Sturges en 1926, se emplea para determinar el número de clases en una distribución de frecuencias y su correspondiente histograma, definida por:

$$K = 1 + 3.22 \times \log(n)$$

3.12.1.3. Tamaño de intervalos de clase (C)

Para calcular se utiliza la siguiente relación:

$$C = \frac{R_x}{K}$$

3.12.1.4. Medidas de tendencia central



- **La media aritmética (u)**

Huanca & Auquitas (2021) indican que la media aritmética, se obtiene al dividir la suma de todos los valores de la variable entre el número total de elementos.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot X_i}{n}$$

- **Mediana(u_m)**

Huanca & Auquitas (2021) señalan que la mediana es el valor que ocupa el lugar central en la distribución de datos, y su cálculo se realiza utilizando la fórmula que sigue:

$$u_m = L_i + \left[\frac{\frac{n}{2} - F_{i-1}}{f_i} \right] \cdot C$$

Donde:

L_i: Límite inferior del intervalo de clase de la mediana

n: Número total de datos

F_{i-1}: Frecuencia acumulada de clase que antecede a la Mediana

f_i: Frecuencia absoluta de clase de la Mediana

C: Ancho de clase de la mediana

- **Moda (u_o)**

También Huanca & Auquitas (2021) indican que la moda señala la puntuación que aparece con mayor frecuencia en la distribución de datos; sin embargo, es posible que existan dos o más modas en la distribución de datos, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$u_o = L_i + \left[\frac{f_i - f_{i-1}}{(f_i - f_{i-1}) + (f_i - f_{i+1})} \right] * C$$

Donde:

L_i : Extremo inferior de la clase modal

f_i : Frecuencia de la clase modal

f_{i-1} : Frecuencia de la clase anterior a la modal

f_{i+1} : Frecuencia de la clase siguiente a la modal

C : Amplitud o ancho del intervalo de la clase

3.12.1.5. Medidas de dispersión central

- **Varianza (σ^2)**

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot (X_i - u)^2}{n - 1}$$

- **Desviación estándar (σ)**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot (X_i - u)^2}{n - 1}}$$

- **Coefficiente de variación (C_v)**

$$C_v = \frac{\sigma}{u} * 100$$

Con el propósito de asegurar la confiabilidad de los datos, se ha optado por analizarlos empleando la desviación estándar y el coeficiente de variación, tomando en consideración los valores consignados en la Tabla 31.

Tabla 31*Coefficiente de variación y desviación estándar*

Dispersión total					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes grados de control (kg/cm ²)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en obra	menor a 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	mayor a 49.2
Concreto en laboratorio	menor a 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	mayor a 24.6

Dispersión entre testigos					
Clase de operación	Coeficiente de variación para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en obra	menor a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	mayor a 6
Concreto en laboratorio	menor a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	mayor a 5

Nota: Recuperado de (Pasquel, 1998).

3.12.2. Prueba de hipótesis

Beltran (2012), indica que “establecer con total certeza la veracidad o falsedad de una hipótesis estadística resulta inalcanzable, dado que tal objetivo requeriría considerar la totalidad de la población. En su lugar, se emplea una muestra aleatoria representativa de la población en estudio y se analizan los datos para respaldar o refutar la hipótesis. Si la evidencia de la muestra contradice la hipótesis, se procede al rechazo; si la respalda, se efectúa su aceptación” (p. 44). A esta proposición se le denomina hipótesis y el procedimiento de tomar decisiones al respecto se conoce como prueba de hipótesis.

Además, Beltrán & Barbona (2019) indican que “en toda prueba o contraste estadístico se pone en competencia dos hipótesis implícitas sobre la población en estudio. Estas hipótesis se denominan Hipótesis Nula e Hipótesis Alternativa. La hipótesis nula, denotada por H_0 , es la creencia convencional o status quo sobre una población, mientras



que la hipótesis alternativa, denotada por H_a , es una alternativa a la hipótesis nula, generalmente es el cambio en la población que el investigador está buscando” (p. 7).

Antes de utilizar la prueba de hipótesis, es fundamental verificar si los datos siguen una distribución normal. Este requisito se verifica mediante un análisis estadístico con el propósito de evaluar de manera precisa las hipótesis planteadas.

Según Isidro (2017), el procedimiento para realizar la prueba de hipótesis es la siguiente:

a) Se identifica el parámetro de interés:

En el contexto de este estudio, el parámetro de interés es la resistencia promedio a la compresión y flexión del concreto en cada grupo investigado, el cual será representada como “ μ ”.

b) Se establece la hipótesis nula (H_0):

Dentro de este estudio, se formula la hipótesis nula $H_0: \mu_1 \geq \mu_2$.

c) Se especifica la hipótesis alternativa (H_a):

En el contexto de este estudio se formula, $H_a: u_1 < u_2$.

- $H_a: \mu_1 > \mu_2$, unilateral a la derecha
- $H_a: \mu_1 < \mu_2$, unilateral a la izquierda

d) Se selecciona el nivel de significancia (α):

- $\alpha = 0.10$ con un nivel de confianza del 90%
- $\alpha = 0.05$ con un nivel de confianza del 95%
- $\alpha = 0.01$ con un nivel de confianza del 99%

Flores & Pacompia (2015), indican que el nivel de significancia utilizado con frecuencia para evaluar los resultados de la resistencia del concreto es 0.05, considerando además los grados de libertad (n_1+n_2-2) , los cuales se emplean para determinar el valor crítico “ T_α ” en las tablas estadísticas de la distribución t de Student. (ANEXO 6).

e) Se selecciona el estadístico de prueba:

Para llevar a cabo la prueba de hipótesis, se emplea el estadístico de prueba basado en la distribución t de Student, debido a que se trata de variables cuantitativas independientes y el tamaño muestral es inferior a 30.

Procedimiento de cálculo:

$$t_p = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad ; \quad S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Donde:

t_p : Estadístico de prueba

n_1, n_2 : Tamaño de las muestras.

\bar{X}_1, \bar{X}_2 : Media de las muestras.

S_1^2, S_2^2 : Varianza de las muestras.

f) Se establece la región de rechazo para el estadístico:

$H_0: \mu_1 \geq \mu_2$; $H_a: \mu_1 < \mu_2$

Entonces se rechaza H_0 , si $t_p < -t_\alpha$ “ t_α toma valores negativos debido a que se trata de una hipótesis unilateral a la izquierda”.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO DEL CONCRETO

4.1.1. Ensayo de asentamiento

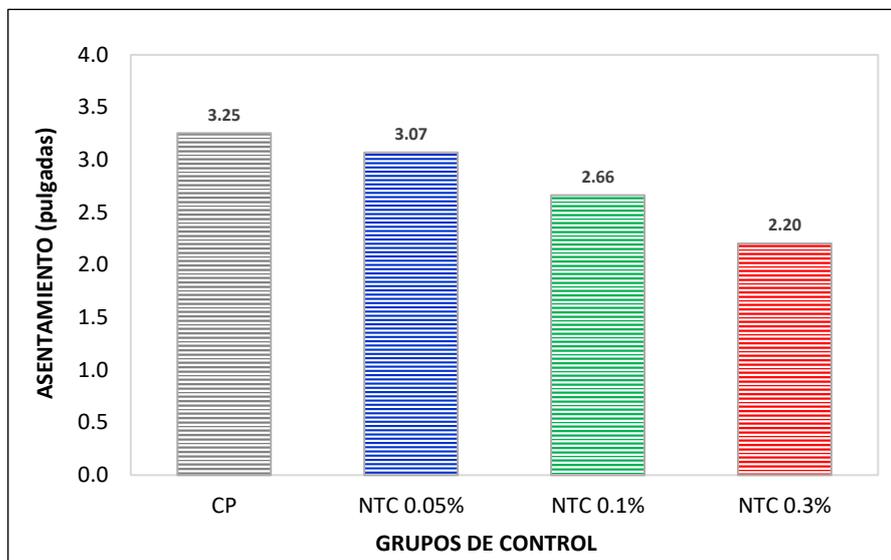
Tabla 32

Resultados del asentamiento de mezcla de concreto

Descripción	Denotación	Fecha de elaboración	Slump (cm)	Slump promedio	
				(cm)	(pulgadas)
Concreto con 0.00% de nanotubos de carbono	CP	30/03/2023	8.10	8.27	3.25
			8.50		
			8.20		
Concreto con 0.05% de nanotubos de carbono	CNTC 0.05%	01/04/2023	7.80	7.80	3.07
			8.00		
			7.60		
Concreto con 0.1% de nanotubos de carbono	CNTC 0.1%	03/04/2023	6.70	6.77	2.66
			7.20		
			6.40		
Concreto con 0.3% de nanotubos de carbono	CNTC 0.3%	05/04/2023	5.60	5.60	2.20
			5.40		
			5.80		

Figura 22

Influencia del porcentaje de NTC en el asentamiento



Los resultados del ensayo de asentamiento concreto fresco se presentan en la Tabla 32. Por otra parte, de la Figura 22, se evidencia que, a mayor proporción de nanotubos de carbono en la mezcla de concreto, presenta una disminución significativa en el asentamiento, que varía entre el 5.6% y el 32.3%. El concreto patrón (CP) presentó el mayor asentamiento con 3.25 pulgadas, mientras que el CNTC 0.3% mostró el asentamiento más bajo con 2.20 pulgadas, lo que indica que es poco trabajable.

Los resultados obtenidos concuerdan con la propiedad de área específica de los NTC, lo que les otorga una capacidad significativa de absorber agua. De este modo, a medida que la proporción de NTC en la mezcla se incrementa, la trabajabilidad disminuye.

4.2. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO DEL CONCRETO

4.2.1. Resistencia a compresión del concreto

Se llevó a cabo el ensayo de la resistencia a la compresión conforme a la norma ASTM C39. Los resultados obtenidos en el laboratorio están documentados en las Tablas 33 a 36. Cada una de estas tablas proporciona información sobre el código asignado a cada muestra, la edad en que se realizó el ensayo, la carga aplicada, el área de la cara superior del espécimen cilíndrico y la resistencia calculada. Para una presentación más detallada, se puede consultar el ANEXO 4.

Tabla 33

Resistencia a compresión del concreto patrón (CP)

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CP - 01	7	12788	87.42	210	146.28		
CP - 02	7	13333	88.41	210	150.81		
CP - 03	7	12026	82.68	210	145.45		
CP - 04	7	11771	82.84	210	142.09	146.51	69.77%
CP - 05	7	13356	86.76	210	153.94		
CP - 06	7	12824	87.91	210	145.88		
CP - 07	7	12383	87.75	210	141.12		
CP - 08	28	18240	87.09	210	209.44		
CP - 09	28	19380	86.76	210	223.37		
CP - 10	28	18772	86.59	210	216.79		
CP - 11	28	18626	87.09	210	213.87	217.59	103.61%
CP - 12	28	19662	87.25	210	225.35		
CP - 13	28	18790	86.92	210	216.18		
CP - 14	28	19141	87.75	210	218.13		

Tabla 34

Resistencia a compresión con 0.05% de nanotubos de carbono (CNTC 0.05%)

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CNTC 0.05% - 01	7	14874	87.42	210	170.14		
CNTC 0.05% - 02	7	14593	87.58	210	166.62		
CNTC 0.05% - 03	7	14895	87.42	210	170.38		
CNTC 0.05% - 04	7	15720	87.25	210	180.17	172.04	81.93%
CNTC 0.05% - 05	7	15148	87.25	210	173.62		
CNTC 0.05% - 06	7	14453	87.25	210	165.65		
CNTC 0.05% - 07	7	14608	82.19	210	177.73		
CNTC 0.05% - 08	28	19831	87.42	210	226.85		
CNTC 0.05% - 09	28	20354	87.58	210	232.40		
CNTC 0.05% - 10	28	19891	86.92	210	228.84		
CNTC 0.05% - 11	28	20053	87.91	210	228.11	227.43	108.30%
CNTC 0.05% - 12	28	20524	87.75	210	233.89		
CNTC 0.05% - 13	28	19512	87.58	210	222.79		
CNTC 0.05% - 14	28	19156	87.42	210	219.13		

Tabla 35*Resistencia a compresión con 0.1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%)*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CNTC 0.1% - 01	7	16150	86.76	210	186.15		
CNTC 0.1% - 02	7	16079	87.09	210	184.63		
CNTC 0.1% - 03	7	16293	87.42	210	186.38		
CNTC 0.1% - 04	7	16301	87.09	210	187.17	187.76	89.41%
CNTC 0.1% - 05	7	17189	87.42	210	196.63		
CNTC 0.1% - 06	7	16634	87.25	210	190.65		
CNTC 0.1% - 07	7	16003	87.58	210	182.72		
CNTC 0.1% - 08	28	22293	86.59	210	257.45		
CNTC 0.1% - 09	28	21153	87.09	210	242.89		
CNTC 0.1% - 10	28	21970	86.59	210	253.72		
CNTC 0.1% - 11	28	21752	87.25	210	249.31	249.47	118.80%
CNTC 0.1% - 12	28	21137	86.59	210	244.10		
CNTC 0.1% - 13	28	21589	86.76	210	248.84		
CNTC 0.1% - 14	28	21691	86.76	210	250.01		

Tabla 36

Resistencia a compresión con 0.3% de nanotubos de carbono (CNTC 0.3%)

Descripción	Edad (días)	Lectura del dial (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CNTC 0.3% - 01	7	13857	87.58	210	158.22		
CNTC 0.3% - 02	7	13210	87.75	210	150.54		
CNTC 0.3% - 03	7	13917	87.58	210	158.91		
CNTC 0.3% - 04	7	14180	86.92	210	163.14	156.49	74.52%
CNTC 0.3% - 05	7	13598	87.42	210	155.55		
CNTC 0.3% - 06	7	12926	86.92	210	148.71		
CNTC 0.3% - 07	7	14016	87.42	210	160.33		
CNTC 0.3% - 08	28	20035	87.09	210	230.05		
CNTC 0.3% - 09	28	20462	86.92	210	235.41		
CNTC 0.3% - 10	28	20671	87.25	210	236.92		
CNTC 0.3% - 11	28	20364	87.09	210	233.83	236.75	112.74%
CNTC 0.3% - 12	28	20645	87.25	210	236.62		
CNTC 0.3% - 13	28	21489	88.41	210	243.06		
CNTC 0.3% - 14	28	21098	87.42	210	241.34		

En la Tabla 37 y la Figura 23 se presentan los resultados promedios de la resistencia a compresión a los 7 y 28 días de edad.

