

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“INFLUENCIA DE NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO  
DE MANGANESO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS  
Y MECÁNICAS DEL CONCRETO EN LIMA  
METROPOLITANA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

BRUNO OMAR DORIVAL GUTIERREZ

ID: 0009-0001-1172-8764

ASESORA:

Msc. ANA VICTORIA TORRE CARRILLO

ID: 0000-0002-4531-4033

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados  
“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Dorival Gutierrez, Bruno Omar

[bodorivalg@uni.pe](mailto:bodorivalg@uni.pe)

+51982567670

DEDICATORIA:

*Le dedico el presente trabajo de investigación a mi madre Marta Gutierrez, a mi padre Mario Dorival fallecido el 21 de diciembre del 2022, mis hermanos María Alejandra y Mario, mi sobrina Alba, mis tíos, primos y familia, por su apoyo y confianza en mí.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos mis maestros, que desde la etapa del colegio hasta la universidad influyeron en mi formación tanto académica como personal.

A la Ing. Ana Torre por acompañarme en este trabajo de tesis, con el cual descubrí todo lo referente a la investigación a otro nivel.

A todo el personal del Laboratorio de Ensayo de Materiales “Ing. Manuel Gonzáles de la Coterá” por su apoyo, amabilidad y hospitalidad durante mi estadía en la realización de las mezclas de concreto y ensayos.

A mis padres, Marta Andrea Gutierrez Gutierrez y Mario Alberto Dorival Herencia (†) por su amor, paciencia y confianza, por ser mi ejemplo a seguir y estar siempre conmigo.

A mis hermanos, Maria Alejandra y Mario, por su amor, cariño y comprensión, por ser el impulso que hace que me trace objetivos cada vez más altos, a mi tía Vilma y Carmen por estar pendiente de mi avance en este largo camino y a mi sobrina Alba por ser la luz de esperanza en la familia.

¡Este hito cumplido es por ustedes!  
Bruno Omar Dorival Gutierrez

## ÍNDICE

<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>Prólogo.....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>11</b>
<b>Lista de símbolos y siglas .....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo I: Introducción .....</b>	<b>15</b>
1.1 Generalidades .....	15
1.2 Descripción del problema de investigación .....	17
1.3 Objetivos del estudio .....	17
1.3.1 Objetivo General .....	17
1.3.2 Objetivos Específicos .....	17
1.4 Hipótesis del estudio .....	18
1.4.1 Hipótesis General.....	18
1.4.2 Hipótesis Específicas .....	18
1.5 Metodología.....	18
<b>Capítulo II: Marco teórico y conceptual .....</b>	<b>19</b>
2.1 Marco teórico.....	19
2.2 Marco conceptual .....	20
2.2.1 Nanopartículas .....	20
2.2.2 El Concreto.....	22
2.2.3 Propiedades del concreto en estado fresco .....	26
2.2.4 Propiedades del concreto en estado endurecido .....	28
2.3 Difracción de Rayos X (DRX) .....	32
<b>Capítulo III: Caracterización de los materiales .....</b>	<b>34</b>
3.1 Nanopartículas de Dióxido de Manganeso .....	34
3.1.1 Acondicionamiento de la muestra de NDMA .....	34
3.1.2 Determinación de la composición química y tamaño de cristales de la muestra de NDMA.....	35
3.1.3 Evaluación del PH .....	37
3.1.4 Determinación de la reactividad térmica entre NDMA y pasta de cemento .....	38
3.1.5 Determinación de la densidad de NDMA.....	40
3.1.6 Determinación del área de la superficie específica.....	41
3.2 Aditivo superplastificante .....	42

3.2.1	Características .....	42
3.2.2	Propiedades físicas .....	42
3.3	Cemento Portland tipo I.....	43
3.4	Agregado fino .....	43
3.4.1	Determinación de la Granulometría y Módulo de Finura.....	43
3.4.2	Determinación del Peso Específico .....	45
3.4.3	Determinación del Porcentaje de Absorción .....	46
3.4.4	Determinación del Contenido de Humedad .....	46
3.4.5	Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado .....	47
3.5	Agregado grueso .....	47
3.5.1	Determinación de la Granulometría y Módulo de Finura.....	47
3.5.2	Tamaño Máximo y Tamaño Máximo Nominal.....	49
3.5.3	Determinación del Peso Específico .....	49
3.5.4	Determinación del Porcentaje de Absorción .....	50
3.5.5	Determinación del Contenido de Humedad .....	50
3.5.6	Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado .....	51
3.6	Agua.....	51
<b>Capítulo IV: Diseños de mezcla de concreto .....</b>		<b>53</b>
4.1	Diseños de mezcla de concreto patrón.....	53
4.1.1	Selección de la relación agua – cemento .....	53
4.1.2	Selección del asentamiento.....	53
4.1.3	Selección del tamaño máximo nominal .....	53
4.1.4	Selección del volumen unitario de agua .....	53
4.1.5	Selección del contenido de aire.....	55
4.1.6	Determinación de la cantidad de cemento.....	55
4.1.7	Porcentaje de participación del cemento como agregado global .....	56
4.1.8	Determinación de la curva de Bolomey .....	57
4.1.9	Determinación del contenido de agregado fino y grueso .....	59
4.1.10	Determinación de volúmenes absolutos de los componentes de la mezcla.....	60
4.1.11	Determinación de los pesos secos de los agregados .....	62
4.1.12	Corrección por humedad de los agregados fino y grueso.....	63
4.1.13	Determinación del aporte de agua libre de los agregados .....	64
4.2	Tablas de dosificación de mezclas de concreto patrón.....	65
4.3	Tablas de dosificación de mezclas de concreto con NDMA.....	66
4.4	Cálculo de costo del concreto.....	67
<b>Capítulo V: Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas .....</b>		<b>71</b>
5.1	Evaluación de las propiedades físicas .....	71

---

5.1.1	Ensayo de Asentamiento .....	71
5.1.2	Ensayo de Peso Unitario.....	73
5.1.3	Ensayo de Medición de Temperatura.....	75
5.1.4	Porosidad.....	77
5.2	Evaluación de las propiedades mecánicas .....	79
5.2.1	Resistencia a la Compresión.....	79
5.2.2	Resistencia a la Tracción .....	83
5.2.3	Resistencia a la Flexión .....	85
5.2.4	Módulo de Elasticidad .....	88
<b>Capítulo VI: Análisis y discusión de los resultados.....</b>		<b>91</b>
6.1	Análisis y discusión de los resultados de las propiedades físicas .....	91
6.1.1	Ensayo de asentamiento.....	91
6.1.2	Ensayo de peso unitario.....	93
6.1.3	Ensayo de medición de temperatura.....	94
6.1.4	Porosidad.....	94
6.2	Análisis y discusión de los resultados de las propiedades mecánicas ..	96
6.2.1	Resistencia a la Compresión.....	96
6.2.2	Resistencia a la Tracción .....	105
6.2.3	Resistencia a la Flexión .....	111
6.2.4	Módulo de Elasticidad .....	118
6.3	Análisis y discusión de los resultados del costo del concreto .....	124
<b>Conclusiones .....</b>		<b>126</b>
<b>Recomendaciones .....</b>		<b>129</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>		<b>130</b>
<b>Anexos .....</b>		<b>138</b>

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar la influencia de las nanopartículas de Dióxido de Manganeso anódico (NDMA) en las propiedades físicas y mecánicas del concreto para las relaciones agua – cemento (a/c): 0.40, 0,45 y 0,50, mediante el reemplazo parcial del 0 %, 5 % y 10 % del cemento Portland tipo I por NDMA en la mezcla de concreto. El tipo de investigación es experimental, la cual adopta como base los ensayos especificados en las normas ASTM y NTP.

Como primer paso, se caracterizaron todos los materiales componentes del concreto, para el caso de las NDMA, se visualizó que, dosificándolas en diferentes porcentajes con respecto del peso del cemento (PC) en presencia de agua, el PH de la mezcla mantiene su rango de alcalinidad. Mediante el método de Bolomey se realizaron 9 diseños de mezcla. Seguidamente, se realizaron ensayos para determinar el asentamiento, peso unitario en estado fresco, y temperatura, luego se fabricaron muestras cilíndricas y prismáticas de concreto y se curaron conforme a la NTP 339.033. Finalmente, se realizaron ensayos para determinar la resistencia a la compresión a edades de 7, 14, 28 y 56 días de curado, la resistencia a la tracción, flexión y el módulo de elasticidad a 28 días de curado y ensayos de porosidad a los 28 y 56 días.

Se realizó el análisis de los resultados y se concluyó que las NDMA influyeron de manera positiva en las propiedades del concreto con relación a/c = 0,40 y 10 % de NDMA, respecto al concreto patrón, en los siguientes ensayos: asentamiento, con un incremento del 30 %, porosidad, con una mejora del 2 % a 56 días, resistencia a la compresión, con un incremento del 11 % a 56 días, resistencia a la tracción, la cual aumentó un 29 % y resistencia a la flexión, la cual aumentó un 22 % para la edad de 28 días. Finalmente, se analizó la factibilidad económica de producir concreto con reemplazo parcial de cemento por NDMA, concluyendo su viabilidad mediante la comparación del costo y de la resistencia a la compresión, existiendo un ahorro de S/ 57,62 por cada 1 m<sup>3</sup> de mezcla de concreto.

**Palabras clave:** Nanopartículas de Dióxido de Manganeso Anódico, propiedades físicas, propiedades mecánicas, resistencia a la compresión, tracción, flexión, módulo de elasticidad, porosidad.

## ABSTRACT

The objective of this research work is to determine the influence of anodic Manganese Dioxide nanoparticles (AMDN) on the physical and mechanical properties of concrete for the water – cement (w/c) ratios: 0,40, 0,45 and 0,50, through the partial replacement of 0 %, 5 % and 10 % of Type I Portland cement with AMDN in the concrete mix. The type of research is experimental, which is based on the tests specified in the ASTM and NTP standards.

As a first step, all the component materials of the concrete were characterized. In the case of AMDN, it was seen that, dosing them in different percentages with respect to the weight of cement (WC) in the presence of water, the pH of the mixture maintains its range. of alkalinity. Using the Bolomey method, 9 mixture designs were carried out. Next, tests were carried out to determine the settlement, unit weight in the fresh state, and temperature, then cylindrical and prismatic concrete samples were manufactured and cured in accordance with NTP 339,033. Finally, tests were carried out to determine the compressive strength at ages of 7, 14, 28 and 56 days of curing, tensile strength, bending and modulus of elasticity at 28 days of curing and porosity tests at 28 and 56 days.

The analysis of the results was carried out and it was concluded that the AMDN positively influenced the properties of the concrete with a w/c ratio = 0,40 and 10 % of AMDN, with respect to the standard concrete, in the following tests: slump, with an increase 30 %, porosity, with an improvement of 2 % at 56 days, compressive strength, with an increase of 11 % at 56 days, tensile strength, which increased by 29 % and flexural strength, which increased by 22 % by the age of 28 days. Finally, the economic feasibility of producing concrete with partial replacement of cement with AMDN was analyzed, concluding its viability by comparing the cost and compression resistance, with a saving of S/ 57,62 for every 1 m<sup>3</sup> of concrete mix.

**Keywords:** Anodic Manganese Dioxide Nanoparticles, physical properties, mechanical properties, compressive strength, traction, bending, modulus of elasticity, porosity.

---

## PRÓLOGO

Desde el inicio masivo de la fabricación del cemento, la industria de la construcción ha sido objeto de constantes críticas debido a su nivel de aporte en la contaminación al medio ambiente, por lo cual esta industria enfrenta desafíos constantes respecto a la sostenibilidad y a la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En este contexto, las nanopartículas de dióxido de manganeso, obtenidas como un residuo no reutilizable del proceso electrolítico de la refinación para obtener el Zinc, aparecen como una prometedora solución para reemplazar parcialmente al cemento en la mezcla de concreto, manteniendo o mejorando las propiedades de esta mezcla, con la finalidad de reducir el consumo de cemento y a su vez reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación de este insumo. Además, esta innovación aporta a tener una construcción sostenible, debido a la disminución de la dependencia del uso de recursos naturales no renovables. Finalmente, también se contribuye a reducir el impacto negativo al medio ambiente mediante la reutilización de este deshecho producto del proceso electrolítico.

ASESORA

## LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1 Límites permisibles para el agua en la mezcla de concreto. ....	25
Tabla N° 2 Valores de tamaño de partícula de NDMA.....	36
Tabla N° 3 Composición química de la muestra de NDMA.....	36
Tabla N° 4 Cantidades de componentes en la mezcla para evaluación del PH..	37
Tabla N° 5 Evaluación de la reactividad térmica en las cinco mezclas.....	39
Tabla N° 6 Valores para el cálculo de la densidad de las NDMA.....	41
Tabla N° 7 Composición química del cemento Portland tipo I. ....	43
Tabla N° 8 Granulometría del Agregado Fino.....	44
Tabla N° 9 Límites recomendables por la ASTM C33 para el Agregado Fino....	44
Tabla N° 10 Datos para cálculo del Peso Específico de Masa del Agregado Fino .....	45
Tabla N° 11 Datos para cálculo del Contenido de Humedad del Agregado Fino. ....	46
Tabla N° 12 Datos para cálculo del peso unitario suelto y compactado del Agregado Fino.....	47
Tabla N° 13 Granulometría del Agregado Grueso.....	48
Tabla N° 14 Límites recomendables por la ASTM C33 para el Agregado Grueso.....	48
Tabla N° 15 Datos para cálculo del Peso Específico de Masa del Agregado Grueso.....	50
Tabla N° 16 Datos para cálculo del Contenido de Humedad del Agregado Grueso.....	50
Tabla N° 17 Datos para cálculo del peso unitario suelto y compactado del Agregado Grueso. ....	51
Tabla N° 18 Ensayo Químico de Agua Potable en Lima Metropolitana. ....	52
Tabla N° 19 Volumen Unitario de Agua para concreto sin aire incorporado. ....	54
Tabla N° 20 Reducción de agua para valores de a/c.....	54
Tabla N° 21 Volumen de agua para cada relación a/c.....	54
Tabla N° 22 Contenido de aire atrapado. ....	55
Tabla N° 23 Valores del coeficiente A. ....	57
Tabla N° 24 Granulometría de Bolomey correspondiente al TM 1/2".....	58
Tabla N° 25 Módulo de Fineza de la curva de Bolomey. ....	59
Tabla N° 26 Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c=0.40.....	65
Tabla N° 27 Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c=0.45.....	65
Tabla N° 28 Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c=0.50.....	66

Tabla N° 29 Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de concreto con NDMA, a/c=0.40 .....	66
Tabla N° 30 Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de concreto con NDMA, a/c=0.45. ....	66
Tabla N° 31 Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de concreto con NDMA, a/c=0.50. ....	67
Tabla N° 32 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c = 0.40. ....	67
Tabla N° 33 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto 5% NDMA, a/c = 0.40. ....	67
Tabla N° 34 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto 10% NDMA, a/c = 0.40. ..	68
Tabla N° 35 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c = 0.45. ....	68
Tabla N° 36 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto 5% NDMA a/c = 0.45. ....	68
Tabla N° 37 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto 10% NDMA, a/c = 0.45. ..	68
Tabla N° 38 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c = 0.50. ....	69
Tabla N° 39 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto 5% NDMA, a/c = 0.50. ....	69
Tabla N° 40 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto 10% NDMA, a/c = 0.50. ..	69
Tabla N° 41 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto a/c = 0.40.....	70
Tabla N° 42 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto a/c = 0.45.....	70
Tabla N° 43 Análisis de costo para 1 m <sup>3</sup> de concreto a/c = 0.50.....	70
Tabla N° 44 Asentamientos obtenidos para diseño a/c = 0.40. ....	72
Tabla N° 45 Asentamientos obtenidos para diseño a/c = 0.45. ....	72
Tabla N° 46 Asentamientos obtenidos para diseño a/c = 0.50. ....	72
Tabla N° 47 Pesos unitarios obtenidos para diseño a/c = 0.40.....	74
Tabla N° 48 Pesos unitarios obtenidos para diseño a/c = 0.45.....	74
Tabla N° 49 Pesos unitarios obtenidos para diseño a/c = 0.50.....	74
Tabla N° 50 Temperaturas del concreto para diseño a/c = 0.40.....	76
Tabla N° 51 Temperaturas del concreto para diseño a/c = 0.45.....	76
Tabla N° 52 Temperaturas del concreto para diseño a/c = 0.50.....	76
Tabla N° 53 Valores de porcentaje de vacíos en el concreto para diseño a/c = 0.40. ....	77
Tabla N° 54 Valores de porcentaje de vacíos en el concreto para diseño a/c = 0.45. ....	77
Tabla N° 55 Valores de porcentaje de vacíos en el concreto para diseño a/c = 0.50. ....	78
Tabla N° 56 Valores de f'c del concreto para diseño a/c = 0.40.....	80
Tabla N° 57 Valores de f'c del concreto para diseño a/c = 0.45.....	80
Tabla N° 58 Valores de f'c del concreto para diseño a/c = 0.50.....	81
Tabla N° 59 Valores de contenidos de cemento y f'c para diseños con 0% NDMA.....	82
Tabla N° 60 Valores de contenidos de cemento y f'c para diseños con 5%	

NDMA.....	82
Tabla N° 61 Valores de contenidos de cemento y $f'c$ para diseños con 10% NDMA.....	82
Tabla N° 62 Valores de esfuerzo a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.40$ . ....	84
Tabla N° 63 Valores de esfuerzo a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.45$ . ....	84
Tabla N° 64 Valores de esfuerzo a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.50$ . ....	84
Tabla N° 65 Valores de esfuerzo a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.40$ . ....	86
Tabla N° 66 Valores de esfuerzo a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.45$ . ....	86
Tabla N° 67 Valores de esfuerzo a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.50$ . ....	86
Tabla N° 68 Valores de módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.40$ . ....	89
Tabla N° 69 Valores de módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.45$ . ....	89
Tabla N° 70 Valores de módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> ) del concreto para diseño $a/c = 0.50$ . ....	89
Tabla N° 71 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión, $a/c = 0.40$ . ....	97
Tabla N° 72 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.40$ . ....	98
Tabla N° 73 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.40$ . ....	98
Tabla N° 74 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión, $a/c = 0.45$ . ....	99
Tabla N° 75 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.45$ . ....	100
Tabla N° 76 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.40$ . ....	100
Tabla N° 77 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión, $a/c = 0.50$ . ...	101
Tabla N° 78 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.50$ . ....	101
Tabla N° 79 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.50$ . ....	102
Tabla N° 80 Prueba ANOVA para la resistencia a la tracción, $a/c = 0.40$ . ....	106
Tabla N° 81 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.40$ . ....	106
Tabla N° 82 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.40$ . ....	107
Tabla N° 83 Prueba ANOVA para la resistencia a la tracción, $a/c = 0.45$ . ....	108
Tabla N° 84 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.45$ . ....	108
Tabla N° 85 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.45$ . ....	109

---

Tabla N° 86 Prueba ANOVA para la resistencia a la tracción, $a/c = 0.50$ . .....	110
Tabla N° 87 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión, $a/c = 0.40$ . .....	112
Tabla N° 88 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.40$ . .....	113
Tabla N° 89 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.40$ . .....	113
Tabla N° 90 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión, $a/c = 0.45$ . .....	114
Tabla N° 91 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.45$ . .....	115
Tabla N° 92 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.45$ . .....	115
Tabla N° 93 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión, $a/c = 0.50$ . .....	116
Tabla N° 94 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.50$ . .....	117
Tabla N° 95 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.50$ . .....	117
Tabla N° 96 Prueba ANOVA para el módulo de elasticidad, $a/c = 0.40$ . .....	119
Tabla N° 97 Prueba ANOVA para el módulo de elasticidad, $a/c = 0.45$ . .....	120
Tabla N° 98 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión, $a/c = 0.50$ . .....	121
Tabla N° 99 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, $a/c = 0.50$ . .....	122
Tabla N° 100 Diferencia de medias para cada diseño de $a/c = 0.50$ . .....	122
Tabla N° 101 Costos y resistencias para cada diseño de mezcla.....	124

## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1 Esquema de Difracción de Rayos X de un cristal.....	33
Figura N° 2 Muestra de lodo de NDMA. ....	34
Figura N° 3 Pulverización de muestra seca de NDMA. ....	35
Figura N° 4 Equipo Difractómetro de Rayos X: Bruker D8 Advance.....	35
Figura N° 5 Difractograma de Rayos X de la muestra de NDMA.....	36
Figura N° 6 Representación gráfica del MnO <sub>2</sub> . ....	37
Figura N° 7 PH obtenido para diferentes combinaciones de cemento con NDMA, a/c = 0.45. ....	38
Figura N° 8 Medición de la temperatura de la pasta de cemento con NDMA en agitador magnético. ....	39
Figura N° 9 Variación de temperatura en el tiempo de mezclas de cemento, agua y NDMA. ....	40
Figura N° 10 Curva Granulométrica del Agregado Fino. ....	45
Figura N° 11 Curva Granulométrica del Agregado Grueso.....	49
Figura N° 12 Curva Granulométrica de Bolomey para TM 1/2". ....	58
Figura N° 13 Ensayo de asentamiento del concreto con 10% de NDMA, a/c=0.45. ....	71
Figura N° 14 Variación del asentamiento según porcentajes de NDMA. ....	73
Figura N° 15 Ensayo de peso unitario del concreto de a/c=0.40 con 10% de NDMA.....	73
Figura N° 16 Variación del peso unitario según porcentajes de NDMA. ....	75
Figura N° 17 Ensayo de medición de temperatura del concreto con 10% de NDMA, a/c=0.50. ....	75
Figura N° 18 Variación de la temperatura del concreto según porcentajes de NDMA.....	76
Figura N° 19 Ebullición en agua de discos de concreto con 10% de NDMA, a/c=0.40. ....	77
Figura N° 20 Variación del porcentaje de vacíos en el concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.40. ....	78
Figura N° 21 Variación del porcentaje de vacíos en el concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.45. ....	78
Figura N° 22 Variación del porcentaje de vacíos en el concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.50. ....	79
Figura N° 23 Ensayo de compresión del concreto con 10% de NDMA, a/c=0.40. ....	80

Figura N° 24 Variación del $f'c$ del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.40. ....	81
Figura N° 25 Variación del $f'c$ del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.45. ....	81
Figura N° 26 Variación del $f'c$ del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.50. ....	82
Figura N° 27 Variación del $f'c$ según contenidos de cemento para cada diseño.	83
Figura N° 28 Ensayo de tracción del concreto con 5% de NDMA, a/c=0.40. ....	83
Figura N° 29 Variación del esfuerzo a la tracción del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.40. ....	84
Figura N° 30 Variación del esfuerzo a la tracción del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.45. ....	85
Figura N° 31 Variación del esfuerzo a la tracción del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.50. ....	85
Figura N° 32 Ensayo de flexión del concreto con 10% de NDMA, a/c=0.40. ....	86
Figura N° 33 Variación del esfuerzo a la flexión del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.40. ....	87
Figura N° 34 Variación del esfuerzo a la flexión del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.45. ....	87
Figura N° 35 Variación del esfuerzo a la flexión del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.50. ....	88
Figura N° 36 Ensayo de módulo de elasticidad del concreto con 5% de NDMA, a/c=0.45. ....	88
Figura N° 37 Variación del módulo de elasticidad concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.40. ....	89
Figura N° 38 Variación del módulo de elasticidad concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.45. ....	90
Figura N° 39 Variación del módulo de elasticidad concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.50. ....	90
Figura N° 40 Interacción de las nanopartículas en la zona de transición interfacial durante la hidratación del cemento. ....	104
Figura N° 41 Zona de Transición Interfacial (ITZ).....	111

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### SÍMBOLOS

- $M_r$  : Módulo de rotura (MPa).  
 $\varepsilon$  : Deformación unitaria.  
 $t_0$  : Porcentaje de participación del cemento en el agregado global.  
 $D_m$  : Densidad del material.  
 $f'_c$  : Resistencia al esfuerzo de compresión por carga axial en probetas de concreto.  
 $T_\alpha$  : Diferencia Honestamente Significativa.

## SIGLAS

ACI : American Concrete Institute.

ANOVA : Análisis de Varianza.

ASE : Área de Superficie Específica.

ASTM : American Society for Testing and Materials.

NDMA : Nanopartículas de Dióxido de Manganeso Anódico.

NTP : Norma Técnica Peruana.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

En la presente investigación se evaluó la influencia de las nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) en las propiedades físicas y mecánicas del concreto utilizando cemento Portland tipo I; estas nanopartículas se depositan en el ánodo durante el proceso electroquímico durante la refinación para la obtención del Zinc en la planta de Cajamarquilla, Perú. Debido al cambio climático, el cual es uno de los desafíos de la humanidad en el siglo XXI, el ecosistema está presentando variaciones de temperatura en diversas zonas del planeta y esto a su vez altera el clima. Una de las principales causas de este cambio climático es la emisión de gases de efecto invernadero, reflejado mediante desastres naturales, por lo cual se están buscando alternativas en el uso de nuevas tecnologías o materiales que contribuyan a mitigar el efecto de esta alteración en el clima y así tener un futuro sostenible. En la industria de la construcción el material más utilizado es el concreto debido a cualidades que lo diferencian del resto de materiales, como por ejemplo la durabilidad, resistencia y versatilidad; un componente en la mezcla de concreto es el cemento, el cual constituye entre 10% y 15% del volumen de la mezcla (Colin, 2014). Según la International Energy Agency (IEA) (2018), la producción anual mundial de cemento Portland es de 3 500 millones de toneladas, lo cual representa aproximadamente un 7% del total de emisiones de gases de efecto invernadero de los sectores energía e industria. Por esta razón, existen investigaciones para encontrar sustitutos del cemento que ayuden a reducir este impacto en contra del medio ambiente (Elkady et al., 2013). De esta manera se busca reducir la huella de carbono asociada al concreto, sin afectar de manera negativa sus propiedades.

Dentro de las alternativas de sustitutos al cemento se encuentran las nanopartículas, estas nanopartículas han sido incorporadas a la mezcla de concreto en anteriores investigaciones con la finalidad de evaluar los efectos en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, entre las nanopartículas con mayor número de investigaciones se encuentran las nanopartículas de SiO<sub>2</sub>, nano – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Óxido de Zinc-Hierro (Nazari y Riahi, 2011). Sin embargo, existen insuficientes investigaciones relacionadas a nanopartículas de algunos elementos metálicos, como por ejemplo el manganeso, donde se pueda evaluar sus efectos en las propiedades del concreto. Farouk (2019), evaluó la

resistencia a la compresión del concreto mediante el reemplazo parcial del cemento por nanopartículas de Óxido de Manganeso en diferentes porcentajes (0.5%, 1.0%, 2.0% y 5.0%), confirmando que al aumentar la cantidad de reemplazo de nanopartículas de Óxido de Manganeso, se incrementa la resistencia a la compresión. No obstante, existe falta de información sobre los efectos de otras nanopartículas, como por ejemplo las nanopartículas de dióxido de manganeso, en las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Según Picasso et al. (2015), los óxidos de manganeso poseen propiedades catalíticas debido a la capacidad de formar óxidos dentro de una variedad de fases cristalinas además de un determinado rango de estructuras tales como Óxido de Manganeso Alfa, Beta y Gamma.

El NDMA debidamente pulverizado se reutilizará mediante reemplazo parcial del cemento Portland tipo I, en este aspecto, este tipo de concreto presentará condiciones de sostenibilidad para el medio ambiente, debido al menor requerimiento de cemento para producir concreto, con lo cual conlleva a una reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) hacia la atmósfera; sin embargo, existe la necesidad de evaluar el comportamiento de la mezcla aplicando diferentes ensayos físicos y mecánicos, con la finalidad de llevar este procedimiento para realizar una producción a escala industrial.

Este trabajo se desarrollará bajo un enfoque experimental, en el cual se llevará a cabo la elaboración de especímenes de concreto sin reemplazo de NDMA y con reemplazo del 5% y 10% de cemento por NDMA, así como también ensayos para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

Con la presente investigación, se espera contribuir con el conocimiento científico en el campo de la Ingeniería Civil ofreciendo una propuesta innovadora y sostenible para la industria de la construcción que pueda ayudar a la lucha contra el cambio climático. Además, se aspira a sentar las bases para futuros estudios y aplicaciones tecnológicas que promuevan la adopción de prácticas más responsables con el entorno ambiental, respecto a nuevos materiales componentes del concreto, y que propicien un desarrollo sostenible y resiliente ante los desafíos del siglo XXI.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Con el aprovechamiento del residuo obtenido del proceso industrial para la refinación del Zinc como sustituto del cemento en la mezcla de concreto, se pretende buscar alternativas para reducir el calentamiento global por medio de la reducción del consumo de cemento en el concreto sin alterar de manera negativa las propiedades físicas y mecánicas. El problema de la investigación radica en comprender como el uso de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico, influyen en las propiedades físicas y mecánicas mediante el reemplazo parcial del cemento en la mezcla de concreto. La resolución de esta interrogante es esencial para comprender la factibilidad y el impacto real del uso de las NDMA en el concreto como una solución innovadora y sostenible para mitigar el cambio climático desde el sector de la construcción.

## 1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

### 1.3.1 Objetivo General

Determinar la influencia de la adición de nanopartículas de dióxido de manganeso en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con diferentes relaciones agua – cemento ( $a/c = 0.40, 0.45$  y  $0.50$ ) en Lima Metropolitana.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características de los materiales componentes del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso.
- Diseñar mezclas de concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso.
- Evaluar la propiedades físicas y mecánicas del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso respecto a una muestra de concreto patrón.
- Validar los resultados obtenidos en el concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso.

## 1.4 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

En base a los resultados de los antecedentes, se espera encontrar mejoras en los resultados de la medición de las propiedades físicas y mecánicas con diferentes diseños de concreto variando el porcentaje de reemplazo de nanopartículas de dióxido de manganeso por el peso de cemento presente en la mezcla de concreto respecto a una muestra patrón.

### 1.4.1 Hipótesis General

La adición de nanopartículas de dióxido de manganeso influenciará en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con diferentes relaciones agua – cemento de 0.40, 0.45 y 0.50 en Lima Metropolitana.

### 1.4.2 Hipótesis Específicas

- El contenido de nanopartículas de dióxido de manganeso en las mezclas adicionadas afectaría las propiedades físicas y mecánicas del concreto.
- Las relaciones agua – cemento de las mezclas de concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso afectaría las propiedades físicas y mecánicas del concreto.
- Las edades del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso afectarían las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

## 1.5 METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo de la presente tesis es la siguiente:

- Revisión Bibliográfica
- Caracterización de los materiales
- Diseño de mezclas
- Ensayos en probetas de concreto
- Análisis de los resultados

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 MARCO TEÓRICO

Desde la aparición de las nanopartículas, se han realizado diversos estudios aplicados a diferentes áreas del conocimiento y para el caso del concreto, se han realizado investigaciones mediante la aplicación de algunas nanopartículas; como primer acontecimiento se tiene el aporte de Stein y Stevels (1964) en el cual se añadió nano SiO<sub>2</sub> en la pasta de Silicato Tricálcico, mostrando que la hidratación de este compuesto fue más rápida y completa de lo normal, produciendo silicato de calcio hidratado (SCH). Sin embargo, las investigaciones relacionadas a las nanopartículas en el concreto se desarrollaron con mayor notoriedad en los últimos años debido al avance de la tecnología; por ejemplo, Li et al. (2004) utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) para analizar muestras de mortero con reemplazo de nanopartículas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub> por cemento, logrando visualizar que la textura de los productos de la hidratación del cemento era más densa en comparación del mortero sin adición de nanopartículas; así mismo, evidenció la disminución en la formación de compuestos de Ca(OH)<sub>2</sub> en la mezcla, contribuyendo de esta forma a la mejora de la resistencia del mortero. De manera similar, Björnström et al. (2004) experimentó la adición de nanosílice coloidal de diámetro 5 nm y área superficial específica de 500 m<sup>2</sup>/g en el mortero de cemento para estudiar el efecto acelerador en la formación de Silicato de Calcio Hidratado (SCH) mediante el uso de la Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier por Reflexión Difusa, en el cual se demostró un mayor consumo de Silicato Tricálcico, mayor formación de SCH y la disminución de grupos OH; este resultado fue predominante para concentraciones del 5% de nanosílice coloidal. Posteriormente, Farouk (2019), realizó ensayos de resistencia a la compresión en el concreto utilizando 3 tipos de nanopartículas, Nano Óxido de Hierro (NF), Nano Oxido de Manganeso (NM), y Dióxido de Sílice (NS), mediante el reemplazo de porcentajes de 0.5, 1.0, 2.0 y 5.0% de estos nanomateriales por cemento; comprobó que de los 3 nanomateriales, el NS tiene mejores resultados en la resistencia a la compresión del concreto, comprobando que para el reemplazo del 5% del peso de cemento la resistencia a la compresión aumenta aproximadamente un 20% respecto al NM y 23% respecto al NF. Sin embargo, los estudios en las variaciones de las propiedades del concreto se han limitado a una poca gama de nanopartículas, uno de estos tipos de nanopartículas poco estudiadas son las nanopartículas de dióxido de manganeso. Por ejemplo, Chousidis et al. (2018), determinó la factibilidad de producir concreto armado

reemplazando un 5% en peso del cemento por residuos de dióxido de manganeso electrolítico, con este porcentaje el  $f'c$  del concreto sumergido en una solución de NaCl supera los 30 MPa a los 28 días. Así mismo, se comprobó la existencia de un menor grado de porosidad del concreto con partículas de dióxido de manganeso en comparación al concreto patrón; de acuerdo a los ensayos de pérdida de masa del acero de refuerzo, la adición de esas partículas tuvo una incidencia positiva en la respuesta contra el ataque de cloruros; sin embargo, las muestras sumergidas en soluciones de sulfatos sufrió daño del acero embebido en el concreto, producto de la presencia de yeso que origina expansión y presencia de grietas en el concreto.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1 Nanopartículas

La palabra nanopartícula proviene de la unión de dos prefijos, “nano” que se deriva del latín “nanus” cuyo significado es “enano” y “partícula” que es la parte más pequeña de una sustancia que conserva las propiedades físicas y químicas de la misma. En física, el prefijo nano equivale a 10 elevado a la -9, por lo tanto, un nanómetro es igual a 0.000000001 metros (López, 2013). Según Zhang et al. (2017), las nanopartículas (NP) se pueden definir como aquellas partículas que tienen un tamaño entre 1 y 100 nm. Reches (2018) sostiene que, debido a su tamaño reducido, poseen una gran área superficial en comparación con su volumen, por lo cual presentan propiedades únicas como por ejemplo una alta reactividad química.

Según Duel (2022), existen dos alternativas para producir nanomateriales: Top-Down y Bottom-Up.

1. Top - Down: sucede cuando los materiales se dividen para formar nanoestructuras por diferentes medios como por ejemplo la pulverización catódica.
2. Bottom - Up: se realiza cuando se producen nanoestructuras en base a precursores moleculares o atómicos.

Khan et al. (2019) clasifica a las NP según su composición física y química en:

- a. NP de carbono: incluyen los nanotubos de carbono y fullerenos. Tienen propiedades mecánicas y eléctricas excepcionales.
- b. NP metálicas: están compuestas principalmente de metales, como el oro, plata o cobre. Tienen propiedades opto-eléctricas y catalíticas únicas.
- c. NP de cerámicas: son sólidos inorgánicos no metálicos. Se caracterizan por su uso en aplicaciones de catálisis y fotocatalisis.
- d. NP semiconductores: están compuestas de semiconductores, como el dióxido de titanio o el óxido de zinc. Son materiales indispensables en fotocatalisis y en dispositivos electrónicos.
- e. NP poliméricas: están compuestas de polímeros como el poliestireno o el polietileno. Tienen forma de nano esferas.
- f. NP basadas en lípidos: se caracterizan por su utilización en aplicaciones biomédicas.

Por otro lado, Korayem et al. (2017) clasificó a las nanopartículas de acuerdo a su dimensión en:

- a. Nanopartículas de dimensión cero (0D): son aquellas nanopartículas en las cuales todas sus dimensiones están en tamaño nanométrico. Las nanopartículas como nano-SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> y ZnO pertenecen a este grupo.
- b. Nanopartículas unidimensionales (1D): son aquellas nanopartículas que tienen como característica de poseer dos dimensiones en nano escala, mientras que la otra dimensión supera el tamaño nanométrico. Los nanotubos de carbono, nano fibras, nano varillas y nano cables conforman este grupo.
- c. Nanopartículas bidimensionales (2D): son aquellas nanopartículas que tienen forma de lámina, en la cual el grosor está en nano escala mientras que la superficie tiene un tamaño mayor a la nano escala. En este grupo se encuentran las nano películas, nano capas y nano recubrimientos.

#### *2.2.1.1 Nanopartículas de Dióxido de Manganeso*

El dióxido de manganeso (MnO<sub>2</sub>) es un compuesto químico inorgánico. Su color está entre negro y café. Entre las principales aplicaciones de las nanopartículas de dióxido de manganeso (NDM) se dan en los dispositivos de almacenamiento de energía, como catalizadores.

Dawadi et al. (2020) distingue diversos métodos para la síntesis de las NDM:

- a. Método Hidrotermal: consiste en colocar compuestos inorgánicos en agua a elevada presión y temperatura, mediante la reacción entre permanganato de potasio y sulfato de manganeso se puede obtener  $MnO_2$ .
- b. Método de oxidación y reducción: consiste en una transferencia de electrones entre los reactantes, mediante la reducción u oxidación del manganeso por intermedio de varios agentes reductores y oxidantes.
- c. Método sol – gel: consiste en la formación de una suspensión coloidal de partículas nanométricas (sol) en un líquido, seguidamente este sol se gelifica para formar un gel tridimensional, finalmente, a partir de este gel se obtiene NDM.
- d. Método de precipitación química: las NDM se forman a partir de la reacción controlada entre catión y anión, por el cual se forma un compuesto insoluble en agua, el cual precipita como sólido. Este sólido se separa de la solución mediante decantación o filtración.
- e. Método de reflujo térmico: consiste en reacciones químicas a temperaturas elevadas en un solvente. En este método se producen una gran cantidad de partículas.
- f. Método de síntesis verde: este método utiliza plantas y microorganismos para la síntesis de nanopartículas.

### 2.2.2 El Concreto

El concreto, comúnmente conocido como hormigón en algunas zonas del mundo, es un material de construcción artificial ampliamente utilizado en las obras debido a su versatilidad, resistencia y durabilidad, se obtiene principalmente del proceso de mezclado de cemento, agregado fino, agregado grueso, aire y agua. Adicionalmente, se pueden añadir aditivos para mejorar una o varias propiedades para fines específicos. Hernández y Rojas (2021) define al concreto como una mezcla donde se emplea arena, grava, cemento y agua los cuales una vez mezclados forman una masa similar a una roca producto de la reacción entre el cemento y agua mediante el endurecimiento de la pasta de cemento. El concreto recién mezclado se caracteriza por su estado plástico, es decir, puede adoptar la forma del recipiente donde será colocado, pero al pasar el tiempo el concreto empieza a endurecer, estado en el cual tiene propiedades mecánicas y químicas ideales para la construcción; el grado de estas propiedades dependerá de muchos factores principalmente de la proporción de sus componentes durante el mezclado.

Shanaka (2016) clasifica al concreto en 4 tipos según su resistencia y constructibilidad, estos se describen a continuación.

- a. Concreto de resistencia normal: son aquellos concretos en el cual la resistencia a la compresión es menor a 50 MPa.
- b. Concreto de alta resistencia: en este grupo se encuentran los concretos cuya resistencia a la compresión se encuentra entre 50 MPa y 100 MPa.
- c. Concreto de muy alta resistencia: los concretos de muy alta resistencia presentan una resistencia a la compresión entre 100 MPa y 150 MPa.
- d. Concreto de ultra alta resistencia: son concretos donde la resistencia a la compresión es mayor a 150 MPa.

#### *2.2.2.1 Cemento Portland*

Es uno de los principales componentes del mortero y concreto que cumple la función de aglutinante, es decir une a los otros componentes del concreto proporcionando resistencia. El cemento es un material hidráulico debido a la característica de solidificarse al momento de reaccionar al contacto con el agua debido al proceso de hidratación en el cual se forman productos tal como el silicato cálcico hidratado y el aluminato de calcio hidratado los cuales proporcionan propiedades de resistencia y durabilidad a la mezcla que lo compone (Sprung, 2008).

La NTP 334.009 define al cemento Portland como un cemento del tipo hidráulico obtenido a través de la pulverización del Clinker; el cemento está compuesto principalmente por silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico, aluminio-ferrito tetracálcico, entre otros.

La ASTM C-150 clasifica al cemento Portland en 10 tipos los cuales se describen a continuación.

- a. Tipo I: se utiliza cuando no existan características especiales de diseño, es de uso general.
- b. Tipo IA: cumple las mismas características generales del tipo I, pero la diferencia radica en la incorporación de aire.
- c. Tipo II: se caracteriza por tener una moderada resistencia contra el ataque de

sulfatos.

- d. Tipo IIA: cumple las mismas características del cemento tipo II, con la diferencia de tener incorporación de aire.
- e. Tipo II(MH): se caracteriza por tener un calor de hidratación moderado y una resistencia moderada contra el ataque de sulfatos.
- f. Tipo II(MH)A: tiene características similares al cemento tipo II (M) con la diferencia que posee incorporación de aire.
- g. Tipo III: se caracteriza por tener alta resistencia a temprana edad.
- h. Tipo IIIA: tiene características similares al cemento tipo III con la diferencia de contener aire incorporado.
- i. Tipo IV: se utiliza cuando los requerimientos exigen un bajo calor de hidratación.
- j. Tipo V: se caracteriza por tener una alta resistencia contra el ataque de los sulfatos.

#### 2.2.2.2 Agregado Fino

La Norma Técnica Peruana NTP 400.011 define al agregado fino como el conjunto de partículas provenientes de la desintegración natural o artificial de las rocas o piedras; este conjunto de partículas tiene como característica que pasan el tamiz normalizado N° 3/8" (9.5 mm) y quedan retenido en el tamiz normalizado N°200 (74  $\mu$ m), el agregado fino más utilizado es la arena.

La Norma Técnica Peruana NTP 400.037 recomienda que el módulo de fineza del agregado fino debe estar comprendido entre 2.3 y 3.1.

#### 2.2.2.3 Agregado Grueso

La Norma Peruana NTP 400.037 define al agregado grueso como aquel conjunto de partículas que son retenidas en el tamiz normalizado N° 4 (4.75 mm), consiste en grava, piedra chancada, entre otros.

En el análisis del agregado grueso, la NTP 400.037 define 2 conceptos importantes: tamaño máximo y tamaño máximo nominal.

- a. Tamaño Máximo: es aquel menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra del agregado grueso.
- b. Tamaño Máximo Nominal: es aquel tamiz de menor abertura de malla por el

cual se retiene entre 5% y 10% del material por primera vez.

#### 2.2.2.4 Agua

El agua es un componente esencial en la producción del concreto debido a la participación para la hidratación del cemento. Según la Norma Peruana NTP 339.088, define varios tipos de agua que pueden ser utilizados para la mezcla de concreto, siendo de preferencia el agua potable; sin embargo, también puede ser no potable siempre y cuando se cumplan los límites permisibles de calidad. Las aguas aptas para su uso en la mezcla de concreto deben cumplir los siguientes límites mostrados en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1 Límites permisibles para el agua en la mezcla de concreto.

Sustancia	Límites Máximos Permisibles
Sólidos en suspensión	5,000 ppm
Materia orgánica	3 ppm
Alcalinidad	1,000 ppm
Sulfatos	600 ppm
Cloruros	1,000 ppm
PH	Entre 5 y 8

Fuente: NTP 339.088.

Por otro lado, Torre (2004) detalla la relación de aguas prohibidas para el empleo en la mezcla de concreto.

- a. Aguas ácidas que tienen un PH menor a 3.
- b. Aguas que provienen de relaves mineros.
- c. Aguas con contenido de cloruro de sodio superior al 3%.
- d. Aguas con contenido de sulfatos superior al 1%.
- e. Aguas negras que contienen aproximadamente 400 ppm de materia orgánica.

#### 2.2.2.5 Aditivo

La NTP 334.088 define al aditivo como aquel componente de la mezcla de concreto que tiene como característica la modificación de una o varias de sus propiedades.

La Norma Internacional ASTM C494 (Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete) cataloga a los aditivos en 8 tipos:

- a. Tipo A: reductores de agua, permiten reducir el agua de diseño hasta un 5%.
- b. Tipo B: retardadores, permiten retrasar el fraguado inicial en 1 hora como mínimo sin exceder las 3 horas y media.
- c. Tipo C: aceleradores de fragua, permiten acortar el tiempo de fraguado.
- d. Tipo D: reductores de agua y retardadores.
- e. Tipo E: reductores de agua y acelerantes.
- f. Tipo F: reductores de agua de alto rango (superplastificantes).
- g. Tipo G: reductores de agua de alto rango y retardadores.
- h. Tipo S: para comportamientos específicos.

### 2.2.3 Propiedades del concreto en estado fresco

El concreto en estado fresco se refiere al concreto antes de iniciar el proceso de fraguado y endurecimiento. Algunas de las propiedades clave del concreto en estado fresco son el asentamiento, peso unitario y temperatura.

#### 2.2.3.1 Asentamiento

El asentamiento se define como la medida de la consistencia del concreto en estado fresco (Ramirez, 2017). El ensayo de asentamiento es el método más utilizado para evaluar la fluidez del concreto en estado fresco, este ensayo brinda una medida de la trabajabilidad (Mehta y Monteiro, 1993). Torre (2004), menciona cuatro tipos de consistencia de acuerdo al valor del asentamiento obtenido.

- a. Consistencia seca: asentamiento entre 0 a 2 cm.
- b. Consistencia plástica: asentamiento entre 3 a 5 cm.
- c. Consistencia blanda: asentamiento entre 6 a 9 cm.
- d. Consistencia fluida: asentamiento entre 10 a 15 cm.

La Norma Técnica Peruana NTP 339.035 brinda el procedimiento para realizar el ensayo de asentamiento o SLUMP.

Procedimiento:

- a. Humedecer el molde, con forma de tronco de cono, y colocarlo en una superficie plana y rígida, se debe pisar las aletas del molde para evitar el desplazamiento del molde.
- b. Se debe rellenar el molde en 3 capas con concreto de la mezcla, se debe apisonar con 25 golpes de manera uniforme mediante el uso de una varilla en cada capa rellena procurando que la varilla penetre ligeramente la capa anterior.
- c. Durante el llenado de la tercera y última capa, se debe colocar la mezcla de concreto por exceso en el molde para luego dar los últimos 25 golpes y enrasar la parte superior del molde.
- d. Se debe levantar de manera vertical el molde en un tiempo de 5 segundos.
- e. Por último, se debe medir la diferencia entre la parte superior del molde y el centro de la cara superior de la mezcla desplazada.

#### 2.2.3.2 Peso Unitario

El peso unitario del concreto en estado fresco es una medida de la masa por unidad de volumen antes que el concreto endurezca. Se calcula mediante la división entre el peso del concreto fresco (kg) y el volumen del recipiente que lo contiene (m<sup>3</sup>). El resultado del peso unitario brinda una referencia del grado de compactación y control de calidad del concreto fabricado. (Solis, 2019)

Según Torre (2004), de acuerdo al resultado del peso unitario del concreto, este se puede clasificar en 3 tipos:

- a. Concreto ligero: si el peso unitario resulta entre 1,200 a 2,000 kg/m<sup>3</sup>.
- b. Concreto normal: si el peso unitario resulta entre 2,000 a 2,800 kg/m<sup>3</sup>.
- c. Concreto pesado: si el peso unitario es mayor a 2,800 kg/m<sup>3</sup>.

La Norma Técnica Peruana NTP 339.046 brinda el procedimiento para realizar el ensayo de asentamiento o SLUMP.

Procedimiento:

- a. Pesar el recipiente previo al llenado de concreto y calcular su volumen.
- b. Humedecer el recipiente y varilla estandarizados conforme a la Norma Técnica

Peruana NTP 339.046.

- c. Rellenar en 3 capas con concreto recién mezclado, en cada capa se debe apisonar 25 golpes con la varilla de manera uniforme, tratando que ingrese aproximadamente 1 pulgada en la capa inferior, seguidamente dar entre 10 a 15 golpes laterales con un martillo de goma.
- d. Enrasar la parte superior, limpiando los bordes. Pesar el recipiente con la mezcla de concreto fresco en una balanza.
- e. Restar el valor del peso del recipiente con la mezcla de concreto fresco y el peso del recipiente vacío. Seguidamente dividir el peso del concreto fresco entre el volumen del recipiente vacío, este valor dará el peso unitario del concreto en estado fresco.

### 2.2.3.3 Temperatura

La temperatura del concreto en estado fresco permite verificar la producción de calor y la alteración del volumen en la mezcla con la finalidad de evitar el agrietamiento y la aparición de fisuras (Solis, 2019). El ACI 301-20 "Specifications for Concrete Construction" y el ACI 305.1-14 "Specification for Hot Weather Concreting" dispone como límite máximo de temperatura del concreto en estado fresco al valor de 35 °C para construcciones en climas cálidos; sin embargo, la Norma Técnica de Edificación E.060 limita la temperatura máxima del concreto fresco a 32 °C.

La Norma Técnica Peruana NTP 339.184 menciona el procedimiento para determinar la temperatura de la mezcla de concreto en estado fresco.

Procedimiento:

- a. Colocar el termómetro, debidamente calibrado, en la mezcla de concreto fresco, de tal forma que el sensor de temperatura se encuentre completamente sumergido como mínimo 7.5 cm.
- b. Dejar el termómetro sumergido como mínimo 2 minutos, pero no mayor a 5 minutos.
- c. Registrar la temperatura con una aproximación de 0.5 °C.

### 2.2.4 Propiedades del concreto en estado endurecido

Las propiedades del concreto en estado endurecido son aquellas características

que el concreto adquiere luego de endurecer producto del proceso de fraguado. Algunas de las propiedades en este estado son la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, porosidad y el módulo de elasticidad.

#### *2.2.4.1 Resistencia a la Compresión*

La resistencia a la compresión del concreto es una de las propiedades más importantes de este material, esta propiedad mide la capacidad para soportar cargas que tienden a comprimirlo, se expresa en unidades de presión. Los resultados del ensayo de la resistencia a la compresión dependen de varios factores al momento de realizar la mezcla como, por ejemplo, el tamaño y forma del molde, la dosificación de los componentes del concreto, el procedimiento de mezclado, el proceso de fabricación de probetas, la temperatura y humedad durante el curado, entre otros (ASTM C39). La resistencia a la compresión del concreto depende de dos elementos fundamentales: la estructura física de los productos de la hidratación y la dosificación de cantidades de los componentes de la mezcla. Así mismo, los factores que afectan principalmente a la resistencia son la relación agua – cemento y la relación árido – cemento (Chauveinc, 2011). Por otro lado, la Norma Técnica Peruana NTP 339.034 señala que los especímenes fabricados de una misma mezcla de concreto no deben tener una diferencia mayor al 14% del promedio de las resistencias a la compresión de dichas muestras.

Según la Norma Técnica Peruana NTP 339.034, la resistencia a la compresión se calcula mediante la división entre la carga que soporta la probeta de concreto obtenida al finalizar el ensayo y el diámetro de la sección circular de la muestra, este valor se expresa en MPa o en kg/cm<sup>2</sup>.

#### *2.2.4.2 Resistencia a la Tracción*

La resistencia a la tracción del concreto es una medida de su capacidad para soportar fuerzas de tensión, se expresa en unidades de presión.

Según la Norma Técnica Peruana NTP 339.084, brinda la siguiente fórmula para calcular la resistencia a la tracción por compresión diametral:

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times l \times d} \quad (1)$$

Donde:

T = Resistencia a la tracción indirecta (MPa).

P = Carga máxima (N).

l = longitud de la muestra (mm).

d = diámetro de la muestra (mm).

Así mismo, menciona que los resultados de dos muestras de la misma mezcla no deben diferenciarse en más del 14% del promedio de la resistencia a la tracción por compresión diametral cercana a 2.8 MPa. Solis (2019) indica que los valores obtenidos a través del ensayo de tracción indirecta sirven para verificar la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, así mismo para estimar la carga en la cual comenzaran a aparecer las fisuras en el concreto por tracción.

#### 2.2.4.3 Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión del concreto es una propiedad mecánica que mide la facultad de soportar fuerzas que tienden a doblarlo o flexionarlo; como por ejemplo, durante el funcionamiento de losas, vigas, pavimentos, entre otros.

Según la Norma Técnica Peruana NTP 339.078, la fórmula para calcular el módulo de rotura en el ensayo de resistencia a la flexión de una viga de concreto con cargas en los tercios de longitud es el siguiente:

$$M_r = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (2)$$

Donde:

Mr = Módulo de rotura (MPa).

P = Carga máxima de rotura (N).

L = Luz libre entre apoyos (mm).

b = Ancho promedio de la viga en la sección de falla (mm).

h = Altura promedio de la viga en la sección de falla (mm).

#### 2.2.4.4 Porosidad

La porosidad es una propiedad física que comprende la presencia de espacios vacíos dentro de la estructura del concreto. Estos espacios vacíos pueden ser microscópicos o ser captados por la vista, la distribución de estos espacios vacíos puede variar en toda la muestra del material. Ruiz (2021) define a la porosidad como el volumen de los espacios comprendidos entre las partículas de los agregados además tiene influencia en sus propiedades debido a que representa la estructura interna de los agregados. Según Hearn et. al (2006), los poros desempeñan predominio en las propiedades del concreto de diferentes modos; por ejemplo, para el caso de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, el factor más importante a tomar en cuenta es el volumen total de poros presentes en una muestra de concreto; sin embargo, para la permeabilidad, adicional al volumen de poros también debe considerarse el tamaño y continuidad de estos.

La Norma Técnica Peruana NTP 339.187, detalla el procedimiento para calcular el porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.

- a. Obtener una muestra representativa del concreto con un volumen no menor a 350 cm<sup>3</sup> o peso no menor a 800 g.
- b. Colocar la muestra en un horno a 110 °C por un tiempo no menor a 24 horas, se debe repetir este procedimiento de manera sucesiva hasta obtener un peso con una variación no mayor del 0.5% respecto al peso seco anterior, este valor se denotará como A.
- c. Sumergir en agua por un periodo de tiempo no menor a 48 horas, repetir este proceso de manera sucesiva hasta obtener un peso de muestra saturada con una variación inferior del 0.5% respecto al peso saturado anterior, este valor se denotará como B.
- d. Luego de saturar la muestra, colocar en agua hirviendo por un periodo de tiempo de 5 horas, seguidamente se debe dejar enfriar por un tiempo no menor a 14 horas. Finalizado este tiempo, se debe secar superficialmente para luego proceder a pesar la muestra. Este valor se designará como C.
- e. Finalmente, la muestra debe colocarse en una canastilla, previamente pesada, dentro del agua para calcular el peso aparente de la muestra, este peso de designará como D.

f. Se calculará el volumen de vacíos de la muestra mediante la siguiente expresión:

$$\text{Volumen de vacíos (\%)} = \frac{(C-A)}{(C-D)} \times 100 \quad (3)$$

#### 2.2.4.5 Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad es una propiedad mecánica que mide la rigidez del concreto para deformarse de manera elástica bajo la aplicación de cargas.

La fórmula para calcular el módulo de elasticidad del concreto según la ASTM C469 es:

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{\epsilon_2 - 0.000050} \quad (4)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad (MPa).

S<sub>2</sub> = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (MPa).

S<sub>1</sub> = Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria de 0.00050 (MPa).

ε<sub>2</sub> = Deformación unitaria longitudinal producida por S<sub>2</sub>.

### 2.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

León y Jansen (2009) define la difracción de Rayos X como una técnica analítica no destructiva para obtener información de la estructura cristalográfica, composición química y propiedades físicas de los materiales, mediante la incidencia de un haz rayos X monocromáticos sobre una muestra de material. Raval et. al (2019) menciona que, al atravesar la muestra, el haz de rayos X es difractado por los átomos que se encuentran en la misma dirección de trayectoria de los rayos incidentes. La naturaleza de esta interferencia cumple la ley de Bragg ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ), donde  $\theta$  es el ángulo de dispersión,  $d$  es la distancia interplanar ( $d$ ),  $n$  es un número entero que representa el orden del pico de difracción, y  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X. En la Figura N° 1 se aprecia el proceso de difracción de Rayos X de un cristal.

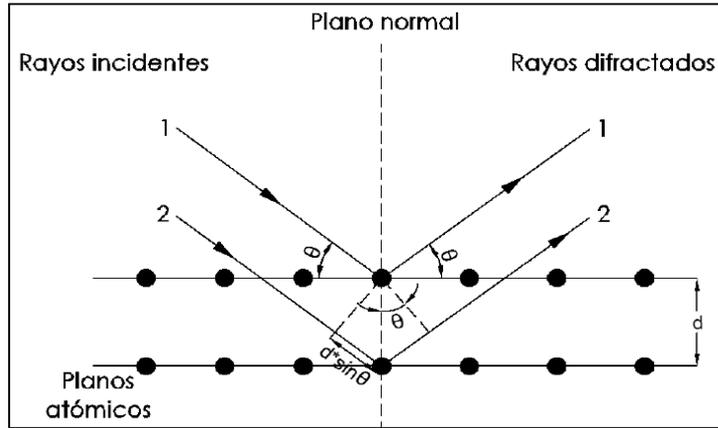


Figura N° 1 Esquema de Difracción de Rayos X de un cristal. Fuente: Muñoz (2014)

## CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

### 3.1 NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE MANGANESO

Las NDMA fueron suministradas por Nexa Resources, empresa minera dedicada a la refinación del Zinc en la planta de Cajamarquilla ubicada en el distrito de Lurigancho – Chosica. Este material se presenta en forma de lodo acuoso, Figura N° 2, y se produce en las celdas anódicas al finalizar el proceso de electrolisis en la refinación del Zinc, para retirar estos residuos se utilizan procedimientos estandarizados de la planta bajo normativas medioambientales aprobadas.

#### 3.1.1 Acondicionamiento de la muestra de NDMA

El lodo de NDMA debe ser colocado en horno industrial en capas delgadas a una temperatura de 80 °C por un periodo de tiempo de 12 horas con la finalidad de asegurar el secado homogéneo de toda la muestra.



Figura N° 2 Muestra de lodo de NDMA.

La masa seca se coloca en pequeñas cantidades en un molinillo eléctrico, Figura N° 3, con el objetivo de pulverizar la masa sólida, por último, este polvillo se filtra mediante el tamiz N°30 para asegurar el paso de partículas ultrafinas de NDMA para añadirlo como componente en la mezcla de concreto mediante su combinación con el cemento previo al inicio del mezclado.



Figura N° 3 Pulverización de muestra seca de NDMA.

### 3.1.2 Determinación de la composición química y tamaño de cristales de la muestra de NDMA

Mediante el uso del equipo Difractómetro de Rayos X de alta resolución: Bruker D8 Advance, Figura N° 4, y con el uso de los programas Vesta, Profex 5.2.2 y OriginPro para el procesamiento de los datos, se obtuvo información de la identificación y superposición de fases a la muestra de NDMA, correspondiendo a los patrones de la anglesita y dióxido de manganeso alfa, en la gráfica de la muestra de NDMA, Figura N° 5, se pueden observar diferentes picos de difracción para la muestra de NDMA, mediante la superposición de estas fases se pudo determinar que el tamaño de partículas del MnO<sub>2</sub> tienen un valor de 42.4 nm, Tabla N° 2, así como también la composición química de la muestra de NDMA la cual se muestra en la Tabla N° 3.



Figura N° 4 Equipo Difractómetro de Rayos X: Bruker D8 Advance.

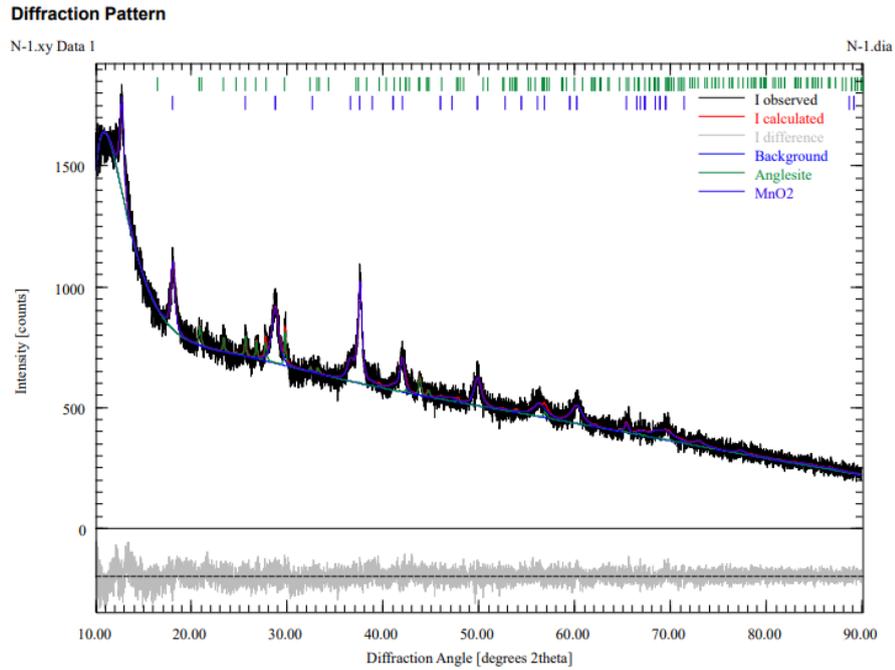


Figura N° 5 Difractograma de Rayos X de la muestra de NDMA.

Tabla N° 2 Valores de tamaño de partícula de NDMA.

Parámetros refinados	
Parámetro	valor
MnO <sub>2</sub>	
Tamaño de partícula (2,2,0)	42.4 nm
Tamaño de partícula (1,1,0)	42.4 nm
Tamaño de partícula (3,1,0)	42.4 nm
Tamaño de partícula (3,-1,0)	42.4 nm
Tamaño de partícula (2,0,0)	42.4 nm

Tabla N° 3 Composición química de la muestra de NDMA.

Compuesto	Cantidad de fase (wt - %)	O (wt - %)	S (wt - %)	M <sub>n</sub> (wt - %)	P <sub>b</sub> (wt - %)
Anglesita	5.60	21.10	10.57	0.00	68.32
MnO <sub>2</sub>	94.40	36.81	0.00	63.19	0.00
Total	100.00	35.93	0.59	59.65	3.83

En la Figura N° 6 se muestra de manera gráfica la estructura atómica del MnO<sub>2</sub>.

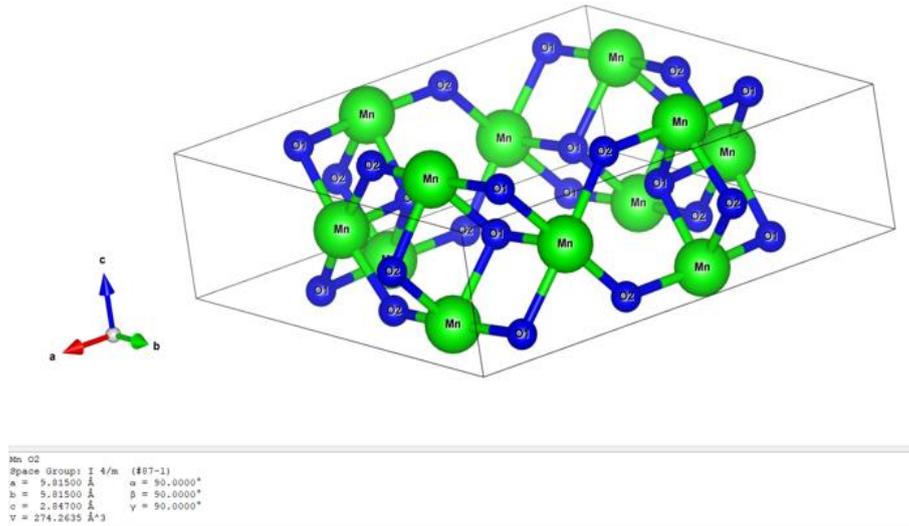


Figura N° 6 Representación gráfica del MnO<sub>2</sub>.

### 3.1.3 Evaluación del PH

Se evaluó la influencia de las NDMA en el PH, considerando 3 tipos de mezcla de mortero con relaciones agua – cemento de 0.40, 0.45 y 0.50, con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento Portland tipo I por NDMA (0, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 y 15%).

Para asegurar la correcta combinación entre el cemento y las NDMA, se utilizó el agitador magnético, DLAB MS-H280-Pro, a 600 rpm durante 5 minutos. Luego se agregó agua destilada en cantidad correspondiente a la relación agua – cemento señalado en la Tabla N° 4. Finalmente, se colocó el medidor de PH, PH EZDO 7200, en el cual se observaron los valores correspondientes al PH de cada mezcla.

Tabla N° 4 Cantidades de componentes en la mezcla para evaluación del PH.

Relación agua - cemento = 0.45, V agua = 22.5 ml		
Descripción	Cemento (g)	NDMA (g)
Mezcla 1 (0.0% NDMA)	50.00	0.00
Mezcla 2 (1.0% NDMA)	49.50	0.50
Mezcla 3 (2.5% NDMA)	48.75	1.25
Mezcla 4 (5.0% NDMA)	47.50	2.50
Mezcla 5 (7.5% NDMA)	46.25	3.75
Mezcla 6 (10.0% NDMA)	45.00	5.00
Mezcla 7 (12.5% NDMA)	43.75	6.25
Mezcla 8 (15.0% NDMA)	42.50	7.50

En la Figura N° 7, se observan los valores de PH obtenidos para cada muestra con diferentes porcentajes de reemplazo de NDMA por cemento.

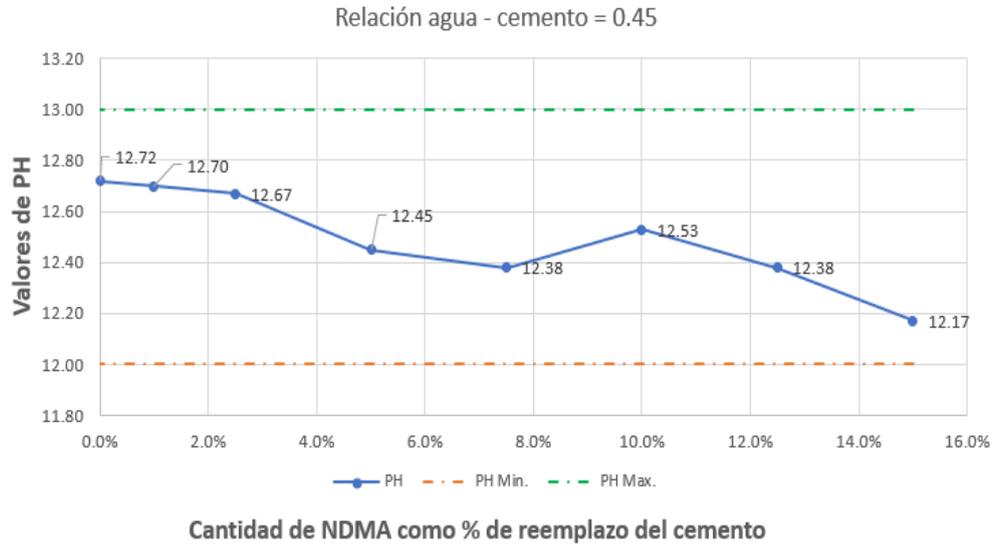


Figura N° 7 PH obtenido para diferentes combinaciones de cemento con NDMA, a/c = 0.45.

En la Figura N° 7 observa que, para todos los casos, la alcalinidad de las mezclas se mantiene por encima de 12 para valores de hasta el 15% de peso de NDMA en la mezcla. Con este resultado, podemos tener un rango de elección del porcentaje de NDMA como reemplazo parcial de cemento sin perjudicar la alcalinidad de la mezcla.

#### 3.1.4 Determinación de la reactividad térmica entre NDMA y pasta de cemento

Se realizó cinco mezclas de pastas de cemento, NDMA y agua destilada, tomando como referencia 3 porcentajes de NDMA utilizados en el ensayo de evaluación del PH (0%, 5% y 12.5%), adicionalmente se agregó 2 porcentajes de 8% y 16%, el primero debido a que ocurre una variación en el resultado de PH para los valores de 7.5% y 10% de NDMA, y el segundo es un porcentaje aleatorio de medición, las dosificaciones se presentan en la Tabla N° 5.

Tabla N° 5 Evaluación de la reactividad térmica en las cinco mezclas.

V agua = 400 ml			
Descripción	Cemento (g)	NDMA (g)	Temperatura Final (°C)
Mezcla 1 (0.0% NDMA)	100	0	30
Mezcla 2 (5.0% NDMA)	95	5	30
Mezcla 3 (8.0% NDMA)	92.5	7.5	31
Mezcla 4 (12.5% NDMA)	87.5	12.5	31
Mezcla 5 (16.0% NDMA)	85	15	30

Cada una de las mezclas se colocaron en agitadores magnéticos a una velocidad de 1000 rpm generando aumento de temperatura entre las partículas, Figura N° 8, hasta alcanzar una temperatura constante, lo cual ocurrió al transcurrir un tiempo de 11 minutos.



Figura N° 8 Medición de la temperatura de la pasta de cemento con NDMA en agitador magnético.

En la Figura N° 9, se representa de manera gráfica el cambio de temperatura a lo largo del tiempo para cada dosificación de reemplazo de NDMA en las mezclas de pasta de cemento.

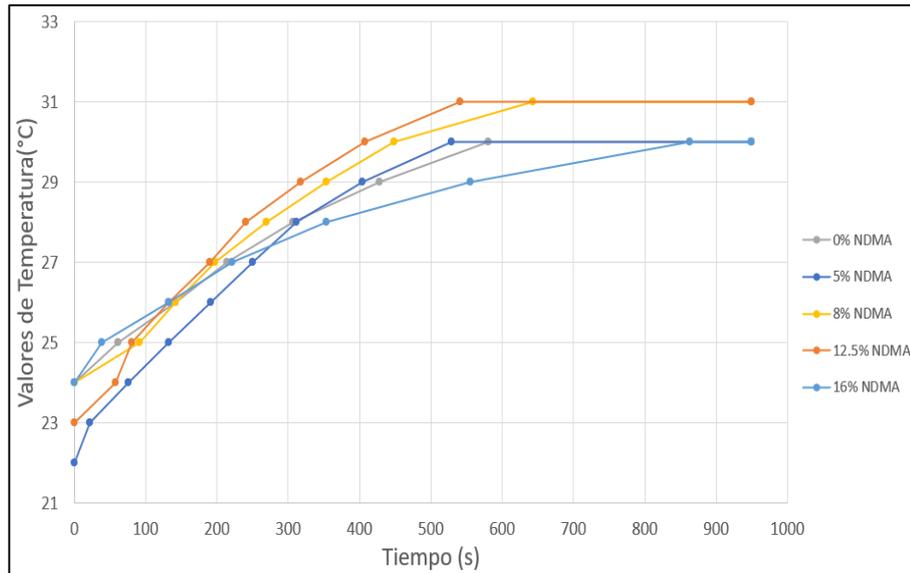


Figura N° 9 Variación de temperatura en el tiempo de mezclas de cemento, agua y NDMA.

Se observa que, ninguna de las cinco mezclas, superaron los 31 °C, así mismo, las mezclas con 0 y 5% tienden a ser similares a partir de los 300 segundos. La mezcla con 16% de NDMA es la que más demora en alcanzar la temperatura final constante, esto ocurre a los 863 segundos; por lo que se puede afirmar que a mayores contenidos de NDMA la temperatura de estabilización de la pasta de cemento aumenta, a excepción de la pasta de cemento con 16% de NDMA.

### 3.1.5 Determinación de la densidad de NDMA

Mediante el uso de picnómetros, se calculó la densidad de las NDMA. Para lograr este propósito se utilizaron 3 muestras midiendo el peso del picnómetro vacío ( $W_p$ ), peso del picnómetro más las NDMA ( $W_{p+m}$ ), peso del picnómetro más las NDMA y agua destilada ( $W_{p+m+a}$ ), y peso del picnómetro más agua destilada ( $W_{p+a}$ ), estas cantidades se muestran en la Tabla N° 6; mediante el uso de la ecuación 5 se calculó el valor de la densidad de las NDMA cuyo valor es 3.27 g/cm<sup>3</sup>.

$$D_m = \frac{(W_{p+m} - W_p)(D_a)}{(W_{p+a} - W_p) - (W_{p+m+a} - W_{p+m})} \quad (5)$$

Donde:

- $D_m$  = Densidad del mineral.
- $W_{p+m}$  = Peso del picnómetro más el mineral.
- $W_p$  = Peso del picnómetro.

$D_a$  = Densidad del agua.  
 $W_{p+a}$  = Peso del picnómetro más el agua.  
 $W_{p+m+a}$  = Peso del picnómetro más agua y mineral.

Tabla N° 6 Valores para el cálculo de la densidad de las NDMA.

Descripción	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P Prom. (g)
<b>Wp</b>	22.32	33.26	24.77	26.78
<b>Wp+m</b>	36.02	52.68	43.77	44.16
<b>Wp+m+a</b>	77.98	96.45	89.85	88.09
<b>Wp+a</b>	68.32	83.01	76.78	76.04

$$D_m = 3.27 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

### 3.1.6 Determinación del área de la superficie específica

Debido al tamaño nanométrico que poseen las partículas del Dióxido de Manganeso, estas poseen una gran área de superficie específica (ASE). Partiendo del tamaño de la nanopartícula determinado en la sección 3.1.2, se calculará el volumen de la esfera que contiene a esta nanopartícula mediante la ecuación 6:

$$V_{\text{esfera}} = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3 \quad (6)$$

Donde:

$r$  = radio de la esfera representada por la nanopartícula en mm.

$$V_{\text{esfera}} = \frac{4}{3} \times \pi \times (0.0000212)^3 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{esfera}} = 3.99113 \times (10)^{-9} \text{ mm}^3$$

Calculando el volumen de 1 g de NDMA aplicando la ecuación 7:

$$V = \frac{W}{\gamma} \quad (7)$$

Donde:

$W$  = peso del material.

$\gamma$  = peso específico del material.

$$V = \frac{1}{3.27} = 0.3058 \text{ cm}^3/\text{g}$$

$$V = 305.8 \text{ mm}^3/\text{g}$$

Mediante la ecuación 8 calcularemos el área de la superficie esférica de una nanopartícula.

$$A_e = 4 \times \pi \times r^2 \quad (8)$$

$$A_e = 4 \times \pi \times (0.0000212)^2$$

$$A_e = 5.64783 \times (10)^{-9} \text{ mm}^2$$

Para calcular la cantidad de esferas presentes en 1 g de NDMA dividiremos  $V / V_{\text{esfera}}$ :

$$\text{Esferas} = 7.66225 \times 10^{15}$$

Finalmente, el área de la superficie esférica total que ocupa 1 g de NDMA (ASE) será igual a la multiplicación entre el  $A_e$  y la cantidad de Esferas presentes en 1 g:

$$\text{ASE} = 43.2 \text{ m}^2/\text{g}$$

### 3.2 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

El H-2020 es un aditivo superplastificante en estado líquido cuyo componente principal son las nanopartículas de sílice. De acuerdo a la clasificación de la norma ASTM este aditivo es del tipo F, calificado como aditivo reductor de agua de alto rango.

#### 3.2.1 Características:

- Reduce el agua de diseño hasta un 45%.
- Mejora y retarda la disminución de la consistencia sin alterar el proceso de fraguado.
- Altera la reología de la mezcla ofreciendo una fluidez alta sin presencia de segregación.

#### 3.2.2 Propiedades físicas:

- Estado líquido.
- Color blanco opalescente.
- Densidad de 1.1 g/ml.

### 3.3 CEMENTO PORTLAND TIPO I

Es el cemento Portland de la marca Sol, sirve para uso general y cumple con la norma ASTM C150. Tiene una densidad de 3.13 g/cm<sup>3</sup> y una superficie específica de 323 m<sup>2</sup>/kg de acuerdo a la ficha técnica suministrada por el fabricante. La composición química se muestra en la Tabla N° 7.