Tabla 37

Resistencia promedio a compresión a los 7 y 28 días

Edad (días)	CP		CNTC 0.05%		CNTC 0.1%		CNTC 0.3%	
	kg/cm ²	%						
7	146.51	69.77%	172.04	81.93%	187.76	89.41%	156.49	74.52%
28	217.59	103.61%	227.43	108.30%	249.48	118.80%	236.75	112.74%

Figura 23

Variación en la resistencia a la compresión

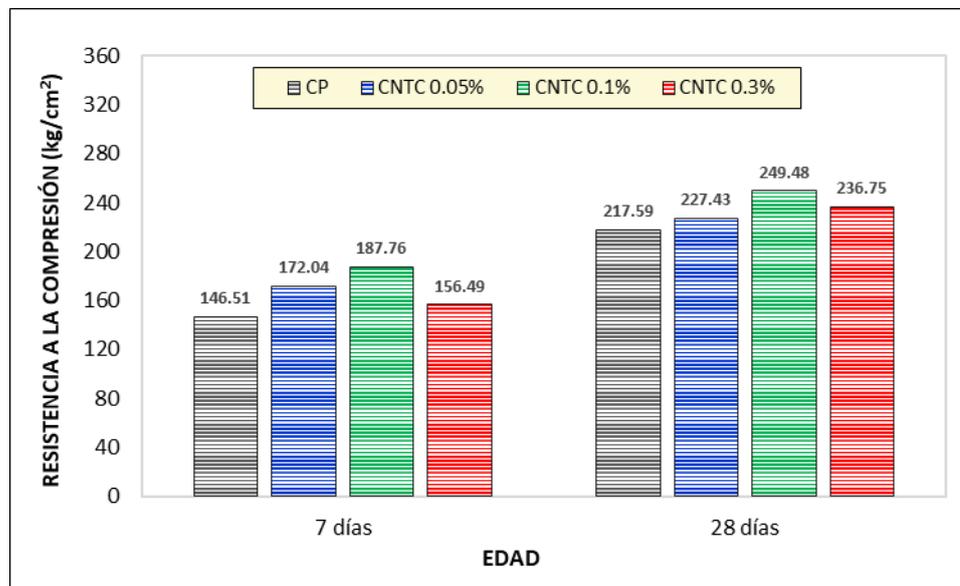
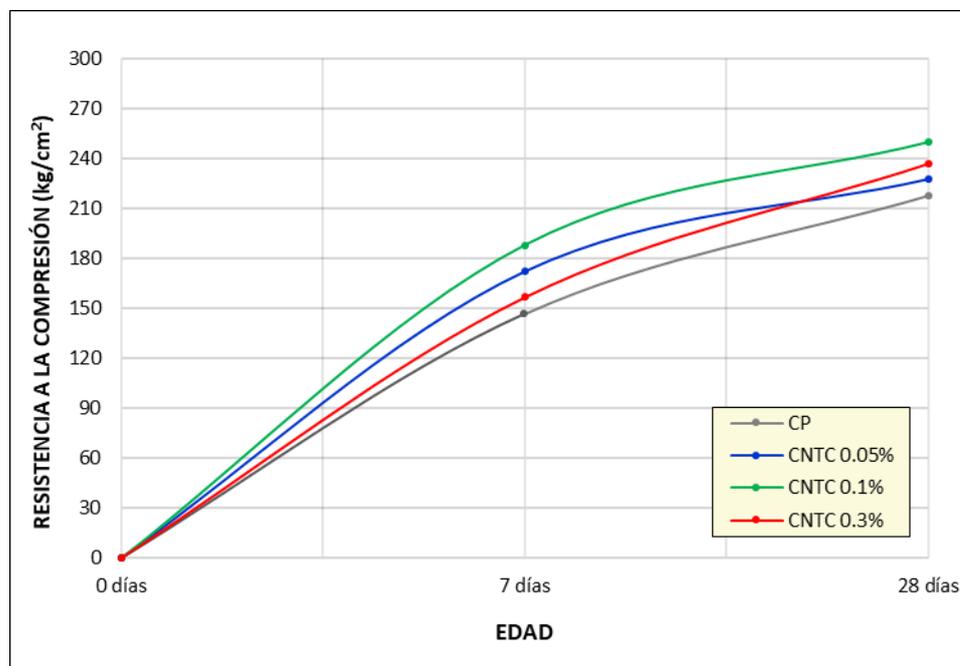


Figura 24

Curva de variación en la resistencia a la compresión



De acuerdo con el análisis de los datos en las Figuras 23 y 24, el concreto patrón (CP) a los 28 días alcanza una resistencia a la compresión de 217.59 kg/cm², superando así la resistencia de diseño de 210 kg/cm². Del mismo modo, las resistencias a compresión

alcanzadas por los grupos CNTC 0.05%, CNTC 0.1% y CNTC 0.3% fueron superiores a las del concreto patrón (CP).

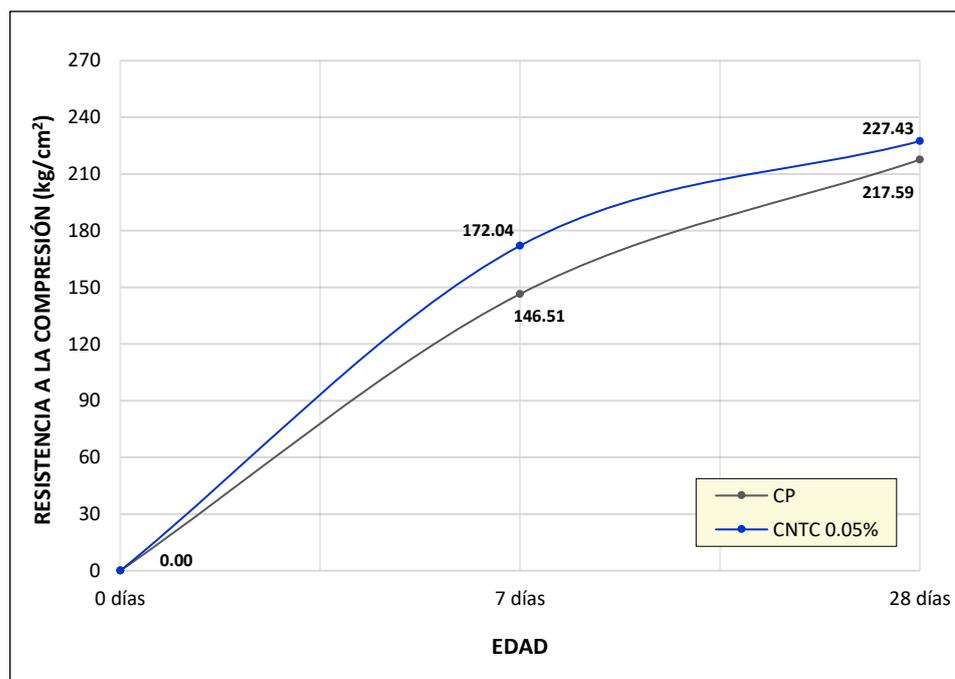
4.2.1.1. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (CP) y CNTC 0.05%

En base a la Figura 25 se puede deducir que, la resistencia a la compresión desarrollada por el concreto patrón (CP) a los 7 días, es de 146.51 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto y a la misma edad adicionado con 0.05% de nanotubos de carbono (CNTC 0.05%), desarrolló una resistencia de 172.04 kg/cm², siendo mayor 17.42% con respecto al (CP).

Además, la resistencia a la compresión desarrollada por el (CP) a los 28 días, es de 217.59 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto y a la misma edad adicionado con 0.05% de nanotubos de carbono (CNTC 0.05%), desarrolló una resistencia de 227.43 kg/cm², siendo mayor 4.52% con respecto al (CP).

Figura 25

Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.05%



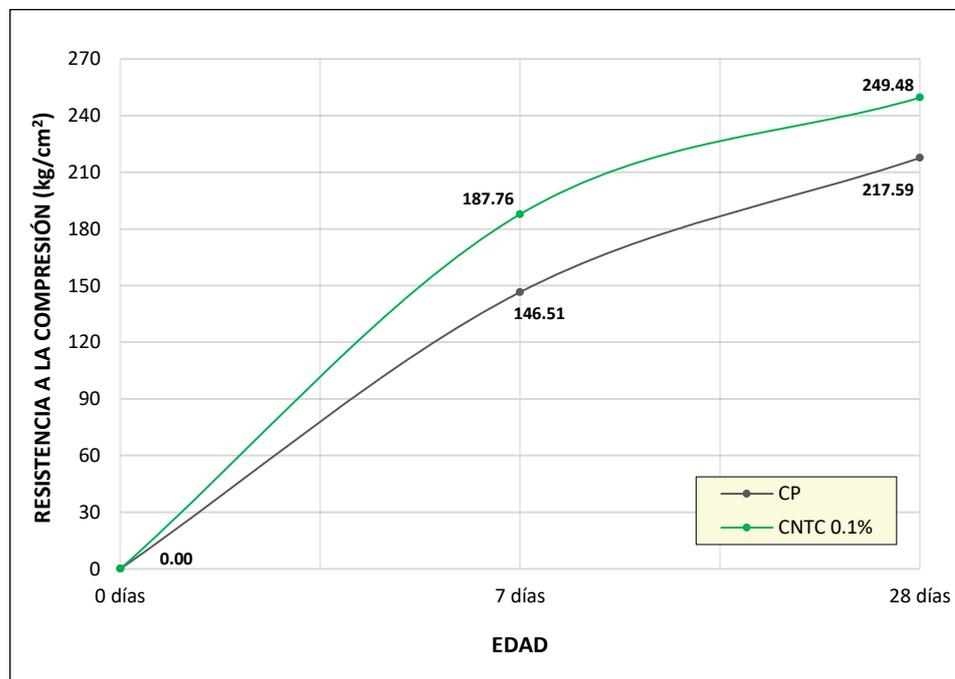
4.2.1.2. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (CP) y CNTC 0.1%

Referente a la Figura 26 se puede deducir que, la resistencia a la compresión desarrollada por el concreto patrón (CP) a los 7 días, es de 146.51 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto y a la misma edad adicionado con 0.1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%), desarrolló una resistencia de 187.76 kg/cm², siendo mayor 28.15% con respecto al (CP).

Además, la resistencia desarrollada por el (CP) a los 28 días, es de 217.59 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto y a la misma edad adicionado con 0.1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%), desarrolló una resistencia de 249.48 kg/cm², siendo mayor 14.65% con respecto al (CP).

Figura 26

Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.1%



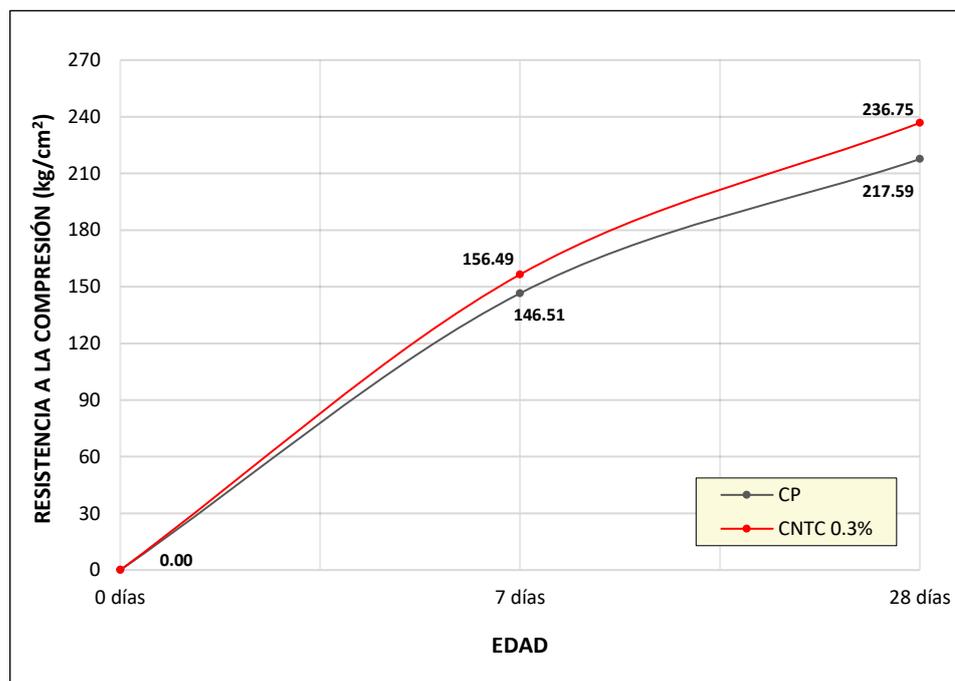
4.2.1.3. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (CP) y CNTC 0.3%

En base a la Figura 27, la resistencia a la compresión desarrollada por el concreto patrón (CP) a los 7 días, es de 146.51 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto y a la misma edad adicionado con 0.3% de nanotubos de carbono (CNTC 0.3%), desarrolló una resistencia de 156.49 kg/cm², siendo mayor 6.81% con respecto al concreto patrón (CP).

Además, La resistencia desarrollada por el (CP) a los 28 días, es de 217.59 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto y a la misma edad, presenta una resistencia de 236.75 kg/cm², lo que representa un aumento del 8.80% respecto al concreto patrón (CP).

Figura 27

Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.3%





Conclusión parcial: Tras analizar los resultados de la resistencia a la compresión con la adición de 0.05%, 0.1% y 0.3% de nanotubos de carbono, mejora la resistencia en todos los casos, con incrementos que oscilaron entre el 4.52% y el 14.65% con respecto a la resistencia desarrollada por el concreto patrón (CP). Asimismo, se determinó que el porcentaje óptimo de nanotubos de carbono fue del 0.1%, ya que esta concentración demostró una mayor resistencia a los 28 días, alcanzando a un valor de 249.48 kg/cm². Por otro lado, tanto el CNTC 0.05% como el CNTC 0.3% superaron la resistencia de diseño de 210 kg/cm², con 227.43 kg/cm² y 238.75 kg/cm², respectivamente. También cabe destacar que, a medida que se incrementa el porcentaje de NTC, la resistencia tiende a disminuir.

4.2.2. Resistencia a compresión del concreto expuesto al congelamiento-deshielo

Los resultados de la resistencia a compresión se determinaron según la norma ASTM C39. Los resultados obtenidos en el laboratorio están documentados en las Tablas 38 a 41.