Tabla N° 7 Composición química del cemento Portland tipo I.

Composición química	% en peso
3CaO.SiO <sub>2</sub>	55
2CaO.SiO <sub>2</sub>	12
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
MgO	2.9
SO <sub>3</sub>	2.8

Fuente: Ficha Técnica Cemento Sol.

### 3.4 AGREGADO FINO

El agregado fino utilizado para el diseño de mezcla de concreto es la arena gruesa, suministrada por la compañía LUK E.I.R.L ubicada en el Fundo Las Salinas, Lurín; esta arena proviene de la desintegración artificial de rocas, cuyas dimensiones están normalizadas, a continuación, se detallarán las propiedades más importantes con la finalidad de realizar el diseño de mezcla.

#### 3.4.1 Determinación de la Granulometría y Módulo de Finura

Se realizó el ensayo de granulometría del agregado fino según la ASTM C136, mediante el uso de tamices estandarizados de acuerdo a la norma ASTM C33, en la Tabla N° 8, se muestran los valores obtenidos del peso retenido en gramos, así como también los porcentajes de peso retenido y pasante del agregado fino. Con estos valores, se calculó el Módulo de Finura sumando todos los porcentajes de pesos retenidos acumulados hasta la malla N°100 y dividiéndolo entre 100, ecuación 9, dando como resultado 2.5. Según la mencionada norma, este valor debe estar entre 2.3 y 3.1, por lo cual el resultado se encuentra dentro de las especificaciones.

Tabla N° 8 Granulometría del Agregado Fino.

Tamiz #	Abertura de la malla (mm)	Peso Retenido	% Peso Retenido	% Peso Retenido Acumulado	% que pasa
3/8"	9.500		0.00%	0.00%	100.00%
# 4	4.750	6.37	1.06%	1.06%	98.94%
# 8	2.360	99.27	16.54%	17.60%	82.40%
# 10	2.000		0.00%	17.60%	82.40%
# 16	1.180	94.07	15.67%	33.27%	66.73%
# 20	0.850		0.00%	33.27%	66.73%
# 30	0.600	86.37	14.39%	47.67%	52.33%
# 40	0.425		0.00%	47.67%	52.33%
# 50	0.300	114.27	19.04%	66.70%	33.30%
# 60	0.250		0.00%	66.70%	33.30%
# 80	0.180		0.00%	66.70%	33.30%
# 100	0.150	98.77	16.46%	83.16%	16.84%
# 200	0.075	100.87	16.81%	99.97%	0.03%
	Fondo		0.00%		
	$\Sigma$	600.00	100.00%		

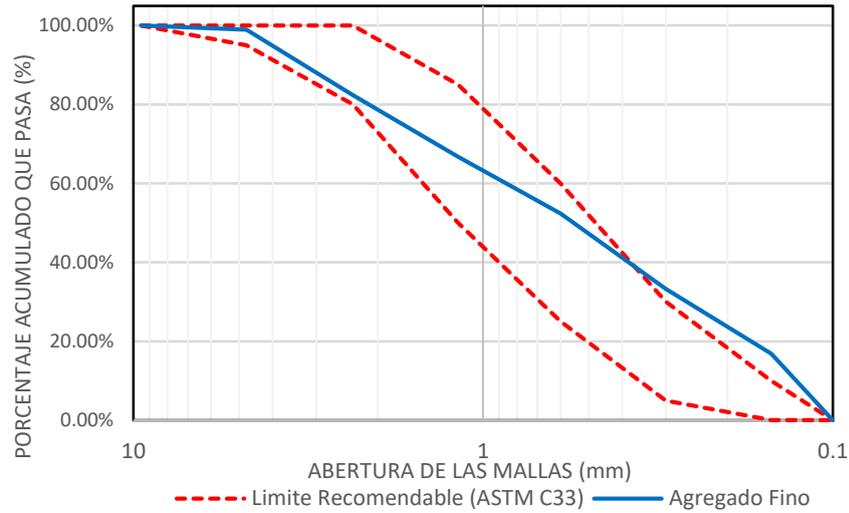
De acuerdo a la norma ASTM C33, establece límites recomendados para la granulometría del agregado fino, estos límites se presentan en la Tabla N° 9.

Tabla N° 9 Límites recomendables por la ASTM C33 para el Agregado Fino.

Tamiz	Abertura de la malla (mm)	Límite Superior Recomendable (ASTM C33)	Límite Inferior Recomendable (ASTM C33)
3/8"	9.5	100.00%	100.00%
N°4	4.75	100.00%	95.00%
N°8	2.36	100.00%	80.00%
N°16	1.18	85.00%	50.00%
N°30	0.6	60.00%	25.00%
N°50	0.3	30.00%	5.00%
N°100	0.15	10.00%	0.00%
Fondo	-	0.00%	0.00%

Fuente: ASTM C33.

En la Figura N° 10 se presenta de manera gráfica los valores de porcentaje acumulado que pasan cada diámetro de abertura de la malla de los tamices según la norma ASTM C33.



Peso de la muestra secada al horno (g) ( <b>H</b> )	495.9
Volumen del Balón (cm <sup>3</sup> ) ( <b>V</b> )	500.0

Mediante el uso de la ecuación 10 se determinó el peso específico de masa:

$$\text{Peso específico de masa} \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{H}{V-W} \quad (10)$$

$$\text{Peso específico de masa} = 2.639 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

#### 3.4.3 Determinación del Porcentaje de Absorción

Se determinó el porcentaje de absorción en base a la norma ASTM C128-22. Mediante el uso de la ecuación 11 se calculó el porcentaje de absorción del agregado fino.

$$\text{Porcentaje de Absorción (\%)} = 100 * \left( \frac{S-H}{H} \right) \quad (11)$$

$$\text{Porcentaje de Absorción} = 0.827 \%$$

#### 3.4.4 Determinación del Contenido de Humedad

Se determinó el contenido de humedad del agregado fino teniendo como referencia la norma ASTM C566-19. En la Tabla N° 11 se muestran los valores para el cálculo del contenido de humedad.

Tabla N° 11 Datos para cálculo del Contenido de Humedad del Agregado Fino.

Descripción	Cantidad
Peso de la muestra en ambiente (g) ( <b>Wh</b> )	500.0
Peso de la muestra seca al horno (g) ( <b>Ws</b> )	494.6
Peso del agua perdida (g) ( <b>Wh - Ws</b> )	5.4

Mediante la aplicación de la ecuación 12 se calculó el contenido de humedad del agregado fino.

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = 100 * \left( \frac{W_h - W_s}{W_s} \right) \quad (12)$$

$$\text{Contenido de Humedad} = 1.09 \%$$

### 3.4.5 Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado

Se determinó el peso unitario suelto y compactado tomando como referencia la norma internacional ASTM C29, los datos se muestran en la Tabla N° 12.

Tabla N° 12 Datos para cálculo del peso unitario suelto y compactado del Agregado Fino.

Descripción	Cantidad
Peso de la muestra suelta + recipiente (kg) (A)	19.90
Peso de la muestra compactada + recipiente (kg) (B)	22.10
Peso del recipiente (kg) (C)	4.33
Peso de la muestra suelta (kg) (A - C)	15.57
Peso de la muestra compactada (kg) (B - C)	17.77
Volumen del recipiente (m <sup>3</sup> ) (D)	0.00944

Mediante la aplicación de las ecuaciones 13 y 14 se calculó el peso unitario suelto y compactado del agregado fino respectivamente.

$$\text{Peso Unitario Suelto} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{A-C}{D} \quad (13)$$

$$\text{Peso Unitario Suelto} = 1,649.55 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Peso Unitario Compactado} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{B-C}{D} \quad (14)$$

$$\text{Peso Unitario Compactado} = 1,882.63 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

## 3.5 AGREGADO GRUESO

El agregado grueso utilizado para el diseño de mezcla de concreto es la piedra chancada, este agregado se consigue a través de la trituración de las rocas mediante maquinarias especializadas. Para un buen desempeño en la mezcla, este agregado debe estar libre de arcillas, polvo u otro material extraño en su superficie. A continuación, se caracterizarán las propiedades del agregado grueso para la consideración en el diseño de mezcla.

### 3.5.1 Determinación de la Granulometría y Módulo de Finura

Se realizó el ensayo de granulometría del agregado grueso según la norma internacional ASTM C136, en la Tabla N° 13 se muestran los valores obtenidos del peso retenido en gramos, así como también los porcentajes de peso retenido y pasante del agregado grueso.

Tabla N° 13 Granulometría del Agregado Grueso.

Tamiz #	Abertura de la malla (mm)	Peso Retenido	% Peso Retenido	% Peso Retenido Acumulado	% que pasa
1"	25.00	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
3/4"	19.00	5.10	0.05%	0.05%	99.95%
1/2"	12.50	3,610.50	36.11%	36.16%	63.84%
3/8"	9.50	2,888.80	28.89%	65.04%	34.96%
1/4"	6.30		0.00%	65.04%	34.96%
N°4	4.75	3,303.80	33.04%	98.08%	1.92%
	Fondo	191.80	1.92%		
	Σ	10,000.00	100.00%		

En la Tabla N° 14 se muestran los valores límite para el agregado grueso según la ASTM C33, para la presente investigación se eligió los límites correspondiente al huso 67 (TMN de 3/4" a N°4).

Tabla N° 14 Límites recomendables por la ASTM C33 para el Agregado Grueso.

Tamiz	Abertura de la malla (mm)	Límite Superior Recomendable (ASTM C33)	Límite Inferior Recomendable (ASTM C33)
1"	25	100.00%	100.00%
3/4"	19	100.00%	90.00%
3/8"	9.5	55.00%	20.00%
N° 4	4.75	10.00%	0.00%
Fondo	-	0.00%	0.00%

Fuente: ASTM C33.

En base a los valores obtenidos, en la Figura N° 11 se muestra la curva granulométrica en la cual los valores del porcentaje que pasa en cada tamiz cumplen con la especificación de la norma internacional ASTM C33.

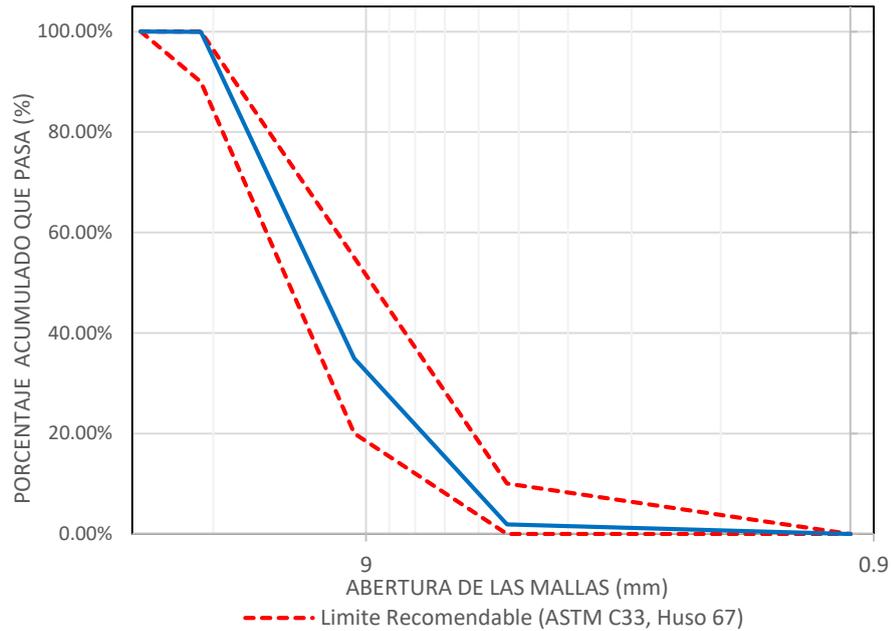


Figura N° 11 Curva Granulométrica del Agregado Grueso.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ Ret. Acum. (11/2" ; 3/4" ; 3/8" ; \#4 ; \#8 ; \#16 ; \#30 ; \#50 ; \#100)}}{100} \quad (15)$$

$$MF = 6.54$$

### 3.5.2 Tamaño Máximo y Tamaño Máximo Nominal

En base a los valores obtenidos de la granulometría del agregado grueso, se calculó el Tamaño Máximo (TM) y Tamaño Máximo Nominal (TMN), según la NTP 400.037, el valor del TM es aquel menor tamiz por el cual se tiene el 100% del material pasante y el TMN es aquel peso del tamiz en el cual se origina el primer peso retenido entre 5% y 10%, según los resultados de la Tabla N° 13, el valor del TM es 1", así mismo el valor del TMN corresponde a 1/2".

### 3.5.3 Determinación del Peso Específico

Se determinó el peso específico de masa del agregado grueso según la norma ASTM C127-15. En la Tabla N° 15 se muestran los valores obtenidos para el cálculo del peso específico de masa.

Tabla N° 15 Datos para cálculo del Peso Específico de Masa del Agregado Grueso.

Descripción	Cantidad
Peso de la muestra secada al horno (g) ( <b>A</b> )	3,968.1
Peso de la muestra Saturada Superficialmente Seca (g) ( <b>B</b> )	4,000.0
Peso de la muestra saturada en agua (g) ( <b>C</b> )	2,522.2

Mediante el uso de la ecuación 16 se determinó el peso específico de masa:

$$\text{Peso específico de masa } \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{A}{B-C} \quad (16)$$

$$\text{Peso específico de masa} = 2.718 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

#### 3.5.4 Determinación del Porcentaje de Absorción

Se determinó el porcentaje de absorción en base a la norma ASTM C127-15. Mediante el uso de la ecuación 17 se calculó el porcentaje de absorción del agregado grueso.

$$\text{Porcentaje de Absorción (\%)} = 100 * \left( \frac{B-A}{A} \right) \quad (17)$$

$$\text{Porcentaje de Absorción} = 1.714 \%$$

#### 3.5.5 Determinación del Contenido de Humedad

Se determinó el contenido de humedad del agregado grueso teniendo como referencia la norma NTP 339.185. En la Tabla N° 16 se muestran los valores para el cálculo del contenido de humedad.

Tabla N° 16 Datos para cálculo del Contenido de Humedad del Agregado Grueso.

Descripción	Cantidad
Peso de la muestra en ambiente (g) ( <b>Wh</b> )	4,000.2
Peso de la muestra seca al horno (g) ( <b>Ws</b> )	3,983.7
Peso del agua perdida (g) ( <b>Wh - Ws</b> )	16.5

Mediante la aplicación de la ecuación 18 se calculó el contenido de humedad del agregado grueso.

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = 100 * \left( \frac{W_h - W_s}{W_s} \right) \quad (18)$$

$$\text{Contenido de Humedad} = 0.41 \%$$

### 3.5.6 Determinación del Peso Unitario Suelto y Compactado

Se determinó el peso unitario suelto y compactado tomando como referencia la norma internacional ASTM C29. Los datos se muestran en la Tabla N° 17.

Tabla N° 17 Datos para cálculo del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso.

Descripción	Cantidad
Peso de la muestra suelta + recipiente (kg) (A)	17.47
Peso de la muestra compactada + recipiente (kg) (B)	19.17
Peso del recipiente (kg) (C)	4.33
Peso de la muestra suelta (kg) (A - C)	13.14
Peso de la muestra compactada (kg) (B - C)	14.84
Volumen del recipiente (m <sup>3</sup> ) (D)	0.00944

Mediante la aplicación de las ecuaciones 19 y 20 se calculó el peso unitario suelto y compactado del agregado grueso respectivamente.

$$\text{Peso Unitario Suelto} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{A-C}{D} \quad (19)$$

$$\text{Peso Unitario Suelto} = 1,392.104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Peso Unitario Compactado} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{B-C}{D} \quad (20)$$

$$\text{Peso Unitario Compactado} = 1,572.209 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### 3.6 AGUA

El agua utilizada para la mezcla de concreto es el agua potable suministrada por SEDAPAL en Lima Metropolitana. En la Tabla N° 18 se muestran las especificaciones de las sustancias presentes en el agua potable de Lima Metropolitana.

Tabla N° 18 Ensayo Químico de Agua Potable en Lima Metropolitana.

<b>Ensayo</b>	<b>Cantidad</b>
Residuos sólidos totales	2,217.5 ppm
Contenido de Sulfatos	501.8 ppm
Contenido de Cloruros	289.0 ppm
Alcalinidad a 23.5 °C	773.0 ppm
pH a 23.5°C	7.8

Fuente: Informe de Ensayos Químicos, UNICON.

## CAPÍTULO IV: DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO

Mediante la aplicación del método de Bolomey se realizaron 3 diseños de mezcla de concreto patrón y 6 diseños de mezcla con reemplazo parcial del cemento por nanopartículas de dióxido de manganeso anódico.

### 4.1 DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO PATRÓN

En esta sección se presenta la secuencia para el cálculo de la dosificación de los componentes de los 3 diseños de mezcla para el concreto patrón.

#### 4.1.1 Selección de la relación agua – cemento

Se seleccionaron 3 valores de relación agua – cemento (0.40, 0.45, 0.50), para cada uno de los diseños, los cuales son:

Diseño 1 Patrón :  $\frac{a}{c} = 0.40$ ; 0.0% *NDMA*

Diseño 2 Patrón :  $\frac{a}{c} = 0.45$ ; 0.0% *NDMA*

Diseño 3 Patrón :  $\frac{a}{c} = 0.50$ ; 0.0% *NDMA*

#### 4.1.2 Selección del asentamiento

Con la finalidad de conseguir un diseño trabajable, se seleccionó un asentamiento para conseguir una mezcla fluida para los 3 diseños de concreto patrón.

$$\text{Asentamiento} = 7''$$

#### 4.1.3 Selección del tamaño máximo nominal

Se realizó la selección del TMN del agregado grueso de acuerdo al apartado 3.5.1. de la presente investigación correspondiente a los 3 diseños de concreto patrón.

$$\text{TMN} = 1/2''$$

#### 4.1.4 Selección del volumen unitario de agua

Para el cálculo del volumen unitario de agua, se realizará de la misma manera que en el diseño por el método del ACI utilizando los valores de la Tabla N° 19.

Tabla N° 19 Volumen Unitario de Agua para concreto sin aire incorporado.

<b>Volumen Unitario de Agua</b>								
Agua en l/m <sup>3</sup> , para los tamaños máximo nominales de agregado grueso y consistencia indicada								
Asentamiento	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto 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	-

Fuente: Comité 211 del ACI.

Tomando en cuenta la selección del asentamiento y del TMN en los apartados 4.2. y 4.3. respectivamente, la cantidad de agua requerida para las mezclas de los 3 diseños del concreto patrón es:

$$\text{Cantidad de agua} = 228 \text{ lt} / \text{m}^3$$

Debido a la adición del aditivo superplastificante H-2020, el cual tiene como características la posibilidad de reducir el porcentaje de agua en la mezcla de concreto, se seleccionaron valores de porcentaje de aditivo y reducción de agua para cada uno de los diseños de mezcla previa realización de tandas de reajuste, los valores se muestran en la Tabla N° 20.

Tabla N° 20 Reducción de agua para valores de a/c.

Relación agua-cemento	% de Aditivo H-2020	Reducción de agua
0.40	1.2 %	10%
0.45	1.1 %	10%
0.50	1.0 %	9%

Las cantidades de agua por cada 1 m<sup>3</sup> de mezcla utilizada en cada diseño se muestran en la Tabla N° 21.

Tabla N° 21 Volumen de agua para cada relación a/c.

Relación agua-cemento	Cantidad de agua (lt / m <sup>3</sup> )
0.40	205.20
0.45	205.20
0.50	207.48

#### 4.1.5 Selección del contenido de aire

La selección del contenido de aire se realizó de acuerdo al método del ACI mediante el valor seleccionado del Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso mediante el uso de la Tabla N° 22.

Tabla N° 22 Contenido de aire atrapado.

Contenido de Aire Atrapado	
Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	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%

Fuente: ACI.

Según esta tabla, el contenido de aire atrapado correspondiente al tamaño máximo nominal del agregado grueso de 1/2" de los 3 diseños de mezcla de concreto patrón tiene un valor de 2.5%.

#### 4.1.6 Determinación de la cantidad de cemento

En base a los valores de la relación de agua – cemento y la cantidad de agua, se calculó la cantidad de cemento en cada diseño mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de cemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Volumen unitario de agua} \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Relación de agua-cemento}} \quad (21)$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.40:

$$\text{Cantidad de cemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{205.20 \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)}{0.40}$$

$$\text{Cantidad de cemento} = 513.00 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.45:

$$\text{Cantidad de cemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{205.20 \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)}{0.45}$$

$$\text{Cantidad de cemento} = 456.00 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.50:

$$\text{Cantidad de cemento} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{207.48 \left( \frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right)}{0.50}$$

$$\text{Cantidad de cemento} = 414.96 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

#### 4.1.7 Porcentaje de participación del cemento como agregado global

En la ecuación 22 se muestra la fórmula para determinar el porcentaje de cemento como agregado:

$$t_0(\%) = \frac{C/d_c}{1-(A+\% \text{ Aire})} \quad (22)$$

Donde:

$t_0$  = Porcentaje de participación del cemento en el agregado global

$C$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) = Peso del cemento por metro cubico de concreto

$d_c$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) = Peso específico del cemento

$1$  ( $\text{m}^3$ ) = Volumen total de los componentes de la mezcla de concreto

$A$  ( $\text{m}^3$ ) = Volumen unitario de agua por metro cubico de concreto

$\% \text{ Aire}$  ( $\text{m}^3$ ) = Porcentaje de aire en la mezcla

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.40:

$$t_0(\%) = \frac{513/3,190}{1-(0.2052+0.025)}$$

$$t_0 = 21.29 \%$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.45:

$$t_0(\%) = \frac{456/3,190}{1-(0.2052+0.025)}$$

$$t_0 = 18.57 \%$$

Diseño de Mezcla Patrón  $a / c = 0.50$ :

$$t_0(\%) = \frac{414.96/3,190}{1-(0.20748+0.025)}$$

$$t_0 = 16.95 \%$$

#### 4.1.8 Determinación de la curva de Bolomey

Con la finalidad de determinar la curva de Bolomey, se utilizó la siguiente formula:

$$Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (23)$$

Donde:

$Y(\%)$  = Porcentaje acumulado que pasa por la malla de abertura "d".

$d$  (mm) = Abertura de la malla respectiva.

$D$  (mm) = Tamaño máximo del agregado total.

$A$  = Coeficiente empírico, depende de la forma del agregado y del asentamiento.

En la Tabla N° 23 se muestran los posibles valores del coeficiente A, para la presente investigación seleccionaremos el valor de  $A = 14$ , debido a que el agregado grueso es de forma angular, así como también el asentamiento escogido es de  $7'' = 177.8$  mm.

Tabla N° 23 Valores del coeficiente A.

Forma del agregado grueso	Consistencia de la mezcla	Asentamiento (mm)	A
Redondeada	Seca - Plástica	0 - 50	10
	Blanda	50 - 100	11
	Fluida	100 - 200	12
Angular	Seca - Plástica	0 - 50	12
	Blanda	50 - 100	13
	Fluida	100 - 200	14

Fuente: Bolívar (2006).

Para el cálculo del tamaño máximo en el método de Bolomey, según Coasaca (2018), corresponde al primer tamiz que retiene menos del 25% del agregado grueso de tamaño más grande, en este caso, se consideró como tamaño máximo al tamiz de 1/2". En la Tabla N° 24 se muestran los valores correspondientes a la curva de Bolomey.

Tabla N° 24 Granulometría de Bolomey correspondiente al TM 1/2"

Curva de Bolomey		TM (1/2")
Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	12.7 mm
		% que pasa
3"	75	100%
2 1/2"	63.5	100%
2"	50.8	100%
1 1/2"	38.1	100%
1"	25.4	100%
3/4"	19.05	100%
1/2"	12.7	100%
3/8"	9.525	88%
1/4"	6.35	75%
N° 4	4.75	67%
N° 8	2.36	51%
N° 16	1.18	40%
N° 30	0.6	33%
N° 50	0.3	27%
N° 100	0.15	23%
N° 200	0.075	21%

En la Figura N° 12 se representan los valores correspondientes a la granulometría de Bolomey para un TM igual a 1/2".

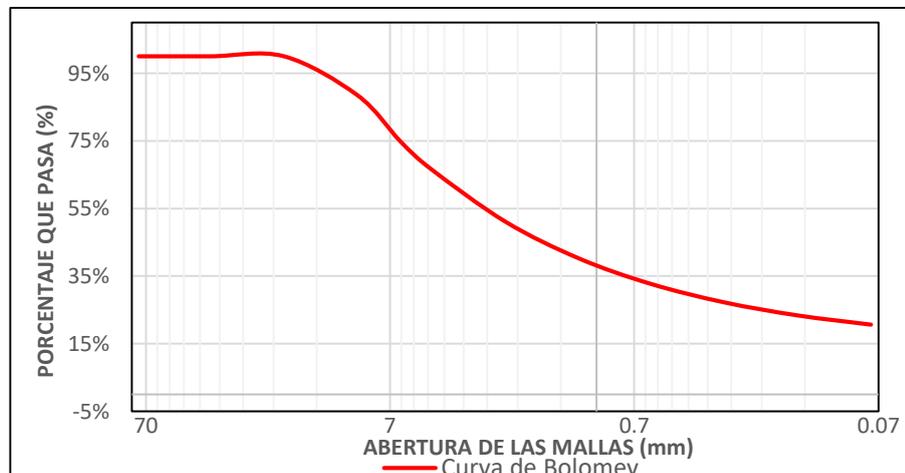


Figura N° 12 Curva Granulométrica de Bolomey para TM 1/2".

#### 4.1.9 Determinación del contenido de agregado fino y grueso

Con el objetivo de determinar el contenido de agregado fino y grueso presentes en la mezcla de concreto, se utilizará el método de módulo de fineza, en el cual se aplicará la ecuación 24, 25 y 26.

$$t_0+t_1+t_2 = 100\% \quad (24)$$

$$MFB_2 = \frac{MF_0 \times t_0 + MF_1 \times t_1 + MF_2 \times t_2}{t_0 + t_1 + t_2} \quad (25)$$

$$t_1 = \frac{100(MF_2 - MFB_2) - (t_0 \times MF_2)}{MF_2 - MF_1} \quad (26)$$

Donde:

$MFB_2$  = Módulo de Fineza de la curva de Bolomey.

$MF_0$  = Módulo de Fineza del cemento, se considera 0 en este método.

$MF_1$  = Módulo de Fineza del agregado fino.

$MF_2$  = Módulo de Fineza del agregado grueso.

$t_0$  = Porcentaje de volumen del cemento en el agregado global.

$t_1$  = Porcentaje de volumen del agregado fino en el agregado global.

$t_2$  = Porcentaje de volumen del agregado grueso en el agregado global.

A continuación, se determinará el módulo de fineza de la curva de Bolomey ( $MFB_2$ ) mediante la resta entre el 100% y el porcentaje acumulado que pasa por la malla de abertura "d" para un TM = 1/2", en la Tabla N° 25 se muestran los valores de  $MFB_2$  obtenidos.

Tabla N° 25 Módulo de Fineza de la curva de Bolomey.

Curva de Bolomey		TM (1/2")	
Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	12.7 mm	
		Y	MFB2
3"	75.00	100%	0%
1 1/2"	38.10	100%	0%
3/4"	19.05	100%	0%
3/8"	9.525	88%	12%

1/4"	6.35	75%	25%
N° 4	4.75	67%	33%
N°8	2.36	51%	49%
N° 16	1.18	40%	60%
N° 30	0.60	33%	67%
N° 50	0.30	27%	73%
N° 100	0.15	23%	77%
N° 200	0.075	21%	79%
<b>MFB2</b>			<b>475%</b>

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.40:

$$t_1 = \frac{100(6.54-4.75)-(0.2129 \times 6.54)}{6.54-2.50} = 43.91\%$$

$$t_2 = 1-(0.2129+0.4391) = 34.79\%$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.45:

$$t_1 = \frac{100(6.54-4.75)-(0.1857 \times 6.54)}{6.54-2.50} = 43.96\%$$

$$t_2 = 1-(0.1857+0.4396) = 37.47\%$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.50:

$$t_1 = \frac{100(6.54-4.75)-(0.1695 \times 6.54)}{6.54-2.50} = 43.98\%$$

$$t_2 = 1-(0.1695+0.4398) = 39.07\%$$

#### 4.1.10 Determinación de volúmenes absolutos de los componentes de la mezcla

Para calcular el volumen absoluto del aire y agua por metro cúbico de mezcla de concreto se procedió a sumar los resultados obtenidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Volumen Abs. de Aire (m}^3\text{)} = \frac{\% \text{ Aire}}{100} \quad (27)$$

$$\text{Volumen Abs. de Agua (m}^3\text{)} = \frac{\text{Peso unitario de agua } \left(\frac{\text{lt}}{\text{m}^3}\right)}{\text{Peso específico del agua } \left(\frac{\text{lt}}{\text{m}^3}\right)} \quad (28)$$

Luego de calcular la suma de estos volúmenes absolutos, se procede a restar esta cantidad a 1 metro cubico de mezcla para obtener la suma de los volúmenes absolutos de los agregados (cemento, agregado fino y agregado grueso) mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Vol. Abs. de Agregados (m3)} = 1 - \text{Vol. Abs (Aire y Agua)(m3)} \quad (29)$$

Para calcular el volumen absoluto del cemento, agregado fino y agregado grueso se deben aplicar las siguientes formulas:

$$\text{Vol. Abs. de Cemento (m3)} = \text{Vol. Abs de Agregados} \times t_0 \quad (30)$$

$$\text{Vol. Abs. de Agregado Fino (m3)} = \text{Vol. Abs de Agregados} \times t_1 \quad (31)$$

$$\text{Vol. Abs. de Agregado Grueso (m3)} = \text{Vol. Abs de Agregados} \times t_2 \quad (32)$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.40:

Volumen Abs. de Aire = 0.025 m3

$$\text{Volumen Abs. de Agua} = \frac{205.200}{1000} = 0.205 \text{ m3}$$

Volumen Abs. de Aire y Agua = 0.230 m3

Vol. Abs. de Agregados =  $1 - 0.230 = 0.770 \text{ m3}$

Vol. Abs. del Cemento =  $0.770 \times 0.2129 = 0.164 \text{ m3}$

*Vol. Abs. del A. Fino* =  $0.770 \times 0.4391 = 0.338 \text{ m3}$

Vol. Abs. del A. Grueso =  $0.770 \times 0.3479 = 0.268 \text{ m3}$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.45:

Volumen Abs. de Aire = 0.025 m3

$$\text{Volumen Abs. de Agua} = \frac{205.200}{1000} = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Abs. de Aire y Agua} = 0.230 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. de Agregados} = 1 - 0.230 = 0.770 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. del Cemento} = 0.770 \times 0.1857 = 0.143 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. del A. Fino} = 0.770 \times 0.4396 = 0.338 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. del A. Grueso} = 0.770 \times 0.3747 = 0.288 \text{ m}^3$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.50:

$$\text{Volumen Abs. de Aire} = 0.025 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Abs. de Agua} = \frac{207.480}{1000} = 0.207 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Abs. de Aire y Agua} = 0.232 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. de Agregados} = 1 - 0.232 = 0.768 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. del Cemento} = 0.768 \times 0.1695 = 0.130 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. del A. Fino} = 0.768 \times 0.4398 = 0.338 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. del A. Grueso} = 0.768 \times 0.3907 = 0.300 \text{ m}^3$$

#### 4.1.11 Determinación de los pesos secos de los agregados

Aplicando la ecuación 33 calcularemos el peso en kilogramos por metro cubico de los componentes de agregados en la mezcla multiplicando el volumen absoluto respectivo por su correspondiente peso específico.

$$W_{\text{seco}} \text{ Agregado} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \text{Vol. del Agregado} * W_{\text{específico del agregado.}} \quad (33)$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.40:

$$W_{\text{seco}} \text{ Cemento} = 0.164 \times 3130 = 513.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{seco}} \text{ Agregado Fino} = 0.338 \times 2,639.17 = 892.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{seco}} \text{ Agregado Grueso} = 0.268 \times 2,717.80 = 727.96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.45:

$$W_{\text{seco}} \text{ Cemento} = 0.143 \times 3130 = 456.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{seco}} \text{ Agregado Fino} = 0.338 \times 2,639.17 = 893.07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{seco}} \text{ Agregado Grueso} = 0.288 \times 2,717.80 = 783.98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.50:

$$W_{\text{seco}} \text{ Cemento} = 0.130 \times 3130 = 414.96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{seco}} \text{ Agregado Fino} = 0.338 \times 2,639.17 = 890.96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{seco}} \text{ Agregado Grueso} = 0.300 \times 2,717.80 = 814.93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 4.1.12 Corrección por humedad de los agregados fino y grueso

Debido a la humedad que posee el agregado fino (A.F.) y grueso (A.G.), se debe hacer una corrección al peso seco para considerarlo dentro de la participación de la mezcla mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Corrección del Agregado} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{W_{\text{seco}} \text{ Agregado} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\frac{\% \text{ Humedad A.F.}}{100} + 1} \quad (34)$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.40:

$$\text{Corrección A.F.} = \frac{892.18}{\frac{1.09}{100} + 1} = 901.90 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Corrección A.G.} = \frac{727.96}{\frac{0.832}{100} + 1} = 734.02 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Diseño de Mezcla Patrón  $a / c = 0.45$ :

$$\text{Corrección A.F.} = \frac{893.07}{\frac{1.09}{100} + 1} = 902.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Corrección A.G.} = \frac{783.98}{\frac{0.832}{100} + 1} = 790.51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Diseño de Mezcla Patrón  $a / c = 0.50$ :

$$\text{Corrección A.F.} = \frac{890.96}{\frac{1.09}{100} + 1} = 900.67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Corrección A.G.} = \frac{814.93}{\frac{0.832}{100} + 1} = 821.71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 4.1.13 Determinación del aporte de agua libre de los agregados

Durante la mezcla de los componentes del concreto, el agregado fino y el agregado grueso contienen humedad libre, esto altera el valor del agua presente en la mezcla por lo cual se debe calcular el aporte de agua libre de los agregados y el agua de diseño, por lo cual se aplicarán las siguientes ecuaciones:

$$\text{Aporte de agua}_{\text{Agreg.}} (\text{L}) = \frac{\% \text{ Humedad} - \% \text{ Abs.}}{100} * W_{\text{seco}} \text{ Agreg.} \quad (35)$$

$$\text{Agua de Diseño (L)} = \text{Vol. Abs. Agua} - (\text{Aporte de agua}_{\text{A.F.} + \text{A.G.}}) \quad (36)$$

Diseño de Mezcla Patrón  $a / c = 0.40$ :

$$\text{Aporte de agua}_{\text{A.F.}} = \frac{1.09 - 0.82}{100} \times 892.18 = 2.409 \text{ L}$$

$$\text{Aporte de agua}_{\text{A.G.}} = \frac{0.83 - 1.71}{100} \times 727.93 = -6.423 \text{ L}$$

$$\text{Agua de Diseño} = 205.2 - (2.409 - 6.423) = 196.369 \text{ L}$$

Diseño de Mezcla Patrón  $a / c = 0.45$ :

$$\text{Aporte de agua}_{\text{A.F.}} = \frac{1.09 - 0.82}{100} \times 893.07 = 2.411 \text{ L}$$

$$\text{Aporte de agua}_{\text{A.G.}} = \frac{0.83 - 1.71}{100} \times 783.98 = -6.917 \text{ L}$$

$$\text{Agua de Diseño} = 205.2 - (2.411 - 6.917) = 195.872 \text{ L}$$

Diseño de Mezcla Patrón a / c = 0.50:

$$\text{Aporte de agua}_{A.F.} = \frac{1.09-0.82}{100} \times 890.96 = 2.406 \text{ L}$$

$$\text{Aporte de agua}_{A.G.} = \frac{0.83-1.71}{100} \times 814.93 = -7.190 \text{ L}$$

$$\text{Agua de Diseño} = 207.48 - (2.406 - 7.190) = 197.885 \text{ L}$$

#### 4.2 TABLAS DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO PATRÓN

En las siguientes tablas se muestran las dosificaciones de mezcla para 1 metro cúbico de concreto patrón referente a cada uno de los diseños de relaciones agua - cemento:

Tabla N° 26 Dosificación para 1 m3 de concreto Patrón, a/c=0.40.

<b>DISEÑO PARA CEMENTO TIPO 1 (SOL) RELACION A/C = 0.40, PATRÓN</b>						
Especificaciones		Material	Peso Seco (kg/m3)	Peso Húmedo (kg/m3)	Unidad	Volumen para 1 m3 de mezcla (m3/m3)
		Cemento	513.00	513.00	kg	0.161
% de Aditivo	1.20%	Agua	205.20	196.37	L	0.196
Reducción de Agua	10%	Piedra	727.96	734.02	kg	0.270
% NDMA	0.00%	Arena	892.18	901.90	kg	0.342
a/c de diseño	0.40	Aire	-	-	-	0.025
Slump	7"	Aditivo	6.16	6.16	kg	0.006
		Total	2,344.50	2,351.45	kg	1.000

Tabla N° 27 Dosificación para 1 m3 de concreto Patrón, a/c=0.45.

<b>DISEÑO PARA CEMENTO TIPO 1 (SOL) RELACION A/C = 0.45, PATRÓN</b>						
Especificaciones		Material	Peso Seco (kg/m3)	Peso Húmedo (kg/m3)	Unidad	Volumen para 1 m3 de mezcla (m3/m3)
		Cemento	456.00	456.00	kg	0.143
% de Aditivo	1.10%	Agua	205.20	195.87	L	0.196
Reducción de Agua	10%	Piedra	783.98	790.51	kg	0.291
% NDMA	0.00%	Arena	893.07	902.81	kg	0.342
a/c de diseño	0.45	Aire	-	-	-	0.025
Slump	7"	Aditivo	5.02	5.02	kg	0.005
		Total	2,343.27	2,350.20	kg	1.000

Tabla N° 28 Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c=0.50.