Tabla 38*Resistencia a compresión del concreto patrón (CP) expuesto al congelamiento-deshielo*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CP - 15	7	11032	86.76	210	127.16		
CP - 16	7	11410	87.75	210	130.03		
CP - 17	7	11605	83	210	139.82		
CP - 18	7	10877	87.25	210	124.66	131.51	62.62%
CP - 19	7	11473	87.75	210	130.75		
CP - 20	7	11601	87.42	210	132.70		
CP - 21	7	11795	87.09	210	135.43		
CP - 22	28	17110	87.42	210	195.72		
CP - 23	28	16550	86.92	210	190.40		
CP - 24	28	17900	87.42	210	204.76		
CP - 25	28	17589	87.25	210	201.59	196.91	93.77%
CP - 26	28	16858	87.42	210	192.84		
CP - 27	28	17081	87.42	210	195.39		
CP - 28	28	17376	87.91	210	197.66		

Tabla 39

Resistencia a compresión con 0.05% de nanotubos de carbono (CNTC 0.05%) expuesto al congelamiento-deshielo

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CNTC 0.05% - 15	7	13566	87.58	210	154.90		
CNTC 0.05% - 16	7	12878	87.42	210	147.31		
CNTC 0.05% - 17	7	12679	82.19	210	154.26		
CNTC 0.05% - 18	7	13178	82.19	210	160.34	155.35	73.97%
CNTC 0.05% - 19	7	12314	81.71	210	150.7		
CNTC 0.05% - 20	7	14328	87.75	210	163.28		
CNTC 0.05% - 21	7	13693	87.42	210	156.63		
CNTC 0.05% - 22	28	18809	87.75	210	214.35		
CNTC 0.05% - 23	28	19019	86.92	210	218.81		
CNTC 0.05% - 24	28	18473	87.09	210	212.11		
CNTC 0.05% - 25	28	18255	87.42	210	208.82	210.79	100.38%
CNTC 0.05% - 26	28	18578	87.25	210	212.93		
CNTC 0.05% - 27	28	17940	87.25	210	205.62		
CNTC 0.05% - 28	28	17805	87.75	210	202.91		

Tabla 40

Resistencia a compresión con 0.1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%) expuesto al congelamiento-deshielo

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CNTC 0.1% - 15	7	13964	87.58	210	159.44		
CNTC 0.1% - 16	7	14260	87.42	210	163.12		
CNTC 0.1% - 17	7	14687	88.25	210	166.42		
CNTC 0.1% - 18	7	14251	86.92	210	163.96	163.98	78.09%
CNTC 0.1% - 19	7	14635	87.42	210	167.41		
CNTC 0.1% - 20	7	13660	87.42	210	156.26		
CNTC 0.1% - 21	7	15056	87.91	210	171.27		
CNTC 0.1% - 22	28	20162	87.09	210	231.51		
CNTC 0.1% - 23	28	20457	86.92	210	235.35		
CNTC 0.1% - 24	28	19950	86.59	210	230.40		
CNTC 0.1% - 25	28	20024	86.92	210	230.37	231.25	110.12%
CNTC 0.1% - 26	28	19713	82.52	210	238.89		
CNTC 0.1% - 27	28	18919	83.00	210	227.94		
CNTC 0.1% - 28	28	18510	82.52	210	224.31		

Tabla 41

Resistencia a compresión con 0.3% de nanotubos de carbono (CNTC 0.3%) expuesto al congelamiento-deshielo

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Área (cm ²)	Resistencia		Resistencia promedio (kg/cm ²)	% resistencia promedio
				diseño (kg/cm ²)	alcanzada (kg/cm ²)		
CNTC 0.3% - 15	7	11893	87.42	210	136.04		
CNTC 0.3% - 16	7	12260	87.25	210	140.52		
CNTC 0.3% - 17	7	12124	87.75	210	138.17		
CNTC 0.3% - 18	7	11441	87.58	210	130.63	137.44	65.45%
CNTC 0.3% - 19	7	11901	87.25	210	136.40		
CNTC 0.3% - 20	7	11182	83.16	210	134.46		
CNTC 0.3% - 21	7	12013	82.35	210	145.88		
CNTC 0.3% - 22	28	17469	83.00	210	210.47		
CNTC 0.3% - 23	28	17629	87.75	210	200.90		
CNTC 0.3% - 24	28	18595	87.09	210	213.51		
CNTC 0.3% - 25	28	18441	87.91	210	209.77	207.78	98.94%
CNTC 0.3% - 26	28	17059	83.32	210	204.74		
CNTC 0.3% - 27	28	18218	87.09	210	209.19		
CNTC 0.3% - 28	28	17996	87.42	210	205.86		

Los resultados promedio de la resistencia a compresión a las edades de 7 y 28 días, tras la exposición al congelamiento-deshielo, se encuentran detallados en la Tabla 42 y la Figura 28.

Tabla 42

Resistencia a la compresión promedio a los 7 y 28 días, expuesto al congelamiento-deshielo

Edad (días)	CP		CNTC 0.05%		CNTC 0.1%		CNTC 0.3%	
	kg/cm ²	%	kg/cm ²	%	kg/cm ²	%	kg/cm ²	%
7	131.51	62.62%	155.34	73.97%	163.98	78.09%	137.44	65.45%
28	196.91	93.77%	210.79	100.38%	231.25	110.12%	207.78	98.94%

Figura 28

Variación en la resistencia a la compresión, expuesto al congelamiento-deshielo

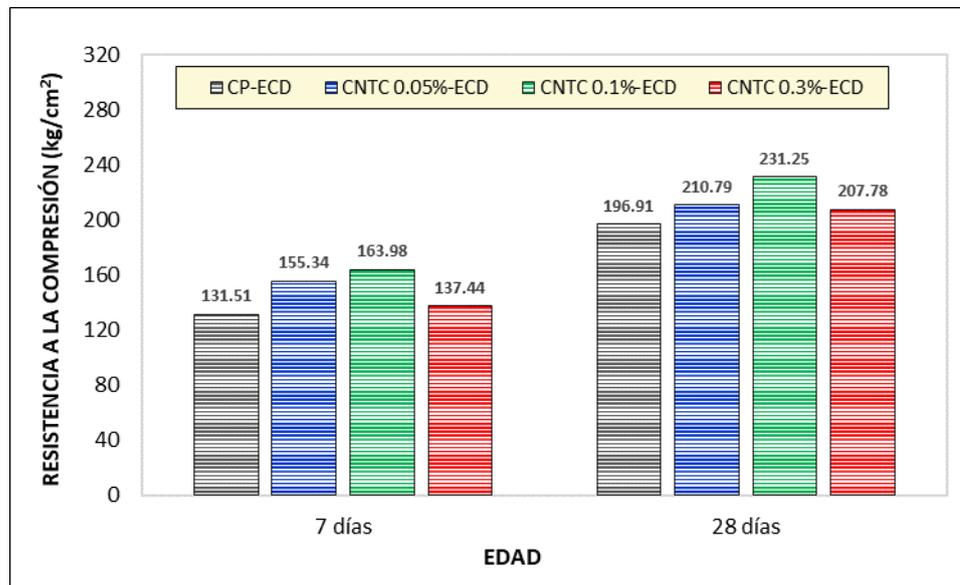
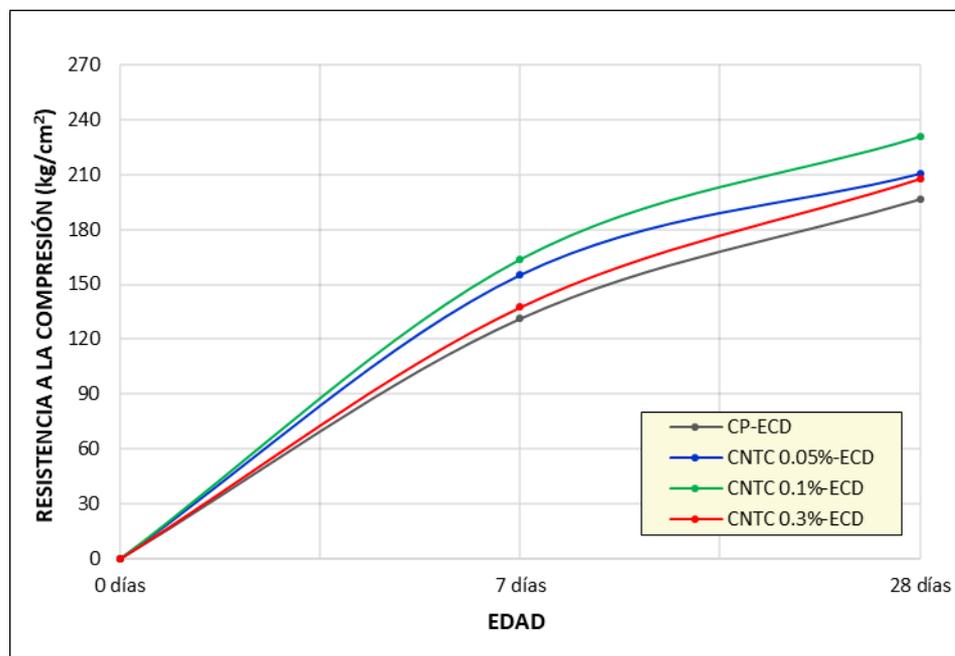


Figura 29

Curva de variación en la resistencia a la compresión, expuesto al congelamiento-deshielo



Basándose en los resultados de las Figuras 28 y 29, se puede observar que el concreto patrón (CP) experimenta una resistencia de 196.91 kg/cm² después de 28 días,



expuesto al congelamiento-deshielo. Sin embargo, esta resistencia no alcanza el valor de diseño de 210 kg/cm^2 . Por otro lado, los valores de resistencia de los grupos CNTC 0.05%, CNTC 0.1% y CNTC 0.3% son superiores a los del concreto patrón (CP), expuesto al congelamiento-deshielo.

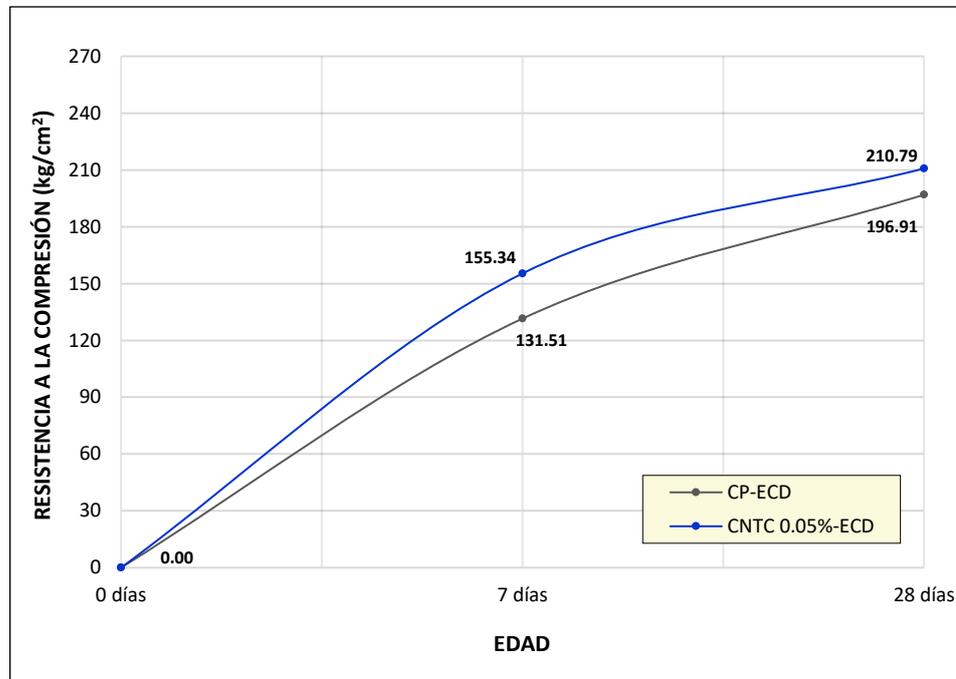
4.2.2.1. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (CP) y CNTC 0.05% expuestos al congelamiento-deshielo

En base a la Figura 30, se puede deducir que el concreto patrón (CP) tiene una resistencia a la compresión de 131.51 kg/cm^2 a los 7 días, expuesto al congelamiento-deshielo. Por otro lado, con la adición de 0.05% de nanotubos de carbono (CNTC 0.05%) expuesto al congelamiento-deshielo, tiene una resistencia de 155.34 kg/cm^2 a la misma edad, mostrando un incremento del 18.12%.

Además, la resistencia obtenida por el concreto patrón (CP) tras ser expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días, presenta un valor de 196.91 kg/cm^2 . Por otro lado, al adicionar un 0.05% de nanotubos de carbono en el mismo concreto (CNTC 0.05%) y exponerlo al congelamiento-deshielo, se obtiene una resistencia de 210.79 kg/cm^2 , lo que representa un aumento del 7.04%.

Figura 30

Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.05% expuestos al congelamiento-deshielo



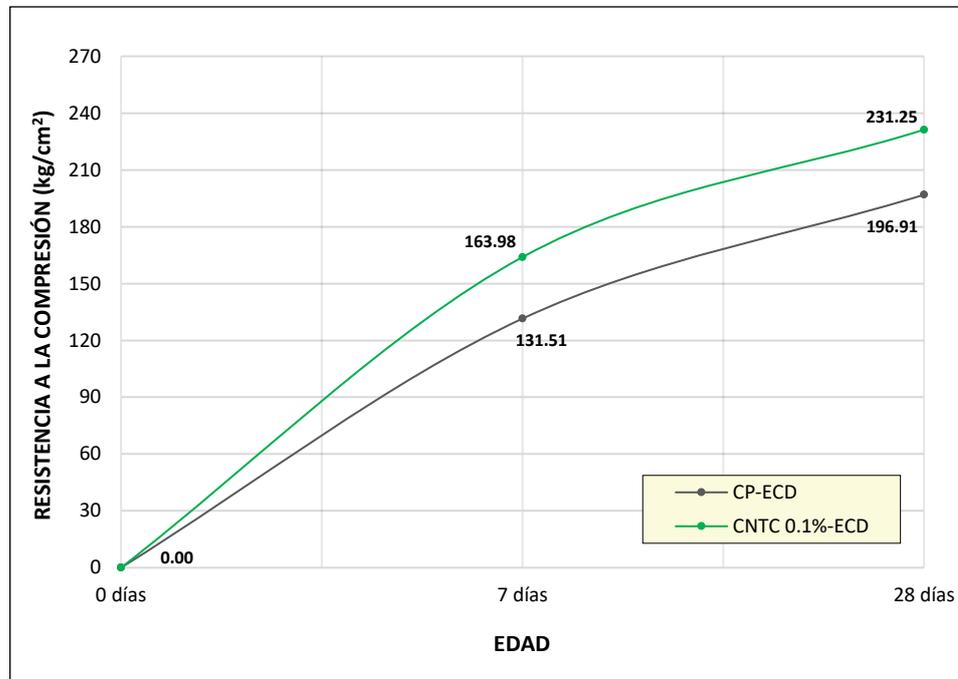
4.2.2.2. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (CP) y CNTC 0.1% expuestos al congelamiento-deshielo

En base a la Figura 31, se puede deducir que el concreto patrón (CP) presenta una resistencia a la compresión de 131.51 kg/cm² a los 7 días, expuesto al congelamiento-deshielo. Por otro lado, con la adición de 0,1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%) expuesto al congelamiento-deshielo, tiene una resistencia de 163.98 kg/cm² a la misma edad, siendo mayor en 24.70%

Asimismo, la resistencia a la compresión desarrollada por el concreto patrón (CP) expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días, es de 196.91 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.1% de nanotubos de carbono (CNTC 0.1%) expuesto al congelamiento-deshielo, desarrolló una resistencia de 231.25 kg/cm², siendo mayor en 17.39%.

Figura 31

Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.1% expuestos al congelamiento-deshielo



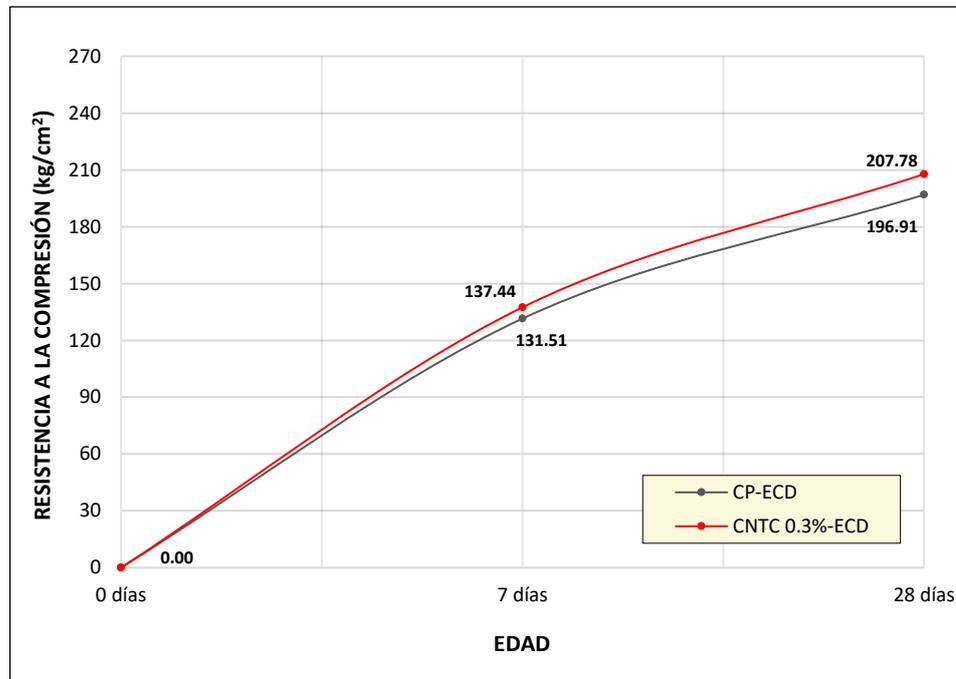
4.2.2.3. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (CP) y CNTC 0.3% expuestos al congelamiento-deshielo

Según la Figura 32, la resistencia a la compresión desarrollada por el concreto patrón (CP) expuesto al congelamiento-deshielo a los 7 días, es de 131.51 kg/cm²; por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.3% de nanotubos de carbono (CNTC 0.3%) expuesto al congelamiento-deshielo, desarrolló una resistencia de 137.44 kg/cm², siendo mayor en 4.50%.

Además, la resistencia a la compresión obtenida por el concreto patrón (CP) tras ser expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días, presenta un valor de 196.91 kg/cm². Por otro lado, al adicionar un 0.3% de nanotubos de carbono en el mismo concreto (CNTC 0.3%) y exponerlo al congelamiento-deshielo, se obtiene una resistencia de 207.78 kg/cm², lo que representa un aumento del 5.52%.

Figura 32

Variación en la resistencia a la compresión entre CP y CNTC 0.3% expuestos al congelamiento-deshielo



Conclusión parcial: Tras ser analizados los resultados de la resistencia a la compresión, que incluían porcentajes de 0.05%, 0.1% y 0.3% de NTC y expuestos al congelamiento-deshielo, se observó un aumento de la resistencia en todos los casos. Esta mejora varía desde un 5.52% hasta un 17.39% en comparación con la resistencia alcanzada por el concreto patrón (CP) expuesto al congelamiento-deshielo. Cabe destacar que la proporción óptima de nanotubos de carbono fue del 0,1%, ya que logró la mayor resistencia a compresión tras 28 días expuesto al congelamiento-deshielo, con un valor de 231,25 kg/cm².

4.2.3. Resistencia a flexión del concreto

Se llevó a cabo las pruebas de la resistencia a la flexión conforme a la norma ASTM C293. Los resultados obtenidos en el laboratorio están documentados en las Tablas 43 a 46. Cada una de estas tablas proporciona información sobre el código

asignado a cada muestra, la edad en que se realizó el ensayo, la carga aplicada, base y altura cada espécimen prismático, distancia entre apoyos y la resistencia calculada. Para una presentación más detallada, se puede consultar el ANEXO 5.

Tabla 43

Resistencia a la flexión del concreto patrón (VP)

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VNTC 0.05% - 01	14	1087	10.10	10.13	30.00	47.21	
VNTC 0.05% - 02	14	957	10.10	10.09	30.00	41.87	
VNTC 0.05% - 03	14	999	10.04	10.04	30.00	44.42	44.13
VNTC 0.05% - 04	14	944	10.03	10.01	30.00	42.24	
VNTC 0.05% - 05	14	1014	10.05	10.06	30.00	44.89	
VNTC 0.05% - 06	28	1201	10.01	10.01	30.00	53.91	
VNTC 0.05% - 07	28	1126	10.03	10.01	30.00	50.41	
VNTC 0.05% - 08	28	1092	10.03	10.02	30.00	48.84	51.25
VNTC 0.05% - 09	28	1128	10.03	10.03	30.00	50.27	
VNTC 0.05% - 10	28	1212	10.11	10.11	30.00	52.80	

Tabla 44*Resistencia a la flexión con 0.05% de nanotubos de carbono (VNTC 0.05%)*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VNTC 0.05% - 01	14	1087	10.10	10.13	30.00	47.21	
VNTC 0.05% - 02	14	957	10.10	10.09	30.00	41.87	
VNTC 0.05% - 03	14	999	10.04	10.04	30.00	44.42	44.13
VNTC 0.05% - 04	14	944	10.03	10.01	30.00	42.24	
VNTC 0.05% - 05	14	1014	10.05	10.06	30.00	44.89	
VNTC 0.05% - 06	28	1201	10.01	10.01	30.00	53.91	
VNTC 0.05% - 07	28	1126	10.03	10.01	30.00	50.41	
VNTC 0.05% - 08	28	1092	10.03	10.02	30.00	48.84	51.25
VNTC 0.05% - 09	28	1128	10.03	10.03	30.00	50.27	
VNTC 0.05% - 10	28	1212	10.11	10.11	30.00	52.80	

Tabla 45*Resistencia a la flexión con 0.1% de nanotubos de carbono (VNTC 0.1%)*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VNTC 0.1% - 01	14	1039	10.06	10.06	30.00	45.91	
VNTC 0.1% - 02	14	1109	10.02	10.07	30.00	49.15	
VNTC 0.1% - 03	14	1065	10.01	10.06	30.00	47.28	48.21
VNTC 0.1% - 04	14	1115	10.02	10.03	30.00	49.74	
VNTC 0.1% - 05	14	1106	10.06	10.05	30.00	48.97	
VNTC 0.1% - 06	28	1243	10.09	10.11	30.00	54.30	
VNTC 0.1% - 07	28	1206	10.07	10.11	30.00	52.74	
VNTC 0.1% - 08	28	1237	10.05	10.06	30.00	54.71	54.22
VNTC 0.1% - 09	28	1191	10.08	10.09	30.00	52.21	
VNTC 0.1% - 10	28	1286	10.04	10.04	30.00	57.14	

Tabla 46

Resistencia a la flexión con 0.3% de nanotubos de carbono (VNTC 0.3%)

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VNTC 0.3% - 01	14	1027	10.08	10.06	30.00	45.32	
VNTC 0.3% - 02	14	1115	10.09	10.08	30.00	48.90	
VNTC 0.3% - 03	14	1107	10.09	10.09	30.00	48.56	46.68
VNTC 0.3% - 04	14	1023	10.07	10.09	30.00	44.94	
VNTC 0.3% - 05	14	1032	10.07	10.05	30.00	45.66	
VNTC 0.3% - 06	28	1107	10.03	10.01	30.00	49.54	
VNTC 0.3% - 07	28	1222	10.10	10.06	30.00	53.78	
VNTC 0.3% - 08	28	1222	10.11	10.10	30.00	53.32	52.37
VNTC 0.3% - 09	28	1125	10.01	10.02	30.00	50.37	
VNTC 0.3% - 10	28	1224	10.02	10.01	30.00	54.84	

Tabla 47

Resistencia promedio a la flexión a los 14 y 28 días

Edad (días)	VP	VNTC 0.05%	VNTC 0.1%	VNTC 0.3%
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
14	44.89	44.13	48.21	46.68
28	50.86	51.25	54.22	52.37

Figura 33

Variación en la resistencia a la flexión

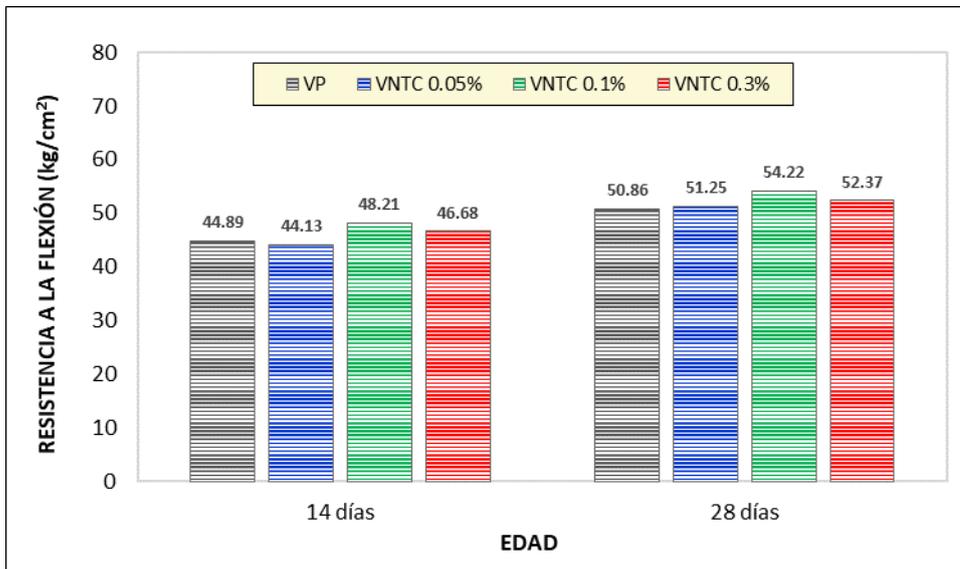
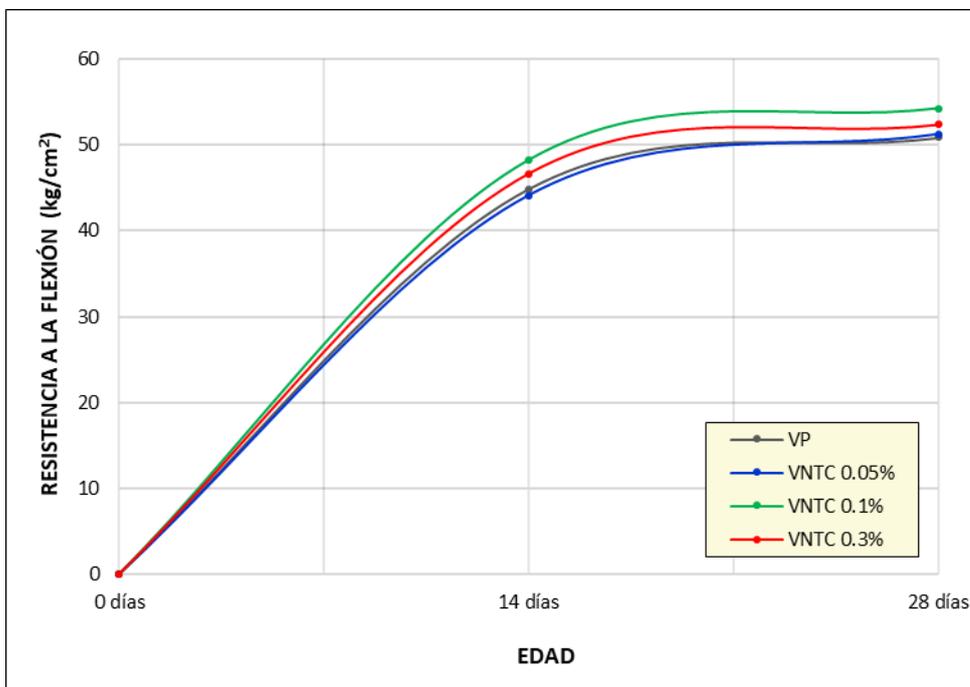


Figura 34

Curva de variación en la resistencia a la flexión



De acuerdo con el análisis de los datos en las Figuras 33 y 34, el concreto patrón (VP) a los 28 días alcanza una resistencia a la flexión de 50.86 kg/cm². Del mismo modo,



las resistencias a flexión alcanzadas por los grupos VNTC 0.05%, VNTC 0.1% y VNTC 0.3% fueron superiores a las del concreto patrón (VP).