<b>DISEÑO PARA CEMENTO TIPO 1 (SOL) RELACION A/C = 0.50, PATRÓN</b>						
Especificaciones		Material	Peso Seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Húmedo (kg/m <sup>3</sup> )	Unidad	Volumen para 1 m <sup>3</sup> de mezcla (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) *
		Cemento	414.96	414.96	kg	0.130
% de Aditivo	1.00%	Agua	207.48	197.88	L	0.198
Reducción de Agua	9%	Piedra	814.93	821.71	kg	0.302
% NDMA	0.00%	Arena	890.96	900.67	kg	0.341
a/c de diseño	0.50	Aire	-	-	-	0.025
Slump	7"	Aditivo	4.15	4.15	kg	0.004
		Total	2,332.48	2,339.37	kg	1.000

#### 4.3 TABLAS DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON NDMA

En base a las tablas de dosificación de los concretos patrones, se elaboraron, para cada relación de agua – cemento, las tablas de dosificación de los concretos con reemplazo parcial de 5% y 10% del peso de cemento por NDMA, en las siguientes tablas se muestran los valores de cemento y NDMA para cada diseño.

Tabla N° 29 Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de concreto con NDMA, a/c=0.40

DOSIFICACIÓN PARA A/C=0.40			
Porcentaje de Reemplazo de Cemento por NDMA	Peso del Cemento Patrón (kg)	Peso del Cemento (kg)	Peso de NDMA (kg)
5%	513.00	487.35	25.65
10%	513.00	461.70	51.30

Tabla N° 30 Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de concreto con NDMA, a/c=0.45.

DOSIFICACIÓN PARA A/C=0.45			
Porcentaje de Reemplazo de Cemento por NDMA	Peso del Cemento Patrón (kg)	Peso del Cemento (kg)	Peso de NDMA (kg)
5%	456.00	433.20	22.80
10%	456.00	410.40	45.60

Tabla N° 31 Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de concreto con NDMA, a/c=0.50.

DOSIFICACIÓN PARA A/C=0.50			
Porcentaje de Reemplazo de Cemento por NDMA	Peso del Cemento Patrón (kg)	Peso del Cemento (kg)	Peso de NDMA (kg)
5%	414.96	394.21	20.75
10%	414.96	373.46	41.50

#### 4.4 CÁLCULO DE COSTO DEL CONCRETO

En base a la cuantificación de los materiales componentes de los diferentes diseños de mezcla, se elaboró el análisis de costos del concreto para obtener el costo de 1 m<sup>3</sup> por cada relación a/c diseñada considerando los siguientes parámetros:

- Lugar y fecha de elaboración: Lima Metropolitana, agosto 2023.
- Tipo de cambio: 1 dólar = 3.694 soles (S/.)

En las siguientes tablas se muestra el costo total para cada diseño de mezcla.

Tabla N° 32 Análisis de costo para 1 m<sup>3</sup> de concreto Patrón, a/c = 0.40.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.40 Patrón</b>	Cemento Tipo I	bls	12.07	24.15	291.50	384.00
	Aditivo R-2020	kg	6.16	12.39	76.27	
	NDMA	kg	0.00	0.00	0.00	
	Agua	m <sup>3</sup>	0.20	5.68	1.12	
	Agregado Grueso H67	m <sup>3</sup>	0.27	42.00	11.34	
	Agregado Fino	m <sup>3</sup>	0.34	11.00	3.76	

Tabla N° 33 Análisis de costo para 1 m<sup>3</sup> de concreto 5% NDMA, a/c = 0.40.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.40 5% NDMA</b>	Cemento	bls	11.47	24.15	276.93	369.42
	Aditivo R-2020	kg	6.16	12.39	76.27	
	NDMA	kg	25.65	0.00	0.00	
	Agua	m <sup>3</sup>	0.20	5.68	1.12	
	Agregado Grueso H67	m <sup>3</sup>	0.27	42.00	11.34	
	Agregado Fino	m <sup>3</sup>	0.34	11.00	3.76	

Tabla N° 34 Análisis de costo para 1 m3 de concreto 10% NDMA, a/c = 0.40.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.40 10% NDMA</b>	Cemento	bls	10.86	24.15	262.35	354.84
	Aditivo R-2020	kg	6.16	12.39	76.27	
	NDMA	kg	51.30	0.00	0.00	
	Agua	m3	0.20	5.68	1.12	
	Agregado Grueso H67	m3	0.27	42.00	11.34	
	Agregado Fino	m3	0.34	11.00	3.76	

Tabla N° 35 Análisis de costo para 1 m3 de concreto Patrón, a/c = 0.45.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.45 Patrón</b>	Cemento	bls	10.73	24.15	259.12	338.36
	Aditivo R-2020	kg	5.02	12.39	62.15	
	NDMA	kg	0.00	0.00	0.00	
	Agua	m3	0.20	5.68	1.11	
	Agregado Grueso H67	m3	0.29	42.00	12.22	
	Agregado Fino	m3	0.34	11.00	3.76	

Tabla N° 36 Análisis de costo para 1 m3 de concreto 5% NDMA a/c = 0.45.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.45 5% NDMA</b>	Cemento	bls	10.19	24.15	246.16	325.40
	Aditivo R-2020	kg	5.02	12.39	62.15	
	NDMA	kg	22.80	0.00	0.00	
	Agua	m3	0.20	5.68	1.11	
	Agregado Grueso H67	m3	0.29	42.00	12.22	
	Agregado Fino	m3	0.34	11.00	3.76	

Tabla N° 37 Análisis de costo para 1 m3 de concreto 10% NDMA, a/c = 0.45.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.45 10% NDMA</b>	Cemento	bls	9.66	24.15	233.20	312.44
	Aditivo R-2020	kg	5.02	12.39	62.15	
	NDMA	kg	45.60	0.00	0.00	
	Agua	m3	0.20	5.68	1.11	
	Agregado Grueso H67	m3	0.29	42.00	12.22	
	Agregado Fino	m3	0.34	11.00	3.76	

Tabla N° 38 Análisis de costo para 1 m3 de concreto Patrón, a/c = 0.50.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.50 Patrón</b>	Cemento	bls	9.76	24.15	235.79	304.78
	Aditivo R-2020	kg	4.15	12.39	51.41	
	NDMA	kg	0.00	0.00	0.00	
	Agua	m3	0.20	5.68	1.12	
	Agregado Grueso H67	m3	0.30	42.00	12.70	
	Agregado Fino	m3	0.34	11.00	3.75	

Tabla N° 39 Análisis de costo para 1 m3 de concreto 5% NDMA, a/c = 0.50.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.50 5% NDMA</b>	Cemento	bls	9.28	24.15	224.01	293.00
	Aditivo R-2020	kg	4.15	12.39	51.41	
	NDMA	kg	20.75	0.00	0.00	
	Agua	m3	0.20	5.68	1.12	
	Agregado Grueso H67	m3	0.30	42.00	12.70	
	Agregado Fino	m3	0.34	11.00	3.74	

Tabla N° 40 Análisis de costo para 1 m3 de concreto 10% NDMA, a/c = 0.50.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.50 10% NDMA</b>	Cemento	bls	8.79	24.15	212.22	281.21
	Aditivo R-2020	kg	4.15	12.39	51.41	
	NDMA	kg	41.50	0.00	0.00	
	Agua	m3	0.20	5.68	1.12	
	Agregado Grueso H67	m3	0.30	42.00	12.70	
	Agregado Fino	m3	0.34	11.00	3.75	

Tomando como referencia los diseños de concreto patrón con reemplazo de cemento por NDMA, se elaboraron las siguientes tablas de costos para el concreto patrón sin aditivo superplastificante, sin reemplazo de cemento por NDMA y sin reducción de agua.

Tabla N° 41 Análisis de costo para 1 m<sup>3</sup> de concreto a/c = 0.40.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.40</b> <b>Patrón sin aditivo</b>	Cemento Tipo I	bls	13.41	24.15	323.89	338.83
	Aditivo R-2020	kg	0.00	12.39	0.00	
	NDMA	kg	0.00	0.00	0.00	
	Agua	m <sup>3</sup>	0.22	5.68	1.25	
	Agregado Grueso H67	m <sup>3</sup>	0.24	42.00	10.05	
	Agregado Fino	m <sup>3</sup>	0.33	11.00	3.64	

Tabla N° 42 Análisis de costo para 1 m<sup>3</sup> de concreto a/c = 0.45.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.45</b> <b>Patrón sin aditivo</b>	Cemento	bls	11.92	24.15	287.91	303.82
	Aditivo R-2020	kg	0.00	12.39	0.00	
	NDMA	kg	0.00	0.00	0.00	
	Agua	m <sup>3</sup>	0.22	5.68	1.25	
	Agregado Grueso H67	m <sup>3</sup>	0.26	42.00	11.02	
	Agregado Fino	m <sup>3</sup>	0.33	11.00	3.65	

Tabla N° 43 Análisis de costo para 1 m<sup>3</sup> de concreto a/c = 0.50.

Diseño	Materiales	Ud.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	Total S/.
<b>a/c = 0.50</b> <b>Patrón sin aditivo</b>	Cemento	bls	10.73	24.15	259.12	275.69
	Aditivo R-2020	kg	0.00	12.39	0.00	
	NDMA	kg	0.00	0.00	0.00	
	Agua	m <sup>3</sup>	0.22	5.68	1.24	
	Agregado Grueso H67	m <sup>3</sup>	0.28	42.00	11.68	
	Agregado Fino	m <sup>3</sup>	0.33	11.00	3.65	

## CAPÍTULO V: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Se realizaron ensayos del concreto en estado fresco y endurecido utilizando los diseños de mezcla calculados en el capítulo anterior, siguiendo los procedimientos de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y de la Norma Técnica Peruana (NTP), utilizando las instalaciones y maquinas debidamente calibradas en el Laboratorio N°1 de Ensayo de Materiales “Ing. Manuel Gonzáles de la Cotera” de la Facultad de Ingeniería Civil en la Universidad Nacional de Ingeniería. El tiempo de mezclado promedio de todos los diseños fue de 11 minutos y medio.

### 5.1 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

En la presente sección se evaluarán de manera cuantitativa los resultados de las propiedades en estado fresco y endurecido tanto de la mezcla de concreto patrón como del concreto con reemplazo parcial del 5% y 10% de cemento por NDMA para las 3 relaciones de agua – cemento diseñadas.

#### 5.1.1 Ensayo de Asentamiento

El ensayo de asentamiento se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma Técnica Peruana NTP 339.035, este ensayo tiene como finalidad calcular la trabajabilidad del concreto patrón y con NDMA en estado fresco para cada relación agua – cemento de diseño.



Figura N° 13 Ensayo de asentamiento del concreto con 10% de NDMA,  $a/c=0.45$ .

En las siguientes tablas se muestran los valores del asentamiento calculados para cada diseño de mezcla.

Tabla N° 44 Asentamientos obtenidos para diseño  $a/c = 0.40$ .

Muestra	Asentamiento	
	plg.	mm
Patrón	7.3	184.2
5% NDMA	7.8	196.9
10% NDMA	9.5	241.3

Respecto a los valores mostrados en la Tabla N° 44, se muestra que el asentamiento para la mezcla de concreto con 5% de NDMA tuvo un aumento de 0.5 pulgadas mientras que la mezcla de concreto con 10% de NDMA aumento 2.2 pulgadas respecto a la mezcla del concreto patrón.

Tabla N° 45 Asentamientos obtenidos para diseño  $a/c = 0.45$ .

Muestra	Asentamiento	
	plg.	mm
Patrón	7.8	196.9
5% NDMA	6.8	171.5
10% NDMA	5.8	146.1

En la Tabla N° 45 se observa que los valores de asentamiento obtenidos para la mezcla del concreto con 5% de NDMA disminuyo 1.0 pulgada respecto a la mezcla patrón, la misma tendencia obtuvo el asentamiento registrado para la mezcla de concreto con 10% de NDMA, la cual tuvo una disminución de 2.0 pulgadas respecto a la mezcla del concreto patrón.

Tabla N° 46 Asentamientos obtenidos para diseño  $a/c = 0.50$ .

Muestra	Asentamiento	
	plg.	mm
Patrón	8.0	203.2
5% NDMA	6.5	165.1
10% NDMA	4.0	101.6

En la Tabla N° 46 se observa que los valores de asentamiento obtenidos para la mezcla del concreto con 5% de NDMA tuvo una disminución de 1.5 pulgadas respecto a la mezcla del concreto patrón, asimismo la mezcla de concreto con 10% de NDMA tuvo una disminución significativa de 4.0 pulgadas respecto a la mezcla patrón.

En la Figura N° 14 se muestra la variación de asentamientos representada en gráfica de barras para las diferentes mezclas realizadas.

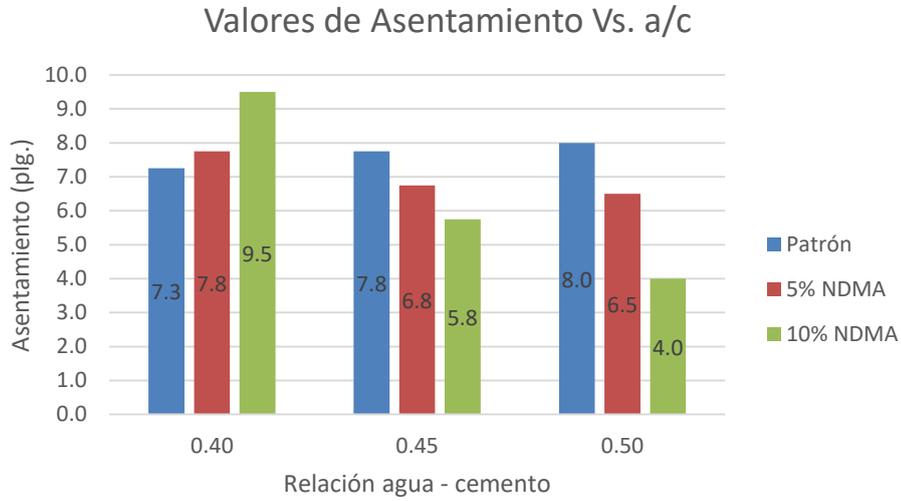


Figura N° 14 Variación del asentamiento según porcentajes de NDMA.

### 5.1.2 Ensayo de Peso Unitario

El ensayo de peso unitario se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma Técnica Peruana NTP 339.046.



Figura N° 15 Ensayo de peso unitario del concreto de a/c=0.40 con 10% de NDMA.

En las siguientes tablas se muestran los valores de peso unitario para cada diseño de mezcla realizado.

Tabla N° 47 Pesos unitarios obtenidos para diseño a/c = 0.40.

Muestra	Peso Unitario kg/m <sup>3</sup>
Patrón	2,459.31
5% NDMA	2,460.73
10% NDMA	2,472.03

Tabla N° 48 Pesos unitarios obtenidos para diseño a/c = 0.45.

Muestra	Peso Unitario kg/m <sup>3</sup>
Patrón	2,445.19
5% NDMA	2,404.22
10% NDMA	2,390.10

Tabla N° 49 Pesos unitarios obtenidos para diseño a/c = 0.50.

Muestra	Peso Unitario kg/m <sup>3</sup>
Patrón	2,424.00
5% NDMA	2,370.32
10% NDMA	2,368.91

En la Figura N° 16 se observa que para la mezcla de relación a/c igual a 0.40 con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, el peso unitario se incrementa respecto a la mezcla patrón; sin embargo, para el caso de las mezclas de a/c 0.45 y 0.50 con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, el peso unitario disminuye respecto a la mezcla patrón conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento por NDMA.

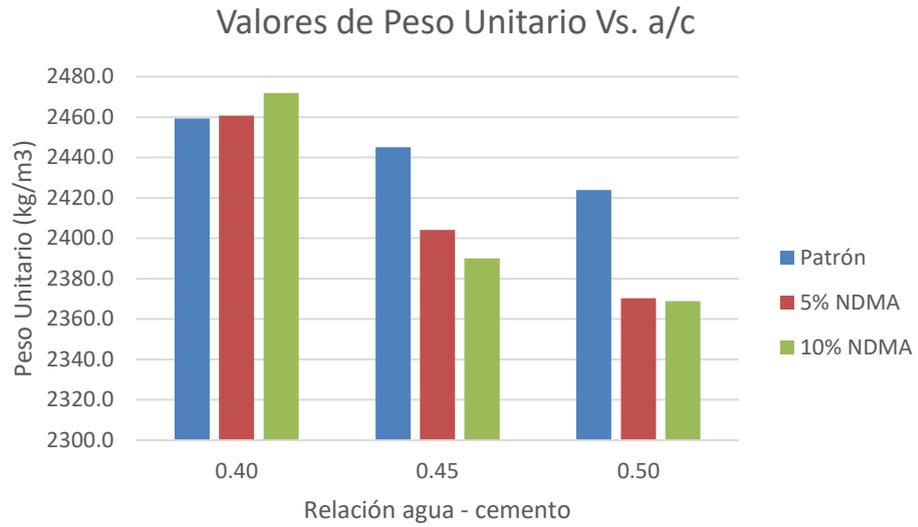


Figura N° 16 Variación del peso unitario según porcentajes de NDMA.

### 5.1.3 Ensayo de Medición de Temperatura

El ensayo de medición de temperatura se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma Técnica Peruana NTP 339.184.



Figura N° 17 Ensayo de medición de temperatura del concreto con 10% de NDMA, a/c=0.50.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos de los valores de temperatura del concreto en estado fresco.

Tabla N° 50 Temperaturas del concreto para diseño  $a/c = 0.40$ .

Muestra	Temperatura	
	°C	°F
Patrón	25.0	77.00
5% NDMA	25.3	77.54
10% NDMA	26.4	79.52

Tabla N° 51 Temperaturas del concreto para diseño  $a/c = 0.45$ .

Muestra	Temperatura	
	°C	°F
Patrón	25.0	77.00
5% NDMA	26.3	79.34
10% NDMA	27.5	81.50

Tabla N° 52 Temperaturas del concreto para diseño  $a/c = 0.50$ .

Muestra	Temperatura	
	°C	°F
Patrón	25.5	77.90
5% NDMA	26.3	79.34
10% NDMA	26.2	79.16

En la Figura N° 18 se muestra que la temperatura para los diseños con relación  $a/c$  igual a 0.40, 0.45 y 0.50 con 5% y 10% de NDMA son mayores a la mezcla de concreto patrón. Así mismo, las temperaturas mínima y máxima de todas las mezclas registraron valores de 25.0 °C y 27.5 °C respectivamente.

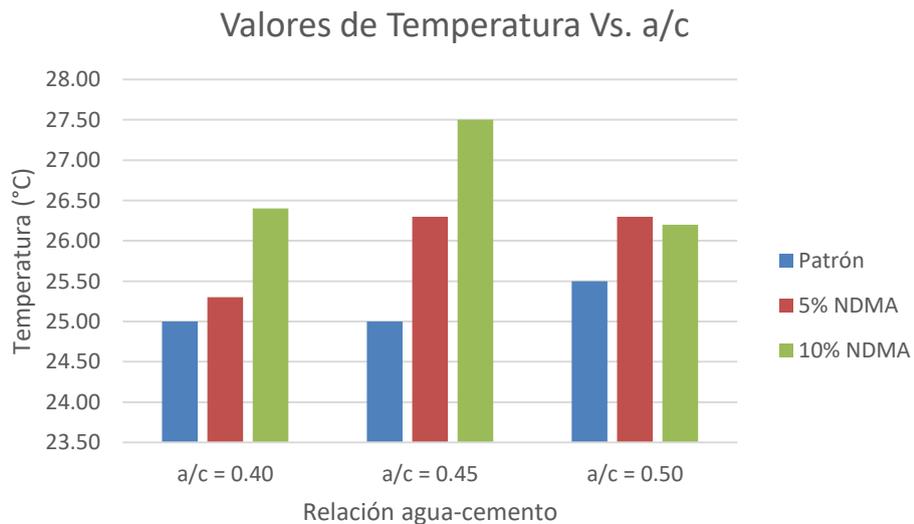


Figura N° 18 Variación de la temperatura del concreto según porcentajes de NDMA.

#### 5.1.4 Porosidad

El ensayo de porosidad, determinado por la cantidad de vacíos, se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma Técnica Peruana NTP 339.187. Se utilizaron discos de 5 cm de altura obtenidos de los dos cuartos centrales de probetas cilíndricas debidamente curadas según la NTP 339.033. Las muestras fueron ensayadas a los 28 y 56 días, se utilizó una maquina cortadora, horno de laboratorio, cocina a gas y una balanza.



Figura N° 19 Ebullición en agua de discos de concreto con 10% de NDMA, a/c=0.40.

Los porcentajes de vacíos obtenidos en cada muestra de concreto se muestran en las siguientes tablas.

Tabla N° 53 Valores de porcentaje de vacíos en el concreto para diseño a/c = 0.40.

Muestra	Edades (días)	
	28	56
Patrón	14.22%	13.54%
5% NDMA	14.08%	13.44%
10% NDMA	14.06%	13.33%

Tabla N° 54 Valores de porcentaje de vacíos en el concreto para diseño a/c = 0.45.

Muestra	Edades (días)	
	28	56
Patrón	13.82%	13.15%
5% NDMA	14.10%	13.50%
10% NDMA	14.59%	13.85%

Tabla N° 55 Valores de porcentaje de vacíos en el concreto para diseño  $a/c = 0.50$ .

Muestra	Edades (días)	
	28	56
Patrón	14.03%	13.35%
5% NDMA	14.93%	14.32%
10% NDMA	15.79%	15.18%

En base a los valores de porcentaje de vacíos mostrados en las tablas, se elaboró las siguientes figuras en forma de graficas de barras en la cual podemos visualizar la variación de los resultados para las 9 mezclas de concreto elaboradas.

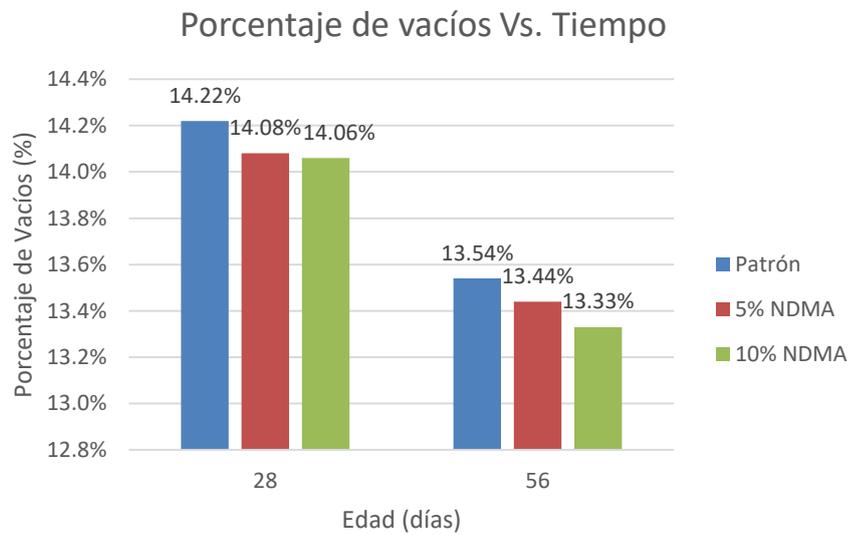


Figura N° 20 Variación del porcentaje de vacíos en el concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.40$ .

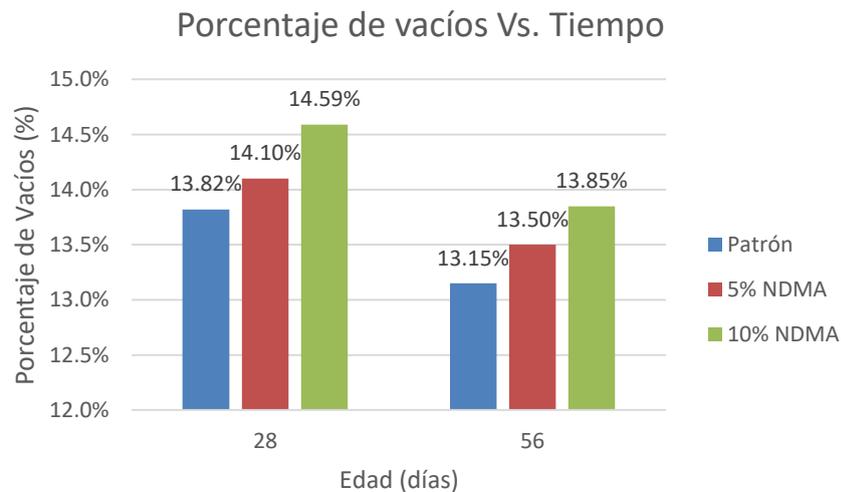


Figura N° 21 Variación del porcentaje de vacíos en el concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.45$ .

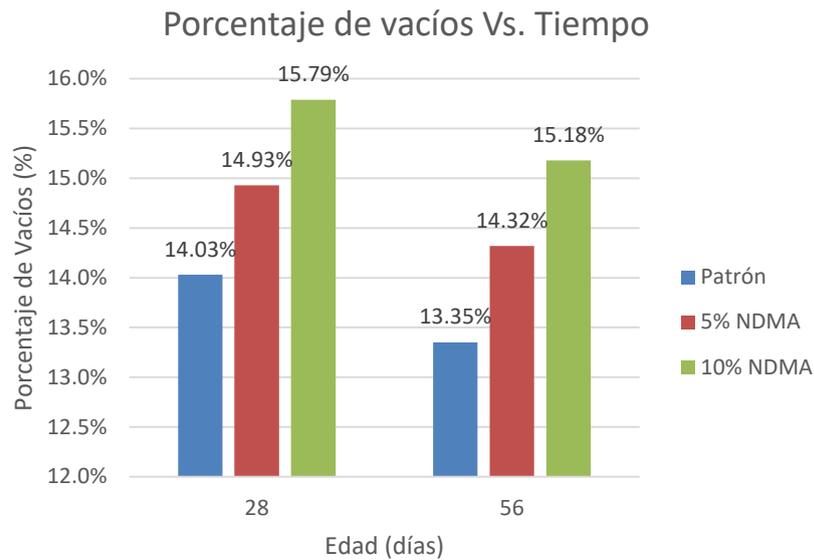


Figura N° 22 Variación del porcentaje de vacíos en el concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.50$ .

## 5.2 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Se realizaron ensayos al concreto en estado endurecido, los cuales comprenden: ensayo de resistencia a la compresión, ensayo de resistencia a la tracción, ensayo de resistencia a la flexión y ensayo de módulo de elasticidad.

### 5.2.1 Resistencia a la Compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma Técnica Peruana NTP 339.034. Se fabricaron especímenes de 10 x 20 cm, los cuales fueron curados de acuerdo a la NTP 339.033. Estos especímenes de concreto fueron ensayados a la edad de 7, 14, 28 y 56 días en la máquina de compresión uniaxial Ele International AM3 con capacidad de 113 t, con certificado de calibración LF-B-050-2023, Figura N° 23.



Figura N° 23 Ensayo de compresión del concreto con 10% de NDMA, a/c=0.40.

Las siguientes tablas muestran los valores de resistencia a la compresión promedio de los especímenes ensayados para cada edad.

Tabla N° 56 Valores de  $f_c$  del concreto para diseño a/c = 0.40.

Muestra	Esfuerzo de Compresión (kg/cm <sup>2</sup> ), a/c = 0.40			
	Edades (días)			
	7	14	28	56
Patrón	595.7	621.6	646.7	683.1
5% NDMA	596.8	636.1	648.1	701.8
10% NDMA	622.4	664.5	724.4	761.3

Tabla N° 57 Valores de  $f_c$  del concreto para diseño a/c = 0.45.

Muestra	Esfuerzo de Compresión (kg/cm <sup>2</sup> ), a/c = 0.45			
	Edades (días)			
	7	14	28	56
Patrón	521.3	529.2	628.6	691.4
5% NDMA	506.2	539.2	582.5	619.2
10% NDMA	462.6	507.4	533.5	600.6

Tabla N° 58 Valores de  $f'_c$  del concreto para diseño  $a/c = 0.50$ .

Muestra	Esfuerzo de Compresión (kg/cm <sup>2</sup> ), $a/c = 0.50$			
	Edades (días)			
	7	14	28	56
Patrón	501.1	526.8	570.3	591.8
5% NDMA	393.8	462.0	489.0	507.1
10% NDMA	425.5	478.6	492.5	512.6

A modo ilustrativo, en las siguientes figuras se muestra la variación de la resistencia a la compresión para diferentes edades con las diferentes relaciones agua – cemento diseñadas mediante el uso de gráfica en barras.

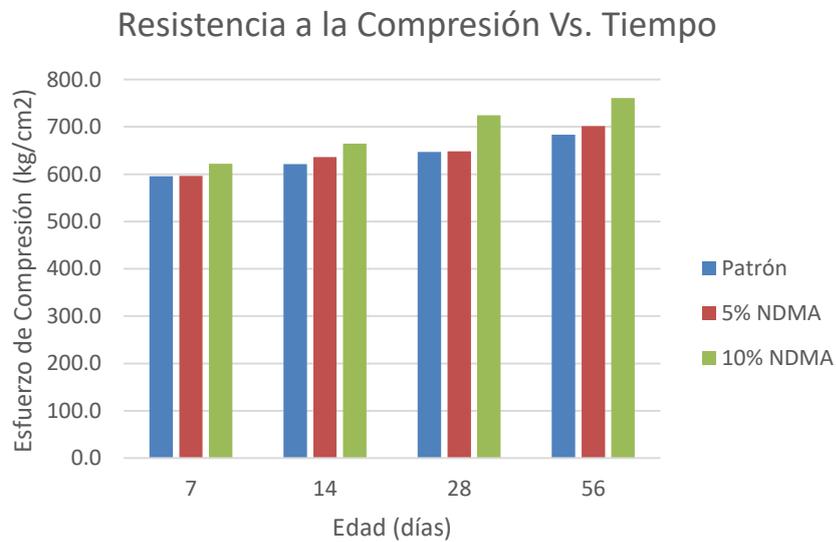


Figura N° 24 Variación del  $f'_c$  del concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.40$ .

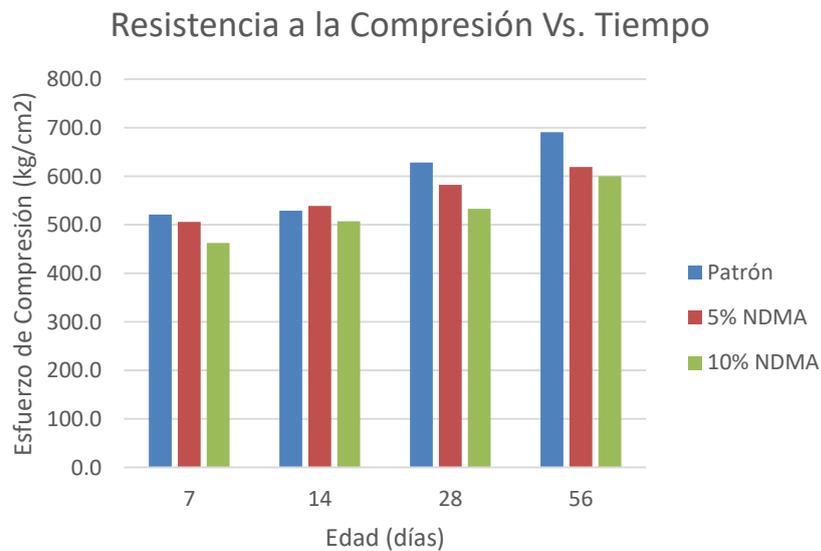


Figura N° 25 Variación del  $f'_c$  del concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.45$ .

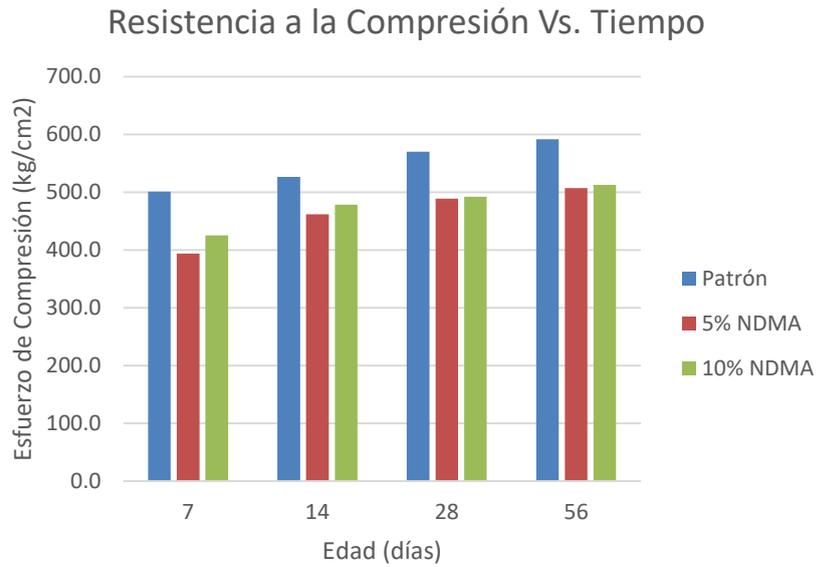


Figura N° 26 Variación del  $f'c$  del concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.50$ .

Considerando los valores de contenido de cemento para cada diseño, y de acuerdo a sus respectivos valores de resistencia a la compresión, se elaboraron las siguientes tablas:

Tabla N° 59 Valores de contenidos de cemento y  $f'c$  para diseños con 0% NDMA.

0% NDMA		
a/c	Cemento	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	415.0	570.3
0.45	456.0	628.0
0.40	513.0	646.7

Tabla N° 60 Valores de contenidos de cemento y  $f'c$  para diseños con 5% NDMA.

5% NDMA		
a/c	Cemento	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	394.2	489.0
0.45	433.2	619.2
0.40	487.4	648.1

Tabla N° 61 Valores de contenidos de cemento y  $f'c$  para diseños con 10% NDMA.

10% NDMA		
a/c	Cemento	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0.50	373.5	492.5
0.45	410.4	600.6
0.40	461.7	724.4

En base a las tablas mostradas, se bosquejo la Figura N° 27, en la cual se visualiza el comportamiento de la resistencia a la compresión de los diferentes diseños de mezclas realizados en función del contenido de cemento.

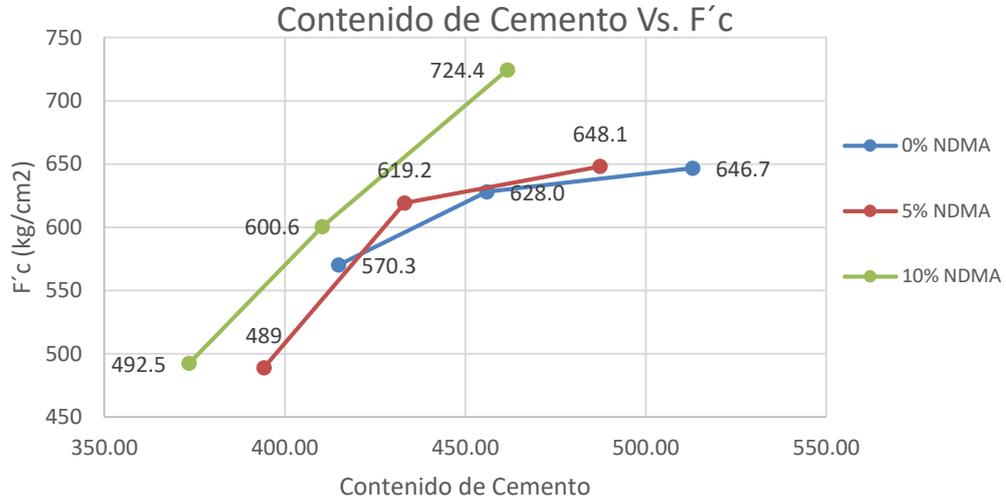


Figura N° 27 Variación del f'c según contenidos de cemento para cada diseño.

### 5.2.2 Resistencia a la Tracción

El ensayo de resistencia a la tracción simple por compresión diametral del concreto se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma Técnica Peruana NTP 339.084. Se fabricaron especímenes de concreto de 15 x 30 cm, seguidamente se colocaron en una poza de curado de acuerdo a la NTP 339.033. Los especímenes fueron ensayados a la edad de 28 días en la máquina universal Tokyokoki Seizosho con capacidad de 100 t, con certificado de calibración LF-B-087-2023.

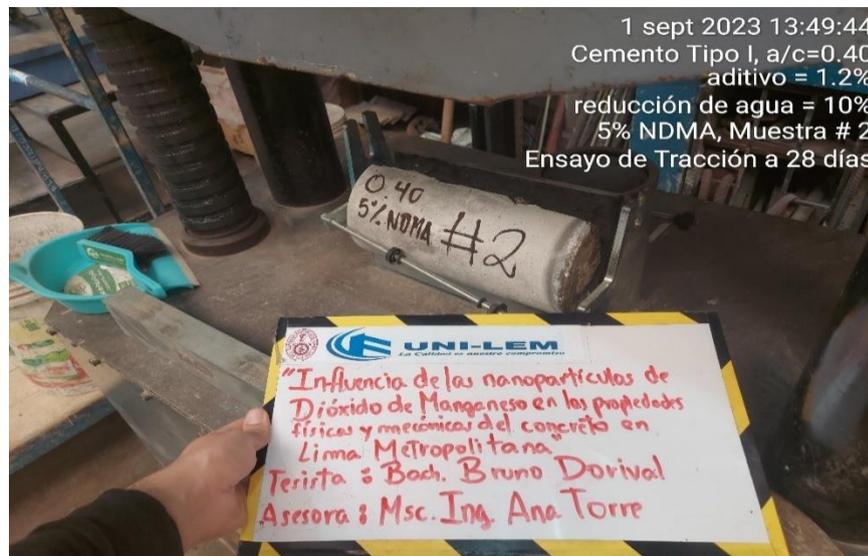


Figura N° 28 Ensayo de tracción del concreto con 5% de NDMA, a/c=0.40.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos al finalizar los ensayos de resistencia a la tracción a la edad de 28 días.

Tabla N° 62 Valores de esfuerzo a la tracción (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.40.

Muestra	Edad (días)
	28
Patrón	24.7
5% NDMA	25.9
10% NDMA	31.9

Tabla N° 63 Valores de esfuerzo a la tracción (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.45.

Muestra	Edad (días)
	28
Patrón	23.6
5% NDMA	23.0
10% NDMA	15.1

Tabla N° 64 Valores de esfuerzo a la tracción (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.50.

Muestra	Edad (días)
	28
Patrón	20.6
5% NDMA	20.1
10% NDMA	19.7

En las siguientes figuras, correspondiente a la distribución de esfuerzos de tracción en forma de gráfica de barras, podemos observar la variación de los esfuerzos para cada relación agua – cemento a la edad de 28 días según los porcentajes de NDMA en las mezclas de concreto.

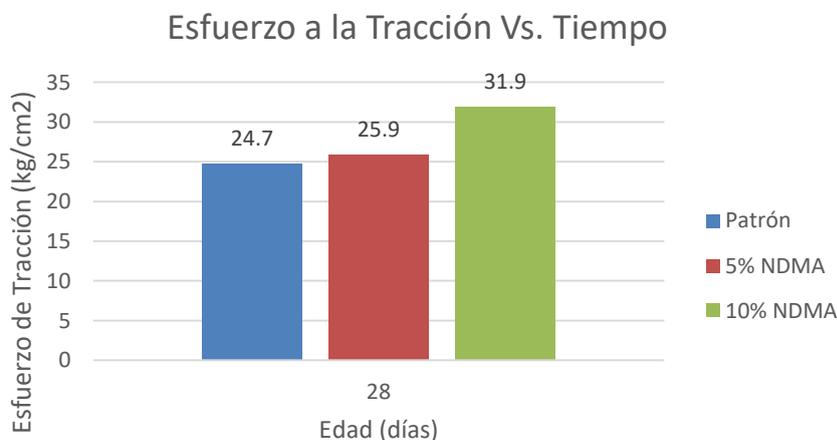


Figura N° 29 Variación del esfuerzo a la tracción del concreto según porcentajes de NDMA,

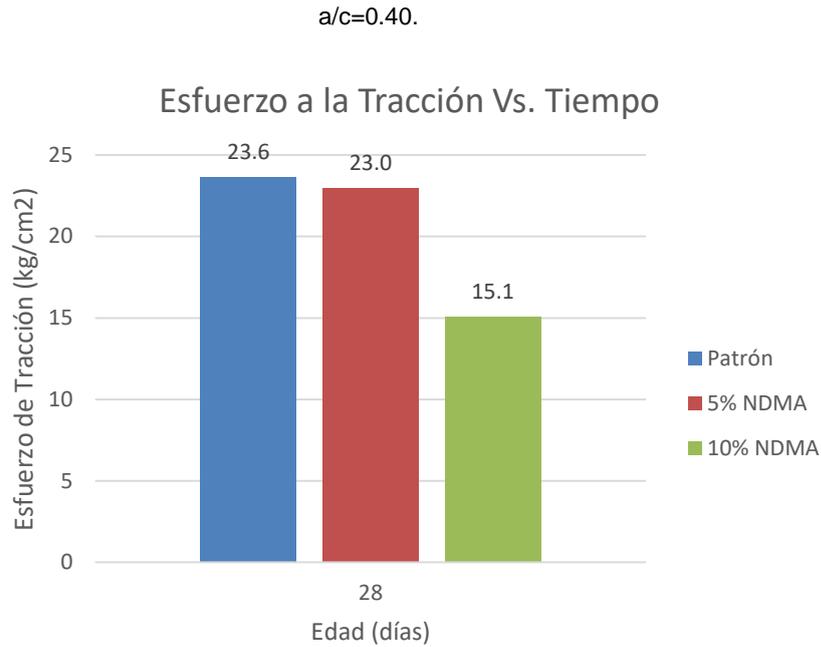


Figura N° 30 Variación del esfuerzo a la tracción del concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.45$ .

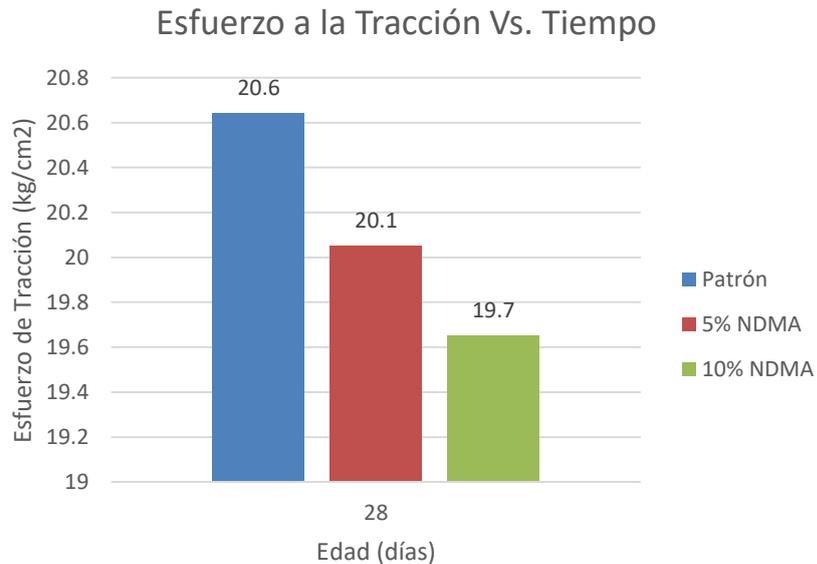


Figura N° 31 Variación del esfuerzo a la tracción del concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.50$ .

### 5.2.3 Resistencia a la Flexión

El ensayo de resistencia a la flexión en vigas de concreto simplemente apoyadas y con carga a los tercios de luz se realizó acuerdo a las especificaciones descritas en la Norma Técnica Peruana NTP 339.078. Los especímenes fabricados tienen forma prismática de dimensiones 15 x 15 x 50 cm, el curado de estos especímenes

se realizó de acuerdo a la NTP 339.033. Las muestras fueron ensayadas a los 28 días en la máquina Tokyokoki Seizosho.



Figura N° 32 Ensayo de flexión del concreto con 10% de NDMA, a/c=0.40.

Los resultados del ensayo de flexión del concreto con diferentes porcentajes de NDMA se muestran en las siguientes tablas.

Tabla N° 65 Valores de esfuerzo a la flexión (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.40.

Muestra	Edad (días)
	28
Patrón	69.2
5% NDMA	76.5
10% NDMA	84.1

Tabla N° 66 Valores de esfuerzo a la flexión (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.45.

Muestra	Edad (días)
	28
Patrón	72.4
5% NDMA	69.1
10% NDMA	61.1

Tabla N° 67 Valores de esfuerzo a la flexión (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.50.

Muestra	Edad (días)
	28
Patrón	65.1

5% NDMA	63.6
10% NDMA	50.6

La representación en forma de grafica de barras de los valores del esfuerzo a la flexión en el concreto mostrados en las tablas anteriores se muestran en las siguientes figuras.

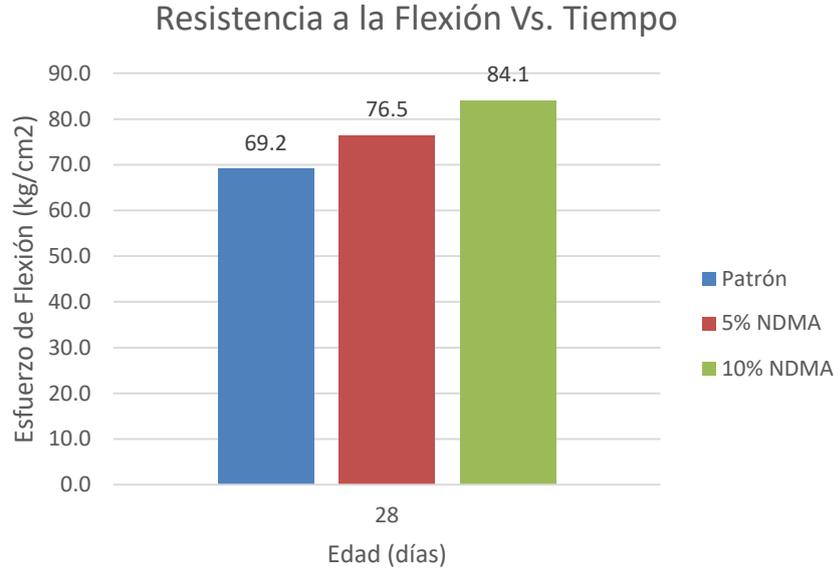


Figura N° 33 Variación del esfuerzo a la flexión del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.40.

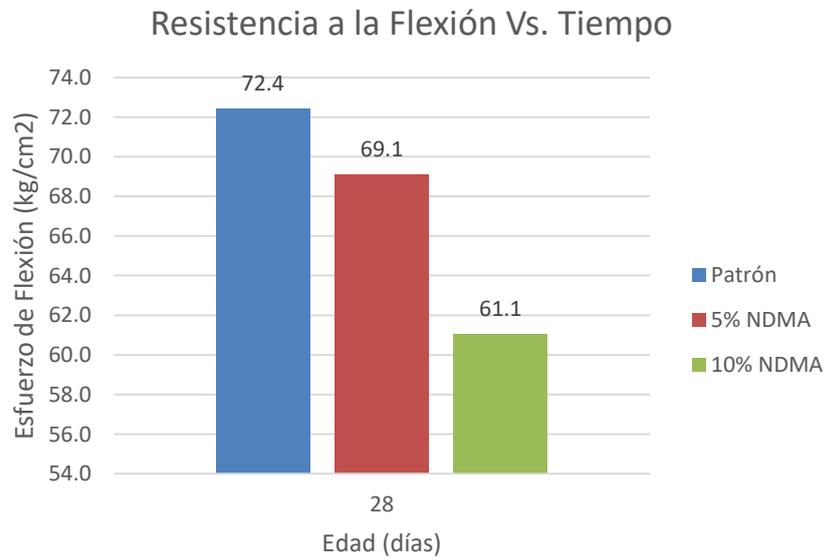


Figura N° 34 Variación del esfuerzo a la flexión del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.45.

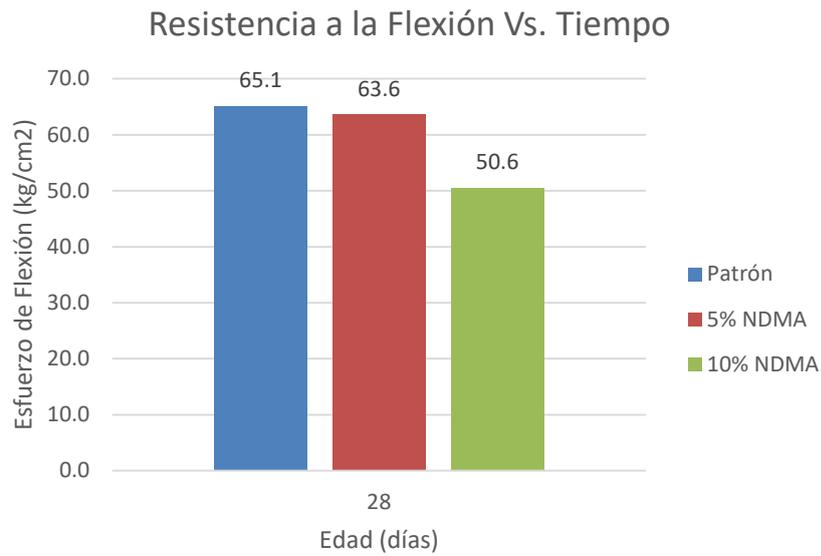


Figura N° 35 Variación del esfuerzo a la flexión del concreto según porcentajes de NDMA, a/c=0.50.

#### 5.2.4 Módulo de Elasticidad

El ensayo de módulo de elasticidad estático del concreto en compresión se realizó de acuerdo a las especificaciones descritas en la norma internacional ASTM C469. Se fabricaron muestras de dimensión 15 x 30 cm, estas fueron curadas bajo el procedimiento de la NTP 339.033.

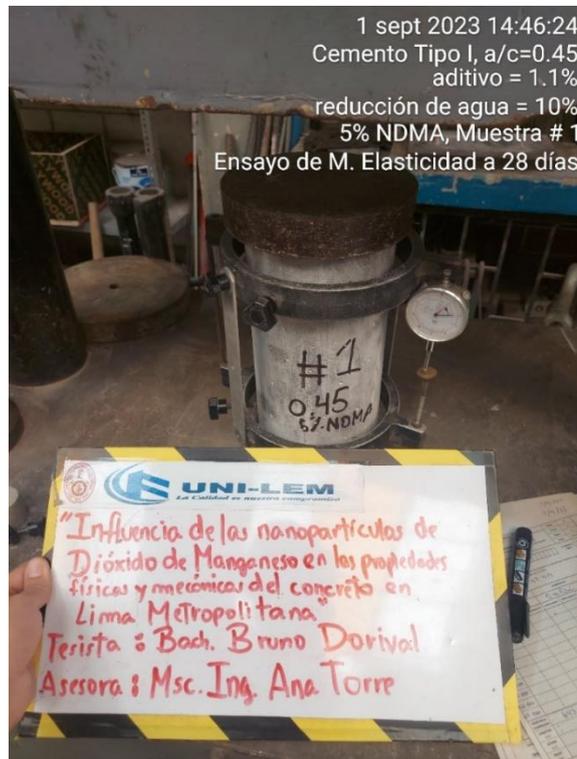


Figura N° 36 Ensayo de módulo de elasticidad del concreto con 5% de NDMA, a/c=0.45.

Se obtuvieron resultados de las muestras a la edad de 28 días, los cuales se muestran en las siguientes tablas.

Tabla N° 68 Valores de módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.40.

Muestra	Edades (días)
	28
Patrón	264,032
5% NDMA	253,366
10% NDMA	259,681

Tabla N° 69 Valores de módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.45.

Muestra	Edades (días)
	28
Patrón	242,045
5% NDMA	227,724
10% NDMA	237,719

Tabla N° 70 Valores de módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>) del concreto para diseño a/c = 0.50.

Muestra	Edades (días)
	28
Patrón	225,818
5% NDMA	224,601
10% NDMA	209,187

En las siguientes figuras se muestran de manera gráfica los valores de módulo de elasticidad obtenidos para cada diseño de mezcla realizado.

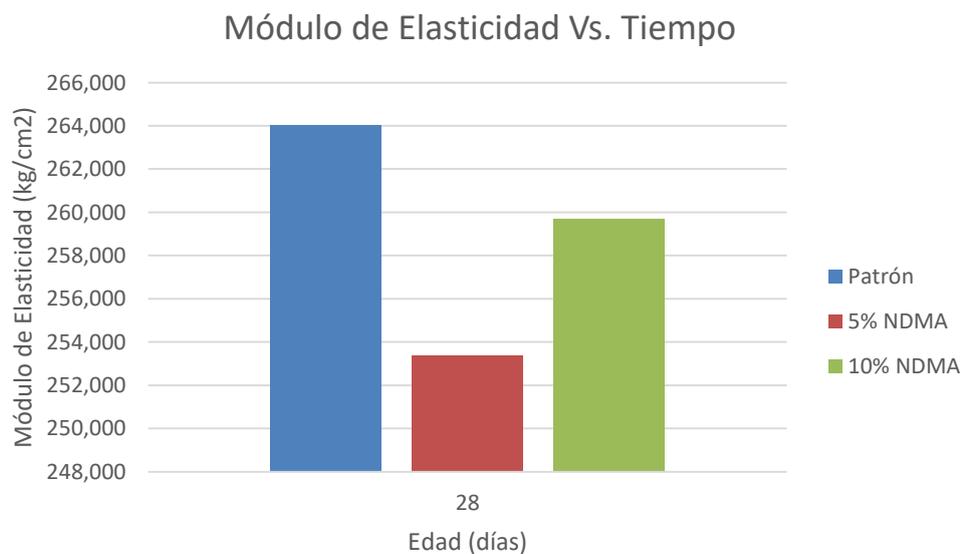


Figura N° 37 Variación del módulo de elasticidad concreto según porcentajes de NDMA,

$a/c=0.40$ .

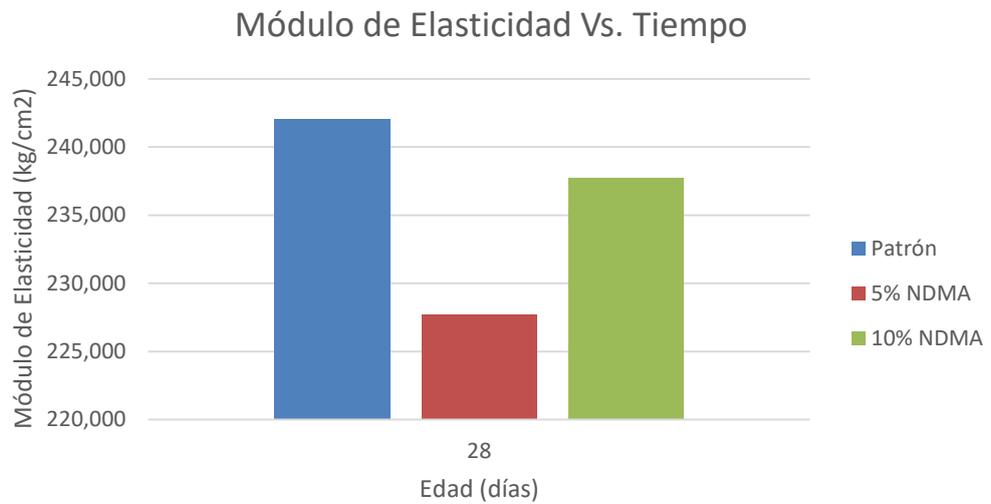


Figura N° 38 Variación del módulo de elasticidad concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.45$ .

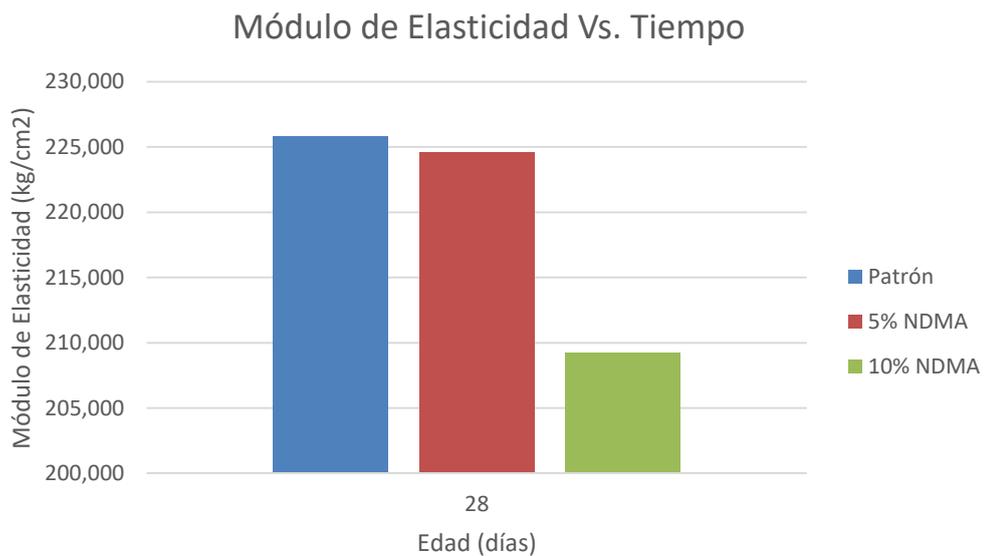


Figura N° 39 Variación del módulo de elasticidad concreto según porcentajes de NDMA,  $a/c=0.50$ .

## **CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

En el presente capítulo se analizarán los datos de acuerdo a patrones, tendencias, investigaciones realizadas por otros autores y métodos estadísticos con la finalidad de dar conclusiones específicas respecto en los resultados obtenidos del capítulo V.

### **6.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS**

En la presente sección se analizarán los datos obtenidos en la sección 5.1 respecto al ensayo de asentamiento, peso unitario, medición de temperatura y porosidad de las mezclas de concreto.

#### **6.1.1 Ensayo de asentamiento**

De acuerdo a los resultados de la sección 5.1.1, el asentamiento correspondiente a las mezclas de relación a/c igual a 0.40 con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA se incrementó en 7% y 30% respectivamente del asentamiento del concreto patrón.

Respecto a los resultados de las mezclas con relación a/c igual a 0.45 y 0.50, los concretos con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA presentaron una disminución del asentamiento respecto al concreto patrón.

##### *6.1.1.1 Análisis de investigaciones realizado por otros autores*

Según Zhang et al. (2021) relaciona las características de adsorción entre el aditivo superplastificante de policarboxilato y las nanopartículas en la mezcla de la pasta de cemento, indicando que la adición de aditivo superplastificante reduce la característica de adsorción de las nanopartículas debido a la adsorción competitiva de los polímeros en las superficies minerales impidiendo el acercamiento de las partículas de cemento, evitando la ocurrencia del proceso químico de la floculación; por otro lado, Zapata et al. (2013) al agregar 1% y 2% de porcentaje en peso de nano Sílice al mortero con aditivo superplastificante de policarboxilato obtuvo un menor tiempo de fluidez para la relación a/c igual a 0.35 respecto a la mezcla patrón.

Sobolev et al. (2009) sostiene que el nano-SiO<sub>2</sub> mejora la trabajabilidad en concretos de alto rendimiento a raíz de la buena dispersión de las nanopartículas,

logrando aumentar la viscosidad de la fase líquida, producto de este aumento las partículas de los agregados y del cemento se suspenden mejorando la resistencia a la segregación y trabajabilidad.

Li et al. (2022) menciona que al agregar nanopartículas a la pasta de cemento, la densidad de empaquetamiento de las partículas de cemento se reduce como consecuencia a dos factores, el primero es el efecto pared, que se refiere a la existencia de espacios pequeños entre las partículas de cemento debido a la dispersión de las nanopartículas, impidiendo que otras partículas puedan rellenar estos espacios; el segundo efecto es el aflojamiento referido a la presencia de una gran cantidad de nanopartículas alrededor de las partículas de cemento las cuales impiden la unión de estas, evitando de esta manera la presencia de moléculas de agua como resultado de estos dos factores.

Berra et al. (2012) indica una reducción de la trabajabilidad de las mezclas con adición de nanopartículas de sílice amorfa (NS) respecto a las mezclas patrón como consecuencia de la interacción entre las NS y la fase líquida de la pasta de cemento, reflejando la producción de geles cuya característica es la capacidad de retener agua.

Mukharjee y Barai (2014) argumenta la disminución de la trabajabilidad debido al aumento del porcentaje de nanopartículas de sílice respecto a la mezcla patrón, estas nanopartículas al tener una gran área superficial y alta cantidad de enlaces insaturados, forman enlaces Si-OH al entrar en contacto con el agua por lo cual reducen la cantidad de agua disponible en la mezcla cuya función es mejorar la fluidez.

Según Li et al. (2022) la dispersión de las nanopartículas disminuye los espacios vacíos entre las partículas de cemento originando que un menor porcentaje del agua rellene estos vacíos y el exceso pueda formar una película alrededor de las partículas de cemento, cumpliendo la función de lubricante, con la finalidad de aumentar la fluidez de la mezcla.

#### *6.1.1.2 Análisis y discusión de los resultados del asentamiento*

De acuerdo con los antecedentes expuestos y a los resultados experimentales de la presente investigación, las NDMA en las mezclas de concreto, con relación a/c igual a 0.40, con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA y porcentaje de aditivo H-2020 igual a 1.2% del peso de cemento, posiblemente obtuvieron una buena dispersión en toda la matriz del concreto; proceso que permitió rellenar los

espacios vacíos entre las partículas de cemento evitando de esta manera que las partículas de agua ocupen estos espacios, resultado que permitió disponer de una mayor cantidad de agua para mejorar la trabajabilidad de la mezcla respecto a la mezcla de concreto patrón.

Posiblemente debido a la mayor cantidad de agua en los diseños de concreto de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, por lo cual aumenta el espacio entre partículas de cemento, el 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA presente en la mezcla no logró rellenar el gran volumen de espacios vacíos presente entre las partículas de cemento, por el contrario, generó el efecto de adsorción de las moléculas de agua debido a su gran área superficial por lo cual el agua disponible para la trabajabilidad disminuyó. Esta disminución se hizo más notoria para la relación de a/c igual a 0.50 con 10% de reemplazo de cemento por NDMA donde la mezcla disminuyó el asentamiento en 4 pulgadas respecto a la mezcla patrón.

#### 6.1.2 Ensayo de peso unitario

Los resultados del ensayo de Peso Unitario mostrados en la sección 5.1.2 demuestran que para las mezclas con relación a/c de 0.40, el valor del peso unitario para las mezclas con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA se incrementó en 1.42 kg y 12.72 kg respectivamente por cada 1 m<sup>3</sup> de mezcla respecto a la mezcla patrón.

Sin embargo, para las mezclas con relación a/c de 0.45 y 0.50, los valores se reducen en promedio 51 kg por 1 m<sup>3</sup> de mezcla respecto al concreto patrón,

##### *6.1.2.1 Análisis de investigaciones realizado por otros autores*

Kosmatka et al. (2004) concluye que, para un volumen de concreto dado, si la proporción de agua es mayor entonces el peso unitario será menor como consecuencia de la menor densidad del agua respecto a los otros componentes del concreto.

Solis (2019) indica que, al agregar nanopartículas de Hierro y Sílice en diferentes proporciones con aditivo plastificante y retardante en la mezcla de concreto, tiene como resultado un valor del peso unitario menor al peso unitario de la mezcla del concreto patrón.

### 6.1.2.2 Análisis de los resultados de peso unitario

Para el caso de los resultados de la mezcla de a/c igual a 0.40, la densidad del NDMA (3.27 g/cm<sup>3</sup>) es mayor a la del cemento (3.13 g/cm<sup>3</sup>), por lo cual al reemplazar las NDMA por cemento, el peso unitario de la mezcla de concreto aumenta.

Para el caso de los diseños de concreto de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, el valor del peso unitario tiene una tendencia a disminuir, esto se puede explicar debido a una posible mala dispersión de las NDMA, así como el exceso de agua presente en la mezcla de concreto, lo cual genera una mayor cantidad de vacíos, reduciendo el peso por cada 1 m<sup>3</sup> de mezcla de concreto.

Según la clasificación de los concretos debido a sus pesos unitarios brindada por Torre (2004), todos los resultados obtenidos están dentro de la clasificación correspondiente a concreto normal.

### 6.1.3 Ensayo de medición de temperatura

De acuerdo a los valores de temperatura obtenidos, se observa que reemplazar las NDMA por 5% y 10% del peso de cemento en las 3 relaciones a/c, se obtienen valores de temperatura con una variación mínima de 0.3°C correspondiente al diseño de a/c=0.40 y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, y una variación máxima de 2.5°C correspondiente al diseño a/c = 0.45 y 10% de reemplazo de cemento por NDMA respecto al diseño de mezcla de concreto patrón.

#### 6.1.3.1 Análisis y discusión de los resultados de temperatura

Según la Norma Técnica de Edificación E.060, los valores de temperatura obtenidos en la sección 5.1.3 están dentro del límite permisible menor a 32 °C. Estos resultados fueron tomados en Lima Metropolitana con una temperatura promedio de 21 °C, pero pueden variar si las mezclas son realizadas en otras zonas del Perú o del mundo.

Según los resultados registrados, el reemplazo del 5% y 10% de NDMA por cemento influye en la mezcla de concreto mediante el aumento de la temperatura para un tiempo de mezclado de 11 minutos y medio.

### 6.1.4 Porosidad

Conforme a los resultados mostrados en la sección 5.1.4, se observa que para el

concreto de relación a/c igual a 0.40, conforme aumenta el porcentaje de NDMA en la mezcla, el concreto presenta menor porosidad debido a la disminución del porcentaje de vacíos. Sin embargo, para los concretos de relación a/c 0.45 y 0.50 ocurre lo contrario, mientras mayor es el porcentaje de reemplazo de cemento por NDMA, la porosidad aumenta en la mezcla.

#### *6.1.4.1 Análisis de investigaciones realizado por otros autores*

Según los resultados de Niewiadomski et al. (2017), al agregar nanopartículas de SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en el concreto, la porosidad disminuye debido a la densificación de la microestructura del mortero. De manera similar Sanchez y Sobolev (2010) identifican a la adición de nanopartículas para reducir la porosidad en el concreto mediante la densificación de la zona de transición interfacial producto del aumento de productos de la hidratación del cemento como consecuencia de la alta reactividad de las nanopartículas.

#### *6.1.4.2 Análisis y discusión de los resultados de porosidad*

Se observa en la Figura N° 20, Figura N° 21 y Figura N° 22 la disminución de la porosidad en un mismo diseño de concreto para la edad de 56 días respecto a los resultados obtenidos para la edad de 28 días; este resultado es conforme a lo mostrado por Quintero et al. (2011), donde concluyó que este efecto se debe a la existencia de una mayor cantidad de productos hidratados como consecuencia a las reacciones entre los reactivos durante la fase de hidratación del cemento; estos productos ocuparon el volumen vacío donde inicialmente se encontraban las partículas de agua.

Asimismo, se observa que existe una relación entre las relaciones de a/c y la porosidad, mientras aumenta el a/c, la porosidad es mayor, este resultado está acorde con lo reportado por Quintero et al. (2011) quien afirma la presencia de una mayor cantidad de poros en las mezclas de relaciones a/c de alto valor debido a la evaporación del agua durante el proceso de curado, por lo cual la porosidad aumenta conforme aumenta la relación a/c.

Conforme a la información recopilada por diferentes autores y a los resultados obtenidos, se concluye que las NDMA influyeron de manera positiva en el concreto de relación a/c igual a 0.40 para concentraciones del 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA debido a que posiblemente estas nanopartículas densificaron

la zona de transición interfacial mediante una correcta dispersión por lo cual rellenaron los poros o espacios vacíos presentes.

Para los concretos de relación a/c igual a 0.45 y 0.50 a pesar que la porosidad disminuye conforme pasa el tiempo respecto a un mismo diseño, el reemplazo del 5 y 10% de cemento por NDMA no mejora el valor de la porosidad respecto al concreto patrón; esto puede estar relacionado a la mala dispersión de las nanopartículas en la mezcla de concreto, lo cual evita rellenar los espacios vacíos presentes en el concreto así como también a una reducción del nivel de compactación durante la fabricación de las probetas como consecuencia de la disminución del asentamiento de la mezcla de concreto.

## 6.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Durante el desarrollo de esta sección, se realizará el análisis y discusión de los resultados de los ensayos obtenidos del concreto en estado endurecido. Mediante el análisis de varianza (ANOVA) se realizará la comparación de las diferencias estadísticas entre los 3 diseños de concreto: concreto patrón, concreto con 5% de reemplazo de cemento por NDMA y concreto con 10% de reemplazo de cemento por NDMA. Posteriormente, con la finalidad de determinar las diferencias individuales entre los 3 diseños, se aplicará la prueba de Post Hoc (Prueba de Tukey) con un nivel de significancia del 5%.

### 6.2.1 Resistencia a la Compresión

Los resultados mostrados en la sección 5.2.1 muestran que para el concreto de relación a/c igual a 0.40, conforme aumenta el reemplazo de NDMA en porcentajes del 5% y 10% respecto al peso del cemento, la resistencia a la compresión también aumenta, obteniendo para el concreto con 10% de NDMA la mayor resistencia a la compresión; sin embargo, para los concretos de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de NDMA, la resistencia tiene una tendencia a disminuir.

#### 6.2.1.1 Análisis estadístico de los resultados a 56 días, a/c = 0.40

Para el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación a/c = 0.40 a la edad de 56 días se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula (Ho):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la compresión de las probetas de concreto de relación a/c igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa (H1):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la compresión de las probetas de concreto de relación a/c igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 71 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las probetas fabricadas para la edad de 56 días.

Tabla N° 71 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión, a/c = 0.40.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	10,012.87	2	5,006.43	11.92	0.008	5.14
Dentro de los grupos	2,519.77	6	419.96			
Total	12,532.64	8				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.008, es menor a 0.05, por este motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto a la compresión. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (37)$$

Donde:

$T_{\alpha}$  = Diferencia honestamente significativa.

q = Amplitud total estandarizada.

$\alpha$  = Nivel de significancia, igual a 0.05.

a = Numero de datos para cada diseño.

f = Grados de libertad.

$MS_E$  = Cuadrado medio del error experimental.

$n$  = Número de repeticiones de las medias de los tratamientos a ser comparados.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación a/c igual a 0.40 se muestran en la Tabla N° 72.

Tabla N° 72 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, a/c = 0.40.

q	=	4.34
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	6
MSE	=	419.96
n	=	3

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como valor de la diferencia mínima significativa a 51.35 para un nivel de significancia del 5%.

$$T_{0.05} = 51.35$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación a/c igual a 0.40 se muestran en la Tabla N° 73.

Tabla N° 73 Diferencia de medias para cada diseño de a/c = 0.40.

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	-18.69
	10%	-78.22
5%	0%	18.69
	10%	-59.54
10%	0%	78.22
	5%	59.54

En la Tabla N° 73 se observa que los diseños con 0% y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a un mismo grupo debido que la diferencia de medias es menor al valor  $T_{0.05}$ , mientras que el diseño con 10% de reemplazo de cemento por NDMA es distinto a los otros 2 diseños.

Por lo cual se concluye que el reemplazo del 10% de cemento por NDMA en el concreto de relación a/c igual a 0.40, influye significativamente en la resistencia a la compresión del concreto mediante el incremento de la resistencia a la

compresión.

### 6.2.1.2 Análisis estadístico de los resultados a 56 días, $a/c = 0.45$

Con la finalidad de realizar el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.45$  a la edad de 56 días se enuncian las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula ( $H_0$ ):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la compresión de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la compresión de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 74 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las probetas fabricadas para la edad de 56 días.

Tabla N° 74 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión,  $a/c = 0.45$ .

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	13,793.66	2	6,896.83	18.63	0.003	5.14
Dentro de los grupos	2,220.67	6	370.11			
Total	16,014.33	8				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.003, es menor a 0.05, por este motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto a la compresión. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 se muestran en la Tabla N° 75.

Tabla N° 75 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey,  $a/c = 0.45$ .

q	=	4.34
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	6
MSE	=	370.11
n	=	3

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como valor de la diferencia mínima significativa a 48.21 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05} = 48.21$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación a/c igual a 0.45 se muestran en la Tabla N° 76.

Tabla N° 76 Diferencia de medias para cada diseño de  $a/c = 0.40$ .

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	72.12
	10%	90.79
5%	0%	-72.12
	10%	18.67
10%	0%	-90.79
	5%	-18.67

En la Tabla N° 76 se observa que los diseños con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a un mismo grupo debido que la diferencia de medias es menor al valor  $T_{0.05}$ , mientras que el diseño con 0% de reemplazo de cemento por NDMA es distinto a los otros 2 diseños.

Por lo cual se concluye que el reemplazo de cemento por NDMA para valores de porcentaje de 5% y 10% influye de manera negativa en la resistencia a la compresión del concreto con relación a/c igual a 0.45 respecto al concreto patrón mediante la disminución de la resistencia a la compresión.

### 6.2.1.3 Análisis estadístico de los resultados a 56 días, $a/c = 0.50$

En el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.50$  a la edad de 56 días se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la compresión de las probetas de concreto de relación a/c igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa (H<sub>1</sub>):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la compresión de las probetas de concreto de relación a/c igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 77 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las probetas fabricadas para la edad de 56 días.

Tabla N° 77 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión, a/c = 0.50.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	13,468.60	2	6,734.30	20.03	0.002	5.14
Dentro de los grupos	2,017.51	6	336.25			
Total	15,486.11	8				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.002, es menor a 0.05, por este motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto a la compresión. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación a/c igual a 0.50 se muestran en la Tabla N° 78.

Tabla N° 78 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, a/c = 0.50.

q	=	4.34
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	6
MSE	=	336.25
n	=	3

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como valor de la diferencia mínima significativa a 45.95 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05} = 45.95$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación a/c igual a 0.50 se muestran en la Tabla N° 79.

Tabla N° 79 Diferencia de medias para cada diseño de a/c = 0.50.

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	84.65
	10%	79.20
5%	0%	-84.65
	10%	-5.45
10%	0%	-79.20
	5%	5.45

En la Tabla N° 79 se observa que los diseños con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a un mismo grupo debido que la diferencia de medias es menor al valor  $T_{0.05}$ , mientras que el diseño con 0% de reemplazo de cemento por NDMA es distinto a los otros 2 diseños.

Por lo cual se concluye que el reemplazo de cemento por NDMA para valores de porcentaje de 5% y 10% influye de manera negativa en la resistencia a la compresión del concreto con relación a/c igual a 0.50 respecto al concreto patrón.

#### 6.2.1.4 Análisis de investigaciones realizado por otros autores

Según Khoshakhlagh et al. (2012) al realizar mezclas de concreto de relación a/c igual a 0.40 con 1% de aditivo de policarboxilato y porcentajes menores al 5% de reemplazo de nanopartículas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por cemento, los resultados mostraron que los valores de la resistencia a la compresión aumentaron para porcentajes de reemplazo de hasta 4%; sin embargo, para reemplazos mayores al 4% la resistencia a la compresión disminuye, a pesar de esto, esta disminución de los valores se mantienen por encima del concreto patrón, esta reducción la atribuyó a dos posibles escenarios, el primero referido a la existencia de zonas débiles producto de la mala dispersión de las nanopartículas en la matriz del concreto y la segunda como consecuencia de la lixiviación del sílice producto del exceso de

nanopartículas en la mezcla, las cuales no llegan a combinarse con la cal liberada durante la hidratación del cemento.

Por otro lado, según Chousidis et al. (2018) la adición de residuos electroquímicos de dióxido de manganeso (EMDW) genera un proceso de hidratación a una menor velocidad, así como también un menor contenido de portlandita (C-H), respecto al concreto patrón, por lo cual el esfuerzo de resistencia a la compresión se reduce en 9.2% para la mezcla de concreto con 5% de reemplazo de cemento por EMDW y en 27% para la mezcla con 10% de reemplazo de cemento por EMDW para la edad de 7 días. Para edades de 100 y 130 días, la resistencia a la compresión se reduce en 31% y 19% respectivamente para la mezcla con 10% de reemplazo de cemento por EMDW, esto debido al aumento de la porosidad y a una menor cantidad de Silicato Tricálcico en la mezcla con EMDW.