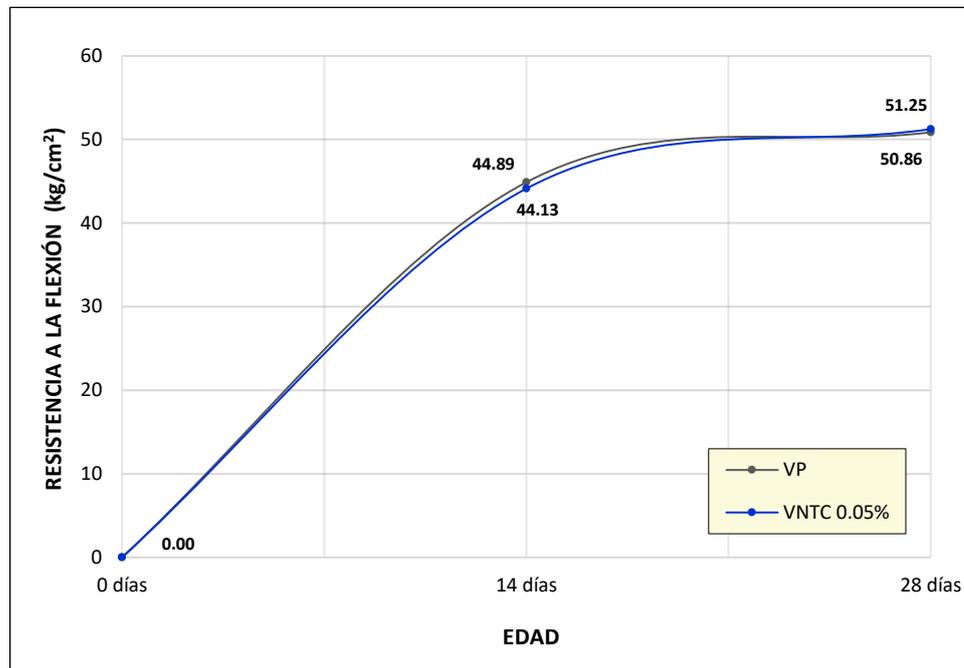
4.2.3.1. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (VP) y VNTC 0.05%

En base a la Figura 35, se puede deducir que el concreto patrón (VP) tiene una resistencia a la flexión de 44.89 kg/cm^2 a los 14 días. Por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.05% de nanotubos de carbono (VNTC 0.05%) tiene una resistencia de 44.13 kg/cm^2 a la misma edad, mostrando una disminución del 1.69% en comparación con el concreto patrón (VP).

A los 28 días, el (VP) tuvo una resistencia de $50,86 \text{ kg/cm}^2$. En comparación, el mismo concreto adicionado con 0.05% de nanotubos de carbono (VNTC 0,05%) y a la misma edad, presenta una resistencia de $51,25 \text{ kg/cm}^2$, lo que representa un aumento del 0,77% respecto al concreto patrón (VP).

Figura 35

Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.05%



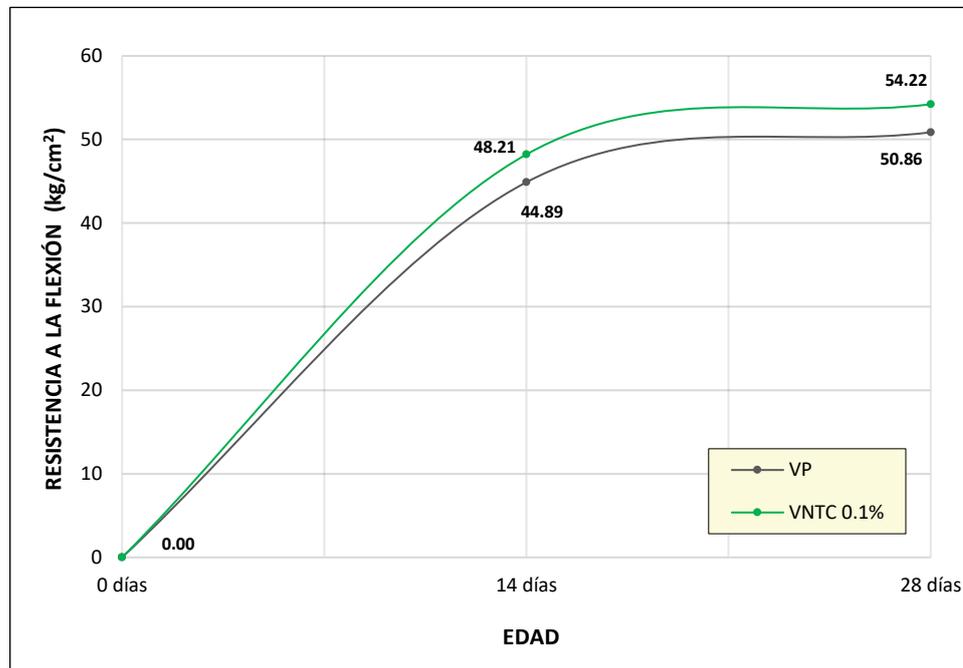
4.2.3.2. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (VP) y VNTC 0.1%

Referente a la Figura 36, el concreto patrón (VP) presenta una resistencia a la flexión de 44.89 kg/cm² a los 14 días. Por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.1% de nanotubos de carbono (VNTC 0.1%) tiene una resistencia de 48.21 kg/cm² a la misma edad, mostrando un incremento de 7,39% en comparación con el concreto patrón (VP).

A los 28 días, el (VP) tuvo una resistencia de 50,86 kg/cm². En comparación, el mismo concreto, con la adición de 0.1% de nanotubos de carbono (VNTC 0.1%) y a la misma edad, presenta una resistencia de 54.22 kg/cm², lo que representa un aumento de 6.60% respecto al concreto patrón (VP).

Figura 36

Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.1%



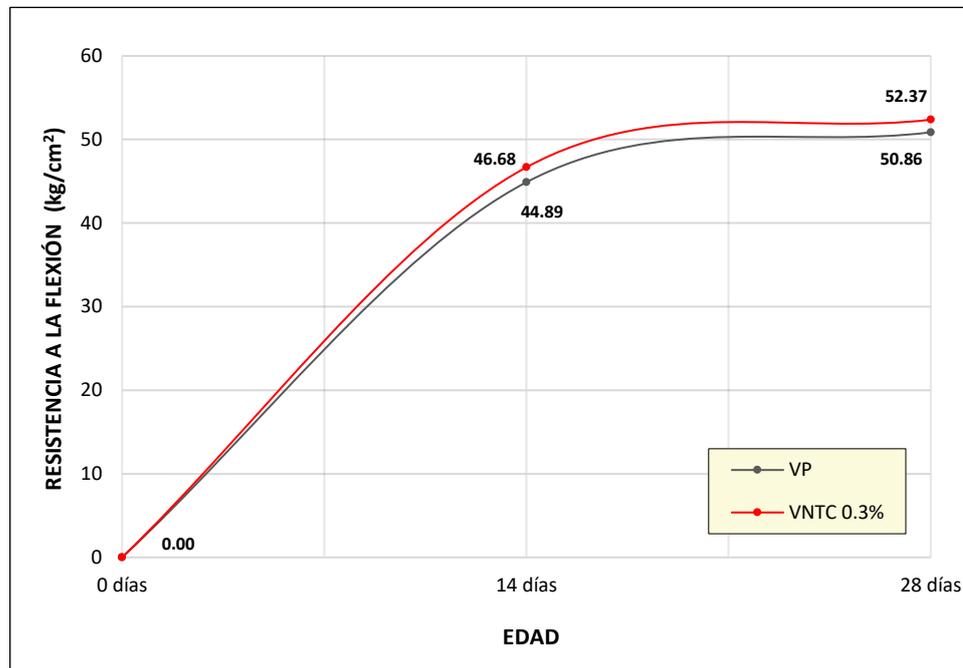
4.2.3.3. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (VP) y VNTC 0.3%

En base a la Figura 37, se puede deducir que el concreto patrón (VP) tiene una resistencia a la flexión de 46,68 kg/cm² a los 14 días. Por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.3% de nanotubos de carbono (VNTC 0.3%) tiene una resistencia de 48.21 kg/cm² a la misma edad, mostrando un incremento de 7.39% en comparación con el concreto patrón (VP).

A los 28 días, el (VP) tuvo una resistencia a la flexión de 50.86 kg/cm². En comparación, el mismo concreto, con la adición de 0.3% de nanotubos de carbono (VNTC 0.3%) y a la misma edad, presenta una resistencia de 52,37 kg/cm², lo que representa un aumento de 2.96% en relación al (VP).

Figura 37

Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.3%



Conclusión parcial: Tras analizar los resultados del ensayo de resistencia a la flexión al adicionar 0.05%, 0.1% y 0.3% de nanotubos de carbono, se observa una mejora parcial en la resistencia a la flexión, con incrementos que oscilaron entre el 0.77% y el 6.60% con respecto a la resistencia desarrollada por el concreto patrón (VP). Asimismo, se determinó que el porcentaje óptimo de nanotubos de carbono fue del 0.1%, ya que esta concentración demostró la mayor resistencia a los 28 días alcanzando a un valor de 54,22 kg/cm². Por otro lado, tanto el VNTC 0.05% como el VNTC 0.3% alcanzaron valores de 227.43 kg/cm² y 238.75 kg/cm² respectivamente.

4.2.4. Resistencia a flexión del concreto expuesto al congelamiento-deshielo

Se llevó a cabo el ensayo de la resistencia a la flexión conforme a la norma ASTM C293. Los resultados obtenidos en el laboratorio están documentados en las Tablas 48 a 51.

Tabla 48*Resistencia a la flexión del concreto patrón (VP) expuesto al congelamiento-deshielo*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VP - 11	14	901	10.07	10.08	30.00	39.63	
VP - 12	14	937	10.09	10.08	30.00	41.12	
VP - 13	14	966	10.09	10.06	30.00	42.61	41.70
VP - 14	14	996	10.10	10.08	30.00	43.63	
VP - 15	14	939	10.08	10.05	30.00	41.51	
VP - 16	28	1179	10.06	10.11	30.00	51.61	
VP - 17	28	1118	10.01	10.07	30.00	49.62	
VP - 18	28	1069	10.03	10.01	30.00	47.83	48.87
VP - 19	28	1115	10.08	10.05	30.00	49.31	
VP - 20	28	1035	10.04	10.04	30.00	45.97	

Tabla 49*Resistencia a la flexión del concreto con 0.05% de nanotubos de carbono (VNTC 0.05%) expuesto al congelamiento-deshielo*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VNTC 0.05% - 11	14	1003	10.08	10.11	30.00	43.83	
VNTC 0.05% - 12	14	938	10.15	10.13	30.00	40.52	
VNTC 0.05% - 13	14	987	10.06	10.06	30.00	43.60	42.42
VNTC 0.05% - 14	14	1009	10.07	10.07	30.00	44.48	
VNTC 0.05% - 15	14	903	10.06	10.09	30.00	39.66	
VNTC 0.05% - 16	28	1192	10.03	10.07	30.00	52.76	
VNTC 0.05% - 17	28	1131	10.04	10.01	30.00	50.62	
VNTC 0.05% - 18	28	1117	10.06	10.05	30.00	49.47	49.64
VNTC 0.05% - 19	28	1098	10.04	10.07	30.00	48.47	
VNTC 0.05% - 20	28	1071	10.07	10.10	30.00	46.88	

Tabla 50

*Resistencia a la flexión del concreto con 0.1% de nanotubos de carbono (VNTC 0.1%)
expuesto al congelamiento-deshielo*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VNTC 0.1% - 11	14	1060	10.01	10.02	30.00	47.46	
VNTC 0.1% - 12	14	1026	10.05	10.08	30.00	45.22	
VNTC 0.1% - 13	14	967	10.08	10.01	30.00	43.10	44.72
VNTC 0.1% - 14	14	985	10.08	10.05	30.00	43.56	
VNTC 0.1% - 15	14	1005	10.07	10.07	30.00	44.27	
VNTC 0.1% - 16	28	1133	10.07	10.04	30.00	50.20	
VNTC 0.1% - 17	28	1152	10.02	10.09	30.00	50.83	
VNTC 0.1% - 18	28	1195	10.03	10.00	30.00	53.57	50.78
VNTC 0.1% - 19	28	1154	10.06	10.05	30.00	51.11	
VNTC 0.1% - 20	28	1088	10.02	10.07	30.00	48.21	

Tabla 51

*Resistencia a la flexión del concreto con 0.3% de nanotubos de carbono (VNTC 0.3%)
expuesto al congelamiento-deshielo*

Descripción	Edad (días)	Carga aplicada (kg)	Base (cm)	Altura (cm)	Distancia entre apoyos (cm)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
VNTC 0.3% - 11	14	1076	10.02	10.01	30.00	48.20	
VNTC 0.3% - 12	14	1050	10.05	10.01	30.00	46.90	
VNTC 0.3% - 13	14	1051	10.05	10.06	30.00	46.56	45.65
VNTC 0.3% - 14	14	976	10.08	10.08	30.00	42.94	
VNTC 0.3% - 15	14	990	10.05	10.08	30.00	43.66	
VNTC 0.3% - 16	28	1117	10.03	10.00	30.00	50.12	
VNTC 0.3% - 17	28	1188	10.04	10.11	30.00	52.11	
VNTC 0.3% - 18	28	1101	10.05	10.04	30.00	48.87	51.24
VNTC 0.3% - 19	28	1154	10.02	10.01	30.00	51.75	
VNTC 0.3% - 20	28	1200	10.03	10.05	30.00	53.34	

Tabla 52

Resistencia promedio a la flexión del concreto a los 14 y 28 días, expuesto al congelamiento-deshielo

Edad (días)	VP	VNTC 0.05%	VNTC 0.1%	VNTC 0.3%
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
14	48.21	44.72	44.72	45.65
28	54.22	50.78	50.78	51.24

Figura 38

Variación en la resistencia a la flexión del concreto expuestos al congelamiento-deshielo