Según Haruehansapong et al. (2014) los resultados de la resistencia a la compresión del mortero con reemplazo parcial de nanosílice, con tamaño de partícula de 40 nm, por cemento fueron mejores a los resultados con reemplazo de nanosílice con tamaño de partícula de 12 y 20 nm., esta diferencia la atribuyó a una posible mala dispersión y aglomeración de las nanopartículas con menor tamaño, asimismo mostró fotografías de microscopía electrónica de barrido (SEM) donde se visualiza que las nanopartículas mejoran la microestructura de la mezcla con cemento. Del mismo modo, según Li et al. (2004) sostiene que las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rellenan los vacíos y fomentan la formación de productos en el proceso de hidratación del cemento, de esta manera las nanopartículas mejoran la microestructura del concreto siempre y cuando se encuentren dispersas de manera uniforme, caso contrario formarán zonas débiles en la matriz del concreto por lo cual tendrán una resistencia menor.

En la Figura N° 40 se puede observar el efecto de la dispersión de las nanopartículas en la zona de transición interfacial entre el cemento y los áridos durante la hidratación del cemento. La dispersión de las nanopartículas entre las partículas de cemento propicia la generación de productos que mejoran las propiedades del concreto como el silicato cálcico hidratado, así como una disminución del volumen de vacíos Liu et al. (2015). Además, se observa la aglomeración de nanopartículas, las cuales, al estar alejadas de las partículas de cemento, generan posibles zonas propensas de falla.

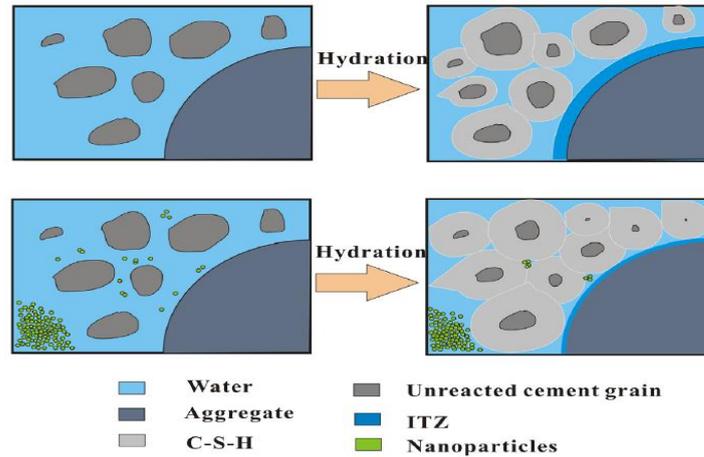


Figura N° 40 Interacción de las nanopartículas en la zona de transición interfacial durante la hidratación del cemento. Fuente Liu et al. (2015).

#### 6.2.1.5 Análisis y discusión de los resultados de resistencia a la compresión

En base al análisis estadístico de la prueba de ANOVA y Tukey, así como también en el análisis de investigaciones pasadas y en los resultados obtenidos se realizan las siguientes conclusiones:

El 5% de reemplazo de cemento por NDMA en el concreto de relación a/c igual a 0.40, no influye en la resistencia a la compresión respecto al concreto patrón, posiblemente como resultado de una adecuada dispersión de las NDMA, las cuales rellenan los espacios vacíos compensando de esta manera el reemplazo del 5% de cemento en la mezcla.

El reemplazo del 10% de cemento por NDMA en el concreto de relación a/c igual a 0.40, influye de manera positiva mejorando la resistencia a la compresión a la edad de 56 días, posiblemente a la buena dispersión de las nanopartículas en la mezcla, generando zonas densas sin producir exceso de vacíos conforme a los resultados obtenidos de los ensayos.

El reemplazo del 5% y 10% de cemento por NDMA para los diseños de concreto de relación a/c igual a 0.45 y 0.50 influyen de manera negativa en la resistencia a la compresión para la edad de 56 días respecto al concreto patrón, debido a una probable deficiencia en la dispersión de las NDMA en toda la mezcla de concreto, por lo cual no se logró rellenar los espacios vacíos en el concreto; así como también a la disminución del asentamiento, con lo cual afecta el comportamiento de la resistencia a la compresión como consecuencia de la dificultad de expulsar las burbujas de aire presentes durante la fabricación de las probetas de concreto con reemplazo parcial de cemento por NDMA respecto al concreto patrón. Esta

pérdida de trabajabilidad se traduce en un posible efecto de floculación entre las partículas de cemento por lo cual existe menor superficie libre para llevar a cabo la correcta hidratación del cemento, acentuando de esta manera la pérdida de resistencia como consecuencia de la sustitución del cemento.

Para un mismo contenido de cemento, independientemente de la relación a/c, los diseños de mezcla con 10% de reemplazo de cemento por NDMA tienen un mejor comportamiento respecto a la resistencia a la compresión respecto a los diseños con 0% y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, mientras que los diseños de mezcla con 5% de reemplazo de cemento por NDMA tienen un comportamiento similar respecto al concreto patrón para iguales contenidos de cemento.

### 6.2.2 Resistencia a la Tracción

Los resultados correspondientes al ensayo de tracción diametral mostrados en la sección 5.2.2 evidencian una tendencia de mejora para el concreto con relación a/c igual a 0.40, logrando observar una mejora del 5% para el concreto con 5% de reemplazo de cemento por NDMA y del 29% para el concreto con 10% de reemplazo de cemento por NDMA con respecto al concreto patrón. No obstante, para el caso del esfuerzo de tracción del concreto de relación a/c igual a 0.45, con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA se certifica una disminución del esfuerzo de tracción por compresión diametral del 3% y 36% respecto al concreto patrón. La misma tendencia se observa para la mezcla de concreto de a/c igual a 0.50 con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, en este caso la reducción fue del 2% y 4% respecto del concreto patrón.

#### 6.2.2.1 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, a/c = 0.40

Para determinar la influencia del NDMA en la resistencia a la tracción del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación a/c = 0.40 a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la tracción de las probetas de concreto de relación a/c igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa (H<sub>1</sub>):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la tracción de las probetas de concreto de relación

a/c igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 80 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la tracción de las probetas fabricadas para la edad de 28 días.

Tabla N° 80 Prueba ANOVA para la resistencia a la tracción, a/c = 0.40.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	59.14	2	29.57	14.37	0.029	9.55
Dentro de los grupos	6.18	3	2.06			
Total	65.32	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.029, es menor a 0.05, por este motivo se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto a la tracción. Para determinar los diseños diferentes se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación a/c igual a 0.40 se muestran en la Tabla N° 81.

Tabla N° 81 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, a/c = 0.40.

q	=	5.91
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	3
MSE	=	2.06
n	=	2

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como diferencia mínima significativa al valor de 6.00 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05} = 6.00$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación a/c igual a 0.40 se muestran en la Tabla N° 82.

Tabla N° 82 Diferencia de medias para cada diseño de  $a/c = 0.40$ .

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	-1.19
	10%	-7.18
5%	0%	1.19
	10%	-5.99
10%	0%	7.18
	5%	5.99

En la Tabla N° 82 se observa que los diseños con 0% y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a un mismo grupo debido que la diferencia de medias es menor al valor  $T_{0.05}$ , mientras que el diseño con 0% de reemplazo de cemento por NDMA es distinto al diseño con 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

Por lo cual se concluye que el reemplazo del 10% de cemento por NDMA influye de manera positiva en la resistencia a la tracción del concreto con relación  $a/c$  igual a 0.40 respecto al concreto patrón. Asimismo, el reemplazo del 5% de cemento por NDMA no tiene influencia en la resistencia a la tracción respecto al concreto patrón.

#### 6.2.2.2 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, $a/c = 0.45$

Para comprobar la influencia del NDMA en la resistencia a la tracción del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.45$  a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

**Hipótesis Nula ( $H_0$ ):** No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la tracción de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

**Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):** Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la tracción de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 83 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la tracción de las probetas fabricadas para la edad de 28 días.

Tabla N° 83 Prueba ANOVA para la resistencia a la tracción,  $a/c = 0.45$ .

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	90.53	2	45.26	1,033.8	0.00	9.55
Dentro de los grupos	0.13	3	0.04			
Total	90.66	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.00, es menor a 0.05, por este motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto al esfuerzo de resistencia a la tracción. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 se muestran en la Tabla N° 84.

Tabla N° 84 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey,  $a/c = 0.45$ .

q	=	5.91
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	3
MSE	=	0.04
n	=	2

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como resultado de la diferencia mínima significativa al valor de 0.87 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05} = 0.87$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 se muestran en la Tabla N° 85.

Tabla N° 85 Diferencia de medias para cada diseño de  $a/c = 0.45$ .

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	0.66
	10%	8.55
5%	0%	-0.66
	10%	7.89
10%	0%	-8.55
	5%	-7.89

En la Tabla N° 85 se observa que los diseños con 0% y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a un mismo grupo, mientras que el diseño con 10% de reemplazo de cemento por NDMA es distinto al diseño con 0% de reemplazo de cemento por NDMA.

Por lo cual se concluye que el 10% de reemplazo de cemento por NDMA influye de manera negativa en el esfuerzo de resistencia a la tracción del concreto con relación  $a/c$  igual a 0.45 respecto al concreto patrón. Asimismo, el 5% de reemplazo de cemento por NDMA en el concreto no influye en el esfuerzo de resistencia a la tracción.

### 6.2.2.3 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, $a/c = 0.50$

Con la finalidad de verificar la influencia del NDMA en la resistencia a la tracción del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.50$  a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

**Hipótesis Nula ( $H_0$ ):** No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la tracción de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

**Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):** Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la tracción de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 86 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la tracción de las probetas fabricadas para la edad de 28 días.

Tabla N° 86 Prueba ANOVA para la resistencia a la tracción, a/c = 0.50.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.84	2	0.42	6.31	0.084	9.55
Dentro de los grupos	0.20	3	0.07			
Total	1.04	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.084, es mayor a 0.05, por este motivo se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, es decir, no existe diferencias entre las medias de los diseños realizados respecto al esfuerzo de resistencia a la tracción. Por esta razón, el reemplazo del 5% y 10% del peso de cemento por NDMA no influye en la resistencia a la tracción respecto al concreto patrón de relación a/c igual a 0.50.

#### 6.2.2.4 Análisis de investigaciones realizado por otros autores

Khaloo et al. (2016) demuestra que un factor determinante e influyente en la resistencia a la tracción es la adherencia existente entre la pasta de cemento y los áridos, zona denominada de transición interfacial (ITZ); por lo cual concluyó que el concreto con reemplazo de 0.75% de cemento por nanosílice desarrolló una microestructura homogénea en la ITZ mejorando de esta manera la resistencia a la tracción respecto al concreto patrón. Del mismo modo, Mukharjee y Barai (2014) atribuye el aumento de la resistencia a la tracción al fortalecimiento de la zona ITZ debido a la adición de nanopartículas, los cuales densifican esta zona mediante la reducción de los vacíos existentes. En la Figura N° 41 Reches (2018) muestra una ilustración donde se visualiza como las nanopartículas ocupan los espacios vacíos en la zona ITZ donde propician la mejora de la densificación y por ende la mejora de la resistencia a la tracción del concreto.

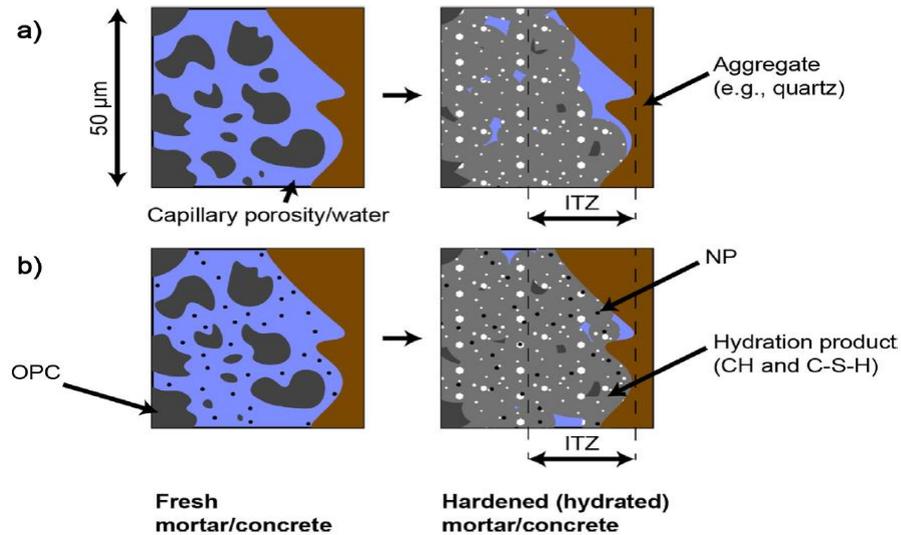


Figura N° 41 Zona de Transición Interfacial (ITZ) a) Concreto sin nanopartículas b) Concreto con nanopartículas. Fuente: Rechtes (2018).

#### 6.2.2.5 Análisis y discusión de los resultados de resistencia a la tracción

Luego de analizar los resultados estadísticos de la prueba ANOVA y Tukey, así como también las investigaciones mencionadas, se mencionan las siguientes conclusiones:

El 5% de reemplazo de cemento por NDMA no influye en la resistencia a la tracción para el concreto de relación a/c igual a 0.40 respecto al concreto patrón debido a una probable adecuada dispersión de las NDMA en la zona de transición interfacial, compensando de esta manera el reemplazo del 5% de cemento.

El 10% de reemplazo de cemento por NDMA influye de manera positiva en el esfuerzo de resistencia a la tracción para el concreto de relación a/c igual a 0.40 posiblemente como consecuencia de la buena dispersión de las NDMA en la zona de transición interfacial, lo cual provoca una reducción de vacíos, aumentando la densidad en esta zona.

El reemplazo del 5% y 10% de cemento por NDMA, en los concretos de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, no influye en la resistencia a la tracción respecto al concreto patrón. Este resultado se puede explicar debido a la adecuada densificación de la zona de transición interfacial, por lo cual se pudo compensar la disminución de la cantidad de cemento en estos diseños.

#### 6.2.3 Resistencia a la Flexión

Respecto a los resultados presentados en la sección 5.2.3 se visualiza que los

valores de resistencia a la flexión correspondiente al concreto de relación a/c igual a 0.40 con reemplazo del 5% y 10% de cemento por NDMA aumenta en 11% y 22% respecto al concreto patrón.

Lo mismo no ocurre con los concretos de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, donde se visualiza que los valores disminuyen respecto al concreto patrón, por ejemplo, para la relación a/c igual a 0.45 con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA disminuye 5% y 14% respectivamente; asimismo, para la relación a/c igual a 0.50 con 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA disminuye 2% y 22% respectivamente.

### 6.2.3.1 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, a/c = 0.40

Para determinar la influencia del NDMA en la resistencia a la flexión del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación a/c = 0.40 a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la flexión de las muestras de concreto de relación a/c igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa (H<sub>1</sub>):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la flexión de las muestras de concreto de relación a/c igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 87 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la flexión de las muestras fabricadas para la edad de 28 días.

Tabla N° 87 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión, a/c = 0.40.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	221.90	2	110.95	97.69	0.002	9.55
Dentro de los grupos	3.41	3	1.14			
Total	225.30	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.002, es menor a 0.05, por este

motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto al esfuerzo de resistencia a la flexión. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación a/c igual a 0.40 se muestran en la Tabla N° 88.

Tabla N° 88 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, a/c = 0.40.

q	=	5.91
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	3
MSE	=	1.14
n	=	2

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como resultado de la diferencia mínima significativa al valor de 4.45 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05} = 4.45$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación a/c igual a 0.40 se muestran en la Tabla N° 89.

Tabla N° 89 Diferencia de medias para cada diseño de a/c = 0.40.

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	-7.29
	10%	-14.90
5%	0%	7.29
	10%	-7.61
10%	0%	14.90
	5%	7.61

En la Tabla N° 89 se observa que los diseños con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a grupos diferentes.

Por lo cual se concluye que el 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA influye en el esfuerzo de resistencia a la flexión del concreto con relación a/c igual a 0.40 respecto al concreto patrón.

### 6.2.3.2 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, $a/c = 0.45$

Para determinar la influencia del NDMA en la resistencia a la flexión del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.45$  a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula ( $H_0$ ):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la flexión de las muestras de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la flexión de las muestras de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 90 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la flexión de las muestras fabricadas para la edad de 28 días.

Tabla N° 90 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión,  $a/c = 0.45$ .

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	136.73	2	68.37	10.51	0.044	9.55
Dentro de los grupos	19.52	3	6.51			
Total	156.26	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.044, es menor a 0.05, por este motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto al esfuerzo de resistencia a la flexión. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación  $a/c$  igual a 0.45 se muestran en la Tabla N° 91.

Tabla N° 91 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, a/c = 0.45.

q	=	5.91
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	3
MSE	=	6.51
n	=	2

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como resultado de la diferencia mínima significativa al valor de 10.66 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05} = 10.66$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación a/c igual a 0.45 se muestran en la Tabla N° 92.

Tabla N° 92 Diferencia de medias para cada diseño de a/c = 0.45.

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	3.32
	10%	11.37
5%	0%	-3.32
	10%	8.05
10%	0%	-11.37
	5%	-8.05

En la Tabla N° 92 se observa que los diseños con 0% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a grupos diferentes. Asimismo, los diseños con 0% y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a grupos iguales.

Por lo cual se concluye que el 10% de reemplazo de cemento por NDMA influye en el esfuerzo de resistencia a la flexión del concreto con relación a/c igual a 0.45 respecto al concreto patrón. Sin embargo, el concreto con 5% de reemplazo de cemento por NDMA no influye en la resistencia a la flexión respecto al concreto patrón.

### 6.2.3.3 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, $a/c = 0.50$

Para determinar la influencia del NDMA en la resistencia a la flexión del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.50$  a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula ( $H_0$ ):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la flexión de las muestras de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de la resistencia a la flexión de las muestras de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 93 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de resistencia a la flexión de las muestras fabricadas para la edad de 28 días.

Tabla N° 93 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión,  $a/c = 0.50$ .

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	256.98	2	128.49	13.50	0.032	9.55
Dentro de los grupos	28.56	3	9.52			
Total	285.54	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.032, es menor a 0.05, por este motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto al esfuerzo de resistencia a la flexión. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 se muestran en la Tabla N° 94.

Tabla N° 94 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey, a/c = 0.50.

q	=	5.91
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	3
MSE	=	9.52
n	=	2

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como resultado de la diferencia mínima significativa al valor de 12.89 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05}=12.89$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación a/c igual a 0.50 se muestran en la Tabla N° 95.

Tabla N° 95 Diferencia de medias para cada diseño de a/c = 0.50.

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	1.50
	10%	14.57
5%	0%	-1.50
	10%	13.08
10%	0%	-14.57
	5%	-13.08

En la Tabla N° 95 se observa que los diseños con 0% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a grupos diferentes. Asimismo, los diseños con 0% y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a grupos iguales.

Por lo cual se concluye que el 10% de reemplazo de cemento por NDMA influye en el esfuerzo de resistencia a la flexión del concreto con relación a/c igual a 0.50 respecto al concreto patrón. No obstante, el concreto con 5% de reemplazo de cemento por NDMA no influye en la resistencia a la flexión respecto al concreto patrón.

#### 6.2.3.4 Análisis de investigaciones realizado por otros autores

Según Tawfik et al. (2018) la reducción de la cantidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente en la mezcla de concreto se produce como consecuencia de la adición de nanopartículas, lo cual origina el aumento de la resistencia a la flexión del concreto.

Mukharjee y Barai (2014) atribuye el aumento de la resistencia de la flexión debido a la mejora de la densificación de la zona de transición interfacial entre el cemento y los áridos en el concreto producto del potencial que poseen las nanopartículas para rellenar los espacios vacíos en esta zona.

Singh et al. (2017) resalta el aumento de la resistencia a la flexión debido a la mayor producción de silicato cálcico hidratado como consecuencia de las reacciones entre las nanopartículas de óxidos metálicos y el hidróxido de calcio, generando una microestructura más densa en el concreto.

#### 6.2.3.5 Análisis y discusión de los resultados de resistencia a la flexión

En base a las investigaciones tomadas como referencia, al análisis estadístico y a los resultados del ensayo de flexión, se mencionan las siguientes conclusiones:

Para el diseño de relación a/c igual a 0.40, el reemplazo del 5% y 10% de cemento por NDMA influye de manera positiva en la resistencia a la flexión debido a una posible densificación de la zona de transición interfacial en el concreto.

Para el diseño de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, el reemplazo del 10% de cemento por NDMA influye de manera negativa en la resistencia a la flexión debido a que el nivel de densificación de la zona de transición interfacial no fue lo suficiente para compensar el reemplazo del 10% de cemento en la mezcla de concreto; esto podría tener como origen la disminución brusca del asentamiento respecto al asentamiento del concreto patrón durante la etapa del mezclado.

Para el diseño de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, el reemplazo del 5% de cemento por NDMA no influye en la resistencia a la flexión del concreto como consecuencia de una posible adecuada densificación de la zona de transición interfacial, con lo cual se pudo compensar la falta del 5% de cemento en la mezcla.

#### 6.2.4 Módulo de Elasticidad

En la sección 5.2.4 se mostraron los resultados del ensayo de módulo de

elasticidad en el concreto para las mezclas diseñadas. Se evidencia que, para todos los casos, el valor del módulo de elasticidad en los concretos con reemplazo del 5% y 10% de cemento por NDMA es menor al concreto patrón.

#### 6.2.4.1 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, $a/c = 0.40$

Para determinar la influencia del NDMA en el módulo de elasticidad del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.40$  a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula ( $H_0$ ):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados del módulo de elasticidad de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados del módulo de elasticidad de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.40 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 96 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de módulo de elasticidad de las probetas fabricadas.

Tabla N° 96 Prueba ANOVA para el módulo de elasticidad,  $a/c = 0.40$ .

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	115,048,012.33	2	57,524,006.17	3.48	0.165	9.55
Dentro de los grupos	49,530,220.50	3	16,510,073.50			
Total	164,578,232.83	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.165, es mayor a 0.05, por este motivo se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, es decir, las medias de los diseños realizados son iguales respecto al módulo de elasticidad.

Por lo cual se concluye que el 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA no tiene influencia en el módulo de elasticidad del concreto con relación a/c igual a 0.40 respecto al concreto patrón.

#### 6.2.4.2 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, a/c = 0.45

Para determinar la influencia del NDMA en el módulo de elasticidad del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación a/c = 0.45 a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados del módulo de elasticidad de las probetas de concreto de relación a/c igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa (H<sub>1</sub>):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados del módulo de elasticidad de las probetas de concreto de relación a/c igual a 0.45 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 97 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA en relación a los resultados del ensayo de módulo de elasticidad.

Tabla N° 97 Prueba ANOVA para el módulo de elasticidad, a/c = 0.45.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	215,803,561.33	2	107,901,780.67	2.31	0.247	9.55
Dentro de los grupos	140,327,393.50	3	46,775,797.83			
Total	356,130,954.83	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.247, es mayor a 0.05, por este motivo se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, es decir, las medias de los diseños realizados son iguales respecto al módulo de elasticidad. Se concluye que el 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA no tiene influencia en el módulo de elasticidad del concreto con relación a/c igual a 0.45 respecto al concreto patrón.

### 6.2.4.3 Análisis estadístico de los resultados a 28 días, $a/c = 0.50$

Para determinar la influencia del NDMA en el módulo de elasticidad del concreto se realizó el análisis estadístico de los diseños de concreto con relación  $a/c = 0.50$  a la edad de 28 días, se proponen las siguientes hipótesis estadísticas:

*Hipótesis Nula ( $H_0$ ):* No existe diferencia significativa entre las medias de los resultados del módulo de elasticidad de las probetas de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

*Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):* Existe diferencia significativa entre las medias de los resultados del módulo de elasticidad de las muestras de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 con 0%, 5% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

En la Tabla N° 98 se muestran los valores correspondientes para el análisis de la prueba ANOVA.

Tabla N° 98 Prueba ANOVA para la resistencia a la flexión,  $a/c = 0.50$ .

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	343,765,633.00	2	171,882,816.50	153.38	0.001	9.55
Dentro de los grupos	3,361,982.50	3	1,120,660.83			
Total	347,127,615.50	5				

El valor del nivel de significancia determinado, 0.001, es menor a 0.05, por este motivo se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe al menos un valor diferente de las medias de los diseños realizados respecto al módulo de elasticidad. Para determinar este diseño diferente se realizará la Prueba de Tukey mediante la aplicación de la ecuación 37.

Los valores de cada elemento de la ecuación 37 para el cálculo de la prueba Tukey para el concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 se muestran en la Tabla N° 99.

Tabla N° 99 Parámetros para cálculo de Prueba de Tukey,  $a/c = 0.50$ .

q	=	5.91
$\alpha$	=	0.05
a	=	3
f	=	3
MSE	=	1,120,660.83
n	=	2

Reemplazando estos valores en la ecuación 37 se tiene como resultado de la diferencia mínima significativa al valor de 4,423.94 para un nivel de significancia del 0.05.

$$T_{0.05} = 4,423.94$$

Los valores de las diferencias de las medias entre cada diseño de concreto de relación  $a/c$  igual a 0.50 se muestran en la Tabla N° 100.

Tabla N° 100 Diferencia de medias para cada diseño de  $a/c = 0.50$ .

% NDMA		Diferencia de Medias
i	j	(i-j)
0%	5%	1,217.50
	10%	16,631.00
5%	0%	-1,217.50
	10%	15,413.50
10%	0%	-16,631.00
	5%	-15,413.50

En la Tabla N° 100 se observa que los diseños con 0% y 10% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a grupos diferentes debido que la diferencia de medias es mayor al valor  $T_{0.05}$ . Asimismo, los diseños con 0% y 5% de reemplazo de cemento por NDMA, estadísticamente corresponden a grupos iguales. Se concluye que el 10% de reemplazo de cemento por NDMA tiene influencia en el módulo de elasticidad del concreto con relación  $a/c$  igual a 0.50 respecto al concreto patrón. No obstante, el concreto con 5% de reemplazo de cemento por NDMA no tiene influencia en el módulo de elasticidad respecto al concreto patrón.

#### 6.2.4.4 Análisis de investigaciones realizado por otros autores

Chousidis et al. (2018) sostiene que al reemplazar 5% de cemento por Dióxido de Manganeso Electrolítico Gamma (EMDW), sumergiendo las muestras en una solución con 3.5% de NaCl durante 28, 100 y 130 días, obtuvo como resultado un aumento del módulo elástico para todas las edades; sin embargo, cuando reemplazó 10% de cemento por EMDW, el valor del módulo elástico disminuyó respecto al concreto patrón como consecuencia del aumento de grietas dentro de la estructura del concreto provocado por el aumento de la concentración de iones sulfatos presentes en la composición del EMDW.

Li et al. (2006) relaciona la influencia de la zona de transición interfacial en los resultados del módulo de elasticidad en muestras de mortero con cemento y nanopartículas de  $Al_2O_3$ , como consecuencia de la alta energía superficial de las nanopartículas, estas son atraídas hacia la superficie de los áridos principalmente por fuerzas de Van der Waals, las cuales ayudan a densificar la zona de transición interfacial.

#### 6.2.4.5 Análisis y discusión de los resultados de módulo de elasticidad

De acuerdo a los resultados observados y a las referencias de investigaciones de otros autores, se mencionan las siguientes conclusiones:

Debido a las propiedades únicas que tienen las NDMA debido a su tamaño nanométrico, posiblemente las zonas de transición interfacial fueron densificadas lo cual conlleva a que el concreto no presente una variación significativa a la propiedad de resistir las deformaciones elásticas debido a cargas axiales, compensando de esta manera la ausencia del 5% y 10% del peso de cemento presentes en la mezcla, por lo cual el reemplazo del 5% y 10% de cemento por NDMA no influye en el Módulo de Elasticidad del concreto a excepción del diseño de relación a/c igual a 0.50 con 10% de reemplazo de cemento por NDMA.

Existe la probabilidad de la existencia de microgrietas tal y como indicó Chousidis et al. (2018), con lo cual se puede explicar la reducción no significativa del módulo elástico en los concretos diseñados respecto al concreto patrón.

El 10% de reemplazo de cemento por NDMA en el diseño de relación a/c igual a 0.50 influye de manera negativa en el Módulo de Elasticidad del concreto como consecuencia de un posible aumento de microgrietas en el concreto producto de

la drástica disminución del asentamiento (4 pulgadas) así como una mayor proporción de agua en la mezcla de concreto, por lo cual no pudo compensar el reemplazo del 10% de cemento, influyendo negativamente en esta propiedad mecánica.

### 6.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL COSTO DEL CONCRETO

En la sección 4.4 se calculó el costo para cada diseño de mezcla realizado, así como también el costo del concreto sin aditivo, mediante esta información se realizaron la siguiente tabla que contiene la resistencia a la compresión para cada diseño en base a los resultados de la resistencia a la compresión mostrados en la sección 5.2.1.

Tabla N° 101 Costos y resistencias para cada diseño de mezcla.

Diseño	Total S/.	f'c kg/cm2 (28 días)	Diseño	Total S/.	f'c kg/cm2 (28 días)	Diseño	Total S/.	f'c kg/cm2 (28 días)
a/c = 0.40 Patrón	384.00	646.7	a/c = 0.45 Patrón	338.36	628.6	a/c = 0.50 Patrón	304.80	570.3
a/c = 0.40 5% NDMA	369.42	648.1	a/c = 0.45 5% NDMA	325.40	582.5	a/c = 0.50 5% NDMA	293.00	489.0
a/c = 0.40 10% NDMA	354.84	724.4	a/c = 0.45 10% NDMA	312.44	533.5	a/c = 0.50 10% NDMA	281.21	492.5
a/c = 0.40 Patrón sin aditivo	338.83	430.0	a/c = 0.45 Patrón sin aditivo	303.82	380.0	a/c = 0.50 Patrón sin aditivo	275.69	335.7

En la Tabla N° 101 se observa que el costo para producir 1 m<sup>3</sup> de concreto con relación a/c igual a 0.40 sin aditivo es S/.338.83, para una resistencia de diseño de f'c = 430.0 kg/cm<sup>2</sup> y 570kg de contenido de cemento. De manera similar, el

costo para fabricar 1 m<sup>3</sup> de concreto de relación a/c igual a 0.50 con 10% de reemplazo de cemento por NDMA es S/. 281.21, con una resistencia calculada de  $f'c = 492.5 \text{ kg/cm}^2$ , 373.5 kg de cemento y 41.5 kg de NDMA. Se concluye que existe un ahorro de S/57.62 por cada 1 m<sup>3</sup> para fabricar concreto con una resistencia mayor en 59 kg/cm<sup>2</sup> respecto a la resistencia de diseño del concreto de relación a/c igual a 0.40. En este aspecto, podemos afirmar que es factible sustituir NDMA por cemento para producir concretos de mayor resistencia a la compresión con menores contenidos de cemento utilizando en su composición NDMA como reemplazo parcial del cemento.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta tesis respaldaron a la hipótesis planteada, demostrando que este nanomaterial efectivamente influenció en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con relaciones agua – cemento de 0.40, 0.45 y 0.50 en Lima Metropolitana. Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, se alcanzó de manera efectiva el cumplimiento de los objetivos propuestos al inicio del estudio. En primer lugar, se logró determinar las características de los componentes en la mezcla de concreto. Además, se diseñó las mezclas de concreto para luego evaluar las propiedades físicas y mecánicas. Finalmente, se realizó la validación de los resultados. A continuación, se enumeran las siguientes conclusiones:

La adición de 5% y 10% de NDMA como reemplazo por cemento en la mezcla de concreto influyó de manera positiva para el concreto de relación a/c igual a 0.40 en las propiedades físicas: asentamiento, peso unitario, y porosidad, y en las propiedades mecánicas: resistencia a la flexión; esta influencia se relaciona con una adecuada dispersión de las NDMA en la mezcla de concreto y a la buena trabajabilidad de la mezcla de concreto.

La adición de 10% de NDMA como reemplazo de cemento para el concreto de relación a/c igual a 0.40 influyó de manera positiva en las propiedades mecánicas: resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, como consecuencia de una posible buena dispersión de las nanopartículas en la mezcla de concreto y a la buena trabajabilidad durante la fabricación de las probetas, lo cual generó un escenario apropiado para constituir una matriz más compacta capaz de mejorar las propiedades mecánicas.

La adición de 5% y 10% de NDMA como reemplazo del peso de cemento presente en la mezcla de concreto de relación a/c igual a 0.45 y 0.50 influyó de manera negativa en el asentamiento, peso unitario, porosidad, resistencia a la compresión como resultado de una probable deficiencia en la dispersión de las nanopartículas en la mezcla, así como también de una disminución de la trabajabilidad de las mezclas de concreto produciendo una mayor cantidad de vacíos, así como una reducción de superficie libre de las partículas de cemento comprometiendo a la hidratación de estas partículas, reduciendo de esta manera estas propiedades.

La adición de 5% y 10% de NDMA como reemplazo del cemento para los concretos de relación a/c igual a 0.45 y 0.50, y 5% de NDMA en el concreto de a/c igual a 0.40 no influyó en la resistencia a la tracción, así mismo la adición de 5% de NDMA como reemplazo de cemento para concretos con a/c igual a 0.45 y 0.50 no influyó en la resistencia a la flexión como consecuencia de una probable densificación de algunas zonas de transición interfacial, lo que permitió compensar el reemplazo de cemento en las mezclas de concreto.

Para iguales contenidos de cemento, las mezclas con 10% de reemplazo de cemento por NDMA tienen mejores resultados de resistencia a la compresión respecto a las mezclas patrón y con 5% de reemplazo de cemento por NDMA.

La adición de 5% y 10% de NDMA como reemplazo de cemento para los concretos de relación a/c igual a 0.40, 0.45 y 0.50 no influyó en los resultados del módulo de elasticidad.

La adición de 5% y 10% de NDMA como reemplazo de cemento para los concretos con a/c igual a 0.40, 0.45 y 0.50 influye en la temperatura de la mezcla sin exceder la temperatura límite establecida según la E.060 en 32 °C.

La adición de 5% y 10% de NDMA como reemplazo de cemento para los concreto con a/c igual a 0.40 disminuyó la porosidad conforme aumenta el porcentaje de reemplazo, mientras que para las relaciones con a/c igual a 0.45 y 0.50, la porosidad aumenta conforme aumenta el porcentaje de reemplazo y el valor del a/c, esto podría explicarse a la capacidad de las NDMA de rellenar los poros vacíos presentes en la mezcla siempre y cuando exista una buena dispersión de nanopartículas como en el caso del a/c igual a 0.40, así como también al asentamiento obtenido, estas causas tuvieron una influencia en la porosidad en los diseños de concreto realizados.

Se determinó las características de todos los materiales componentes del concreto: cemento, arena gruesa, piedra chancada, agua, aditivo H-2020 y nanopartículas de dióxido de manganeso, las cuales mediante el uso de la Difracción de Rayos X se obtuvo el tamaño de partícula con un valor igual a 42.4 nm, así como también el área de superficie específica con un valor de 43.2 m<sup>2</sup>/g y la composición química, la cual está compuesta por 94.4% de MnO<sub>2</sub>.

Se determinó que el PH de la pasta de cemento se mantiene en un rango de alcalinidad entre 12 a 13 para reemplazos de cemento por NDMA entre 0% a 15%.

Se diseñó 3 relaciones a/c de concreto de 0.40, 0.45 y 0.50 con 0, 5 y 10% de reemplazo de NDMA por cemento mediante el método de Bolomey, verificando para todos los casos mezclas trabajables con adición del 1.2%, 1.1% y 1.0% de aditivo superplastificante respecto al peso de cemento para cada relación a/c diseñada de concreto patrón.

Se evaluó las propiedades físicas y mecánicas del concreto con reemplazo parcial del cemento por NDMA respecto al concreto patrón, determinando que el concreto de relación a/c igual a 0.40 con 10% de reemplazo de cemento por NDMA presenta los mejores resultados respecto al concreto patrón.

Los resultados obtenidos fueron validados mediante la aplicación de los métodos estadísticos del análisis de varianza ANOVA y la prueba de Tukey, así como también de comparaciones con investigaciones de otros autores, los cuales sirvieron de base para la sustentación de este trabajo de investigación.

El costo de fabricar concreto con adición de NDMA como reemplazo parcial del cemento y aditivo superplastificante es factible respecto al concreto convencional para requerimientos de resistencia a la compresión.

## RECOMENDACIONES

Realizar dosificaciones de mezclas de concreto con otros porcentajes de NDMA con la finalidad de determinar el comportamiento y el valor óptimo de reemplazo de cemento para las diferentes relaciones agua – cemento.

Investigar métodos para mejorar la dispersión de las nanopartículas en la mezcla de concreto y evaluar su influencia en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con NDMA.

Realizar dosificaciones de concreto utilizando otro tipo de aditivo y evaluar su efecto en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con reemplazo parcial de cemento por NDMA.