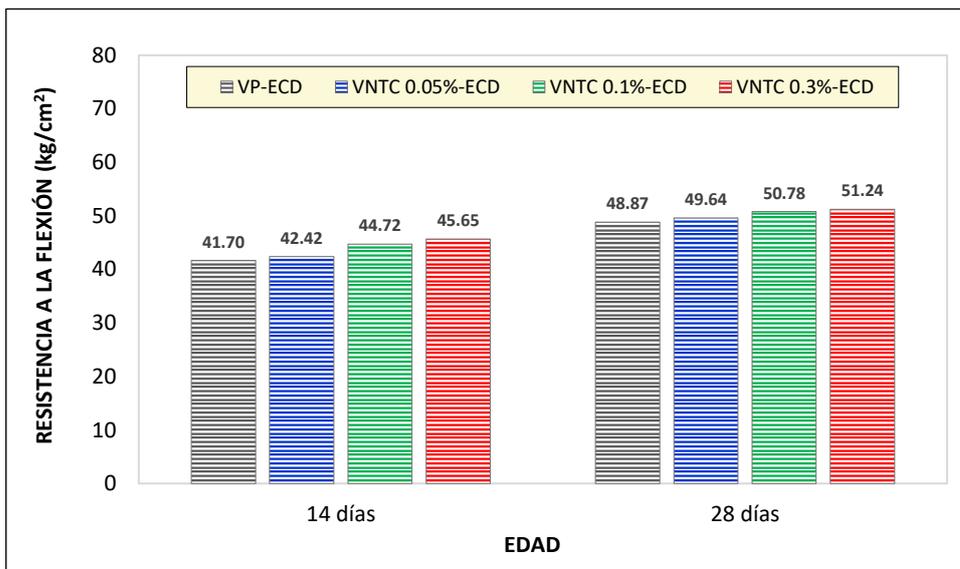
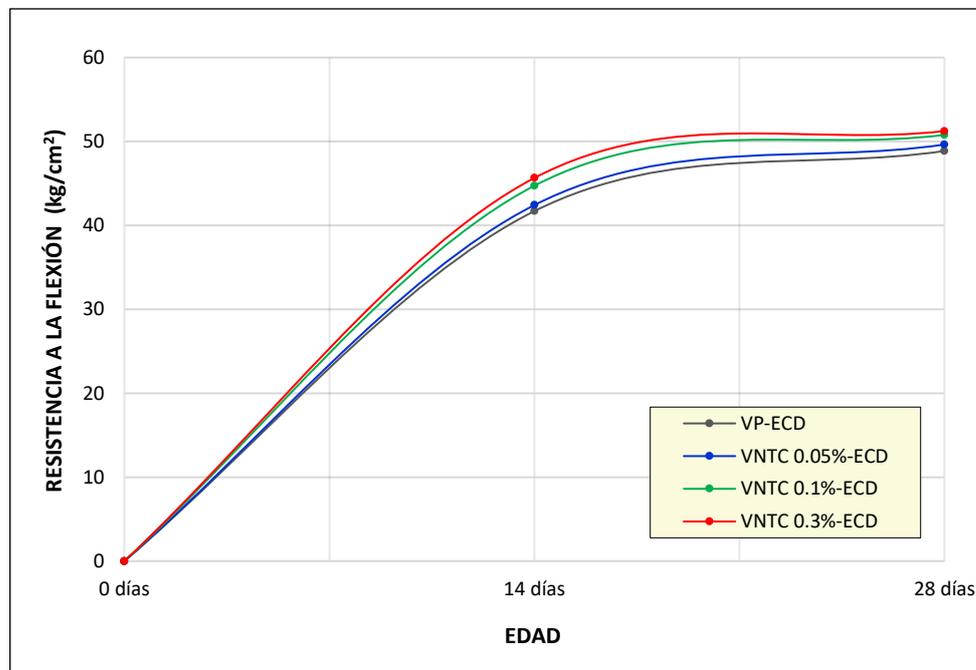


Figura 39

Curva de variación en la resistencia a la flexión del concreto expuestos al congelamiento-deshielo



En base al análisis de datos de las Figuras 38 y 39, se puede observar que el concreto patrón (VP) experimenta una resistencia a la flexión de 48.87 kg/cm^2 después de 28 días, expuesto al congelamiento-deshielo. Por otro lado, los valores de resistencia a la flexión de los grupos VNTC 0.05%, VNTC 0.1% y VNTC 0.3% fueron superiores a los del concreto patrón (VP) expuestos al congelamiento-deshielo.

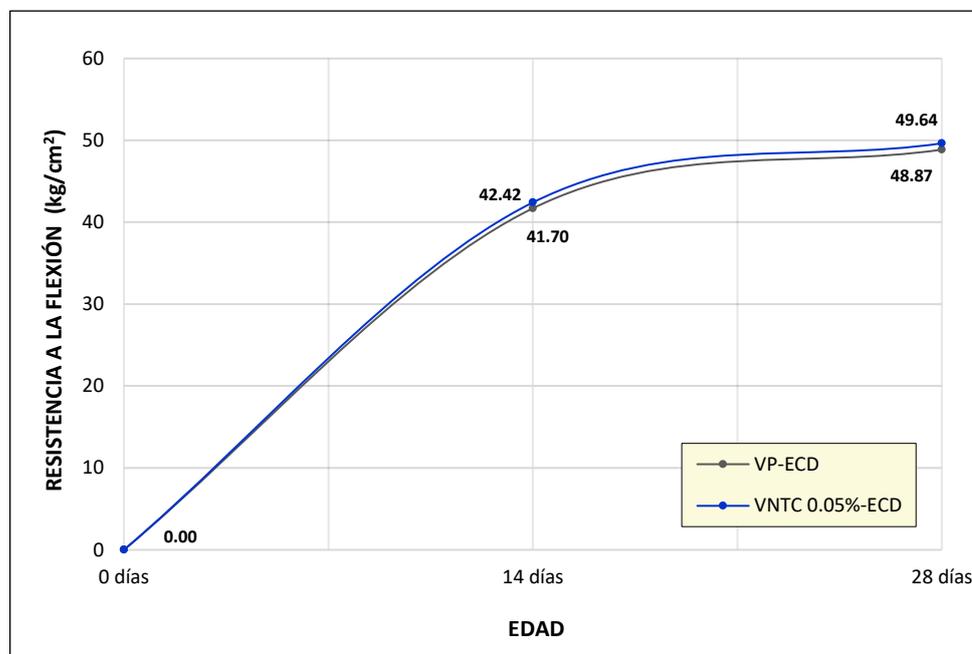
4.2.4.1. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (VP) y VNTC 0.05% expuestos al congelamiento-deshielo

En base a la Figura 40 se puede deducir que, la resistencia a la flexión desarrollada por el concreto patrón (VP) expuesto al congelamiento-deshielo a los 7 días, es de 41.70 kg/cm^2 ; por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.05% de nanotubos de carbono (VNTC 0.05%) expuesto al congelamiento deshielo, desarrolló una resistencia de 42.42 kg/cm^2 , siendo mayor en 1.72%.

Además, la resistencia a la flexión obtenida por el concreto patrón (VP) tras ser expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días, presenta un valor de 48.87 kg/cm^2 . Por otro lado, al adicionar un 0.05% de nanotubos de carbono en el mismo concreto (VNTC .05%) y exponerlo al congelamiento-deshielo, se obtiene una resistencia de 49.64 kg/cm^2 , lo que representa un aumento de 1.57%.

Figura 40

Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.05% expuestos al congelamiento y deshielo



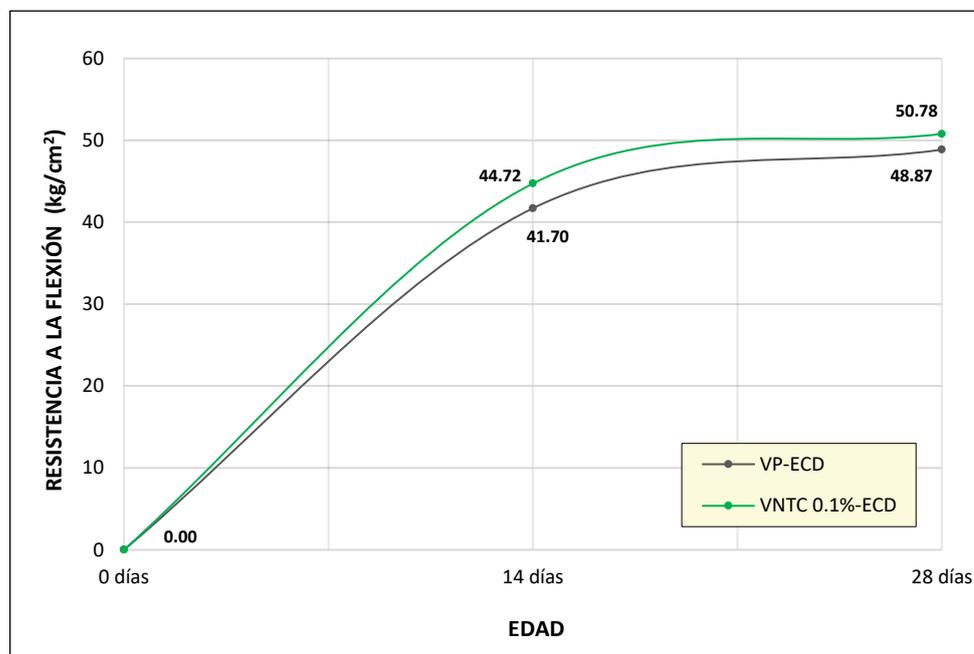
4.2.4.2. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (VP) y VNTC 0.1% expuestos al congelamiento-deshielo

Con respecto a la Figura 41 se puede deducir que, la resistencia a la flexión desarrollada por el concreto patrón (VP) expuesto al congelamiento-deshielo a los 7 días, es de 41.70 kg/cm^2 ; por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.1% de nanotubos de carbono (VNTC 0.1%) expuesto al congelamiento deshielo, desarrolló una resistencia de 44.72 kg/cm^2 , siendo mayor en 7.24%.

Además, la resistencia a la flexión obtenida por el concreto patrón (VP) tras ser expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días, presenta un valor de 48.87 kg/cm^2 . Por otro lado, al adicionar un 0.1% de nanotubos de carbono en el mismo concreto (VNTC 0.1%) y exponerlo al congelamiento-deshielo, se obtiene una resistencia de 50.78 kg/cm^2 , lo que representa un aumento de 3.90%.

Figura 41

Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.1% expuestos al congelamiento y deshielo



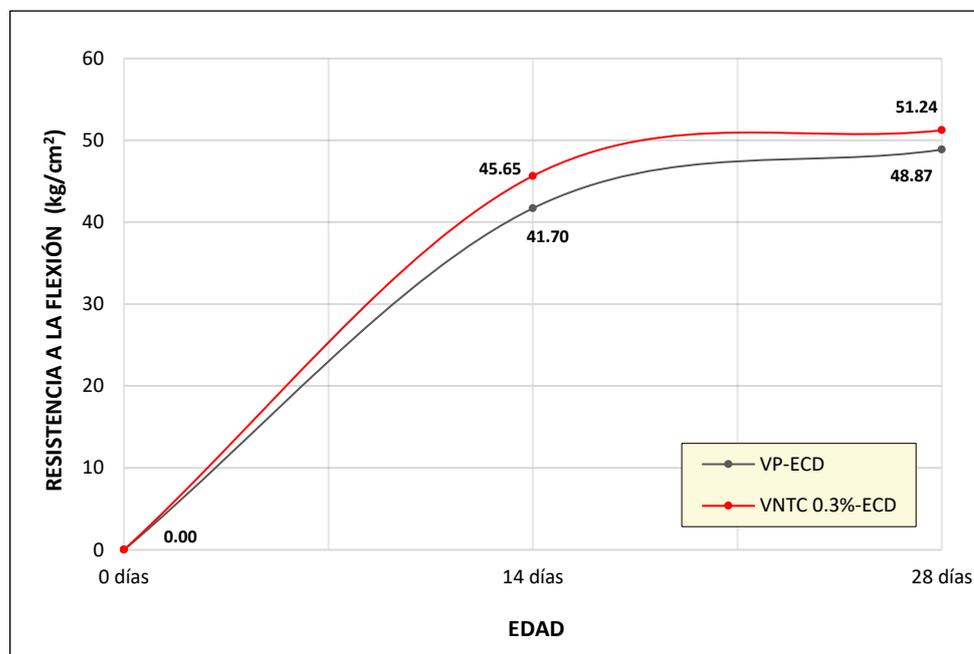
4.2.4.3. Comparativa de resultados entre el concreto patrón (VP) y VNTC 0.3% expuestos al congelamiento-deshielo

Referente a la Figura 42 se puede deducir que, la resistencia a la flexión desarrollada por el concreto patrón (VP) expuesto al congelamiento-deshielo a los 7 días, es de 41.70 kg/cm^2 ; por otro lado, el mismo concreto adicionado con 0.3% de nanotubos de carbono (VNTC 0.3%) expuesto al congelamiento deshielo, desarrolló una resistencia de 45.65 kg/cm^2 , siendo mayor en 9.47%.

Además, la resistencia a la flexión obtenida por el concreto patrón (VP) tras ser expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días, presenta un valor de 48.87 kg/cm^2 . Por otro lado, al adicionar un 0.3% de nanotubos de carbono en el mismo concreto (VNTC 0.3%) y exponerlo al congelamiento-deshielo, se obtiene una resistencia de 51.24 kg/cm^2 , siendo mayor en 4.84%.

Figura 42

Variación en la resistencia a la flexión entre VP y VNTC 0.3% expuestos al congelamiento y deshielo



Conclusión parcial: Luego de analizar los datos del ensayo de resistencia a la flexión, donde se adicionaron cantidades de 0.05%, 0.1% y 0.3% de NTC y expuestos al congelamiento-deshielo, se observó un incremento mínimo de la resistencia. Esta mejora parcial varía desde un 1,57% hasta un 4.84% en comparación con la resistencia alcanzada por el concreto patrón (VP) expuesto al congelamiento-deshielo. Cabe destacar que la proporción óptima de nanotubos de carbono fue del 0.3%, ya que logró la mayor resistencia tras 28 días expuesto al congelamiento-deshielo, con un valor de 51.24 kg/cm^2 .



Además, el VNTC 0.05% y VNTC 0.1% alcanzaron 49.64 kg/cm^2 , 50.78 kg/cm^2 respectivamente.

4.3. ANÁLISIS DE COSTOS DEL CONCRETO

Se realizó el análisis del costo del concreto patrón y del concreto con adiciones de nanotubos de carbono en porcentajes de 0.05%, 0.1% y 0.3%, con el fin de evaluar el impacto económico de agregar nanotubos de carbono a las mezclas. Es importante destacar que en el análisis de costos no se incluyeron los costos de mano de obra ni el equipo utilizado. Se llevó a cabo este análisis considerando el uso de los materiales en la mezcla para una cantidad de un metro cúbico de concreto.

El costo de adquisición de los nanotubos de carbono fue de \$ 211 el kg, tomando en cuenta el tipo de cambio de \$ 1 = S/ 3.81. De este modo, se tiene el costo total de S/ 803,91 por kg.

Tabla 53

Costo del concreto patrón para un metro cúbico

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio unit.	Parcial
Cemento portland- tipo IP	bolsa	8.52	S/ 27.50	S/ 234.30
Agregado fino	m ³	0.232	S/ 44.00	S/ 10.21
Agregado grueso	m ³	0.434	S/ 46.80	S/ 20.31
Agua	m ³	0.193	S/ 4.79	S/ 0.92
Costo para 1 m ³ de concreto				S/ 265.74

Tabla 54*Costo del concreto con adición de 0.05% de NTC para un metro cúbico*

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio unit.	Parcial
Cemento portland- tipo IP	bolsa	8.52	S/ 27.50	S/ 234.30
Agregado fino	m ³	0.232	S/ 44.00	S/ 10.21
Agregado grueso	m ³	0.434	S/ 46.80	S/ 20.31
Nanotubo de carbono	kg	0.181	S/ 803.91	S/ 145.55
Agua	m ³	0.193	S/ 4.79	S/ 0.92
Costo para 1 m ³ de concreto				S/ 411.29

Tabla 55*Costo del concreto con adición de 0.1% de NTC para un metro cúbico*

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio unit.	Parcial
Cemento portland- tipo IP	bolsa	8.52	S/ 27.50	S/ 234.30
Agregado fino	m ³	0.232	S/ 44.00	S/ 10.21
Agregado grueso	m ³	0.434	S/ 46.80	S/ 20.31
Nanotubo de carbono	kg	0.362	S/ 803.91	S/ 291.10
Agua	m ³	0.193	S/ 4.79	S/ 0.92
Costo para 1 m ³ de concreto				S/ 556.84

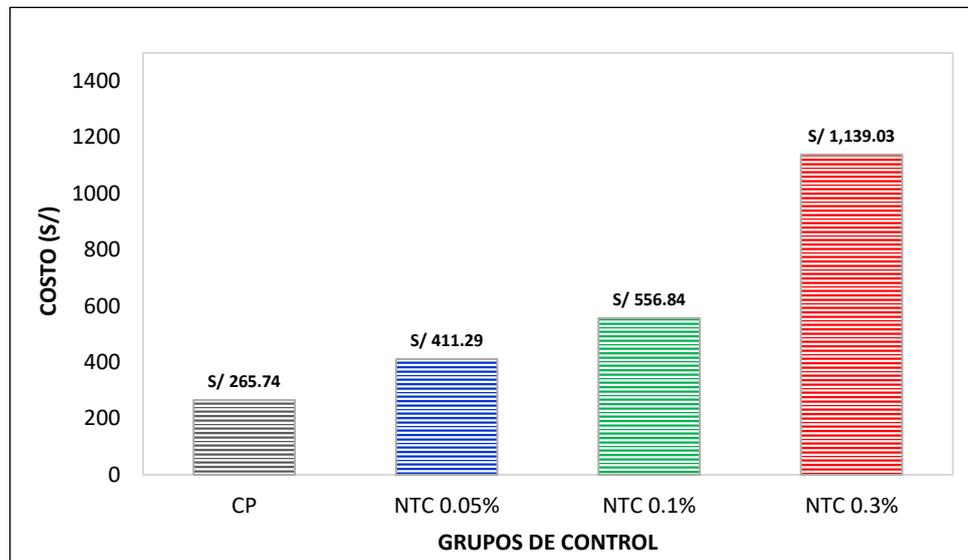
Tabla 56*Costo del concreto con adición de 0.3% de NTC para un metro cúbico*

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Parcial
Cemento portland- tipo IP	bolsa	8.52	S/ 27.50	S/ 234.30
Agregado fino	m ³	0.232	S/ 44.00	S/ 10.21
Agregado grueso	m ³	0.434	S/ 46.80	S/ 20.31
Nanotubo de carbono	kg	1.086	S/ 803.91	S/ 873.29
Agua	m ³	0.193	S/ 4.79	S/ 0.92
Costo para 1 m ³ de concreto				S/ 1,139.03

De acuerdo a los resultados obtenidos desde Tabla 53 hasta la Tabla 56, se muestra la Figura 43.

Figura 43

Comparación del costo de concreto



En base a la Figura 43 se muestra que, a medida que se aumenta la cantidad de nanotubos de carbono, se puede observar un aumento en el costo unitario de los materiales utilizado.

El costo unitario del concreto patrón es de S/ 265.74.

El concreto que contiene un 0.05% de nanotubos de carbono presenta un costo unitario de materiales de S/ 411.29. Esto representa un aumento en el costo del 54.8% en comparación con el concreto patrón.

El concreto con adición de 0.1% de NTC presenta un costo unitario de materiales de S/ 556.84, registrándose un incremento en el costo de 109.5% con respecto al concreto patrón.

El concreto adicionado con 0.3% de nanotubos de carbono presenta un costo unitario de materiales de S/ 1 139.09, registrándose un incremento en el costo de 328.6% en comparación con el concreto patrón.



Conclusión parcial: Se pueden observar aumentos significativos en el costo de materiales que contienen adiciones de nanotubos de carbono, llegando hasta un 328.6% para una adición del 0.3%, en comparación con el costo del concreto patrón, se concluye que la adición de nanotubos de carbono en el concreto incrementa considerablemente el costo unitario de materiales.

4.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.4.1. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión

Según los datos obtenidos del ANEXO 7, en la Tabla 57 se presentan las interpretaciones correspondientes del coeficiente de variación y desviación estándar de cada grupo de control de la resistencia a compresión a los 28 días.

Tabla 57

Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la compresión a los 28 días de edad

Descripción del grupo de control	Interpretación
Coeficiente de variación y desviación estándar del concreto patrón (CP) a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 4.54 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 2.08 se considera muy bueno, debido a que está entre 2.0 a 3.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coeficiente de variación y desviación estándar del CNTC 0.05% a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 4.08 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 1.80 se considera excelente, ya que se encuentra por debajo de 2.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coeficiente de variación y desviación estándar del CNTC 0.1% a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 4.28 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 1.71 también se considera excelente, ya que se encuentra por debajo de 2.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coeficiente de variación y desviación estándar del CNTC 0.3% a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 4.28 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 1.81 también se considera excelente, ya que se encuentra por debajo de 2.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.

Así mismo, en la Tabla 58 se presentan las interpretaciones correspondientes de cada grupo de control para el ensayo de resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días.

Tabla 58

Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días de edad

Descripción del grupo de control	Interpretación
Coeficiente de variación y desviación estándar del concreto patrón (CP) expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 4.28 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 2.17 se considera muy bueno, debido a que está entre 2.0 a 3.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coeficiente de variación y desviación estándar del CNTC 0.05% expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 5.56 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 2.63 se considera muy bueno, debido a que está entre 2.0 a 3.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coeficiente de variación y desviación estándar del CNTC 0.1% expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 4.28 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 1.85 también se considera excelente, ya que se encuentra por debajo de 2.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coeficiente de variación y desviación estándar del CNTC 0.3% expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 4.54 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 2.17 se considera muy bueno, debido a que está entre 2.0 a 3.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.

4.4.2. Análisis estadístico de la resistencia a la flexión

De acuerdo a los datos obtenidos del ANEXO 7, en la Tabla 59 se presentan las interpretaciones correspondientes del coeficiente de variación y desviación estándar de cada grupo de control de las pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días.

Tabla 59

Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la flexión a los 28 días de edad

Descripción del grupo de control	Interpretación
Coefficiente de variación y desviación estándar del concreto patrón (VP) a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 1.67 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.26 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coefficiente de variación y desviación estándar del VNTC 0.05% a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 1.79 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.50 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coefficiente de variación y desviación estándar del VNTC 0.1% a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 1.67 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.05 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coefficiente de variación y desviación estándar del VNTC 0.3% a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 2.00 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.8 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.

Así mismo, en la Tabla 60 se presentan las interpretaciones correspondientes de cada grupo de control para el ensayo de resistencia a la flexión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días.

Tabla 60

Interpretación del coeficiente de variación y desviación estándar para los grupos de control de la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días de edad

Descripción del grupo de control	Interpretación
Coficiente de variación y desviación estándar del concreto patrón (VP) expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 1.67 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.45 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coficiente de variación y desviación estándar del VNTC 0.05% expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 1.67 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.38 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coficiente de variación y desviación estándar del VNTC 0.1% expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 1.67 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.29 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.
Coficiente de variación y desviación estándar del VNTC 0.3% expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.	Según los datos obtenidos, este grupo de control presenta una desviación estándar excelente, esto se debe a que el valor de 1.67 es inferior a 14.1. Además, el coeficiente de variación de 3.25 se considera bueno, debido a que está entre 3.0 a 4.0. Asimismo, según la Campana de Gauss, se infiere que los resultados se adecúan a una distribución normal.

4.5. PRUEBA DE HIPÓTESIS

El propósito de esta prueba es determinar el efecto de los nanotubos de carbono en las propiedades del concreto. Con los datos obtenidos en el laboratorio se realiza una comparación de cada grupo de control a los 28 días, con respecto al concreto patrón, para determinar si los nanotubos de carbono tienen una influencia positiva o negativa en las propiedades del concreto.

4.5.1. Resistencia a la compresión

Según los datos obtenidos del ANEXO 8, en la Tabla 61 se presentan las interpretaciones de las hipótesis nulas, hipótesis alternas y las conclusiones de cada grupo de control para el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

Tabla 61

Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días

	Hipótesis nula	Hipótesis alterna	Est. de prueba	Conclusión
CNTC 0.05%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la compresión.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la compresión.	$t_p = -3.86$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.05%, INCREMENTA la resistencia a compresión del concreto a los 28 días de edad.
CNTC 0.1%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la compresión.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la compresión.	$t_p = -13.47$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.1%, INCREMENTA la resistencia a compresión del concreto a los 28 días de edad.
CNTC 0.3%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la compresión.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la compresión.	$t_p = -8.02$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.3%, INCREMENTA la resistencia a compresión del concreto a los 28 días de edad.

Así mismo, en la Tabla 62 se presentan las interpretaciones de las hipótesis nulas, hipótesis alternas y las conclusiones de cada grupo de control para el ensayo de resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días.

Tabla 62

Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días

	Hipótesis nula	Hipótesis alterna	Est. de prueba	Conclusión
CNTC 0.05%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento - deshielo.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento - deshielo.	$t_p = 0.21$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.05%, INCREMENTA la resistencia a compresión del concreto expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.
CNTC 0.1%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento - deshielo.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento - deshielo.	$t_p = -3.34$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.1%, INCREMENTA la resistencia a compresión del concreto expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.
CNTC 0.3%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento - deshielo.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la compresión expuesto al congelamiento - deshielo.	$t_p = -1.09$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.3%, INCREMENTA la resistencia a compresión del concreto expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.

4.5.2. Resistencia a la flexión

Según los datos obtenidos del ANEXO 8, en la Tabla 63 se presentan las interpretaciones de las hipótesis nulas, hipótesis alternas y las conclusiones de cada grupo de control para el ensayo de resistencia a la flexión a los 28 días.

Tabla 63

Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la flexión a los 28 días

	Hipótesis nula	Hipótesis alterna	Est. de prueba	Conclusión
VNTC 0.05%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la flexión.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la flexión.	$t_p = -3.86$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.05%, NO INCREMENTA la resistencia a flexión del concreto a los 28 días de edad.
VNTC 0.1%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la flexión.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la flexión.	$t_p = -13.47$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.1%, INCREMENTA la resistencia a flexión del concreto a los 28 días de edad.
VNTC 0.3%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la flexión.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la flexión.	$t_p = -8.02$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.3%, NO INCREMENTA la resistencia a flexión del concreto a los 28 días de edad.

Así mismo, en la Tabla 64 se presentan las interpretaciones de las hipótesis nulas, hipótesis alternas y las conclusiones de cada grupo de control para el ensayo de resistencia a la flexión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días.

Tabla 64

Resumen de la prueba de hipótesis de los resultados de la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento-deshielo a los 28 días

	Hipótesis nula	Hipótesis alterna	Est. de prueba	Conclusión
VNTC 0.05%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento - deshielo.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.05 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento - deshielo.	$t_p = 2.55$	Con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.05%, NO INCREMENTA la resistencia a flexión del concreto expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.
VNTC 0.1%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento - deshielo.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.1 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento - deshielo.	$t_p = 1.42$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.1%, NO INCREMENTA la resistencia a flexión del concreto expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.
VNTC 0.3%	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, NO INCREMENTA la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento - deshielo.	La adición de nanotubos de carbono en un 0.3 % a los 28 días de edad, INCREMENTA la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento - deshielo.	$t_p = 3.78$	Con un nivel de significancia de 0.05 y con una confiabilidad del 95%; se concluye que: La adición de nanotubos en un 0.3%, NO INCREMENTA la resistencia a flexión del concreto expuesto al congelamiento - deshielo a los 28 días de edad.

4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Del Slump del concreto

Galán & Nieto (2021), en su investigación indican que para un concreto convencional el Slump es 3.11 pulgadas, pero al adicionarle NTC en 0.05%, 0.10% y 0.15% disminuyen a 3.00, 2.76 y 2.55 pulgadas respectivamente. Asimismo, Apaza & Quispe (2018) señalan con respecto a la trabajabilidad de un concreto normal con cemento Yura Tipo IP y Wari Tipo I, presentan Slump de 7.22 y 9.17 pulgadas respectivamente, pero al adicionarle NTC en 0.05%, 0.10% y 0.15% disminuye a 7.13, 6.33 y 2.83 pulgadas con cemento Yura Tipo IP y 8.53, 8.07 y 7.47 pulgadas con cemento Wari Tipo I. En



nuestro estudio el concreto patrón es trabajable y presentó el mayor asentamiento con 3.25 pulgadas, mientras con adición de 0.05%, 0.1% y 0.3% de NTC presentó una disminución en 3.07, 2.66 y 2.20 pulgadas respectivamente, este último considerándose poco trabajable. Los resultados concuerdan con la propiedad de los NTC de tener un área específica. Debido a esta propiedad, los NTC tienen una gran capacidad para absorber agua, por lo que a medida que se incrementa la cantidad de nanotubos en la mezcla, ésta se vuelve menos manejable, ya que una mayor cantidad de nanotubos absorbe más agua.

- De la resistencia a la compresión

El estudio de Navarro & Forero (2017), indican que la resistencia a compresión del concreto con adición de nanotubos de carbono de 0.3% y 0.5% con respecto al peso del cemento, los resultados obtenidos muestran un aumento 11.7% con una proporción del 0.3% de NTC y un aumento de 10.2% de la resistencia con 0.5% de NTC. Respecto a nuestra investigación, al adicionar NTC en proporciones de 0.05%, 0.1% y 0.3% en el concreto presenta un incremento de 4.52%, 14.65% y 8.80% respectivamente a la edad de 28 días. Además, Ccopa (2017) en su investigación elaboró especímenes de concreto con adición de grafeno de 0.5%, 1% y 1.5% con respecto al peso del cemento, llegando a la conclusión de que el grafeno mejora la resistencia a la compresión en un 26% con respecto al concreto patrón y con una dosis optima de 0.5% de grafeno.

Asimismo, López & Mamani (2017) Al adicionar nanosílice en proporciones de 0.5%, 1% y 1.5% en el concreto, los resultados indican que la resistencia a la compresión más alta se dio con incorporación de 1.5% de nanosílice, mientras tanto, los que fueron sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo presentaron la resistencia a la compresión más alta también con incorporación de 1.5% de nanosílice, teniendo en cuenta que el congelamiento se dio durante 12 horas con temperaturas desde -8°C hasta -15°C y el deshielo también durante 12 horas de forma natural. En nuestro caso al adicionar NTC en



proporciones de 0.05%, 0.1% y 0.3% en el concreto expuesto al congelamiento a una temperatura de $-16 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y deshielo a temperatura ambiente, la resistencia a la compresión tuvo un aumento en 7.04%, 17.39% y 5.52% respectivamente a la edad de 28 días.