Realizar un proceso de diseño de concreto con nanopartículas de dióxido de manganeso con la finalidad de cuantificar la cantidad de NDMA óptima para cada resistencia de diseño requerida. Estudiar las reacciones químicas de las nanopartículas de dióxido de manganeso alfa anódico durante el proceso de hidratación del cemento Portland.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute (2020). *Specifications for Concrete Construction*. (ACI SPEC-301-20). ACI.
- American Concrete Institute (2014). *Specification for Hot Weather Concreting*. (ACI 305.1-14). ACI.
- American Society for Testing and Materials (2023). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. (ASTM C29 / C29M-23). ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2023). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. (ASTM C33 / C33M-23). ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. (C39 / C39M-21). ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2016). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. (C127-15). ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2023). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. (C128-22). ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2020). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate*. (C136 / C136M-19). ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2022). *Standard Specification for Portland Cement*. (C150 / C150M-22). ASTM.
- American Society for Testing and Materials (2022). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. (C469 / C469M -22). ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. (C494 / C494M-19e1). ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. (C566-19). ASTM.
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. y Sebastiani, M. (2012). Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland

- cement pastes. *Construction and Building Materials*, 35, 666–675.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132>
- Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L. y Panas, I. (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*, 392, 242–248.  
<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.05.071>
- Bolivar, O. (2006). Dosificación de mezclas de hormigón Métodos: ACI 211.1, Weymouth, Fuller, Bolomey, Faury (Universidad Nacional de Colombia).
- Chauveinc, J. (2011). *Estudio experimental de propiedades mecánicas de hormigones con árido reciclado mediante la modificación del método de mezclado de hormigón*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.  
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104206>
- Chousidis, N., Ioannou, I. y Batis, G. (2018). Utilization of Electrolytic Manganese Dioxide (E.M.D.) waste in concrete exposed to salt crystallization. *Construction and Building Materials*, 158, 708-718.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.036>
- Coasaca, G. (2018). *Análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas del concreto utilizando distintos métodos de diseños de mezclas con los materiales típicos de la provincia de Arequipa*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio de la Universidad Católica Santa María.  
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/7730>
- Colin, R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114-140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Dawadi, S., Gupta, A., Khatri, M., Budhathoki, B., Lamichhane G. y Parajuli, N. (2020). Manganese dioxide nanoparticles: synthesis, application and challenges. *Bull Mater Sci*, 43 (277), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12034-020-02247-8>
- Duel, P. (2022). *Síntesis y caracterización de nanomateriales híbridos para la captura de iones de interés medioambiental*. [Tesis doctoral, Universitat de les Illes Balears]. Repositorio Institucional de la Universitat de les Illes Balears. <http://hdl.handle.net/11201/159732>

- Elkady, H., Serag, M. y Elfeky, M. (2013). Effect of Nano Silica De-agglomeration, and Methods of Adding Super-plasticizer on the Compressive Strength, and Workability of Nano Silica Concrete. *Civil and Environmental Research*, 3, 1719.
- Farouk, M. (2019). Influence of Different Nano Materials on Mechanical Properties of Plain Concrete. *European Journal of Engineering Research and Science*, 4, 129-134. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2019.4.6.1389>
- Haruehansapong, S., Pulngern, T. y Chucheepsakul, S. (2014). Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO<sub>2</sub>. *Construction and Building Materials*, 50, 471-477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.002>
- Hearn, N., Hooton, D. y Nokken, M. (2006). Pore Structure, Permeability and Penetration Resistance Characteristics of Concrete. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*, 238-252.
- Hernández, E. y Rojas, J. (2021). *Estudio de la resistencia a la compresión del concreto, con vidrio molido reciclado como sustituto parcial del agregado fino*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/27150>
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2013). *Cementos Portland Requisitos* (NTP 334.009). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2008). *Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas* (NTP 339.034). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2009). *Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de cemento Portland* (NTP 339.035). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2008). *Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón (concreto)*. (NTP 339.046). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad

- Intelectual (2012). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo*. (NTP 339.078). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2006). *Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos*. (NTP 339.088). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2013). *Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado* (NTP 339.185). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2008). *Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos)* (NTP 400.011). INDECOPI.
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (2014). *Especificaciones normalizadas para agregados en concreto* (NTP 400.037). INDECOPI.
- Instituto Nacional de la Calidad (2015). *Aditivos químicos en pastas, morteros y concreto. Especificaciones* (NTP 334.088). INACAL.
- Instituto Nacional de la Calidad (2015). *Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Campo*. (NTP 339.033). INACAL.
- Instituto Nacional de la Calidad (2012). *Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a tracción simple del concreto, por compresión diametral de una probeta cilíndrica* (NTP 339.084). INACAL.
- Instituto Nacional de la Calidad (2021). *Determinación de la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado* (NTP 339.184). INACAL.
- Instituto Nacional de la Calidad (2002). *Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, absorción y porcentaje de vacíos en el hormigón (concreto) endurecido* (NTP 339.187). INACAL.
- International Energy Agency. (2018). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
- Khaloo, A., Mobini, M. y Hosseini, P. (2016). Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete. *Construction and*

- Building Materials*, 113, 188-201.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041>
- Khan, I., Saeed, K. y Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 908-931.  
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Khoshakhlagh, A., Nazari, A. y Khalaj, G. (2012). Effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on Water Permeability and Strength Assessments of High Strength Self-Compacting Concrete. *J. Mater. Sci. Technol.*, 28, 73-82.  
[https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60026-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60026-7)
- Korayem, A.H., Tourani, N., Zakertabrizi, M., Sabziparvar, A.M. y Duan, W.H., (2017). A review of dispersion of nanoparticles in cementitious matrices: Nanoparticle geometry perspective. *Construction and Building Materials*, 153, 346-357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.164>
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto (EB201). *Portland Cement Association*, 1.
- Lago, G. (2023). Informe de Ensayos Químicos. UNICON.
- León, B. y Jansen, J.A. (2009). Thin Calcium Phosphate Coatings for Medical Implants. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77718-4>
- Li, H., Xiao, H.-G., Yuan, J. y Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35, 185-189.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0)
- Li, Q., Fan, Y. y Shah, S.P. (2022). Rheological Properties and Structural Build-Up of Cement Based Materials with Addition of Nanoparticles: A Review. *Buildings*, 12, 2219. <https://doi.org/10.3390/buildings12122219>
- Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y. y Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60, 356–359.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.08.061>
- Liu, J., Li, Q. y Xu, S. (2015). Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 101, 892-901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.149>
- López, M. (2013). *Nanoresiduos. Incorporación en materiales de base cemento*. [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio

- Institucional de la Universitat Politècnica de Catalunya.  
<http://hdl.handle.net/2099.1/26056>
- Mehta, P. y Monteiro, P. (1993). Concrete-Structure, Properties, and Materials. *Mc Graw-Hill Education*, 4.
- Mukharjee, B.B. y Barai, S.V. (2014). Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 29-37.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.040>
- Muñoz, J. (2014). *Efectos de la sílice amorfa en las propiedades cristaloquímicas y mecánicas del hormigón en un medio salino*. [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. Sistema de Bibliotecas de la Universidad Austral de Chile.  
[http://cyber tesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfci583e/doc/bmfci\\_d583e.pdf](http://cyber tesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfci583e/doc/bmfci_d583e.pdf)
- Nazari, A. y Riahi, S. (2011). The effects of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical, thermal and mechanical properties of concrete using ground granulated blast furnace slag as binder. *Materials Science and Engineering A*, 528, 2085-2092.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.070>
- Niewiadomski, P., Stefaniuk, D. y Hoła, J. (2017). Microstructural analysis of self-compacting concrete modified with the addition of nanoparticles. *Procedia Engineering*, 172, 776-783. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.122>
- Picasso, G., Quijano, J. y Sun, R. (2015). Síntesis de catalizadores basados en Co-Mn para la combustión de n-hexano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(4), 369-380. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2015000400009&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2015000400009&script=sci_abstract)
- Quintero, L., Herrera, J., Corzo, L. y García, J. (2011). Relación entre la Resistencia a la Compresión y la Porosidad del concreto evaluada a partir de parámetros ultrasónicos. *Revista ION*, 24, 69-76.
- Ramirez, M. (2017). *Determinación de la manejabilidad de mezclas de concreto de bajo asentamiento utilizando el método de ensayo del consistómetro vebe*. [Tesis de pregrado, Universidad Rafael Landívar]. Recursos Biblioteca de la Universidad Rafael Landívar.  
<http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrzd/2017/02/09/Ram%C3%ADrez-Maria.pdf>
- Raval, N., Maheshwari, R., Kalyane, D., Youngren-Ortiz, S., Chougule, B. y Tekade, R. (2019). Importance of Physicochemical Characterization of Nanoparticles in Pharmaceutical Product Development. *Basic Fundamentals of Drug*

*Delivery*, 369-400. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817909-3.00010-8>

Reches, Y. (2018). Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. *Construction and Building Materials*, 175, 483-495.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214>

Ruiz, R. (2021). *Influencia del tiempo de mezclado en las propiedades del concreto premezclado en estado fresco en la ciudad de Tarapoto*. [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Perú]. Repositorio UCP.

<http://hdl.handle.net/20.500.14503/1742>

Sanchez, F. y Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24, 2060-2071.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>

Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (2020). *Norma Técnica de Edificación Concreto Armado (E.060)*. SENCICO.

Shanaka, K. (2016). *Ductility Design of Very-High Strength Reinforced Concrete Columns (100-150 MPa)*. [Tesis doctoral, Universidad de Melbourne]. ResearchGate.

[https://www.researchgate.net/profile/ShanakaBaduge/publication/331386345\\_Ductility\\_Design\\_of\\_VeryHigh\\_Strength\\_Reinforced\\_Concrete\\_Columns\\_100-150\\_MPa/links/5d3f9e47a6fdcc370a6bc242/DuctilityDesign-of-Very-High-Strength-Reinforced-Concrete-Columns-100-150-MPa.pdf](https://www.researchgate.net/profile/ShanakaBaduge/publication/331386345_Ductility_Design_of_VeryHigh_Strength_Reinforced_Concrete_Columns_100-150_MPa/links/5d3f9e47a6fdcc370a6bc242/DuctilityDesign-of-Very-High-Strength-Reinforced-Concrete-Columns-100-150-MPa.pdf)

Singh, N., Kalra, M. y Saxena, S. (2017). Nanoscience of Cement and Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 4, 5478-5487.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.003>

Solis, S. (2019). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto con aditivos de nanopartículas de sílice y hierro ZVI a partir de precursores*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA.

<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10843>

Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L.M., Valdez, P.L., Zarazua, E. y Cuellar, E.L. (2009). Engineering of SiO<sub>2</sub> Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials. *Nanotechnology in Construction*, 139-148.

[https://doi.org/10.1007/978-3-642-00980-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00980-8_18)

Sprung, S. (2012). Cement. *In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 7, 399-461. [https://doi.org/10.1002/14356007.a04\\_009](https://doi.org/10.1002/14356007.a04_009)

- Stein, H. y Stevels, J. (1964). Influence of silica on the hydration of 3 CaO, SiO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Chemistry*, 14 (8), 338–346.  
<https://doi.org/10.1002/jctb.5010140805>
- Tawfik, T., Abd EL-Aziz, M., Abd El-Aleem, S. y Serag Faried, A. (2018). Influence of nanoparticles on mechanical and nondestructive properties of high-performance concrete. *Journal of the Chinese Advanced Materials Society*.  
<https://doi.org/10.1080/22243682.2018.1489303>
- Torre, A. (2004). Curso básico de tecnología del concreto. Facultad de Ingeniería Civil - Laboratorio de Ensayo de Materiales, Lima, Perú.
- Zapata, L.E., Portela, G., Suárez, O.M. y Carrasquillo, O. (2013). Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO<sub>2</sub> additions. *Construction and Building Materials*, 41, 708-716. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.025>
- Zhang, C., Kong, X., Yin, J. y Fu, X. (2021). Rheology of fresh cement pastes containing polymer nanoparticles. *Cement and Concrete Research*, 144, 106419. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106419>
- Zhang, P., Wan, J., Wang, K. y Li, Q. (2017). Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on properties of fresh and hardened high performance concrete: a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 148, 648-658.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>

## ANEXOS

Anexo 1: Ficha técnica aditivo H-2020, Industrias Ulmen.....	139
Anexo 2: Ficha técnica cemento sol tipo I, UNACEM.....	140
Anexo 3: Lodo de Dióxido de Manganeso acuoso, extraído del ánodo del proceso electroquímico para la refinación del zinc. ....	142
Anexo 4: Granulometría del agregado grueso en el laboratorio LEM, Laboratorio de Ensayo de Materiales – FIC UNI. ....	143
Anexo 5: Granulometría del agregado fino en el laboratorio LEM.....	144
Anexo 6: Ensayo de resistencia a la compresión, UNU-LEM. ....	145
Anexo 7: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 7 y 14 días, a/c =0.40.....	146
Anexo 8: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 28 y 56 días, a/c=0.40.....	147
Anexo 9: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 7 y 14 días, a/c =0.45.....	148
Anexo 10: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 28 y 56 días, a/c =0.45.....	149
Anexo 11: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 7 y 14 días, a/c =0.50.....	150
Anexo 12: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 28 y 56 días, a/c =0.50.....	151
Anexo 13: Cuadro de resultados para ensayo de Tracción a 28 días, a/c=0.40, 0.45 y 0.50.....	152
Anexo 14: Cuadro de resultados para ensayo de Flexión a 28 días, a/c=0.40, 0.45 y 0.50.....	153
Anexo 15: Cuadro de resultados para ensayo de Módulo de Elasticidad a 28 días, a/c=0.40, 0.45 y 0.50.....	154
Anexo 16: Cuadro de resultados para ensayo de Porosidad a 28 y 56 días, a/c=0.40.....	155
Anexo 17: Cuadro de resultados para ensayo de Porosidad a 28 y 56 días, a/c=0.45.....	156
Anexo 18: Cuadro de resultados para ensayo de Porosidad a 28 y 56 días, a/c=0.50.....	157

## Anexo 1: Ficha técnica de aditivo H-2020, Industrias Ulmen.



# R-2020

REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO A BASE DE NANOSILICE

Fecha de Emisión: Dic 10, 20  
Revisión: 1  
Fecha de Revisión: Mar 16, 21  
Página : 1 de 1

Industrias Ulmen S.A. Aditivos Nanotecnológicos

**DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO**

El **R-2020** es un nanoaditivo en estado líquido de alta actividad por las nano materias de última generación que lo componen.  
Pertenece a la línea **Gaia Nanosilice**, donde las reacciones químicas en el mezcla permiten que las nanopartículas de silice se convierten en nanopartículas de cemento.  
Según las normas ASTM C494 y NTP 334.088, cumple con la clasificación **TIPO F – Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango**.

**CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS**

- Permite reducir el agua de diseño en 15% a 45%, según dosis de uso.
- Brinda una pérdida lenta de la consistencia sin retardar el proceso de fraguado.
- Debido a su composición en base a solución de nanosilice, brinda una mejora en las resistencias mecánicas y durabilidad en las estructuras.
- Permite obtener una mezcla con una mayor consistencia sin alterar la relación A/C.
- Está libre de cloruros, por ello no promoverá la corrosión.
- Modifica la reología de la mezcla brindando una alta fluidez sin segregación.

**CAMPOS DE APLICACIÓN**

El **R-2020** es ideal para concretos con baja relación agua – cementante. Se puede aplicar en concretos de altas exigencias, ya que brinda una mantención prolongada, altas resistencia iniciales y mejora la durabilidad ante agentes químicos nocivos. Por las propiedades reológicas que brinda al concreto se puede aplicar en concretos autonivelantes y rheoplásticos en general. Su desempeño mejora cuando la cantidad de material cementante es mayor.

**DOSIFICACIÓN**

El **R-2020** puede ser utilizado en dosis desde **0.4% a 2%** con respecto al peso del cemento. Se recomienda realizar pruebas previas para validar la dosis optima. El producto debe de ser diluido en el agua efectiva y adicionado a la mezcla durante el proceso de mezclado.

Estas recomendaciones pueden sufrir variaciones debido a materiales de mala calidad, condiciones de obra y/o incorrecta metodología de uso, por ello se recomienda contactar a nuestros asesores técnicos **ULMEN**.

**PROPIEDADES FÍSICAS**

Apariencia	Líquida
Color	Blanco Opalescente
Densidad	1,1 ± 0,02 g/mL

**PRESENTACIÓN**

Se suministra en:

- IBC de 1100 Kg
- Cilindro de 220 Kg
- Garrafas de 60 Kg
- Baldes de 20 Kg

**DURACIÓN Y ALMACENAMIENTO**

6 meses almacenado en un lugar fresco y protegido del sol, recomendado por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO9001.

**INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD**

Para información y consejo sobre seguridad en la manipulación y disposición de productos químicos, los usuarios deben referirse a la Hoja de Datos de Seguridad vigente, la cual contiene datos físicos, ecológicos toxicológicos y otros datos relativos a la seguridad.

Cooperativa las Vertientes, Calle 4, Mz C-1 Sub Lt 2-F Villa El Salvador – Lima  
Teléfonos (01) 719-4126 / 719-4127  
[www.cognoscibletechnologies.com](http://www.cognoscibletechnologies.com)    [www.ulmen.cl](http://www.ulmen.cl)    [atencionalcliente@ulmen.cl](mailto:atencionalcliente@ulmen.cl)

"Influencia de nanopartículas de dióxido de manganeso en las propiedades físicas y mecánicas del concreto en Lima Metropolitana"  
Bach. Bruno Omar Dorival Gutierrez

139

## Anexo 2: Ficha técnica cemento sol tipo I, UNACEM.



### FICHA TÉCNICA CEMENTO SOL

#### DESCRIPCIÓN:

Tipo I, Cemento Portland de uso general.

#### BENEFICIOS:

- > Acelerado desarrollo de resistencias iniciales.
- > Óptima trabajabilidad.
- > Permite menor tiempo de desencofrado.
- > Excelente desarrollo de resistencias en shotcrete.
- > Excelente permanencia del slump.

#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

- > Cumple con la Norma Técnica Peruana NTP - 334.009 y la Norma Técnica Americana ASTM C-150.

#### APLICACIONES:

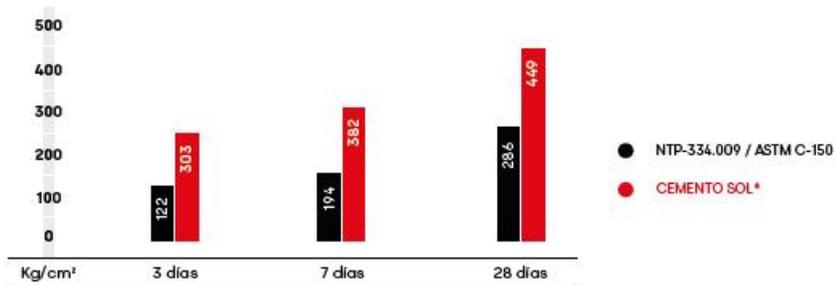
- > Construcciones en general y de gran envergadura cuando no se requieren características especiales o no especifique otro tipo de cemento.
- > Preparación de concretos para cimientos, sobrecimientos, zapatas, vigas, columnas y techado.

#### FORMATO DE DISTRIBUCIÓN:

- > Bolsas de 42.5 kg: 03 pliegos (02 de papel + 01 film plástico).
- > Bolsas de 25 kg: 03 pliegos (02 de papel + 01 film plástico).
- > Granel: A despacharse en camiones bombonas y big bags.

#### REQUISITOS MECÁNICOS:

COMPARACIÓN RESISTENCIAS NTP-334.009 / ASTM C-150 VS. CEMENTO SOL



\* Valores referenciales

**PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS**

PARÁMETRO	UNIDAD	CEMENTO SOL	REQUISITOS NTP-334.009/ ASTM C-150
Contenido de aire	%	7	Máximo 12
Expansión autoclave	%	0.09	Máximo 0.80
Superficie específica	m <sup>2</sup> /kg	323	Mínimo 260
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	3.13	No específica
<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN</b>			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm <sup>2</sup>	303	Mínimo 122
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm <sup>2</sup>	382	Mínimo 194
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm <sup>2</sup>	449	Mínimo 285 (*)
<b>TIEMPO DE FRAGUADO</b>			
Fraguado Vicat Inicial	min	129	45 a 375
<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>			
MgO	%	2.9	Máximo 6.0
SO <sub>3</sub>	%	2.8	Máximo 3.5
Pérdida al fuego	%	2.2	Máximo 3.5
Residuo insoluble	%	0.9	Máximo 1.5
<b>FASES MINERALÓGICAS</b>			
C2S	%	12	No específica
C3S	%	55	No específica
C3A	%	10	No específica
C4AF	%	10	No específica

(\*) Requisito opcional

**RECOMENDACIONES  
GENERALES**

**DOSIFICACIÓN:**

- > Utilizar agua, arena y piedra libre de impurezas.
- > Respetar la relación agua-cemento (a/c) a fin de obtener un buen desarrollo de resistencias, trabajabilidad y performance del cemento.
- > Para desarrollar la resistencia a la compresión del concreto y evitar grietas, se necesita curar por lo menos durante 7 días.

**MANIPULACIÓN:**

- > Se debe manipular el cemento en ambientes ventilados.
- > Usar la vestimenta y app adecuados: casco, protectores para los ojos, guantes y botas.
- > El contacto con la humedad o con el polvo de cemento sin protección puede causar irritación o daño en la piel.

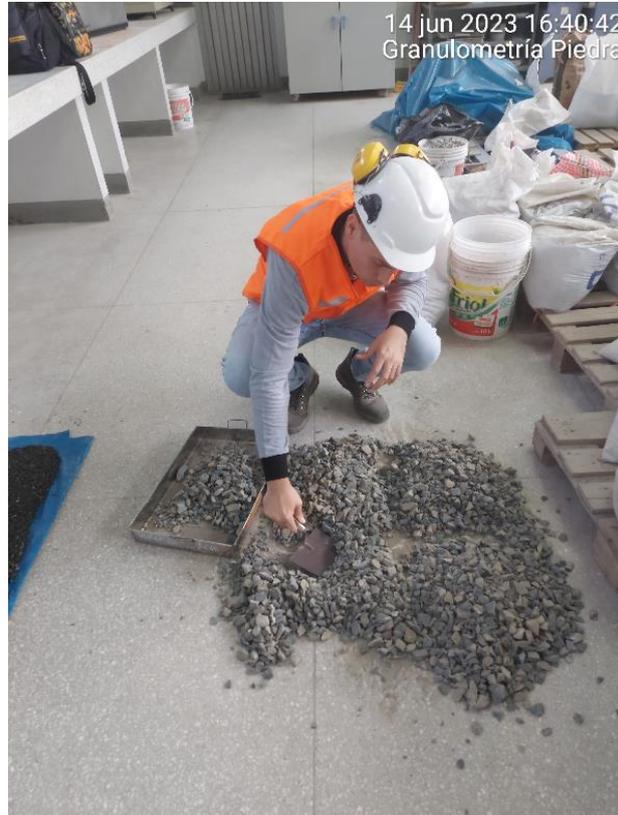
**ALMACENAMIENTO:**

- > Las bolsas con cemento deben ser almacenadas en recintos secos, protegidos de la intemperie, lluvia y humedad.
- > Las bolsas deben ser colocadas sobre parihuelas de madera seca, en áreas niveladas y estables. Posteriormente cubrirlas con mantas de plástico.
- > Apilar como máximo 10 bolsas de cemento y evitar tiempos prolongados de almacenamiento.

**Anexo 3: Lodo de Dióxido de Manganeso acuoso, extraído del ánodo del proceso electroquímico para la refinación del zinc.**



**Anexo 4: Granulometría del agregado grueso en el laboratorio LEM,  
Laboratorio de Ensayo de Materiales – FIC UNI.**



## Anexo 5: Granulometría del agregado fino en el laboratorio LEM.



## Anexo 6: Ensayo de resistencia a la compresión, UNI-LEM.



**Anexo 7: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 7 y 14 días, a/c =0.40.**

CEMENTO TIPO I, a/c=0.40, ADITIVO 1.2%, REDUCCION DE AGUA 10%																							
ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reduccion de agua)																							
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m³)	Peso Especifico (kg/m³)	Peso Especifico Prom. (kg/m³)	F'c (kg/cm2)	Diferencia con el Max Valor de F'c	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación	S	Coef. Variacion	F'c (MPa)	Diferencia con el Max Valor de F'c	F'c Prom. (MPa)	% Variación
CP-1	0%	6/07/2023	13/07/2023	10.19	10.07	20.28	20.30	3.89	46,186	0.00161	2409.0	2448.5	580.49	20.46	595.71	77.44		13.393	2.248	56.93	2.01	58.42	100%
				9.94		20.31														58.93	0.46		
CP-2	0%	6/07/2023	13/07/2023	10.08	10.12	20.05	20.09	3.97	48,338	0.00162	2456.7	2448.5	600.95	4.74	595.71	77.44		13.393	2.248	58.93	0.46	58.42	100%
				10.16		20.13														59.40	2.47		
CP-3	0%	6/07/2023	13/07/2023	10.05	10.12	20.10	20.13	4.01	48,671	0.00162	2479.6	2448.5	605.69	25.20	595.71	77.44		13.393	2.248	59.40	2.47	58.42	100%
				10.18		20.15														56.96	1.18		
NDMA-1	5%	7/07/2023	14/07/2023	9.92	9.91	20.42	20.43	3.85	44,800	0.00158	2443.8	2430.2	580.82	12.03	596.76	77.58	100%	18.204	3.051	56.96	1.18	58.52	100%
				9.90		20.43														58.14	2.33		
NDMA-2	5%	7/07/2023	14/07/2023	10.02	10.02	20.43	20.43	3.92	46,749	0.00161	2433.3	2430.2	592.85	23.74	596.76	77.58	100%	18.204	3.051	58.14	2.33	58.52	100%
				10.02		20.43														60.47	3.51		
NDMA-3	5%	7/07/2023	14/07/2023	9.94	9.95	20.43	20.43	3.83	47,896	0.00159	2413.4	2430.2	616.59	35.78	596.76	77.58	100%	18.204	3.051	60.47	3.51	58.52	100%
				9.95		20.43														62.05	6.27		
NDMA-4	10%	11/07/2023	18/07/2023	10.12	10.09	19.82	19.84	3.85	49,579	0.00159	2427.5	2426.5	620.05	6.27	622.40	80.91	104%	3.413	0.548	60.81	0.61	61.04	104%
				10.06		19.85														61.42	0.54		
NDMA-5	10%	11/07/2023	18/07/2023	10.09	10.13	20.74	20.77	4.04	50,428	0.00167	2415.8	2426.5	626.31	5.48	622.40	80.91	104%	3.413	0.548	61.42	0.54	61.04	104%
				10.16		20.80														60.88	0.08		
NDMA-6	10%	11/07/2023	18/07/2023	10.22	10.24	20.21	20.26	4.06	51,079	0.00167	2436.3	2426.5	620.84	0.79	622.40	80.91	104%	3.413	0.548	60.88	0.08	61.04	104%
				10.25		20.30																	
ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reduccion de agua)																							
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m³)	Peso Especifico (kg/m³)	Peso Especifico Prom. (kg/m³)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación	S	Coef. Variacion	F'c (MPa)	Diferencia de F'c (Mpa)	F'c Prom. (MPa)	% Variación
CP-1	0%	6/07/2023	20/07/2023	10.02	10.04	20.43	20.46	3.92	49,341	0.00162	2420.0	2418.1	623.23	10.12	621.55	80.80	104%	7.736	1.245	61.12	0.99	60.95	104%
				10.06		20.49														60.13	1.49		
CP-2	0%	6/07/2023	20/07/2023	10.03	10.06	20.48	20.49	3.95	48,733	0.00163	2425.9	2418.1	613.11	15.19	621.55	80.80	104%	7.736	1.245	60.13	1.49	60.95	104%
				10.09		20.49														61.62	0.50		
CP-3	0%	6/07/2023	20/07/2023	10.09	10.07	20.30	20.28	3.89	50,040	0.00162	2408.4	2418.1	628.30	5.07	621.55	80.80	104%	7.736	1.245	61.62	0.50	60.95	104%
				10.05		20.26														61.04	0.09		
NDMA-1	5%	7/07/2023	21/07/2023	10.03	10.04	20.40	20.42	3.86	49,280	0.00162	2387.7	2385.2	622.46	0.87	636.09	82.69	102%	22.853	3.593	61.04	0.09	62.38	102%
				10.05		20.44														61.13	3.84		
NDMA-2	5%	7/07/2023	21/07/2023	10.20	10.25	20.27	20.26	3.98	51,435	0.00167	2380.7	2385.2	623.33	39.14	636.09	82.69	102%	22.853	3.593	61.13	3.84	62.38	102%
				10.30		20.25														64.97	3.92		
NDMA-3	5%	7/07/2023	21/07/2023	10.03	10.03	20.47	20.49	3.86	52,291	0.00162	2387.2	2385.2	662.47	40.01	636.09	82.69	102%	22.853	3.593	64.97	3.92	62.38	102%
				10.02		20.50														62.20	3.13		
NDMA-4	10%	11/07/2023	25/07/2023	10.05	10.06	20.44	20.48	3.97	50,414	0.00163	2438.8	2431.0	634.26	31.95	664.45	86.38	107%	29.351	4.417	62.20	3.13	65.16	107%
				10.07		20.52														65.33	2.62		
NDMA-5	10%	11/07/2023	25/07/2023	10.18	10.16	20.69	20.70	4.08	53,958	0.00168	2434.1	2431.0	666.20	26.68	664.45	86.38	107%	29.351	4.417	65.33	2.62	65.16	107%
				10.13		20.70														67.95	5.75		
NDMA-6	10%	11/07/2023	25/07/2023	10.03	10.06	20.48	20.45	3.93	55,019	0.00162	2420.2	2431.0	692.88	58.62	664.45	86.38	107%	29.351	4.417	67.95	5.75	65.16	107%
				10.08		20.42																	

**Anexo 8: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 28 y 56 días, a/c=0.40.**

CEMENTO TIPO I, a/c=0.40, ADITIVO 1.2%, REDUCCION DE AGUA 10%																							
ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reduccion de agua)																							
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación	S	Coef. Variacion	F'c (MPa)	Diferencia de F'c (Mpa)	F'c Prom. (MPa)	% Variación
CP-1	0%	6/07/2023	3/08/2023	10.01	10.01	20.29	20.28	3.91	48,447	0.00159	2452.4	2445.1	616.23	27.51	646.68	84.07	104%	32.022	4.952	60.43	2.70	63.42	104%
				10.00		20.27							643.74	36.33						63.13	3.56		
CP-2	0%	6/07/2023	3/08/2023	9.99	10.00	20.50	20.53	3.99	50,509	0.00161	2477.0	2445.1	643.74	36.33	646.68	84.07	104%	32.022	4.952	63.13	3.56	63.42	104%
				10.00		20.56							680.07	63.84						66.69	6.26		
CP-3	0%	6/07/2023	3/08/2023	10.28	10.27	20.36	20.39	4.06	56,281	0.00169	2406.0	2445.1	680.07	63.84	646.68	84.07	104%	32.022	4.952	66.69	6.26	63.42	104%
				10.25		20.42							636.44	10.14						62.41	0.99		
NDMA-1	5%	7/07/2023	4/08/2023	10.23	10.25	20.40	20.43	4.00	52,465	0.00168	2375.7	2377.8	636.44	10.14	648.08	84.25	100%	12.456	1.922	62.41	0.99	63.55	100%
				10.26		20.45							646.57	14.64						63.41	1.44		
NDMA-2	5%	7/07/2023	4/08/2023	10.06	10.03	20.40	20.41	3.85	51,087	0.00161	2387.4	2377.8	646.57	14.64	648.08	84.25	100%	12.456	1.922	63.41	1.44	63.55	100%
				10.00		20.42							661.21	24.78						64.84	2.43		
NDMA-3	5%	7/07/2023	4/08/2023	10.20	10.23	20.25	20.28	3.95	54,348	0.00167	2370.3	2377.8	661.21	24.78	648.08	84.25	100%	12.456	1.922	64.84	2.43	63.55	100%
				10.26		20.30							709.84	30.97						69.61	3.04		
NDMA-4	10%	11/07/2023	8/07/2023	10.14	10.09	20.70	20.71	4.07	56,731	0.00166	2459.0	2459.4	709.84	30.97	724.37	94.17	112%	15.572	2.150	69.61	3.04	71.04	112%
				10.15		20.32							740.81	18.36						72.65	1.80		
NDMA-5	10%	11/07/2023	8/07/2023	10.17	10.16	20.32	20.32	4.05	60,060	0.00165	2458.4	2459.4	740.81	18.36	724.37	94.17	112%	15.572	2.150	72.65	1.80	71.04	112%
				10.00		20.51							722.45	12.61						70.85	1.24		
NDMA-6	10%	11/07/2023	8/07/2023	10.00	10.01	20.51	20.47	3.96	56,798	0.00161	2460.7	2459.4	722.45	12.61	724.37	94.17	112%	15.572	2.150	70.85	1.24	71.04	112%
				10.01		20.43							697.71	19.77						68.42	1.94		
ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 56 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reduccion de agua)																							
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación	S	Coef. Variacion	F'c (MPa)	Diferencia de F'c (Mpa)	F'c Prom. (MPa)	% Variación
CP-1	0%	6/07/2023	31/08/2023	9.98	9.98	20.48	20.49	3.93	54,606	0.00160	2451.0	2433.6	697.71	19.77	683.11	88.80	106%	12.812	1.876	68.42	1.94	66.99	106%
				9.99		20.50							677.94	4.24						66.48	0.42		
CP-2	0%	6/07/2023	31/08/2023	10.04	10.02	20.40	20.39	3.89	53,485	0.00161	2418.5	2433.6	677.94	4.24	683.11	88.80	106%	12.812	1.876	66.48	0.42	66.99	106%
				10.01		20.38							673.70	24.00						66.07	2.35		
CP-3	0%	6/07/2023	31/08/2023	10.20	10.20	20.05	20.07	3.99	55,077	0.00164	2431.5	2433.6	673.70	24.00	683.11	88.80	106%	12.812	1.876	66.07	2.35	66.99	106%
				10.21		20.10							716.05	29.60						70.22	2.90		
NDMA-1	5%	7/07/2023	1/09/2023	10.07	10.06	20.66	20.65	3.98	56,915	0.00164	2425.4	2414.6	716.05	29.60	701.80	91.23	103%	14.834	2.114	70.22	2.90	68.82	103%
				10.05		20.63							686.44	16.48						67.32	1.62		
NDMA-2	5%	7/07/2023	1/09/2023	10.17	10.17	20.22	20.22	3.95	55,789	0.00164	2403.9	2414.6	686.44	16.48	701.80	91.23	103%	14.834	2.114	67.32	1.62	68.82	103%
				10.18		20.22							702.92	13.12						68.93	1.29		
NDMA-3	5%	7/07/2023	1/09/2023	10.15	10.15	20.22	20.26	3.96	56,904	0.00164	2414.5	2414.6	702.92	13.12	701.80	91.23	103%	14.834	2.114	68.93	1.29	68.82	103%
				10.16		20.30							731.54	59.18						71.74	5.80		
NDMA-4	10%	11/07/2023	5/09/2023	10.02	10.01	20.49	20.49	3.98	57,599	0.00161	2467.6	2478.4	731.54	59.18	761.34	98.97	111%	29.592	3.887	71.74	5.80	74.66	111%
				10.01		20.48							790.72	28.97						77.54	2.84		
NDMA-5	10%	11/07/2023	5/09/2023	10.09	10.07	20.61	20.60	4.06	63,007	0.00164	2473.1	2478.4	790.72	28.97	761.34	98.97	111%	29.592	3.887	77.54	2.84	74.66	111%
				10.06		20.60							761.75	30.21						74.70	2.96		
NDMA-6	10%	11/07/2023	5/09/2023	10.14	10.12	20.32	20.35	4.08	61,242	0.00164	2494.4	2478.4	761.75	30.21	761.34	98.97	111%	29.592	3.887	74.70	2.96	74.66	111%
				10.10		20.37																	

**Anexo 9: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 7 y 14 días, a/c =0.45.**

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reduccion de agua)																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia con el Max Valor de F'c	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	24/07/2023	31/07/2023	10.12	10.11	20.53	20.57	4.05	42,127	0.00165	2453.2	2449.6	524.77	6.45	521.26	67.76	100%
				10.10		20.60											
CP-2	0%	24/07/2023	31/07/2023	10.02	10.02	20.26	20.27	3.89	40,872	0.00160	2434.3	2449.6	518.32	2.36	521.26	67.76	100%
				10.02		20.27											
CP-3	0%	24/07/2023	31/07/2023	10.01	10.00	20.33	20.33	3.93	40,894	0.00160	2461.3	2449.6	520.68	4.09	521.26	67.76	100%
				9.99		20.33											
NDMA-1	5%	4/08/2023	11/08/2023	10.01	10.02	20.51	20.48	3.85	39,976	0.00162	2382.5	2383.9	506.71	2.87	506.16	65.80	97%
				10.04		20.46											
NDMA-2	5%	4/08/2023	11/08/2023	10.03	10.05	20.43	20.43	3.86	39,928	0.00162	2384.7	2383.9	503.83	4.12	506.16	65.80	97%
				10.07		20.42											
NDMA-3	5%	4/08/2023	11/08/2023	10.03	10.03	20.44	20.45	3.85	40,114	0.00161	2384.5	2383.9	507.95	1.24	506.16	65.80	97%
				10.03		20.45											
NDMA-4	10%	8/08/2023	15/08/2023	10.15	10.15	20.68	20.67	4.01	37,249	0.00167	2397.6	2385.5	460.35	0.98	462.61	60.14	89%
				10.15		20.66											
NDMA-5	10%	8/08/2023	15/08/2023	10.11	10.10	20.54	20.54	3.88	36,925	0.00164	2360.1	2385.5	461.34	4.81	462.61	60.14	89%
				10.08		20.54											
NDMA-6	10%	8/08/2023	15/08/2023	10.02	10.02	20.49	20.48	3.87	36,721	0.00161	2398.8	2385.5	466.15	5.79	462.61	60.14	89%
				10.01		20.47											
ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reduccion de agua)																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	24/07/2023	7/08/2023	10.11	10.06	20.48	20.45	3.96	42,640	0.00162	2438.3	2426.7	536.99	18.36	529.24	68.80	102%
				10.00		20.43											
CP-2	0%	24/07/2023	7/08/2023	10.06	10.04	20.50	20.47	3.95	41,039	0.00162	2438.3	2426.7	518.62	13.49	529.24	68.80	102%
				10.02		20.45											
CP-3	0%	24/07/2023	7/08/2023	10.05	10.06	20.42	20.44	3.90	42,253	0.00162	2403.5	2426.7	532.11	4.88	529.24	68.80	102%
				10.06		20.45											
NDMA-1	5%	4/08/2023	18/08/2023	10.13	10.15	20.30	20.30	3.94	43,833	0.00164	2397.2	2403.9	541.46	14.36	539.23	70.10	102%
				10.18		20.31											
NDMA-2	5%	4/08/2023	18/08/2023	10.21	10.21	20.16	20.15	3.97	45,484	0.00165	2407.6	2403.9	555.81	35.39	539.23	70.10	102%
				10.21		20.14											
NDMA-3	5%	4/08/2023	18/08/2023	10.00	10.02	20.42	20.41	3.87	40,997	0.00161	2406.7	2403.9	520.43	21.03	539.23	70.10	102%
				10.03		20.41											
NDMA-4	10%	8/08/2023	22/08/2023	10.17	10.19	20.22	20.21	4.02	42,425	0.00165	2442.7	2431.6	520.73	12.02	507.40	65.96	96%
				10.20		20.20											
NDMA-5	10%	8/08/2023	22/08/2023	9.98	9.99	20.54	20.51	3.91	39,874	0.00161	2430.7	2431.6	508.71	15.94	507.40	65.96	96%
				10.00		20.49											
NDMA-6	10%	8/08/2023	22/08/2023	9.99	9.99	20.40	20.41	3.87	38,605	0.00160	2421.3	2431.6	492.77	27.96	507.40	65.96	96%
				9.99		20.42											

**Anexo 10: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 28 y 56 días, a/c =0.45.**

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reduccion de agua)																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	24/07/2023	21/08/2023	10.16	10.17	20.29	20.27	4.05	50,932	0.00165	2458.2	2458.5	626.99	0.29	628.63	81.72	119%
				10.18		20.26											
CP-2	0%	24/07/2023	21/08/2023	10.03	10.02	20.33	20.32	3.95	49,393	0.00160	2464.7	2458.5	626.70	5.52	628.63	81.72	119%
				10.01		20.32											
CP-3	0%	24/07/2023	21/08/2023	10.00	10.01	20.38	20.37	3.93	49,729	0.00160	2452.4	2458.5	632.22	5.23	628.63	81.72	119%
				10.02		20.37											
NDMA-1	5%	4/08/2023	1/09/2023	9.95	9.97	20.40	20.42	3.86	46,472	0.00159	2420.1	2419.5	594.97	37.63	582.50	75.73	93%
				10.00		20.44											
NDMA-2	5%	4/08/2023	1/09/2023	10.10	10.13	20.04	20.03	3.91	44,874	0.00161	2425.1	2419.5	557.33	37.87	582.50	75.73	93%
				10.15		20.01											
NDMA-3	5%	4/08/2023	1/09/2023	9.99	10.02	20.45	20.45	3.89	46,911	0.00161	2413.2	2419.5	595.20	0.24	582.50	75.73	93%
				10.05		20.46											
NDMA-4	10%	8/08/2023	5/09/2023	10.19	10.18	20.21	20.22	3.97	42,789	0.00164	2413.7	2423.2	525.97	18.12	533.47	69.35	85%
				10.17		20.23											
NDMA-5	10%	8/08/2023	5/09/2023	9.99	9.98	20.48	20.48	3.91	42,562	0.00160	2441.2	2423.2	544.09	13.75	533.47	69.35	85%
				9.97		20.47											
NDMA-6	10%	8/08/2023	5/09/2023	9.98	10.01	20.42	20.43	3.88	41,715	0.00161	2414.8	2423.2	530.34	4.37	533.47	69.35	85%
				10.04		20.44											
ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 56 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reduccion de agua)																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	25/07/2023	19/09/2023	10.25	10.22	20.10	20.11	4.06	56,565	0.00165	2462.3	2457.4	689.87	27.43	691.35	89.88	110%
				10.19		20.13											
CP-2	0%	25/07/2023	19/09/2023	10.00	10.02	20.40	20.41	3.96	56,562	0.00161	2460.5	2457.4	717.30	50.42	691.35	89.88	110%
				10.04		20.42											
CP-3	0%	25/07/2023	19/09/2023	10.15	10.14	20.44	20.42	4.04	53,880	0.00165	2449.4	2457.4	666.88	22.99	691.35	89.88	110%
				10.14		20.40											
NDMA-1	5%	4/08/2023	29/09/2023	9.93	9.94	20.37	20.37	3.87	48,622	0.00158	2448.9	2429.2	626.57	25.23	619.23	80.50	90%
				9.95		20.36											
NDMA-2	5%	4/08/2023	29/09/2023	10.08	10.08	20.62	20.62	3.99	47,940	0.00164	2427.2	2429.2	601.34	28.44	619.23	80.50	90%
				10.07		20.62											
NDMA-3	5%	4/08/2023	29/09/2023	10.10	10.12	20.08	20.08	3.89	50,607	0.00161	2411.4	2429.2	629.78	3.21	619.23	80.50	90%
				10.13		20.07											
NDMA-4	10%	8/08/2023	3/10/2023	10.10	10.07	20.55	20.57	3.97	46,435	0.00164	2424.8	2427.9	583.33	23.03	600.56	78.07	87%
				10.04		20.59											
NDMA-5	10%	8/08/2023	3/10/2023	10.00	10.02	20.54	20.57	3.93	47,766	0.00162	2425.3	2427.9	606.36	5.63	600.56	78.07	87%
				10.03		20.60											
NDMA-6	10%	8/08/2023	3/10/2023	10.13	10.13	20.68	20.65	4.05	49,323	0.00166	2433.5	2427.9	611.98	28.66	600.56	78.07	87%
				10.14		20.62											

**Anexo 11: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 7 y 14 días, a/c =0.50.**

ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia con el Max Valor de F'c	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	25/07/2023	1/08/2023	10.05	10.04	20.05	20.06	4.07	38,440	0.00159	2563.1	2595.7	485.49	8.61	501.14	65.15	100%
				10.03		20.06											
CP-2	0%	25/07/2023	1/08/2023	9.79	9.78	20.04	20.05	3.93	37,141	0.00151	2607.6	2595.7	494.11	29.71	501.14	65.15	100%
				9.78		20.06											
CP-3	0%	25/07/2023	1/08/2023	9.91	9.91	20.07	20.08	4.05	40,391	0.00155	2616.3	2595.7	523.82	38.32	501.14	65.15	100%
				9.91		20.08											
NDMA-1	5%	7/08/2023	14/08/2023	10.19	10.25	20.33	20.35	3.93	31,349	0.00168	2342.7	2363.0	380.29	9.28	393.75	51.19	79%
				10.30		20.37											
NDMA-2	5%	7/08/2023	14/08/2023	10.03	10.02	20.42	20.41	3.80	30,719	0.00161	2361.7	2363.0	389.57	21.84	393.75	51.19	79%
				10.01		20.39											
NDMA-3	5%	7/08/2023	14/08/2023	10.13	10.13	20.34	20.35	3.91	33,157	0.00164	2384.6	2363.0	411.40	31.12	393.75	51.19	79%
				10.13		20.35											
NDMA-4	10%	9/08/2023	16/08/2023	10.00	10.03	20.48	20.46	3.89	33,248	0.00161	2409.3	2410.8	421.22	8.03	425.48	55.31	85%
				10.05		20.43											
NDMA-5	10%	9/08/2023	16/08/2023	10.05	10.04	20.58	20.59	3.93	33,983	0.00163	2410.9	2410.8	429.24	3.27	425.48	55.31	85%
				10.03		20.60											
NDMA-6	10%	9/08/2023	16/08/2023	10.05	10.07	20.66	20.69	3.97	33,892	0.00165	2412.2	2410.8	425.97	4.75	425.48	55.31	85%
				10.08		20.71											
ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	25/07/2023	8/07/2023	10.12	10.13	20.30	20.28	4.06	44,496	0.00163	2484.6	2485.0	552.09	48.59	526.83	68.49	105%
				10.14		20.25											
CP-2	0%	25/07/2023	8/07/2023	10.15	10.17	20.38	20.38	4.11	40,901	0.00166	2483.2	2485.0	503.50	21.40	526.83	68.49	105%
				10.19		20.37											
CP-3	0%	25/07/2023	8/07/2023	10.11	10.12	20.32	20.30	4.06	42,221	0.00163	2487.1	2485.0	524.90	27.19	526.83	68.49	105%
				10.13		20.27											
NDMA-1	5%	7/08/2023	21/08/2023	10.18	10.18	20.28	20.29	3.94	37,299	0.00165	2387.8	2386.6	458.03	2.91	462.03	60.06	88%
				10.19		20.29											
NDMA-2	5%	7/08/2023	21/08/2023	10.15	10.16	20.64	20.64	3.99	37,352	0.00167	2386.8	2386.6	460.95	6.15	462.03	60.06	88%
				10.17		20.64											
NDMA-3	5%	7/08/2023	21/08/2023	10.03	10.02	20.50	20.47	3.85	36,796	0.00161	2385.3	2386.6	467.10	9.06	462.03	60.06	88%
				10.00		20.45											
NDMA-4	10%	9/08/2023	23/08/2023	10.02	10.02	20.52	20.53	3.90	36,968	0.00162	2411.9	2414.9	469.28	15.40	478.56	62.21	91%
				10.01		20.54											
NDMA-5	10%	9/08/2023	23/08/2023	10.00	10.00	20.67	20.64	3.89	38,029	0.00162	2400.0	2414.9	484.68	2.98	478.56	62.21	91%
				9.99		20.61											
NDMA-6	10%	9/08/2023	23/08/2023	9.95	9.98	20.52	20.55	3.91	37,644	0.00161	2432.9	2414.9	481.70	12.42	478.56	62.21	91%
				10.00		20.57											

**Anexo 12: Cuadro de resultados para ensayo de Compresión a 28 y 56 días, a/c =0.50.**

<b>ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)</b>																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	25/07/2023	22/08/2023	10.14	10.14	20.52	20.56	4.00	46,123	0.00166	2408.8	2424.0	571.43	8.56	570.25	74.13	108%
				10.14		20.60							562.88	13.56			
CP-2	0%	25/07/2023	22/08/2023	10.00	10.02	20.34	20.37	3.89	44,363	0.00161	2423.5	2424.0	562.88	13.56	570.25	74.13	108%
				10.04		20.40							576.43	5.00			
CP-3	0%	25/07/2023	22/08/2023	10.00	10.00	20.44	20.45	3.92	45,273	0.00161	2439.7	2424.0	576.43	5.00	570.25	74.13	108%
				10.00		20.45											
NDMA-1	5%	7/08/2023	4/09/2023	10.03	10.02	20.59	20.58	3.86	38,672	0.00162	2381.5	2386.3	490.91	5.95	489.00	63.57	86%
				10.01		20.57							484.97	6.16			
NDMA-2	5%	7/08/2023	4/09/2023	10.20	10.22	20.15	20.13	3.94	39,764	0.00165	2386.8	2386.3	484.97	6.16	489.00	63.57	86%
				10.24		20.12							491.13	0.22			
NDMA-3	5%	7/08/2023	4/09/2023	10.01	10.00	20.46	20.46	3.84	38,554	0.00161	2390.6	2437.4	491.13	0.22	492.46	64.02	86%
				9.99		20.47							511.44	13.28			
NDMA-4	10%	9/08/2023	6/09/2023	10.03	10.03	20.66	20.67	3.99	40,390	0.00163	2443.0	2437.4	511.44	13.28	492.46	64.02	86%
				10.03		20.67							498.16	30.40			
NDMA-5	10%	9/08/2023	6/09/2023	9.98	9.99	20.50	20.49	3.90	39,067	0.00161	2430.0	2437.4	498.16	30.40	492.46	64.02	86%
				10.01		20.47							467.77	43.68			
NDMA-6	10%	9/08/2023	6/09/2023	10.01	10.01	20.51	20.51	3.93	36,775	0.00161	2439.2	2437.4	467.77	43.68	492.46	64.02	86%
				10.00		20.52											
<b>ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 56 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)</b>																	
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	F'c (kg/cm2)	Diferencia de F'c (kg/cm2)	F'c Prom. (kg/cm2)	13% de F'c Prom. (kg/cm2)	% Variación
CP-1	0%	25/07/2023	19/09/2023	10.02	10.02	20.52	20.51	3.94	45,954	0.00162	2434.6	2435.3	582.48	33.49	591.77	76.93	104%
				10.03		20.51							615.97	39.12			
CP-2	0%	25/07/2023	19/09/2023	10.19	10.19	20.37	20.33	4.02	50,259	0.00166	2423.8	2435.3	615.97	39.12	591.77	76.93	104%
				10.20		20.29							576.85	5.63			
CP-3	0%	25/07/2023	19/09/2023	10.00	10.00	20.55	20.56	3.95	45,283	0.00161	2447.4	2435.3	576.85	5.63	591.77	76.93	104%
				10.00		20.57											
NDMA-1	5%	7/08/2023	2/10/2023	10.19	10.20	20.17	20.18	3.97	42,008	0.00165	2410.5	2437.4	514.60	25.86	507.12	65.93	86%
				10.20		20.18							488.74	29.28			
NDMA-2	5%	7/08/2023	2/10/2023	10.00	10.01	20.65	20.76	4.00	38,462	0.00163	2448.9	2437.4	488.74	29.28	507.12	65.93	86%
				10.02		20.86							518.01	3.42			
NDMA-3	5%	7/08/2023	2/10/2023	9.99	10.00	20.52	20.53	3.95	40,644	0.00161	2452.8	2437.4	518.01	3.42	507.12	65.93	86%
				10.00		20.53											
NDMA-4	10%	9/08/2023	4/10/2023	10.04	10.07	20.80	20.81	4.04	39,179	0.00166	2439.7	2422.8	492.42	31.04	512.57	66.63	87%
				10.09		20.83							523.46	1.64			
NDMA-5	10%	9/08/2023	4/10/2023	9.98	10.02	20.52	20.53	3.90	41,236	0.00162	2411.5	2422.8	523.46	1.64	512.57	66.63	87%
				10.05		20.54							521.82	29.40			
NDMA-6	10%	9/08/2023	4/10/2023	10.20	10.17	20.51	20.43	4.01	42,368	0.00166	2417.2	2422.8	521.82	29.40	512.57	66.63	87%
				10.14		20.36											

**Anexo 13: Cuadro de resultados para ensayo de Tracción a 28 días, a/c=0.40, 0.45 y 0.50.**

ENSAYO DE TRACCIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reducción de agua)												
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Longitud (cm)	Longitud Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo de Tracción (kg/cm2)	Diferencias	Esfuerzo de Tracción Prom. (kg/cm2)
CP-1	0%	13/07/2023	10/08/2023	15.37	15.26	30.30	30.30	13.52	18,250	25.12	0.77	24.74
				15.18		30.30						
				15.24		30.30						
CP-2	0%	13/07/2023	10/08/2023	15.03	15.15	30.20	30.20	13.56	17,500	24.35		24.74
				15.20		30.20						
				15.22		30.20						
NDMA-1	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.21	15.22	30.10	30.10	13.47	18,000	25.01		25.92
				15.24		30.10						
				15.22		30.10						
NDMA-2	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.18	15.16	30.20	30.20	13.56	19,300	26.84	1.83	25.92
				15.16		30.20						
				15.15		30.20						
NDMA-3	10%	11/07/2023	8/08/2023	15.05	15.07	30.10	30.10	13.52	21,700	30.46		31.91
				15.10		30.10						
				15.05		30.10						
NDMA-4	10%	11/07/2023	8/08/2023	15.20	15.18	30.30	30.30	13.42	24,100	33.36	2.89	31.91
				15.24		30.30						
				15.10		30.30						
ENSAYO DE TRACCIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reducción de agua)												
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Longitud (cm)	Longitud Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo de Tracción (kg/cm2)	Diferencias	Esfuerzo de Tracción Prom. (kg/cm2)
CP-1	0%	24/07/2023	21/08/2023	15.02	15.07	30.10	30.09	13.50	16,900	23.73	0.23	23.62
				15.08		30.08						
				15.10		30.10						
CP-2	0%	24/07/2023	21/08/2023	15.10	15.13	30.10	30.08	13.25	16,800	23.50		23.62
				15.17		30.05						
				15.11		30.10						
NDMA-1	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.32	15.32	30.10	30.10	13.27	16,500	22.77	-0.36	22.96
				15.30		30.10						
				15.35		30.10						
NDMA-2	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.32	15.29	30.30	30.23	13.26	16,800	23.14		22.96
				15.30		30.20						
				15.25		30.20						
NDMA-3	10%	8/08/2023	5/09/2023	15.36	15.27	30.20	30.17	13.29	10,800	14.93		15.06
				15.12		30.20						
				15.34		30.10						
NDMA-4	10%	8/08/2023	5/09/2023	15.35	15.31	30.00	30.10	13.36	11,000	15.20	0.28	15.06
				15.36		30.20						
				15.21		30.10						
ENSAYO DE TRACCIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)												
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Longitud (cm)	Longitud Prom. (cm)	Masa (kg)	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo de Tracción (kg/cm2)	Diferencias	Esfuerzo de Tracción Prom. (kg/cm2)
CP-1	0%	25/07/2023	22/08/2023	15.10	15.14	30.10	30.13	13.44	14,900	20.80	0.32	20.64
				15.15		30.20						
				15.16		30.10						
CP-3	0%	25/07/2023	22/08/2023	15.10	15.12	30.20	30.23	13.38	14,700	20.48		20.64
				15.15		30.30						
				15.10		30.20						
NDMA-1	5%	7/08/2023	4/09/2023	15.29	15.30	30.30	30.28	13.27	14,500	19.92	0.26	20.05
				15.31		30.25						
				15.31		30.30						
NDMA-2	5%	7/08/2023	4/09/2023	15.30	15.32	30.30	30.27	13.23	14,700	20.19		20.05
				15.34		30.20						
				15.31		30.30						
NDMA-3	10%	9/08/2023	6/09/2023	15.36	15.34	30.10	30.12	13.36	14,500	19.99	0.52	19.72
				15.32		30.15						
				15.33		30.10						
NDMA-6	10%	9/08/2023	6/09/2023	15.25	15.26	30.30	30.23	13.29	14,100	19.46		19.72
				15.39		30.20						
				15.13		30.20						

**Anexo 14: Cuadro de resultados para ensayo de Flexión a 28 días, a/c=0.40, 0.45 y 0.50.**

<b>ENSAYO DE FLEXIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reducción de agua)</b>														
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Ancho (cm)	Ancho Prom. (cm)	Alto (cm)	Alto Prom. (cm)	3 x Altura + 2%	Largo (cm)	Luz Libre (cm)	Carga Máxima (kgf)	Fractura dentro del tercio medio de la luz?	Esfuerzo de Flexión (kg/cm2)	Esfuerzo de Tracción Prom. (kg/cm2)
CP-1	0%	6/07/2023	3/08/2023	16.10	15.89	15.31	15.30	46.81	50.15	45.15	5,760	SI	69.94	69.18
				15.94		15.33								
				15.64		15.26								
CP-2	0%	6/07/2023	3/08/2023	15.33	15.32	15.07	15.06	46.08	50.10	45.10	5,270	SI	68.43	69.18
				15.32		15.04								
				15.30		15.08								
NDMA-1	5%	7/07/2023	4/08/2023	15.00	15.03	15.40	15.27	46.72	50.20	45.20	5,920	SI	76.37	76.47
				15.10		15.20								
				15.00		15.20								
NDMA-2	5%	7/07/2023	4/08/2023	15.00	15.17	15.30	15.37	47.02	50.10	45.10	6,080	SI	76.57	76.47
				15.20		15.40								
				15.30		15.40								
NDMA-3	10%	11/07/2023	8/08/2023	15.15	15.11	15.16	15.09	46.18	50.05	45.05	6,340	SI	83.02	84.08
				15.14		15.07								
				15.04		15.04								
NDMA-4	10%	11/07/2023	8/08/2023	15.15	15.24	15.05	15.07	46.11	50.05	45.05	6,540	SI	85.14	84.08
				15.22		15.07								
				15.34		15.09								
<b>ENSAYO DE FLEXIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reducción de agua)</b>														
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Ancho (cm)	Ancho Prom. (cm)	Alto (cm)	Alto Prom. (cm)	3 x Altura + 2%	Largo (cm)	Luz Libre (cm)	Carga Máxima (kgf)	Fractura dentro del tercio medio de la luz?	Esfuerzo de Flexión (kg/cm2)	Esfuerzo de Tracción Prom. (kg/cm2)
CP-1	0%	24/07/2023	21/08/2023	15.31	15.36	15.25	15.29	46.78	50.10	45.10	5,880	SI	73.87	72.43
				15.43		15.30								
				15.35		15.32								
CP-3	0%	24/07/2023	21/08/2023	15.26	15.27	15.30	15.31	46.84	50.20	45.20	5,620	SI	70.99	72.43
				15.25		15.24								
				15.32		15.39								
NDMA-1	5%	7/08/2023	4/09/2023	15.69	15.70	15.13	15.17	46.41	50.20	45.20	5,720	SI	71.60	69.11
				15.71		15.18								
				15.70		15.19								
NDMA-2	5%	7/08/2023	4/09/2023	15.38	15.39	15.43	15.48	47.38	50.00	45.00	5,460	SI	66.62	69.11
				15.40		15.49								
				15.38		15.53								
NDMA-3	10%	14/08/2023	11/09/2023	15.60	15.55	15.37	15.38	47.05	50.05	45.05	5,080	SI	62.28	61.06
				15.57		15.41								
				15.47		15.36								
NDMA-4	10%	14/08/2023	11/09/2023	15.10	15.15	15.34	15.36	46.99	50.10	45.10	4,740	SI	59.84	61.06
				15.12		15.29								
				15.24		15.44								
<b>ENSAYO DE FLEXIÓN A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)</b>														
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Ancho (cm)	Ancho Prom. (cm)	Alto (cm)	Alto Prom. (cm)	3 x Altura + 2%	Largo (cm)	Luz Libre (cm)	Carga Máxima (kgf)	Fractura dentro del tercio medio de la luz?	Esfuerzo de Flexión (kg/cm2)	Esfuerzo de Tracción Prom. (kg/cm2)
CP-1	0%	31/07/2023	28/08/2023	15.41	15.39	15.27	15.25	46.68	50.20	45.20	4,969	SI	62.75	65.12
				15.41		15.23								
				15.34		15.26								
CP-2	0%	31/07/2023	28/08/2023	15.29	15.32	15.50	15.56	47.60	50.10	45.10	5,550	SI	67.50	65.12
				15.33		15.52								
				15.35		15.65								
NDMA-1	5%	7/08/2023	4/09/2023	15.01	15.02	15.12	15.13	46.30	50.20	45.20	4,760	SI	62.58	63.63
				15.04		15.10								
				15.01		15.17								
NDMA-2	5%	7/08/2023	4/09/2023	15.08	15.08	15.22	15.16	46.39	50.20	45.20	4,960	SI	64.68	63.63
				15.07		15.08								
				15.10		15.19								
NDMA-3	10%	11/08/2023	8/09/2023	15.51	15.55	15.38	15.32	46.88	50.20	45.20	3,860	SI	47.81	50.55
				15.53		15.32								
				15.62		15.26								
NDMA-4	10%	11/08/2023	8/09/2023	15.03	15.07	15.28	15.24	46.63	50.05	45.05	4,140	SI	53.30	50.55
				15.08		15.22								
				15.11		15.23								

**Anexo 15: Cuadro de resultados para ensayo de Módulo de Elasticidad a 28 días, a/c=0.40, 0.45 y 0.50.**

ENSAYO DE MODULO DE ELASTICIDAD A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reduccion de agua)																					
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Area (cm2)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	F'c Prom. (kg/cm2)	Carga Maxima (kg)	Carga al 40% (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	S2 (efuerzo al 40 % de resistencia)	S1 (efuerzo inicial)	δ2 (Deformacion final al 40% de f'c)	δ1 (Deformacion inicial)	Modulo de Elasticidad (kg/cm2)	Modulo de Elasticidad Promedio
CP-1	0%	3/08/2023	31/08/2023	15.24	15.30	183.73	30.20	30.20	13.67	646.68	118,178.04	47,271.22	0.00555	2463.6	2476.6	258.67	10.88	0.00098	0.00005	266,649.00	264,032.00
				15.36			30.20														
CP-2	0%	3/08/2023	31/08/2023	15.09	15.21	181.76	29.90	29.90	13.53	646.68	118,178.04	47,271.22	0.00543	2489.6	2476.6	258.67	11.39	0.00100	0.00005	261,415.00	264,032.00
				15.34			29.90														
NDMA-1	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.36	15.37	185.60	30.50	30.50	13.56	648.08	118,477.63	47,391.05	0.00566	2395.4	2407.3	259.23	0.92	0.00106	0.00005	257,027.00	253,366.00
				15.39			30.50														
NDMA-2	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.10	15.14	180.03	30.20	30.20	13.56	648.08	118,477.63	47,391.05	0.00561	2419.2	2407.3	259.23	4.04	0.00107	0.00005	249,705.00	253,366.00
				15.18			30.20														
NDMA-3	10%	14/08/2023	11/09/2023	15.37	15.23	182.12	30.05	30.03	13.57	724.37	132,092.37	52,836.95	0.00547	2481.7	2480.9	289.75	13.75	0.00112	0.00005	257,556.00	259,680.50
				15.09			30.00														
NDMA-4	10%	14/08/2023	11/09/2023	15.32	15.25	182.59	30.10	30.08	13.62	724.37	132,092.37	52,836.95	0.00549	2480.2	2480.9	289.75	18.71	0.00109	0.00005	261,805.00	259,680.50
				15.18			30.05														
ENSAYO DE MODULO DE ELASTICIDAD A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reduccion de agua)																					
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Area (cm2)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	F'c Prom. (kg/cm2)	Carga Maxima (kg)	Carga al 40% (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	S2 (efuerzo al 40 % de resistencia)	S1 (efuerzo inicial)	δ2 (Deformacion final al 40% de f'c)	δ1 (Deformacion inicial)	Modulo de Elasticidad (kg/cm2)	Modulo de Elasticidad Promedio
CP-1	0%	3/08/2023	31/08/2023	15.32	15.35	185.00	30.20	30.20	13.43	628.63	115,936.28	46,374.51	0.00559	2403.8	2409.6	251.45	10.99	0.00106	0.00005	238,059.00	242,044.50
				15.38			30.20														
CP-2	0%	3/08/2023	31/08/2023	15.22	15.30	183.85	29.95	29.95	13.30	628.63	115,936.28	46,374.51	0.00551	2415.4	2409.6	251.45	7.19	0.00104	0.00005	246,030.00	242,044.50
				15.38			29.95														
NDMA-1	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.30	15.18	180.98	30.10	30.10	13.34	582.50	106,013.81	42,405.52	0.00545	2448.8	2429.5	233.00	4.46	0.00103	0.00005	234,381.00	227,723.50
				15.06			30.10														
NDMA-2	5%	4/08/2023	1/09/2023	15.16	15.27	183.01	30.10	30.10	13.13	582.50	106,013.81	42,405.52	0.00545	2410.3	2429.5	233.00	6.13	0.00108	0.00005	221,066.00	227,723.50
				15.37			30.10														
NDMA-3	10%	14/08/2023	11/09/2023	15.18	15.16	180.50	30.30	30.35	13.41	533.47	96,245.28	38,498.11	0.00548	2447.8	2454.6	213.39	10.92	0.00091	0.00005	234,563.00	237,718.50
				15.14			30.40														
NDMA-4	10%	14/08/2023	11/09/2023	15.14	15.15	180.33	30.10	30.10	13.36	533.47	96,245.28	38,498.11	0.00543	2461.4	2454.6	213.39	9.65	0.00090	0.00005	240,874.00	237,718.50
				15.17			30.10														
ENSAYO DE MODULO DE ELASTICIDAD A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reduccion de agua)																					
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Fecha de Ensayo	Diametro (cm)	Diametro Prom. (cm)	Area (cm2)	Altura (cm)	Altura Prom. (cm)	Masa (kg)	F'c Prom. (kg/cm2)	Carga Maxima (kg)	Carga al 40% (kg)	Volumen (m3)	Peso Especifico (kg/m3)	Peso Especifico Prom. (kg/m3)	S2 (efuerzo al 40 % de resistencia)	S1 (efuerzo inicial)	δ2 (Deformacion final al 40% de f'c)	δ1 (Deformacion inicial)	Modulo de Elasticidad (kg/cm2)	Modulo de Elasticidad Promedio
CP-1	0%	8/08/2023	5/09/2023	15.20	15.17	180.62	30.10	30.15	13.25	570.25	103,527.96	41,411.18	0.00545	2433.1	2428.2	228.10	8.97	0.00102	0.00005	226,669.00	225,818.00
				15.13			30.20														
CP-2	0%	8/08/2023	5/09/2023	15.28	15.24	182.47	30.10	30.10	13.31	570.25	103,527.96	41,411.18	0.00549	2423.3	2428.2	228.10	6.63	0.00103	0.00005	224,967.00	225,818.00
				15.21			30.10														
NDMA-1	5%	7/08/2023	4/09/2023	15.34	15.25	182.59	30.40	30.30	13.32	489.00	89,391.70	35,756.68	0.00555	2402.0	2409.2	195.60	11.04	0.00087	0.00005	224,618.00	224,618.00
				15.16			30.20														
NDMA-3	10%	11/08/2023	8/09/2023	15.05	15.16	180.56	30.00	30.05	13.21	492.46	89,493.89	35,797.55	0.00543	2434.6	2422.2	196.98	5.12	0.00097	0.00005	208,209.00	209,187.00
				15.28			30.10														
NDMA-4	10%	11/08/2023	8/09/2023	15.41	15.26	182.89	30.20	30.20	13.31	492.46	89,493.89	35,797.55	0.00552	2409.8	2422.2	196.98	5.18	0.00096	0.00005	210,165.00	209,187.00
				15.11			30.20														

**Anexo 16: Cuadro de resultados para ensayo de Porosidad a 28 y 56 días, a/c=0.40.**

ENSAYO DE POROSIDAD A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reducción de agua)										
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Peso luego de secado en horno (g)	Peso luego de sumergido en agua (g)	Peso luego de sumergido en agua hirviendo (g)	Peso luego de sumergido en canastilla (g)	Densidad Global (bruta) seca Mg/m3	Densidad Aparente Mg/m3	Volumen de Vacios (espacio de poros permeables) %	Volumen de Vacios Promedio (%)
CP-1	0%	3/08/2023	2105.40	2229.90	2234.90	1330.90	2.33	2.72	14.33%	14.22%
CP-2	0%	3/08/2023	2091.20	2213.70	2217.00	1322.90	2.34	2.72	14.07%	
CP-3	0%	3/08/2023	1948.10	2063.10	2067.20	1231.90	2.33	2.72	14.26%	
NDMA-1	5%	4/08/2023	2026.70	2155.20	2159.60	1270.00	2.28	2.68	14.94%	14.08%
NDMA-2	5%	4/08/2023	1946.50	2052.00	2056.30	1230.90	2.36	2.72	13.30%	
NDMA-3	5%	4/08/2023	2118.70	2241.70	2246.20	1336.00	2.33	2.71	14.01%	
NDMA-4	10%	14/08/2023	1928.20	2045.80	2049.40	1218.70	2.32	2.71	14.23%	14.06%
NDMA-5	10%	14/08/2023	2136.20	2261.50	2264.80	1349.60	2.33	2.72	14.05%	
NDMA-6	10%	14/08/2023	1947.20	2060.10	2062.90	1231.30	2.34	2.72	13.91%	
ENSAYO DE POROSIDAD A LOS 56 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.40, 1.2% aditivo, 10% reducción de agua)										
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Peso luego de secado en horno (g)	Peso luego de sumergido en agua (g)	Peso luego de sumergido en agua hirviendo (g)	Peso luego de sumergido en canastilla (g)	Densidad Global (bruta) seca Mg/m3	Densidad Aparente Mg/m3	Volumen de Vacios (espacio de poros permeables) %	Volumen de Vacios Promedio (%)
CP-1	0%	6/07/2023	873.10	921.90	923.40	547.30	2.32	2.68	13.37%	13.54%
CP-2	0%	6/07/2023	829.40	874.40	876.00	521.40	2.34	2.69	13.14%	
CP-3	0%	6/07/2023	808.00	853.80	855.50	507.50	2.32	2.69	13.65%	
CP-4	0%	6/07/2023	878.20	930.00	931.50	550.20	2.30	2.68	13.98%	
NDMA-1	5%	7/07/2023	881.90	930.60	932.50	549.60	2.30	2.65	13.21%	13.44%
NDMA-2	5%	7/07/2023	842.20	888.50	890.30	526.20	2.31	2.67	13.21%	
NDMA-3	5%	7/07/2023	857.30	907.50	909.50	533.50	2.28	2.65	13.88%	
NDMA-4	10%	11/07/2023	876.70	926.50	928.20	553.80	2.35	2.70	12.95%	13.33%
NDMA-5	10%	11/07/2023	863.40	914.00	915.40	545.20	2.34	2.70	13.32%	
NDMA-6	10%	11/07/2023	872.30	924.40	926.00	551.00	2.33	2.70	13.71%	

**Anexo 17: Cuadro de resultados para ensayo de Porosidad a 28 y 56 días, a/c=0.45.**

<b>ENSAYO DE POROSIDAD A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reducción de agua)</b>										
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Peso luego de secado en horno (g)	Peso luego de sumergido en agua (g)	Peso luego de sumergido en agua hirviendo (g)	Peso luego de sumergido en canastilla (g)	Densidad Global (bruta) seca Mg/m3	Densidad Aparente Mg/m3	Volumen de Vacios (espacio de poros permeables) %	Volumen de Vacios Promedio (%)
CP-1	0%	24/07/2023	883.60	934.50	935.90	553.80	2.31	2.68	13.69%	13.82%
CP-2	0%	24/07/2023	917.70	970.70	972.10	573.90	2.30	2.67	13.66%	
CP-3	0%	24/07/2023	867.90	918.60	920.60	546.80	2.32	2.70	14.10%	
NDMA-1	5%	4/08/2023	866.40	919.10	920.50	539.80	2.28	2.65	14.21%	14.10%
NDMA-2	5%	4/08/2023	857.20	908.30	909.90	530.60	2.26	2.62	13.89%	
NDMA-3	5%	4/08/2023	847.40	900.00	901.20	522.20	2.24	2.61	14.20%	
NDMA-4	10%	8/08/2023	854.90	909.30	910.70	536.80	2.29	2.69	14.92%	14.59%
NDMA-5	10%	8/08/2023	852.90	905.30	906.20	532.90	2.28	2.67	14.28%	
NDMA-6	10%	8/08/2023	855.10	908.30	909.60	535.20	2.28	2.67	14.56%	
<b>ENSAYO DE POROSIDAD A LOS 56 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.45, 1.1% aditivo, 10% reducción de agua)</b>										
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Peso luego de secado en horno (g)	Peso luego de sumergido en agua (g)	Peso luego de sumergido en agua hirviendo (g)	Peso luego de sumergido en canastilla (g)	Densidad Global (bruta) seca Mg/m3	Densidad Aparente Mg/m3	Volumen de Vacios (espacio de poros permeables) %	Volumen de Vacios Promedio (%)
CP-1	0%	25/07/2023	824.10	872.53	869.80	519.10	2.35	2.70	13.03%	13.15%
CP-2	0%	25/07/2023	899.20	949.52	948.80	565.90	2.35	2.70	12.95%	
CP-3	0%	25/07/2023	902.90	952.53	955.60	564.50	2.31	2.67	13.47%	
NDMA-1	5%	4/08/2023	837.20	886.40	888.20	518.10	2.26	2.62	13.78%	13.50%
NDMA-2	5%	4/08/2023	814.90	860.50	862.50	509.10	2.31	2.66	13.47%	
NDMA-3	5%	4/08/2023	831.40	877.10	878.90	520.20	2.32	2.67	13.24%	
NDMA-4	10%	8/08/2023	953.10	1009.10	1010.50	593.30	2.28	2.65	13.76%	13.85%
NDMA-5	10%	8/08/2023	929.80	983.20	984.20	583.90	2.32	2.69	13.59%	
NDMA-6	10%	8/08/2023	935.40	992.40	993.40	584.60	2.29	2.67	14.19%	

**Anexo 18: Cuadro de resultados para ensayo de Porosidad a 28 y 56 días, a/c=0.50.**

ENSAYO DE POROSIDAD A LOS 28 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)										
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Peso luego de secado en horno (g)	Peso luego de sumergido en agua (g)	Peso luego de sumergido en agua hirviendo (g)	Peso luego de sumergido en canastilla (g)	Densidad Global (bruta) seca Mg/m3	Densidad Aparente Mg/m3	Volumen de Vacios (espacio de poros permeables) %	Volumen de Vacios Promedio (%)
CP-1	0%	25/07/2023	873.90	925.40	926.90	549.30	2.31	2.69	14.0%	14.03%
CP-2	0%	25/07/2023	865.00	916.90	918.20	542.50	2.30	2.68	14.2%	
CP-3	0%	25/07/2023	881.20	932.20	933.90	554.40	2.32	2.70	13.9%	
NDMA-1	5%	7/08/2023	919.70	977.70	980.30	570.00	2.24	2.63	14.8%	14.93%
NDMA-2	5%	7/08/2023	889.80	945.50	947.40	552.90	2.26	2.64	14.6%	
NDMA-3	5%	7/08/2023	833.40	888.40	890.40	520.50	2.25	2.66	15.4%	
NDMA-4	10%	9/08/2023	833.80	889.10	891.50	524.80	2.27	2.70	15.7%	15.79%
NDMA-5	10%	9/08/2023	834.80	890.70	893.40	525.90	2.27	2.70	15.9%	
NDMA-6	10%	9/08/2023	854.00	909.10	912.70	538.60	2.28	2.71	15.7%	
ENSAYO DE POROSIDAD A LOS 56 DÍAS DE MUESTRAS PATRÓN VS MnO2 (a/c=0.50, 1.0% aditivo, 9% reducción de agua)										
# Muestra	% NDM	Fecha de Fabricación	Peso luego de secado en horno (g)	Peso luego de sumergido en agua (g)	Peso luego de sumergido en agua hirviendo (g)	Peso luego de sumergido en canastilla (g)	Densidad Global (bruta) seca Mg/m3	Densidad Aparente Mg/m3	Volumen de Vacios (espacio de poros permeables) %	Volumen de Vacios Promedio (%)
CP-1	0%	25/07/2023	1023.90	1087.90	1084.40	642.90	2.32	2.69	13.7%	13.35%
CP-2	0%	25/07/2023	809.20	862.12	852.10	514.00	2.39	2.74	12.7%	
CP-3	0%	25/07/2023	884.40	938.97	935.70	560.10	2.35	2.73	13.7%	
NDMA-1	5%	7/08/2023	889.50	945.10	946.30	555.00	2.27	2.66	14.5%	14.32%
NDMA-2	5%	7/08/2023	916.90	973.00	973.90	574.40	2.30	2.68	14.3%	
NDMA-3	5%	7/08/2023	902.70	958.40	959.40	559.60	2.26	2.63	14.2%	
NDMA-4	10%	9/08/2023	934.70	995.20	996.40	588.90	2.29	2.70	15.1%	15.18%
NDMA-5	10%	9/08/2023	935.80	997.00	997.90	589.60	2.29	2.70	15.2%	
NDMA-6	10%	9/08/2023	911.30	970.70	971.70	573.70	2.29	2.70	15.2%	