- De la resistencia a la flexión

Núñez & Mamani, (2018) con incorporación del polipropileno en un 0.6, 1.2, 1.8 y 2.4 kg/m^3 y aditivo incorporador de aire de 204.3 ml/m^3 ; los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión del concreto normal sometido a ciclos de congelamiento a una temperatura de -25°C fue de 199.12 kg/cm^2 y la resistencia a la flexión (con cargas en los puntos tercios) del concreto normal también sometido a ciclos de congelamiento se obtuvo una resistencia a la flexión de 25.14 kg/cm^2 . En nuestra investigación, a los 28 días de edad y a una temperatura de congelamiento de $-16 \pm 2^{\circ}\text{C}$, la resistencia a la compresión y flexión (con carga en punto medio) del concreto patrón fue de 196.91 kg/cm^2 y 48.87 kg/cm^2 respectivamente. En función a los resultados contrastados, se concluye que la resistencia a la compresión concuerda ya que las diferencias son mínimas, por otro lado, en resistencia a la flexión existen diferencias por el tipo de carga aplicada.

- Del costo de concreto

Teniendo en cuenta que para el análisis de costos no se tomó en consideración la mano de obra ni el equipo utilizado y para 1 m^3 de concreto, Apaza & Quispe (2018) en su investigación indican que el costo del concreto normal fue de S/ 257.76, pero con incorporación de NTC en 0.05%, 0.10% y 0.15% aumenta a S/ 457.77, S/ 657.78 y S/ 857.79 respectivamente. Asimismo, Galán & Nieto (2021), en su estudio indican que para un concreto convencional el costo es de S/ 345.15, pero con la adición de NTC en 0.05%, 0.10% y 0.15% se incrementan a S/ 452.67, S/577.31 y S/ 702.41 respectivamente. En nuestra investigación los costos del concreto patrón (CP) y del concreto con adiciones de



NTC en proporciones de 0.05%, 0.1% y 0.3% fue de S/ 265.74, S/ 411.74, S/ 556.84 y S/ 1139.03 respectivamente. En los resultados se observa un aumento del costo a medida que se incrementa el porcentaje de NTC, las razones por las que los NTC tiende a ser costoso son por el proceso de síntesis complicado en su fabricación y además se requerir tecnologías avanzadas.



V. CONCLUSIONES

CONCLUSIÓN GENERAL

- La adición de nanotubos de carbono en el concreto expuesto al congelamiento, mejora la resistencia a la compresión y parcialmente la resistencia a la flexión. Respecto a la trabajabilidad se ha determinado que presenta una tendencia a la reducción en el Slump a mayor porcentaje de NTC.

CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

- A medida que aumenta el porcentaje de adición NTC al concreto, se produce una disminución significativa en el asentamiento, variando desde 5.6% hasta 32.3%, los NTC presentan una gran capacidad de absorción de agua. es por eso a medida que se incrementa la cantidad de nanotubos en la mezcla, se reduce la trabajabilidad.
- Al adicionar NTC en proporciones de 0.05%, 0.1% y 0.3% en el concreto aumenta la resistencia a la compresión en 227.43 kg/cm², 249.48 kg/cm² y 236.75 kg/cm² respectivamente a la edad de 28 días, además, superaron la resistencia de diseño de 210 kg/cm²; en cuanto a la resistencia a la flexión tuvo un incremento parcial desde 51.25 kg/cm², 54.22 kg/cm² y 52.37 kg/cm² para 0.05%, 0.1% y 0.3% de NTC respectivamente, aceptándose así la primera hipótesis específica planteada.
- Al adicionar NTC en proporciones de 0.05%, 0.1% y 0.3% en el concreto expuesto al congelamiento a una temperatura de $-16 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y deshielo a temperatura ambiente, la resistencia la compresión tuvo un aumento de 210.79 kg/cm², 231.25 kg/cm² y 207.78 kg/cm² respectivamente a la edad de 28 días; asimismo, la resistencia a la flexión expuesto al congelamiento-deshielo



presentó un ligero aumento desde 49.64 kg/cm², 50.78 kg/cm² y 51.24 kg/cm² para 0.05%, 0.1% y 0.3% de NTC respectivamente, aceptándose la hipótesis planteada.

- Finalmente, el costo unitario de materiales que contienen adiciones de NTC, llega hasta un 328.6% para una adición del 0.3%, en comparación con el costo del concreto patrón, se concluye que la adición de nanotubos de carbono en el concreto incrementa considerablemente el costo unitario de materiales.



VI. RECOMENDACIONES

- En la región de Puno la temperatura más baja que se presentó en el año 2022 fue en la localidad de Mazocruz $-23.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, se recomienda el uso de 0.1% de NTC en el concreto ya que presenta un mayor incremento de la resistencia a la compresión.
- Se recomienda el uso de diferentes tipos de nanotubos de carbono y otros nanomateriales, como las nanofibras, para comparar su eficacia en el refuerzo del concreto sometido al congelamiento-deshielo. Además, se deben realizar análisis de costo-beneficio para evaluar la viabilidad económica de la implementación a gran escala de estos materiales.
- Se recomienda elaborar las mezclas de concreto con otros tipos de cementos existentes en el mercado peruano, con el fin de evaluar el efecto de los NTC en las propiedades del concreto.
- Se recomienda investigar el comportamiento de los NTC a altas temperaturas.
- Con respecto al costo, no se recomienda hacer estudios con dosificaciones mayores por el elevado costo de los NTC. El alto costo se debe a la necesidad de importarlos de otros países, y representa un obstáculo significativo para la implementación de esta tecnología a gran escala en nuestro país. Además, su viabilidad se ve limitada tanto por la falta de investigación, así como por el elevado precio.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto C., F. (2009). *Tecnología del concreto* (2a ed.). San Marcos EIRL.
- ACI 306. (2002). *Cold Weather Concreting*. American Concrete Institute.
- Apaza M., V., & Quispe M., K. (2018). *Mejoramiento de propiedades mecánicas del concreto con adición de nanotubos de carbono*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Arapa M., P., & Mamani C., W. W. (2018). *Evaluación de la calidad de los agregados de cuatro canteras aledañas a la ciudad de Juliaca y su influencia en la resistencia del concreto empleado en la construcción de obras civiles*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Arias Gonzáles, J. L. (2020). *Proyecto de tesis Guía para la elaboración* (1a ed.). Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú. www.agogocursos.com
- ASTM C 293/C 293M. (2003). *Método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión del hormigón (utilizando una viga simple con carga en el punto central)*. American Society for Testing and Materials International.
- ASTM C 31/C 31M. (2009). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. American Society Testing and Materials International.
- ASTM C 33/C 33M. (2014). *Especificaciones Normalizadas para Agregados en Concreto*. American Society for Testing and Materials International.
- ASTM C 39. (2018). *Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*. American Society for Testing and Materials International.
- ASTM C 666. (2017). *Método de ensayo estándar para la resistencia del hormigón a la*



- congelación y descongelación rápidas*. American Society Testing and Materials International.
- Beltrán, C., & Barbona, I. (2019). Contribución de la estadística en la investigación. Elementos básicos de inferencia estadística. *Revista de Epistemología y Ciencias Humanas*, 11, 1–14.
<http://rephip.unr.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/2133/14286/revistaepistemologia-r11-3.-c-beltran-i-barbona-2019.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Beltran M., J. (2012). *Introducción a las Pruebas de Hipótesis* (1a ed.). UNAM-MEXICO.
- Ccopa M., H. (2017). *Efecto del grafeno como aditivo nanotecnológico en la resistencia del concreto* [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4534>
- Flores Q., C., & Pacompia C., I. (2015). *Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de plástico para pavimentos $f'c$ 175 kg/cm² en la ciudad de Puno*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Fracica N., G. (1998). *Modelo de simulación en muestreo* (1a ed.). Universidad de la Sabana.
- Galán F., M., & Nieto J., M. (2021). *Propuesta de mejora de la permeabilidad del concreto expuesto a sulfatos mediante el uso de los nanotubos de carbono para obras portuarias, en la provincia constitucional del Callao, Perú*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Hernández S., R., Collado F., C., & Baptista L., P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). Mc Graw Hill Education.
- Huanca S., J., & Auquitas C., G. (2021). *Estadística Básica Descriptiva* (1a ed.).



Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú.

- Isidro P., G. (2017). *Influencia de las fibras de polipropileno en las Propiedades del concreto $f'c$ 210 kg/cm²*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Jany E., J. (2005). *Investigación integral de mercados* (3a ed.). McGraw-Hill.
- Llanos R., D. (2017). *Los nanotubos de carbono como nueva alternativa de aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga o reducir fisuramiento en diseño de pavimentos rígidos con concreto hidráulico*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- López M., E., & Mamani C., J. (2017). *Influencia del nanosílice y superplastificante en la durabilidad del concreto sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo de la ciudad de Puno*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Masías M., K. (2018). *Resistencia a la flexión y tracción en el concreto, usando ladrillo triturado como agregado grueso*. Universidad de Piura.
- MTC. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Navarro J., E., & Forero R., H. (2017). *Mejoramiento de la resistencia a compresión del concreto con Nanotubos de Carbono*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- NRMCA. (2021). *Resistencia a flexión del concreto*. National Ready Mixed Concrete Association.
- NTP 334.090. (2020). *Cementos Hidráulicos Adicionados. Requisitos*. Norma Técnica Peruana.
- NTP 339.088. (2019). *Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Pórtland. Requisitos*. Norma Técnica Peruana.



- NTP 339.183. (2013). *CONCRETO. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio*. Norma Técnica Peruana.
- NTP 400.012. (2018). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*. Norma Técnica Peruana.
- Núñez A., L., & Mamani H., F. (2018). *Influencia del polipropileno y los aditivos incorporadores de aire sometido al congelamiento en las propiedades del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, en la zona altiplánica 2017* [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/8953>
- Oré T., J. (2014). *Manual de preparación, colocación y cuidados del concreto*. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción-SENCICO.
- Pasquel C., E. (1998). *Tópicos de tecnología del concreto en el Perú* (2a ed.). Colegio de Ingenieros del Perú.
- Rivva L., E. (2014). *Diseño de Mezclas* (2a ed.). Fondo editorial ICG.
- RNE. (2022). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Salinas, P. (2012). *Metodología de la investigación científica*. Universidad de los Andes.
- Sota, H. (2017). *Influencia del aditivo sika 1 y agregado chancado en la resistencia a la compresión y propiedades físicas en concreto de baja permeabilidad*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Yana Valencia, G. (2022). *Análisis comparativo de propiedades físico mecánicas del concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ con agua subterránea agua potable, distrito de Juliaca, Puno 2022*. Universidad César Vallejo.



ANEXOS

- ANEXO 1:** Matriz de consistencia
- ANEXO 2:** Propiedades de los agregados
- ANEXO 3:** Diseño de mezcla
- ANEXO 4:** Resultados de la resistencia a la compresión
- ANEXO 5:** Resultados de la resistencia a la flexión
- ANEXO 6:** Tabla de distribución t de Student
- ANEXO 7:** Análisis estadístico
- ANEXO 8:** Prueba de hipótesis
- ANEXO 9:** Ficha técnica de los nanotubos de carbono
- ANEXO 10:** Certificado de calibración de equipos
- ANEXO 11:** Reportes de SENAMHI
- ANEXO 12:** Panel fotográfico



Universidad Nacional del Altiplano
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
DIRECCIÓN DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



ACTA DE DICTAMEN DE REVISIÓN DE BORRADOR DE TESIS

En el local de la sala de Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, siendo las 9:00 horas de la mañana del día 18 de agosto del año 2023, se reunieron los miembros del Jurado Dictaminador:

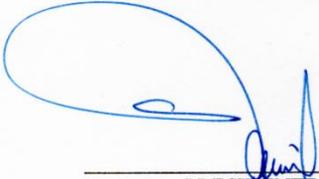
PRESIDENTE : MSc. WALTER HUGO LIPA CONDORI
1er MIEMBRO : MSc. GINO FRANK LAQUE CORDOVA
2do MIEMBRO : Ing. GLENY ZOILA DE LA RIVA TAPIA
DIRECTOR : Dr. SAMUEL HUAQUISTO CÁCERES

Quienes revisaron el borrador de tesis intitulado: "INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO AL CONGELAMIENTO - DESHIELO EN PUNO, 2022" con Código de Proyecto N.º 2022-1867.

Presentado por los bachilleres: JHON FREDDY CALLA PACOMPIA
HENRY SHUMAGER HUANCA MAMANI

El cual ha sido debidamente evaluado de acuerdo al Reglamento de Titulaciones y Normas de la UNA-PUNO, habiéndose emitido las observaciones por parte de los miembros del jurado, siendo absueltas en su oportunidad, en mérito de lo cual la comisión ha considerado la APROBACIÓN del mencionado borrador de Tesis.

El jurado Dictaminador previa coordinación propone ejecutar el Acto de Sustentación y defensa de los bachilleres para el día 08 de septiembre del año 2023 a horas 10:00 a.m. para la exposición y defensa de la tesis en forma presencial, en la Sala de Sustentaciones de la Escuela Profesional. Siendo las 10:15 a.m. horas del mismo día, se dio por concluida la presente reunión de trabajo, firmado para refrendar la presente.



PRESIDENTE



SEGUNDO MIEMBRO



PRIMER MIEMBRO



DIRECTOR



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JHON FREDDY GALLA PACOMPIA
identificado con DNI 70487944 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

“ INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES DEL
CONCRETO EXPUESTO AL CONGELAMIENTO - DESHIELO EN PUNO, 2022 ”

” Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 31 de AGOSTO del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JHON FREDDY CALLA PACOMPIA
identificado con DNI 70487944 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

“ INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES DEL
CONCRETO EXPUESTO AL CONGELAMIENTO - DESHIELO EN PUNO, 2022 ”

” Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 31 de AGOSTO del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo HENRY SHUMAGER HUANCA MAMANI
identificado con DNI 45515440 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES
DEL CONCRETO EXPUESTO AL CONGELAMIENTO - DESHIELO EN PUNO, 2022"

" Es un tema original.

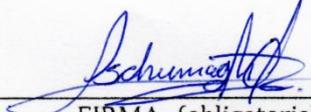
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 31 de AGOSTO del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo HENRY SHUMAGER HUANCA MAMANI
, identificado con DNI 45515440 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES
DEL CONCRETO EXPUESTO AL CONGELAMIENTO-DESHIELO EN PUNO, 2022"

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 31 de AGOSTO del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella