

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Civil



TESIS

**Influencia de las nanopartículas de dióxido de manganeso en la
porosidad del concreto determinada con la técnica de
resistividad eléctrica**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

Elaborado por

Ricardo Enrique Gregorio Rojas Alvino

 [0009-0006-5731-5064](https://orcid.org/0009-0006-5731-5064)

Asesor

Dra. Ana Victoria Torre Carrillo

 [0000-0002-4531-4033](https://orcid.org/0000-0002-4531-4033)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Rojas Alvino [1]
Referencia/Reference	[1] R. Rojas Alvino, <i>"Influencia de las nanopartículas de dióxido de manganeso en la porosidad del concreto determinada con la técnica de resistividad eléctrica"</i> [Tesis de pregrado], Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Rojas, 2025)
Referencia/Reference	Rojas, R. (2025). <i>Influencia de las nanopartículas de dióxido de manganeso en la porosidad del concreto determinada con la técnica de resistividad eléctrica</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería], Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi madre: La mujer que ha sido mi fuerza silenciosa y mi refugio constante. A ti, que me enseñaste a resistir cuando todo parecía imposible, y a volar alto sin olvidar mis raíces. Esta tesis, y cada logro que he alcanzado en mi vida, lleva tu nombre grabado en lo más profundo. Porque fuiste guía, consuelo, inspiración... porque siempre estuviste, incluso cuando nadie más lo hacía. Porque tu amor incondicional fue el faro que me mantuvo firme aún en las tormentas. Nada de esto habría sido posible sin ti, y todo lo que soy te lo debo.

Esta meta también es tuya. Lo logramos. Te amo, mamá.

A mi padre, a mi hermana y a cada uno de mis seres queridos: Gracias por estar presentes con su apoyo inquebrantable, por creer en mí, y por caminar a mi lado en este trayecto lleno de desafíos y aprendizajes. Su amor, su fe en mí, y su compañía han sido pilares fundamentales en esta etapa. A ustedes, que con palabras, silencios, abrazos y presencia me sostuvieron cuando más lo necesitaba, les dedico con profundo agradecimiento este logro. Porque ningún paso lo di solo, y porque cada uno de ustedes vive también en estas páginas.

Esta tesis es tan mía como suya. Gracias, de corazón.

A mi abuela: A la luz que desde otro plano sigue guiando mis pasos y cuidando mi camino. Tu recuerdo habita en mí con fuerza, con ternura y con una presencia que trasciende el tiempo. Esta meta que hoy alcanzo lleva impresa tu esencia, esa que me impulsó a seguir adelante cuando más lo necesitaba.

Gracias por tu amor eterno, por tu ejemplo y por la inspiración silenciosa que fuiste. Sé que, desde donde estás, celebras conmigo este logro.

Esta tesis va dedicada a ti, con todo mi amor.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), por el constante respaldo a la investigación científica, y en especial al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (IIFIC) por el apoyo mediante el concurso de proyectos de investigación, el cual fue fundamental para el desarrollo de esta tesis.

Agradezco de manera especial a mi asesora, la Dra. Ana Torre Carrillo, por sus valiosas enseñanzas, su guía y sus acertadas recomendaciones durante todo el proceso de elaboración de este trabajo. Su experiencia y compromiso fueron clave para el desarrollo de esta investigación.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, mi sincero reconocimiento por brindarme una formación sólida en las diversas áreas de la ingeniería civil. De manera particular, agradezco a los responsables del Laboratorio de Ensayo de Materiales LEM-FIC, por su colaboración, apoyo técnico y disposición para el uso de los equipos e instalaciones durante la ejecución de esta tesis.

Del mismo modo, agradezco al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE - UNI) por permitirme el uso de sus instalaciones y equipos, los cuales fueron de gran utilidad para el desarrollo experimental de este trabajo.

No puedo dejar de agradecer a mis compañeros de laboratorio y amigos de investigación, por su apoyo incondicional, su compañía y su disposición para colaborar en todo momento. Su ayuda fue invaluable y su amistad, un gran soporte en este proceso.

Resumen

El concreto es un material fundamental en la construcción, cuya durabilidad está estrechamente ligada a su porosidad. Sin embargo, los métodos tradicionales para determinarla son invasivos y poco prácticos para el control en obra. En este contexto, la presente investigación desarrolla un modelo predictivo de porosidad a partir de la resistividad eléctrica, incorporando nanopartículas de dióxido de manganeso (NDMN) como aditivo para modificar la microestructura del concreto.

Se diseñaron mezclas con relaciones agua/cemento (a/c) de 0.40, 0.45 y 0.50, y porcentajes de reemplazo parcial de cemento por NDMN de 0%, 5% y 10%. Se evaluaron 930 datos experimentales de resistividad y porosidad durante 81 días, los cuales permitieron ajustar un modelo basado en la ecuación de Archie, alcanzando un coeficiente de determinación $R^2 > 0.90$.

Los resultados muestran que la adición de NDMN reduce la porosidad y eleva la resistividad, especialmente en mezclas con baja relación a/c. Los valores de resistividad oscilaron entre 3,500 y 10,700 $\Omega\text{-cm}$, mientras que la porosidad varió entre 7% y 15%. La combinación de a/c = 0.40 y 10% NDMN alcanzó simultáneamente la menor porosidad, la mayor resistividad y la mayor resistencia a compresión, evidenciando un desempeño superior en términos de durabilidad y densificación de la matriz cementicia.

Este estudio valida la resistividad eléctrica como una técnica no destructiva y confiable para estimar la porosidad del concreto, proponiendo una metodología innovadora para el diseño de mezclas orientadas a un desempeño optimizado

Palabras clave — Concreto, porosidad, resistividad eléctrica, nanopartículas de dióxido de manganeso anódico, durabilidad, modelo predictivo.

Abstract

Concrete is a fundamental material in construction, and its durability is strongly linked to its porosity. However, traditional methods to determine porosity are invasive and not practical for on-site quality control. In this context, the present research develops a predictive model of porosity based on electrical resistivity, incorporating manganese dioxide nanoparticles (NDMN) as an additive to modify the concrete microstructure.

Mixes were designed with water/cement ratios of 0.40, 0.45, and 0.50, and with partial replacement of cement by NDMN at 0%, 5%, and 10%. A total of 930 experimental data points of resistivity and porosity were evaluated during 81 days, allowing the adjustment of a model based on Archie's equation, which achieved a determination coefficient of $R^2 > 0.90$.

The results show that the addition of NDMN decreases porosity and increases resistivity, especially in mixes with low w/c ratios. Electrical resistivity values ranged from 3,500 to 10,700 Ω -cm, while porosity varied between 7% and 15%. The mix with w/c = 0.40 and 10% NDMN simultaneously reached the lowest porosity, the highest resistivity, and the best compressive strength, showing superior performance in terms of durability and microstructural densification.

This study validates electrical resistivity as a non-destructive and reliable technique to estimate concrete porosity, and proposes an innovative methodology for mix design oriented to optimized performance.

Keywords — Concrete, porosity, electrical resistivity, anodic manganese dioxide nanoparticles, durability, predictive model.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract.....	vi
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivos del estudio.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Antecedentes investigativos.....	4
1.5.1 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica.....	5
1.5.2 Incorporación de nanopartículas en el concreto y su impacto en la porosidad	6
1.5.3 Estudios normativos y metodológicos sobre la resistividad en el concreto	6
1.5.4 Brecha de conocimiento y aporte de esta investigación	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	8
2.1 Concreto	8
2.1.1 Componentes del concreto.....	8
2.1.2 Método de diseño de mezcla de concreto	15
2.1.3 Método de Bolomey	16
2.1.4 Propiedades del Concreto.....	17
2.2 Porosidad del Concreto.....	21
2.2.1 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica.....	24
2.2.2 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica del Concreto	25
2.2.3 Relación entre Resistencia y Porosidad	26

2.2.4 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica del Concreto	26
2.2.5 Modelos Matemáticos relacionados con la Porosidad y la Resistencia a la Compresión	27
2.3 Resistividad Eléctrica	31
2.3.1 Modelos Matemáticos relacionados con la Resistividad y la Porosidad	33
2.3.2 Relación frente a la microestructura	38
2.3.3 Relación frente a componentes del concreto	39
2.3.4 Aplicaciones de la Resistividad Eléctrica en la Evaluación de la Porosidad del Concreto	40
2.3.5 Modelos Matemáticos relacionados con la Resistividad Eléctrica y la Resistencia a la Compresión	41
Capítulo III. Caracterización de los materiales componentes del concreto con dióxido de manganeso	44
3.1 Concreto	44
3.2 Agua	45
3.3 Aditivo	46
3.3.1 Características	46
3.3.2 Dosificación	47
3.3.3 Propiedades Físicas	47
3.3.4 Consideraciones de seguridad y protección a la salud	47
3.4 Agregados	48
3.4.1 Propiedades Físicas	48
3.4.2 Granulometría del agregado fino	48
3.4.3 Granulometría del agregado grueso	51
3.5 Nanopartículas de Dióxido de Manganeso	54
3.5.1 Acondicionamiento de las NDMN	55
3.5.2 Determinación de la densidad de las NDMN	56
Capítulo IV. Diseño de mezclas para concreto con nanopartículas de manganeso con relaciones a/c 0.4, 0.45 y 0.5	59

4.1	Método de Bolomey	59
Capítulo V. Medición de la resistividad eléctrica, la porosidad y otras propiedades del concreto		72
5.1	Medición de la Resistividad Eléctrica	72
5.2	Medición de la Porosidad	80
5.3	Medición de la Resistencia a la Compresión	84
Capítulo VI. Análisis de resultados.....		86
6.1	Resistividad Eléctrica	86
6.2	Porosidad.....	96
6.3	Resistencia a la compresión.....	103
6.4	Correlaciones	112
6.4.1	Correlación entre porosidad y resistencia a la compresión.....	113
6.4.2	Correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión	118
6.4.3	Correlación entre resistividad eléctrica y porosidad.....	124
6.5	Modelo de predicción de la porosidad mediante la resistividad eléctrica	125
6.5.1	Propuesta de metodología de diseño del concreto para alcanzar un determinado valor de porosidad	138
Conclusiones		141
Recomendaciones		143
Referencias bibliográficas		145
Anexos.....		150

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Límites químicos para el agua de mezcla.....	9
Tabla 2: Comparación entre Método Directo y Método de Wenner	37
Tabla 3: Tabla de propiedades físicas y químicas del cemento Sol.....	45
Tabla 4: Límites permisibles del agua de mezcla	45
Tabla 5: Propiedades físicas del agregado fino y del agregado grueso.....	48
Tabla 6: Requisitos de gradación del agregado fino (ASTM C33)	50
Tabla 7: Tabla de Análisis granulométrico del agregado fino	50
Tabla 8: Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso o global.....	52
Tabla 9: Cuadro de Análisis granulométrico del agregado grueso.....	53
Tabla 10: Datos recopilados en el ensayo del picnómetro	57
Tabla 11: Densidad de las NDMN.....	58
Tabla 12: Contenido de aire atrapado según su TMN	60
Tabla 13: Volumen Unitario de Agua diseño para 1 m ³ de concreto (l)	60
Tabla 14: Relación a/c por resistencia	62
Tabla 15: Interpolación de f'c para una relación a/c=0.4	62
Tabla 16: Valores de coeficiente de A de la curva de Bolomey	64
Tabla 17: Granulometría de Bolomey correspondiente al TMN ½"	64
Tabla 18: Módulo de fineza de la curva de Bolomey MFB2 para un TMN de ½"	66
Tabla 19: Proporcionamiento de los agregados por el Método de Módulo de Fineza de Bolomey Diseño de mezcla para relación a/c = 0.4	67
Tabla 20: Ajuste por humedad diseño a/c=0.40	69
Tabla 21: Dosificación con Adición de NDMA a/c=0.40.....	70
Tabla 22: Dosificación con Adición de NDMA a/c=0.45.....	70
Tabla 23: Dosificación con Adición de NDMA a/c=0.50.....	71
Tabla 24: Dosificaciones de las mezclas de concreto para 1 m ³ de concreto	71

Tabla 25: Valores de Resistividad Eléctrica (ohm-cm) para una relación a/c=0.4	77
Tabla 26: Valores de Resistividad Eléctrica (ohm-cm) para una relación a/c=0.45 ..	78
Tabla 27: Valores de Resistividad Eléctrica (ohm-cm) para una relación a/c=0.5	79
Tabla 28: Mediciones de Porosidad (% de vacíos) vs a/c con distinto %NDMN, medida a los 14, 28 y 56 días	84
Tabla 29: Valores de Resistencia a la Compresión para una relación a/c = 0.4, medidos a los 7, 14, 28, 56 y 90 días.....	85
Tabla 30: Valores de Resistencia a la Compresión para una relación a/c = 0.45, medidos a los 7, 14, 28, 56 y 90 días.....	85
Tabla 31: Valores de Resistencia a la Compresión para una relación a/c = 0.5, medidos a los 7, 14, 28, 56 y 90 días.....	85
Tabla 32: Valores de resistencia a la compresión, porosidad y resistividad eléctrica para los mismos diseños de mezcla, con valores iguales de a/c, % de NDMN y edad	112
Tabla 33: Parámetros de los modelos ajustados en la correlación entre porosidad y resistencia a la compresión.....	114
Tabla 34: Comparación de Modelos de Correlación Porosidad-Resistencia en Concreto con NDMN	115
Tabla 35: Comparación de los valores reales de f'_c con los calculados mediante el modelo híbrido (Zheng y Zhou Balshin Modificado).....	116
Tabla 36: Parámetros de los modelos ajustados en la correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión	121
Tabla 37: Comparación de Modelos de Correlación Resistividad Eléctrica - Resistencia a la Compresión en Concreto con NDMN	121
Tabla 38: Comparación de los valores reales de f'_c con los calculados mediante el modelo de Regresión Múltiple Lineal.....	122
Tabla 39: Logaritmos de resistividad eléctrica y porosidad, para valores iguales de a/c, %NDMN y edad.....	128
Tabla 40: Cuadro comparativo entre la porosidad experimental y la porosidad calculada	131

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Parámetros utilizados en la definición de la Resistividad Eléctrica	32
Figura 2: Método de Wenner.....	34
Figura 3: Método Directo.....	36
Figura 4: Cemento Portland Tipo I – Sol	44
Figura 5: Tamices colocados en tamizador eléctrico UNI-LEM	49
Figura 6: Partículas de AF retenidas en los tamices UNI-LEM	49
Figura 7: Muestra colocada en el equipo tamizador UNI-LEM.....	52
Figura 8: Muestra lodosa inicial de NDMN.	56
Figura 9: Muestra final de NDMN, lista para ser utilizada en la mezcla.	56
Figura 10: Muestra de NDMA en fiola	57
Figura 11: Equipos utilizados para medir la resistencia eléctrica de las probetas de concreto (etapa de pruebas)	73
Figura 12: Portable Wheatstone bridge type 2755	74
Figura 13: Probetas de concreto en la poza de curado	75
Figura 14: Montaje del espécimen para la medición de resistividad eléctrica	76
Figura 15: Muestra de concreto hirviendo	83
Figura 16: Muestra de concreto sumergida en agua	83

Lista de Gráficos

	Pág.
Gráfico 1: Curva granulométrica del agregado fino	51
Gráfico 2: Curva granulométrica del agregado grueso	54
Gráfico 3: Resistividad eléctrica con relación $a/c=0.4$ vs #días	86
Gráfico 4: Resistividad eléctrica con relación $a/c=0.45$ vs #días	88
Gráfico 5: Resistividad eléctrica con relación $a/c=0.5$ vs #días	90
Gráfico 6: Resistividad eléctrica con relación $a/c=0.4$; 0.45 y 0.5 vs #día.....	92
Gráfico 7: Valores de Resistividad Eléctrica en edades representativas (7, 14, 28 y 56 días) para distintas combinaciones de relación ($a/c = 0.4$, 0.45 y 0.5) y porcentajes de reemplazo de cemento por NDMN en 0%, 5% y 10%.	94
Gráfico 8: Valores de porosidad vs edad, para una relación $a/c = 0.4$	97
Gráfico 9: Valores de porosidad vs edad, para una relación $a/c = 0.45$	98
Gráfico 10: Valores de porosidad vs edad, para una relación $a/c = 0.5$	100
Gráfico 11: Valores de porosidad a los 28 días para relaciones $a/c = 0.4$, 0.45 y 0.5	101
Gráfico 12: Valores de resistencia a la compresión vs # días, para una relación $a/c = 0.4$	103
Gráfico 13: Valores de resistencia a la compresión vs # días, para una relación $a/c = 0.45$	105
Gráfico 14: Valores de resistencia a la compresión vs # días, para una relación $a/c = 0.5$	107
Gráfico 15: Valores de resistencia a la compresión a los 28 días, para relaciones $a/c = 0.4$, 0.45 y 0.5	109
Gráfico 16: Correlación entre porosidad y resistencia a la compresión, para todos los diseños de mezcla	113
Gráfico 17: Comparación entre valores de f'_c real y f'_c calculada por el modelo híbrido, para las mismas condiciones de a/c , %NDMN y edad.....	117
Gráfico 18: Correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión, para todos los diseños de mezcla	118
Gráfico 19: Comparación entre valores de f'_c real y f'_c calculada por el modelo de Regresión Múltiple, para las mismas condiciones de a/c , %NDMN y edad.	123

Gráfico 20: Correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión, para todos los diseños de mezcla	125
Gráfico 21: Gráficas de residuos para Resistividad Eléctrica	126
Gráfico 22: Regresión lineal entre $\log(\rho)$ y $\log(\Phi)$ y su respectivo análisis de varianza	129
Gráfico 23: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.4$ y 0% de DNMN.....	133
Gráfico 24: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.4$ y 5% de DNMN.....	133
Gráfico 25: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.4$ y 10% de DNMN.....	134
Gráfico 26: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.45$ y 0% de DNMN.....	134
Gráfico 27: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.45$ y 5% de DNMN.....	135
Gráfico 28: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.45$ y 10% de DNMN.....	135
Gráfico 29: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.5$ y 0% de DNMN.....	136
Gráfico 30: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.5$ y 5% de DNMN.....	136
Gráfico 31: Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.5$ y 10% de DNMN.....	137

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades

El concreto es el material constructivo más utilizado a nivel mundial, gracias a su disponibilidad, bajo costo y desempeño estructural (Neville, 2011). Sin embargo, su durabilidad y comportamiento a largo plazo dependen en gran medida de su microestructura interna, especialmente de su porosidad. Esta última tiene una influencia directa sobre propiedades fundamentales como la permeabilidad, la resistencia frente a agentes agresivos y la tasa de deterioro en entornos hostiles (Mehta & Monteiro, 2014).

La porosidad del concreto no es un atributo constante; varía en función de diversos factores del diseño de mezcla, como la relación agua/cemento (a/c), la calidad de los materiales, el tipo de aditivos y las condiciones de curado (Scrivener et al., 2015). Todos estos factores determinan el grado de compactación y densidad de la matriz cementicia, lo que a su vez afecta la capacidad del concreto para resistir la penetración de fluidos y sustancias agresivas.

En años recientes, el desarrollo de la nanotecnología ha permitido la incorporación de materiales en escala nanométrica dentro de matrices cementicias, generando importantes avances en términos de densificación microestructural. Las nanopartículas, al actuar como núcleos de nucleación, aceleran la hidratación y mejoran la distribución de los productos de reacción, contribuyendo así a una matriz más compacta y con menor porosidad capilar (Li et al., 2018).

Entre las diversas nanopartículas estudiadas, el dióxido de manganeso (MnO_2) ha mostrado propiedades interesantes. Estudios como el de Rostami et al. (2019) evidencian que su inclusión en el concreto puede aumentar la resistividad eléctrica, reducir la porosidad y alterar positivamente la evolución de la microestructura durante el curado. Si bien su manipulación en seco requiere precaución por posibles efectos tóxicos, la incorporación en estado húmedo y su encapsulamiento en la matriz cementicia mitigan considerablemente estos riesgos (Zhang et al., 2020).

Tradicionalmente, la porosidad se ha evaluado mediante métodos directos como la absorción de agua o la porosimetría por intrusión de mercurio (ASTM C642-21). Si bien estos métodos ofrecen precisión, su carácter destructivo y su complejidad limitan su aplicabilidad en estudios de campo o en evaluaciones continuas.

Frente a ello, la resistividad eléctrica ha emergido como una alternativa no destructiva, capaz de proporcionar información indirecta sobre la microestructura del concreto. Esta técnica evalúa la oposición del material al paso de corriente eléctrica, la cual depende de la conectividad de los poros, su saturación y el contenido iónico en la solución intersticial (Ghosh & Tran, 2015; Snyder et al., 2003).

La presente investigación se enmarca en esta línea de estudio, analizando cómo influye el reemplazo parcial de cemento por nanopartículas de MnO_2 en la porosidad del concreto, utilizando la resistividad eléctrica como herramienta de evaluación. Para ello, se diseñaron mezclas con diferentes relaciones a/c (0.40, 0.45 y 0.50) y porcentajes de adición, con el propósito de establecer correlaciones útiles para aplicaciones en control de calidad, durabilidad y diseño de mezclas innovadoras.

1.2 Descripción del problema de investigación

En el ámbito de la ingeniería civil, la durabilidad del concreto sigue siendo uno de los mayores desafíos, particularmente en estructuras expuestas a entornos agresivos. La microestructura del concreto, y en especial su porosidad, desempeña un rol determinante en el transporte de agentes externos, en la progresión de los mecanismos de deterioro y en la vida útil de las estructuras (Mehta & Monteiro, 2014).

Si bien se dispone de métodos como la porosimetría por mercurio, la absorción de agua y la microscopía electrónica para determinar la porosidad del concreto, su carácter invasivo, alto costo y requerimientos técnicos complejos dificultan su implementación en evaluaciones prácticas o de campo (ASTM C642-21, 2021). Por este motivo, se ha incrementado el interés por técnicas indirectas que permitan estimar la porosidad de manera rápida y confiable.

En este contexto, la resistividad eléctrica se ha posicionado como una herramienta valiosa para la caracterización indirecta del concreto endurecido. Diversos estudios han demostrado la existencia de una correlación entre la resistividad eléctrica y parámetros como la porosidad, permeabilidad y saturación (Snyder et al., 2003; Ghosh & Tran, 2015). Su naturaleza no destructiva, simplicidad y rapidez la hacen especialmente atractiva para estudios a gran escala y sistemas de monitoreo en tiempo real.

Por otro lado, la nanotecnología ha brindado nuevas herramientas para modificar la microestructura del concreto. En particular, las nanopartículas de dióxido de manganeso (MnO_2) han mostrado efectos positivos sobre la densificación de la matriz cementicia y el aumento de la resistividad eléctrica, al promover una hidratación más eficiente y una reducción del volumen de poros interconectados (Rostami et al., 2019). No obstante, la relación cuantitativa entre la presencia de estas nanopartículas y la porosidad del concreto aún no ha sido completamente esclarecida.

Así, se identifica una necesidad concreta: evaluar cómo la incorporación de MnO_2 en estado nanoparticulado afecta la porosidad del concreto, y si la resistividad eléctrica puede ser utilizada como una técnica confiable para su estimación.

Por lo tanto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo influyen las nanopartículas de dióxido de manganeso en la porosidad del concreto y cuál es su relación con la resistividad eléctrica?

Responder esta interrogante permitirá contribuir al conocimiento sobre el impacto de las nanopartículas de (MnO_2) en la microestructura del concreto y validar la resistividad eléctrica como una técnica efectiva para la estimación de la porosidad, proporcionando así una alternativa innovadora para la evaluación de la durabilidad del material en diversas aplicaciones constructivas.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de las nanopartículas de dióxido de manganeso en la porosidad del concreto determinada con la técnica de la resistividad eléctrica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales componentes del concreto.
- Determinar la resistividad eléctrica y la porosidad del concreto con nanopartículas de dióxido de manganeso.
- Correlacionar la resistividad eléctrica con la porosidad y otras propiedades del concreto con nanopartículas de dióxido de manganeso.

1.4 Hipótesis

Las nanopartículas de dióxido de manganeso influirán en el concreto, reduciendo su porosidad, la misma que será determinada con la técnica de resistividad eléctrica.

1.5 Antecedentes investigativos

El concreto es un material compuesto cuya durabilidad y desempeño estructural están influenciados por su microestructura, en particular por la porosidad. En las últimas décadas, diversos estudios han explorado métodos alternativos y menos invasivos para evaluar la porosidad del concreto, así como la influencia de materiales novedosos, como las nanopartículas, en su comportamiento mecánico y durabilidad. Por ejemplo, Snyder et al. (2003) propusieron la resistividad eléctrica como un método viable y no destructivo para inferir características de porosidad y durabilidad del concreto, observando una correlación significativa con la conectividad de poros y la permeabilidad a iones. Del mismo modo, Ghosh y Tran (2015) demostraron que la resistividad eléctrica superficial puede emplearse para estimar indirectamente la porosidad, particularmente en concretos modificados con materiales cementantes suplementarios.

Además, Rajabipour et al. (2015) analizaron la viabilidad de usar la espectroscopía de impedancia electroquímica como herramienta para caracterizar la red porosa y la

resistencia iónica del concreto. Estas técnicas permiten realizar evaluaciones más rápidas, sin dañar la muestra, y con potencial para ser implementadas en estructuras existentes.

Por otro lado, estudios recientes también exploran el uso de la tomografía de impedancia eléctrica (EIT) y otras metodologías basadas en sensores embebidos, lo que marca una tendencia hacia la digitalización y el monitoreo continuo del concreto in situ (Sadowski, 2010; Wang et al., 2021).

Esta evolución hacia técnicas no invasivas justifica la pertinencia de utilizar la resistividad eléctrica como herramienta de evaluación en el presente trabajo, especialmente al buscar relacionarla con la porosidad del concreto modificado con nanopartículas.

1.5.1 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica

Evaluar La resistividad eléctrica ha sido identificada como una propiedad clave para evaluar la durabilidad del concreto, ya que está directamente relacionada con su microestructura y contenido de humedad (Ghosh & Tran, 2015). Investigaciones previas han establecido que existe una correlación inversa entre la resistividad y la porosidad, debido a que una mayor porosidad facilita la conductividad iónica dentro del material (Snyder K. A., et al., 2003).

Uno de los estudios más relevantes en este ámbito es el de (Hornbostel et al., 2013), quienes analizaron la relación entre la resistividad eléctrica y la permeabilidad del concreto, concluyendo que la resistividad es un indicador confiable para estimar la porosidad conectada y la facilidad de ingreso de agentes agresivos. Su investigación ha servido de base para el desarrollo de métodos no destructivos de evaluación de la durabilidad del concreto.

Otro trabajo significativo es el de (Martys & Ferraris, 2001), donde se empleó modelado computacional para correlacionar la resistividad con la estructura porosa del concreto. Este estudio permitió validar la aplicación de la resistividad como una herramienta para predecir la vida útil de estructuras en ambientes agresivos.

1.5.2 Incorporación de nanopartículas en el concreto y su impacto en la porosidad

El uso de nanopartículas en el concreto ha despertado un gran interés en la comunidad científica debido a su capacidad para modificar la hidratación del cemento y mejorar propiedades mecánicas y de durabilidad (Senff L. et al., 2009). Dentro de estos estudios, se ha observado que la adición de nanopartículas puede reducir la porosidad del concreto al densificar la matriz cementicia y mejorar la adherencia en la zona de transición entre la pasta y los agregados (Li et al., 2006).

En el caso específico del dióxido de manganeso (MnO_2), las investigaciones han sido más limitadas, pero algunos estudios han demostrado su potencial como aditivo cementicio. Por ejemplo, Rostami, et al. (2019) analizaron el efecto del (MnO_2) en la hidratación del cemento y concluyeron que su incorporación en pequeñas dosis puede mejorar la resistencia mecánica y reducir la absorción de agua, lo que sugiere una disminución de la porosidad total del sistema.

Además, Gaitero et al., (2008) exploraron el uso de nanopartículas (nano- SiO_2) en cementos con el objetivo de mejorar la compactación de la pasta. Sus hallazgos indicaron que el refinamiento de la estructura porosa gracias a la nanotecnología no solo mejora la resistencia a compresión, sino que también incrementa la resistividad eléctrica, lo que refuerza la hipótesis de que estos materiales pueden optimizarse para aplicaciones en estructuras durables.

1.5.3 Estudios normativos y metodológicos sobre la resistividad en el concreto

El uso de la resistividad eléctrica como herramienta de evaluación ha sido incorporado en diversas normativas internacionales. Por ejemplo, la ASTM C1760-12 establece procedimientos para la medición de la resistividad de superficies de concreto, mientras que la NTC 5377 en Colombia y la NTP 400.037 en Perú han comenzado a incluir métodos de resistividad para evaluar la calidad de mezclas cementicias en términos de durabilidad.

En estudios experimentales, Sarkar, et al., (2010) aplicaron mediciones de resistividad para estimar la conectividad de poros en concretos con distintas proporciones

de cenizas volantes y nano-aditivos, demostrando que esta técnica puede emplearse para predecir el desempeño del material a largo plazo.

1.5.4 Brecha de conocimiento y aporte de esta investigación

A pesar de los avances en la correlación entre resistividad y porosidad, así como en la aplicación de nanopartículas en el concreto, aún no existen suficientes estudios que analicen específicamente el impacto del dióxido de manganeso (MnO_2) en la resistividad y porosidad del concreto. Esta investigación busca llenar ese vacío, proporcionando una evaluación detallada de cómo la incorporación de NDMN en diferentes relaciones a/c afecta la microestructura del concreto y cómo estas modificaciones pueden ser detectadas mediante mediciones de resistividad eléctrica.

Los resultados de este estudio no solo contribuirán al conocimiento sobre la interacción entre nanopartículas y la porosidad del concreto, sino que también permitirán validar la resistividad eléctrica como un método confiable y no destructivo para la estimación de la porosidad, facilitando así el control de calidad y la predicción de la durabilidad en estructuras de concreto.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Concreto

“El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementosos (cementantes) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta” (Kosmatka et al., 2004, pág. 1).

2.1.1 Componentes del concreto

2.1.1.1 Cemento Portland. El cemento Portland es un aglomerante hidráulico obtenido a partir de la mezcla de caliza y arcilla que se calcina a altas temperaturas y se muele finamente. Es el componente que proporciona la resistencia al concreto y le permite endurecerse mediante una reacción química conocida como hidratación. El cemento Portland es esencial para unir los demás componentes y darle cohesión al concreto.

2.1.1.2 Cemento Portland Tipo I. “El cemento tipo I es un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado” (Kosmatka et al., 2004, pág. 30).

2.1.1.3 Agua. Elemento líquido crucial que inicia la reacción química en el concreto, y permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante, hidratar el cemento y dar manejabilidad al concreto.

Se puede utilizar prácticamente cualquier agua, y en general, el agua potable, sin embargo, para cualquier otra, natural o no, en la NTP 339.088 se mencionan los límites permisibles de las sustancias contenidas perjudiciales para su uso en mezclas de concreto.

Tabla 1*Límites químicos para el agua de mezcla.*

CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN EL AGUA	LÍMITE	MÉTODO DE ENSAYO
A. Cloruro como Cl, ppm		
1. En Concreto pretensado, tableros de puentes o designados de otra manera.	500	NTP 334.086
2. Otros concretos reforzados en ambientes húmedos o que contengan aluminio embebido o metales diversos o con formas metálicas galvanizadas permanentes.	1000	NTP 334.086
B. Sulfatos como SO ₄ , ppm	3000	NTP 334.086
C. Álcalis como (Na ₂ O+0.658K ₂ O), ppm	600	NTP 334.086
D. Sólidos totales por masa, ppm	50000	ASTM C1603

Fuente: NTP 339.088

2.1.1.4 Aditivo. “Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado para modificar sus propiedades. Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue: aditivos incorporadores de aire, aditivos reductores de agua, plastificantes, aditivos aceleradores, aditivos retardadores, aditivos de control de la hidratación, inhibidores de corrosión, reductores de retracción, inhibidores de reacción álcali-agregado, aditivos colorantes, aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad, para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti deslave, espumante y auxiliares de bombeo” (Kosmatka et al., 2004, pág. 135).

2.2.1.5 Aditivo Reductor de Agua. Los aditivos reductores de agua se usan para disminuir la cantidad de agua de mezcla necesaria para la producción de un concreto con un revenimiento (asentamiento) específico, para reducir la relación (a/c), para disminuir el contenido de cemento y para aumentar el revenimiento. Los reductores de agua típicos disminuyen el contenido de agua aproximadamente del 5% al 10%.

“Con los aditivos reductores de agua normalmente se obtiene un aumento de la resistencia porque se disminuye la relación a/c. En concretos con los mismos contenidos de cemento y de aire y revenimiento, la resistencia a los 28 días de un concreto

conteniendo un reductor de agua (y reducción de la cantidad de agua) puede ser del 10% al 25% mayor que la resistencia de un concreto sin aditivo” (Kosmatka et al., 2004, pág. 138).

2.1.1.6 Adiciones.

NANOMATERIALES:

Como su nombre lo indica, son materiales de una dimensión ínfima, de escala inferior a 100 nm. Los nanomateriales pueden ser de origen natural, como por ejemplo el humo, el hollín y las proteínas sanguíneas o, por el contrario, artificiales.

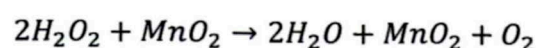
NANOPARTÍCULAS:

Las nanopartículas son complementos microestructurales, con aportes muy significativos en la composición de cemento, que, al agregarlos, modifican sus propiedades, ofreciendo muchas ventajas en su aplicación. Por ende, investigaciones buscan formas de garantizar una larga vida en el concreto mejorando sus propiedades físicas y químicas, destacando su resistencia, permeabilidad, ductilidad, retracción y resistencia al impacto. Debido a sus múltiples beneficios, permite la creación de nuevos diseños ingenieriles que generan construcciones inteligentes con un gran porcentaje de ahorro económico, pues permite también, reducción significativa de una cantidad de cemento y de esta manera elaborar concretos más económicos por metro cúbico y al mismo tiempo reducir la demanda del cemento, lo cual mitiga impactos ambientales negativos en la producción del cemento, aportando un desarrollo sostenible en el sector de la construcción.

NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE MANGANESO:

El óxido de manganeso (IV) o dióxido de manganeso (MnO₂), es un óxido iónico del manganeso. Conocido como pirolusita, es el óxido más importante del manganeso, pero no el más estable. Se utiliza en pinturas y barnices para pintar cristales y cerámica, en la obtención de cloro y yodo, y como despolarizador en pilas secas.

Reacciona con el peróxido de hidrógeno y lo descompone:



En este caso, el óxido de manganeso (IV) actúa como catalizador.

El dióxido de manganeso se usa como materia prima basada en Mn y pigmento coloreado en varias aplicaciones industriales. Además de las industrias ya establecidas, el dióxido de manganeso se usa en las siguientes áreas:

- Producción de lana de vidrio y vidrio
- Purificación del agua
- Producción de acero para mejorar su dureza, rigidez y solidez
- Aditivo en la gasolina para mejorar el octanaje de la gasolina
- Producción de ladrillos

Cuando las nanopartículas de dióxido de manganeso son usadas en el concreto, se espera:

- Reducción de la absorción de agua
- Mejora de la estructura de la superficie, mayor uniformidad y mejor trabajabilidad.

2.1.1.7 Agregado. “Generalmente los agregados se dividen en dos grupos: finos y gruesos (áridos). Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9.5 mm (3/8 pulg.); agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1.18 mm (tamiz #16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg.). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm (3/4 pulg. o 1 pulg.). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9.5 mm (3/8 pulg.) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.” (Kosmatka et al., 2004, pág. 1).

“Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregados friables (disgregables o desmenuzables) o capaces de rajarse son indeseables.

Se deben evitar agregados que contienen cantidades apreciables de esquisto u otras rocas esquistosas, de materiales blandos y porosos. Se deben evitar, en especial, algunos tipos de cherts, pues tienen poca resistencia al intemperismo y causan defectos superficiales tales como las erupciones” (Kosmatka et al., 2004, pág. 104).

Dado que los agregados representan entre el 60% y el 75% del volumen total del concreto, su elección es un aspecto xclave en su desempeño. Estos deben estar conformados por partículas con una resistencia mecánica suficiente y ser capaces de soportar las condiciones ambientales a las que estarán expuestos, sin incluir sustancias que puedan comprometer la durabilidad del concreto. Para lograr un uso eficiente de la pasta, es preferible una distribución continua de tamaños de partículas. A lo largo de este documento, se considerará que los agregados utilizados cumplen con estos requisitos, salvo que se indique lo contrario.

2.1.1.8 Propiedades de los Agregados. Para un diseño adecuado y óptimo de mezclas de concreto, a través del método de Bolomey, se mencionan: granulometría, tamaño máximo, tamaño máximo nominal, módulo de fineza, peso unitario, contenido de humedad, porcentaje de absorción y peso específico.

GRANULOMETRÍA:

Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregado en una muestra. Para el caso del agregado que será usado en una mezcla de concreto, viene a ser la medición del peso de los agregados que pasan por las mallas o tamices 1 ½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100. El procedimiento está regido bajo la NTP 400.037 y la ASTM C33.

TAMAÑO MÁXIMO:

Es el tamiz de menor tamaño por el que pasa el 100% de la muestra del agregado, podemos encontrar los tamices en la NTP 400.037 y en la ASTM C33.

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:

Es el tamiz de menor tamaño que ocasiona el primer retenido, el cual tiene un margen de entre 5% a 10%.

MÓDULO DE FINURA:

El MF, es un índice que nos permite tener idea de las características granulométricas de los agregados, también llamado modulo granulométrico, se define como el número que se obtiene al dividir por 100 la suma de los porcentajes retenidos acumulados por los tamices 6", 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100. El valor aumenta cuando el agregado contiene granos más gruesos, y decrece cuando sus granos disminuyen de tamaño. El agregado fino deberá tener un módulo de finura que no sea menor de 2.3 ni mayor de 3.1

$$MF = \frac{\% \text{ retenido acumulado}}{100} \quad (2.1)$$

$$MF = \frac{\sum \% \text{Ret. acumulado}(6"; 3"; 1 \frac{1}{2}"; 3/4"; 3/8"; \#4; \#8; \#16; \#30; \#50; \#100)}{100}$$

PESO UNITARIO:

Se define como la densidad, peso por unidad de volumen. Nos permite conocer el rendimiento, y, para el diseño de mezclas, se tiene al peso unitario suelto y al peso unitario compactado.

PESO UNITARIO SUELTO:

En su abreviación, PUS. Determinado después de seleccionar una muestra, cuartearla, secarla al horno, colocarla dentro de un recipiente, y finalmente habiendo sido llevada a ras con una varilla lisa de 5/8". El método de ensayo para la determinación de éste se encuentra en la NTP 400.017.

$$PUS = \frac{\text{peso suelto del agregado}}{\text{volumen ocupado por el agregado}} \quad (2.2)$$

PESO UNITARIO COMPACTADO:

En su abreviación, PUC. Determinado después de seleccionar una muestra, cuartearla, secarla al horno, colocarla dentro de un recipiente en 3 capas debidamente compactadas, y finalmente, habiendo sido llevada a ras con una varilla lisa de 5/8". El método de ensayo para la determinación de éste se encuentra en la NTP 400.017.

$$PUC = \frac{\text{peso compactado de agregado}}{\text{volumen ocupado por el agregado}} \quad (2.3)$$

CONTENIDO DE HUMEDAD:

El contenido de humedad presente en el agregado corresponde al agua alojada tanto en su superficie como en su interior, a través de su red de poros. Esta cantidad varía en función de las condiciones ambientales y del tipo de almacenamiento previo a su uso en obra. Para determinar el contenido de humedad, el método de ensayo se encuentra en la NTP 400.022.

$$\%H = \frac{(\text{Peso original} - \text{Peso Seco})}{\text{Peso seco}} \times 100\% \quad (2.4)$$

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN:

La absorción de un agregado se refiere a su capacidad para captar y retener agua dentro de su estructura porosa. Esta característica tiene un impacto directo en la trabajabilidad, resistencia y densidad del mortero. Además, proporciona información sobre el nivel de porosidad del agregado, siendo un parámetro esencial en el diseño de mezclas de concreto y mortero, ya que permite estimar la cantidad de agua que la arena extraerá de la mezcla. Su valor se expresa en porcentaje. El método de ensayo para la determinación de éste se encuentra en la NTP 400.022.

PESO ESPECÍFICO:

En el Sistema Internacional de Unidades, el término densidad también se emplea para describir la relación entre la masa de las partículas de un agregado y su volumen, sin considerar los espacios vacíos entre ellas. Según la norma NTP 400.022, en los agregados finos se identifican tres tipos de densidad:

- **Densidad Secada al Horno (OD):** Corresponde a la masa de las partículas completamente secas en horno por unidad de volumen, incluyendo el espacio ocupado por los poros tanto permeables como impermeables dentro de las partículas, pero sin considerar los vacíos entre ellas.

- **Densidad Saturada Superficialmente Seca (SSD):** Se refiere a la masa del agregado cuando sus poros están completamente saturados de agua, pero su superficie permanece seca. Este valor se expresa por unidad de volumen de las partículas, incluyendo los poros llenos de agua, sin contar los vacíos entre partículas.
- **Densidad Aparente:** Representa la relación entre la masa del agregado y el volumen correspondiente únicamente a la fracción impermeable de sus partículas, excluyendo tanto los espacios entre ellas como los poros internos.

2.1.2 Método de diseño de mezcla de concreto

El diseño de mezcla es esencial para determinar las características necesarias del concreto, como las propiedades en estado fresco y endurecido, así como la inclusión o exclusión de ingredientes específicos. Este proceso también conduce al desarrollo de las especificaciones finales del concreto. El ajuste adecuado de la mezcla se refiere al proceso de calcular las cantidades de los ingredientes del concreto utilizando materiales disponibles localmente, de modo que se alcancen las características definidas previamente. Un concreto bien ajustado debe exhibir cualidades clave, como la facilidad de manejo en estado fresco, la durabilidad, la resistencia y una apariencia uniforme una vez que ha endurecido, además de ser económicamente eficiente. Para lograr estas cualidades, es esencial comprender los principios fundamentales del diseño de mezclas y aplicar cálculos precisos para determinar las proporciones de la mezcla.

El diseño de mezcla implica la planificación detallada de cómo combinar los componentes del concreto, garantizando no solo la resistencia necesaria, sino también la facilidad de manipulación y la uniformidad en su consistencia.

Existen diversos métodos disponibles para la creación de concreto, cada uno con sus propios enfoques, lo que lleva a variaciones significativas en las mezclas. Por lo tanto, es crucial identificar el enfoque óptimo que permita obtener todos los datos requeridos, al mismo tiempo que se asegura la eficiencia económica por metro cúbico.

La elección del diseño de mezcla es un paso fundamental en la producción de concreto, ya que equivale a la "receta" para un nuevo producto. La mejor manera de seleccionar un diseño de mezcla es encontrar aquel que cumpla con la mayoría de los requisitos, considerando las características y propiedades de los componentes disponibles. El diseño que mejor se adapte a estas características producirá resultados más eficientes.

Entre los métodos de diseño más destacados se tienen: ACI, Walker, Módulo de Fineza de la Combinación de los agregados, Füller, Bolomey, Faury, O'Reilly y Porrero & Grases.

2.1.3 Método de Bolomey

En 1925, el profesor Bolomey de la Universidad de Lausanna, en Suiza, mejoró el método de Füller. Él consideró el cemento como un agregado fino adicional y propuso una curva granulométrica continua, teniendo en cuenta la consistencia del concreto y la forma de los agregados. Esto resultó en una mejor proporción de los agregados, superando problemas como la aspereza superficial y la trabajabilidad deficiente que a veces se obtenían con ciertos agregados utilizando el método de Füller. La ecuación desarrollada por Bolomey para trazar la curva se expresó como:

$$Y\% = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (2.5)$$

donde:

Y(%) : Representa el porcentaje acumulado que pasa por la malla de
abertura "d"

d(mm) : Abertura de la malla de referencia

D(mm): Tamaño máximo del agregado total

A : Coeficiente empírico que depende de la forma del agregado y la
consistencia del concreto, representando la fracción de espacio no llenado
por los agregados.

El procedimiento de dosificación de componentes siguió el método de Füller, pero con mejoras notables:

- Se consideraron tres tipos de agregados (fino, grueso y cemento).
- Se conoció la cantidad y el porcentaje de cemento en el agregado global.
- El módulo granulométrico del cemento se consideró como cero.
- Las curvas granulométricas utilizadas para determinar los módulos de fineza teóricos de Bolomey fueron una modificación de sus curvas originales.
- Se observó que cuanto más cemento se usaba en la mezcla, menor cantidad de agregado fino se requería para alcanzar la compacidad óptima.

El método de Bolomey, junto con su respectiva curva, ha demostrado un buen rendimiento, especialmente en la dosificación de concretos masivos, como presas, muros de gravedad, vertederos, etc. (Coasaca Condori, 2018).

2.1.4 Propiedades del Concreto

2.1.4.1 Concreto Fresco. El concreto fresco es una mezcla de cemento, agua, agregados y aditivos, que se encuentra en su estado plástico antes de fraguar y endurecer. Las propiedades del concreto fresco son fundamentales para asegurar la calidad y el rendimiento del concreto una vez que se endurece, las cuales son:

ASENTAMIENTO:

El asentamiento, también conocido como slump, en inglés, es la medida de la deformación vertical que experimenta una muestra de concreto fresco cuando se le somete a una fuerza de compactación. En otras palabras, es la propiedad que evalúa cuán fácil es dar forma, empujar y alisar este material de construcción.

La evaluación del asentamiento es crucial para determinar la idoneidad del concreto en una aplicación de construcción específica. Un asentamiento más alto indica una mayor facilidad de manejo del concreto. Cuando el asentamiento es demasiado bajo, la mezcla no se formará con facilidad, mientras que, si es excesivamente alto, existe el riesgo de que

los componentes como la arena, la grava y el cemento se separen de la mezcla, lo que resultaría en una mezcla no utilizable.

Las normas que describen el procedimiento para determinar el asentamiento son las siguientes:

- NTP. 339.03. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto con el cono de Abrams.
- ASTM C 143. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.

El procedimiento es el siguiente:

- Humedecer los elementos que van a estar en contacto con la mezcla.
- Colocar el cono de Abrams en una superficie plana, rígida, no absorbente y libre de vibraciones, luego pisar las aletas para evitar que se mueva y agregar la mezcla en tres capas de igual tamaño, en cada capa compactar con una varilla lisa de acero de 16 mm de diámetro y punta semiesférica, con 25 golpes distribuidos uniformemente, en la primera capa la varilla no debe chocar el fondo, para la segunda y tercera capa, la varilla debe penetrar ligeramente la capa anterior.
- En la última capa debe sobrar concreto, usar la barra como regla para enrasar la superficie, luego se levanta verticalmente el cono de Abrams en un tiempo de 5 ± 2 segundos, sin girarlo ni moverlo lateralmente. Todo el procedimiento desde la primera capa hasta levantar el cono debe durar como máximo 2 minutos con 30 segundos.
- Se coloca el cono de Abrams invertido en un costado y se mide el asentamiento desde el centro de la mezcla hasta la parte inferior de la varilla usada como regla.

PESO UNITARIO:

El peso unitario es la masa por unidad de volumen del concreto fresco y se expresa en kg/m^3 o lb/ft^3 . El peso unitario, densidad del concreto fresco, depende de la cantidad y tipo de agregados, así como de la relación agua-cemento.

Las normas que describen el procedimiento para determinar el asentamiento son: la NTP 400.011 y la ASTM C138, las cuales proporcionan métodos de ensayo para determinar el peso unitario del concreto fresco. Se basan en la determinación de la densidad del concreto fresco utilizando una probeta cilíndrica y se calcula el peso unitario a partir de la masa y el volumen.

TEMPERATURA:

Es muy importante conocer la temperatura del concreto, puesto que en temperaturas que varíen mucho a la ideal, es posible que el concreto presente problemas de fraguado. Cabe resaltar que la temperatura del concreto depende del aporte de temperaturas de todos los componentes, además del calor de hidratación liberado por el cemento. Asimismo, es necesario conocer que la temperatura ideal de concreto es de 23°C .

La temperatura es medida para determinar la conformidad con los límites de temperatura en una especificación y es una prueba requisito para preparar los especímenes. Es permitido medir la temperatura de concreto en el lugar cuando no se mide en relación con pruebas de resistencia.

Las normas que describen el procedimiento para determinar el asentamiento son las siguientes:

- NTP. 339.184 (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto. El control de la temperatura está regulado por la norma establecida, que indica la manera de medir la temperatura del concreto con un termómetro de 0.5°C de precisión y que el tiempo que esté introducido en la mezcla sea de 2 minutos como mínimo y 5 minutos como máximo.

- ASTM C1064 Método de ensayo estándar para la medición de la temperatura del concreto de cemento hidráulico. Esta no tendrá que ser necesariamente compuesta (tomada en un mínimo en dos porciones en periodos dentro de 5 a 15 minutos, después del 10% y antes del 90% de la descarga del concreto fresco) y verificar que se cumplan los tiempos que marca la norma ASTM 172, en el caso de que no se pudiese dar seguimiento a esta; la toma de temperatura se podrá verificar en molde o siempre cuando se realice en una sección que nos permita cumplir con las características adelante descritas.

2.1.4.2 Concreto Endurecido. El concreto endurecido es un material compuesto formado por cemento, agua, agregados gruesos y finos, que se endurece y adquiere resistencia mecánica con el tiempo. Sus propiedades dependen de los materiales que lo componen, la relación entre ellos y las condiciones de curado.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN F'C:

La resistencia a la compresión es una propiedad importante del concreto porque determina su capacidad para soportar cargas. La resistencia a la compresión se mide mediante ensayos de compresión. En estos ensayos, se aplica una carga axial a un espécimen de concreto hasta que falla. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área del espécimen.

La resistencia a la compresión del concreto varía en función de los materiales utilizados, la relación entre estos materiales y las condiciones de curado.

Las normas que describen el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión son las siguientes:

- ASTM C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- NTP 339.034. Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas

El propósito de este método consiste en determinar la resistencia a la compresión del concreto, para este fin se utiliza una máquina universal que transmitirá fuerzas uniaxiales de compresión a la probeta en ensayo, hasta que la falla ocurra. Por lo expuesto anteriormente es que a este método se le clasifica como un ensayo destructivo.

2.2 Porosidad del Concreto

La porosidad del concreto es una de las propiedades más influyentes en su durabilidad y desempeño mecánico. Se define como la fracción del volumen total del material que está ocupada por poros, los cuales pueden estar conectados o aislados. La cantidad, distribución y continuidad de estos poros determinan propiedades como la permeabilidad, la absorción de agua y la difusión de iones (Mehta & Monteiro, 2014).

La porosidad del concreto se refiere a la presencia de pequeños agujeros o poros a través de los cuales pueden pasar fluidos y aire. Durante la mezcla del concreto, se incorpora una cierta cantidad de aire. A medida que el concreto se endurece, los ingredientes más pesados tienden a asentarse en el fondo, mientras que los más ligeros suben. El agua, siendo el más ligero, tiende a ascender y evaporarse, dejando millones de huecos entrecruzados en todas direcciones. Según el aire escapa, tiene el mismo efecto. Estos huecos forman la porosidad del concreto. Frecuentemente, estos huecos, poros provocan quebraduras finísimas dentro del concreto, debilitándolo.

La acción capilar en el concreto permite que el agua se desplace a través de él. Esto puede ocurrir cuando la lluvia golpea las paredes de concreto o cuando el agua subterránea entra en contacto con las paredes de un sótano, haciendo que el agua fluya por los poros dentro del material.

Los poros en el concreto están interconectados, lo que facilita el paso gradual del agua a lo largo de la estructura. A medida que el concreto se vuelve más denso, los poros se vuelven más compactos y, por lo tanto, la cantidad de agua que puede atravesar el material disminuye.

La estructura porosa del concreto tiene un impacto significativo en su comportamiento. Específicamente, la porosidad determina la capacidad de las sustancias

agresivas para penetrar en el concreto y provocar su deterioro. Los índices de intrusión están estrechamente vinculados con la permeabilidad del concreto. En términos generales, la permeabilidad depende de cómo se distribuye la porosidad total dentro del material. A su vez, la porosidad está influenciada por varios factores, como la calidad de la reacción química del cemento, las proporciones de los componentes minerales, las partículas de los agregados, la relación agua-cemento y las condiciones de curado, entre otros.

Según Powers, los poros en la pasta de cemento endurecida se pueden dividir en dos categorías basadas en su tamaño: poros de gel y poros capilares. Además, se identifican otros tipos de poros, como los poros de aire y los macroporos, que pueden originarse debido a defectos en la compactación.

En ese sentido, y teniendo presente el modelo de Powers, tenemos los siguientes tipos de poros (Powers & Brownyard, 1960).

POROS DE GEL (C-S-H)

Los poros de gel son extremadamente pequeños, con diámetros que varían entre 1 y 10 nanómetros. Estos poros están presentes en el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), que es uno de los principales productos de hidratación del cemento. Se forman durante el proceso de hidratación del cemento, cuando el clinker de cemento reacciona con el agua para formar gel C-S-H.

Aunque son muy pequeños, los poros de gel contribuyen significativamente a la superficie específica y la capacidad de absorción de agua del concreto. Sin embargo, su influencia en la permeabilidad y la conductividad eléctrica es limitada debido a su tamaño.

POROS CAPILARES

Los poros capilares son más grandes que los poros de gel, con diámetros que pueden variar desde unos pocos nanómetros hasta varios micrómetros. Estos poros están distribuidos a lo largo de la matriz de cemento. Se forman debido al exceso de agua que no reacciona durante el proceso de hidratación. De manera simplificada, los poros capilares representan el volumen de huecos ocupado por el agua libre de la pasta de cemento. El volumen y tamaño de estos poros viene determinado por la relación agua/cemento y el

grado de hidratación del cemento. Para una cierta razón agua/cemento, el volumen de poros capilares de la pasta se reduce a medida que el material cementíceo se hidrata.

Los poros capilares tienen un impacto significativo en la permeabilidad, la durabilidad y la resistividad eléctrica del concreto. Un mayor contenido de poros capilares generalmente reduce la resistividad eléctrica debido a la mayor cantidad de agua y iones presentes en estos poros.

Los poros capilares son los más importantes desde el punto de vista de la durabilidad ya que son los que controlan el transporte de materia en el interior del concreto, debido, por un lado, a las fuerzas capilares y de tensión superficial de estos huecos, y por otro, a que son el medio por donde penetran y difunden los agresivos externos.

POROS DE AIRE

Los poros de aire son espacios de aire atrapados o intencionalmente incorporados en la mezcla de concreto. Estos poros pueden tener diámetros de hasta varios milímetros.

Los poros de aire pueden ser el resultado de la incorporación intencional de aditivos aireantes o de la aireación natural durante el mezclado del concreto.

Los poros de aire pueden mejorar la durabilidad del concreto al proporcionar espacios para la expansión del agua congelada, reduciendo así el daño por congelación y deshielo. Sin embargo, un exceso de poros de aire puede reducir la resistencia mecánica del concreto.

En términos generales se puede mencionar que, la porosidad del concreto influye en su comportamiento, ya que determina la cantidad de sustancias agresivas que pueden penetrar en la masa y causar daños. La permeabilidad del concreto, es decir, su capacidad para dejar pasar sustancias, está relacionada con la porosidad. La porosidad depende de factores como la composición original del cemento, las mezclas minerales, la relación agua-sólidos y las condiciones de curado, entre otros.

Las normas que describen el procedimiento para determinar la porosidad del concreto son las siguientes:

- NTP 339.033. Procedimiento para determinar la porosidad y el porcentaje de vacíos del concreto endurecido, inmersión y absorción capilar.
- ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- NTG 41017 h21. Método de ensayo. Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido

2.2.1 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica

2.2.1.1 Relación a/c. La cantidad de agua utilizada en la mezcla influye directamente en la formación de poros capilares. Relaciones a/c altas generan una mayor cantidad de poros interconectados, aumentando la permeabilidad y reduciendo la resistencia del concreto (Neville, 2011).

2.2.1.2 Desarrollo de hidratación. El grado de hidratación del cemento Portland influye en la evolución de la porosidad. En las primeras edades, la matriz presenta una gran cantidad de poros capilares, los cuales se van reduciendo a medida que avanzan las reacciones de hidratación y se forman productos como el gel de C-S-H (calcio-silicato-hidratado), el principal responsable de la resistencia mecánica del concreto (Scrivener et al., 2015).

2.2.1.3 Microestructura de la Zona de Transición Interfacial (ITZ). La zona interfacial entre la pasta de cemento y los agregados gruesos es la región más débil del concreto debido a su mayor porosidad y menor contenido de productos de hidratación. La conectividad de los poros en esta zona juega un papel crucial en la difusión de iones y la permeabilidad global del concreto (Mehta & Monteiro, 2014).

2.2.1.4 Incorporación de Nanomateriales y Aditivos. El uso de nanopartículas como la nano sílice y el grafeno puede reducir la porosidad al promover la nucleación de productos de hidratación y reducir el tamaño de los poros capilares. Adicionalmente, los aditivos reductores de agua permiten obtener mezclas más compactas con menor volumen de poros interconectados (Li et al., 2018).

2.2.2 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica del Concreto

La resistividad eléctrica del concreto es una propiedad que mide su capacidad para oponerse al paso de corriente eléctrica. Se ha demostrado que existe una relación inversa entre la resistividad y la porosidad conectada del material, ya que los poros llenos de solución iónica permiten el movimiento de cargas eléctricas (Whittington et al., 1981).

2.2.2.1 Influencia de la Porosidad en la Conductividad Iónica. La resistividad del concreto depende de la conectividad y saturación de los poros. Un concreto con alta porosidad conectada facilita la difusión de iones, reduciendo la resistividad eléctrica. Por el contrario, un concreto con una matriz densa y bien hidratada presenta menor conductividad iónica y, por ende, mayor resistividad (Castellote et al., 2002).

2.2.2.2 Relación Matemática entre Resistividad Eléctrica y Porosidad. Diversos modelos han sido propuestos para correlacionar la resistividad eléctrica con la porosidad efectiva del concreto. Uno de los más utilizados es el modelo de Archie, originalmente desarrollado para medios porosos saturados (Archie, 1942):

$$\rho = a * \Phi^{-m} \quad (2.6)$$

donde:

- ρ : Resistividad eléctrica (ohm-cm)
- Φ : Porosidad – porcentaje de vacíos (porcentaje, sin unidades)
- a : Factor de tortuosidad (constante empírica)
- m : Exponente de cementación (depende de la microestructura).

2.2.2.3 Factores que afectan la Resistividad Eléctrica.

- **Saturación de los Poros:** La resistividad varía con el grado de saturación, siendo mínima en condiciones completamente saturadas.
- **Concentración Iónica de la Solución Intersticial:** A mayor concentración de iones en el agua porosa, menor será la resistividad.
- **Edad del Concreto:** Con el tiempo, la hidratación continua del cemento reduce la porosidad y aumenta la resistividad.

2.2.3 Relación entre Resistencia y Porosidad

La porosidad también afecta la resistencia del concreto. Existe una relación significativa entre la porosidad y la resistencia, ya que los espacios vacíos en la estructura limitan la resistencia. En materiales de múltiples fases como el concreto, la porosidad de cada componente contribuye a la porosidad general del concreto y, por lo tanto, a su resistencia. Los agregados naturales suelen ser densos y resistentes, por lo que la porosidad de la matriz de pasta de cemento y la zona de transición entre la matriz y el agregado grueso son factores determinantes en la resistencia del concreto normal.

2.2.4 Relación entre Porosidad y Resistividad Eléctrica del Concreto

La resistencia a la compresión del concreto está determinada por una combinación de factores que influyen en su microestructura, entre los cuales destacan la relación agua/cemento (a/c), el grado de compactación y las condiciones de curado. Estos parámetros afectan directamente la porosidad de la pasta de cemento y de la zona de transición interfacial, zonas críticas para la transmisión de esfuerzos mecánicos (Mehta & Monteiro, 2014). Aunque la determinación directa de la porosidad de estos componentes puede resultar impráctica a nivel experimental, se han desarrollado modelos empíricos que permiten predecir la resistencia del concreto a partir de características del diseño de mezcla y de propiedades físicas medibles (Neville, 2011).

En efecto, diversos estudios han demostrado que la porosidad del concreto está estrechamente relacionada con su capacidad para resistir esfuerzos mecánicos y la penetración de agentes agresivos como cloruros, sulfatos y dióxido de carbono, factores clave en su durabilidad (Zhang & Gjrv, 1991; Lian et al., 2011). Controlar la porosidad del concreto se vuelve, por tanto, un objetivo central en el diseño de mezclas durables y sostenibles, particularmente cuando se busca optimizar simultáneamente su resistencia mecánica y su comportamiento frente a la agresión ambiental.

Existen diversos modelos propuestos para correlacionar la porosidad del concreto con propiedades mecánicas y parámetros del diseño de mezcla. Uno de los enfoques más clásicos es la relación inversa entre porosidad y resistencia a la compresión, basada en

principios de mecánica de materiales porosos. En términos generales, al aumentar la porosidad se reduce la resistencia mecánica, dado que el volumen de vacíos interrumpe la continuidad de la matriz cementicia.

Este comportamiento puede representarse mediante modelos empíricos del tipo:

$$f_c = k * (1 - p)^n \quad (2.7)$$

Donde f_c es la resistencia a la compresión, p es la porosidad total, y k y n son constantes ajustadas experimentalmente (Zhang & Gjrv, 1991).

Asimismo, estudios han demostrado una fuerte correlación entre la porosidad y la relación agua/cemento (a/c), dado que una mayor proporción de agua genera una matriz con mayor volumen capilar. Según (Mehta & Monteiro, 2014), esta relación puede expresarse de forma directa, donde la porosidad se incrementa casi linealmente con el aumento de a/c , especialmente en mezclas sin aditivos.

En cuanto a la resistividad eléctrica, la correlación con la porosidad se fundamenta en el hecho de que el concreto actúa como un medio poroso saturado, cuya capacidad de conducción eléctrica depende del volumen y la conectividad de los poros. El modelo de Archie, adaptado desde estudios en geología, propone una relación del tipo:

$$\rho = \rho_0 * \phi^{-m} \quad (2.8)$$

donde ρ es la resistividad del concreto, ρ_0 es la resistividad del electrolito en los poros, ϕ es la porosidad efectiva, y m es el llamado factor de cementación (Archie, 1942). Este modelo ha sido utilizado y ajustado en contextos de caracterización del concreto, mostrando buena correlación con métodos gravimétricos de porosidad.

2.2.5 Modelos Matemáticos relacionados con la Porosidad y la Resistencia a la Compresión

La correlación entre porosidad y resistencia a la compresión ha sido modelada mediante enfoques teóricos clásicos. Ryshkewitch (1953) propuso un modelo exponencial, válido para materiales con microestructuras porosas, donde la resistencia decae exponencialmente debido a la concentración de esfuerzos alrededor de vacíos. Por su

parte, Powers (1948) desarrolló un modelo de potencia basado en el volumen de sólidos efectivos, aplicable a pastas de cemento. Ambos modelos han sido adaptados para concretos, siendo el exponencial más preciso en rangos de alta porosidad ($\phi > 15\%$), como se evidencia en este estudio.

2.2.5.1 Modelo Exponencial (Ryshkewitch, 1953). Desarrollado originalmente para materiales cerámicos poros sinterizados, pero aplicable a concretos y pastas de cemento.

$$f'c = f_0 * e^{-b*\phi} \quad (2.9)$$

donde:

- $f'c$: Resistencia teórica a porosidad cero ($\phi=0$)
- b : Constante empírica que depende de la microestructura del material (tamaño, forma y distribución de poros).
- ϕ : Porosidad expresada como fracción (ej.: 15% $\rightarrow$ 0.15).

Ryshkewitch demostró que la resistencia disminuye exponencialmente con el aumento de la porosidad debido a:

- La concentración de esfuerzos alrededor de los poros.
- La reducción del área sólida efectiva que soporta carga.

Estudios posteriores (Mehta & Monteiro, 2014) confirmaron su validez en matrices cementicias, especialmente en concretos con $\phi > 10\%$.

2.2.5.2 Modelo de Potencia (Powers, 1948). Propuesto por T.C. Powers para pastas de cemento endurecidas, basado en la teoría de espacio de gel.

$$f'c = k * (1 - \phi)^n \quad (2.10)$$

donde:

- k : Resistencia intrínseca del material sin poros.
- n : Exponente relacionado con la conectividad de la matriz (típicamente $n \approx 2-3$ para concretos).

Powers argumentó que la resistencia depende del volumen de sólidos percolados (área continua que transfiere carga).

El término $(1 - \phi)^n$ refleja la probabilidad de que los esfuerzos encuentren caminos continuos en la microestructura.

Sin embargo, se puede mencionar que, como limitación, subestima el efecto de la porosidad en concretos de alta resistencia ($f'_c > 70$ MPa), donde la distribución de poros es crítica.

2.2.5.3 Modelo de Zheng y Zhou (2003). Desarrollado para materiales compuestos con nanopartículas, especialmente en cerámicos y concretos de ultra-alta resistencia (UHPC).

$$f'_c = f_0 \cdot e^{-k \cdot \phi^{1.5}} \quad (2.11)$$

donde:

f_0 : Resistencia teórica a porosidad cero (similar a Ryshkewitch).

k : Constante que refleja la eficiencia de las nanopartículas en reducir la porosidad y reforzar la matriz.

ϕ : Porosidad total (fracción decimal).

Las nanopartículas (como las NDMN) actúan como núcleos de densificación, reduciendo el tamaño y la conectividad de los poros.

El exponente 1.5 captura la no linealidad crítica en materiales con baja porosidad (<15%), donde pequeños cambios en ϕ afectan drásticamente la resistencia.

Zheng y Zhou demostraron que este modelo predice mejor la resistencia en materiales con nanoadiciones (ej., nano-sílice, TiO_2) que los modelos clásicos.

2.2.5.4 Modelo de resistencia ajustado por fracción de nanoaditivos (Balshin Modificado). Adaptación del modelo clásico de Balshin (1949) para materiales porosos, extendido a concretos con nanomateriales.

$$f'_c = f_0 \cdot (1 - \phi)^n \cdot (1 + \alpha \cdot \eta) \quad (2.12)$$

donde:

- f_0 : Resistencia a porosidad cero.
- n : Exponente que depende de la distribución de poros (típicamente 2–3 para pastas de cemento).
- α : Coeficiente de eficiencia de las nanopartículas (ej., NDMN).
- η : Fracción volumétrica o másica de nanopartículas (ej., 5%→ 0.05).

Las nanopartículas rellenan poros y modifican la zona de transición interfacial (ITZ), aumentando el área sólida efectiva.

El término $(1 + \alpha \cdot \eta)$ cuantifica el aporte mecánico directo de las NDMN.

Es el único modelo que incluye explícitamente el % de nanopartículas (η), permitiendo diseñar mezclas optimizadas.

2.2.5.5 Modelo Híbrido (Zheng y Zhou – Balshin Modificado). Combinación del modelo exponencial (Ryshkewitch) y el efecto de nanopartículas (Balshin modificado), desarrollado para esta investigación.

$$f'_c = A \cdot e^{(-B \cdot \phi)} \cdot (1 + C \cdot \eta) \quad (2.13)$$

donde:

- A : Resistencia base influenciada por la matriz cementante.
- B : Constante de decaimiento exponencial (similar a Ryshkewitch).
- C : Factor de eficiencia nanométrica (relacionado con α en Balshin).

El término exponencial $e^{(-B \cdot \phi)}$ modela el impacto de la porosidad en la resistencia.

El término $(1 + C \cdot \eta)$ añade el refuerzo por NDMN, similar a Balshin pero con mejor ajuste empírico.

2.3 Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica (ρ) del concreto es una propiedad que mide la capacidad del material para oponerse al paso de la corriente eléctrica. Se expresa en ohm-centímetros ($\Omega\text{-cm}$) y depende de la presencia de poros interconectados, la humedad y la concentración de iones en la solución porosa (Snyder K. A. et al., 2003).

Esta propiedad ha sido ampliamente utilizada en la evaluación de la durabilidad del concreto, ya que tiene una correlación directa con su permeabilidad iónica, lo que la convierte en una herramienta eficaz para estimar su porosidad conectada sin recurrir a ensayos invasivos o destructivos (Castellote et al., 2002).

DEFINICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad eléctrica es una propiedad fundamental del material que cuantifica la fuerza con la que un material dado se opone al flujo de corriente eléctrica. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios metro ($\Omega\text{-m}$) o en ohmios centímetro ($\Omega\text{-cm}$).

La resistividad eléctrica (ρ) es la inversa de la conductividad eléctrica (σ), de acuerdo con la ecuación:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.14)$$

donde:

ρ : Resistividad eléctrica ($\Omega\text{-cm}$)

σ : Conductividad eléctrica (S/m)

El paso de corriente en el concreto se produce predominantemente a través de la solución porosa, la cual está compuesta por agua y especies iónicas derivadas de la hidratación del cemento. Este mecanismo, conocido como conducción iónica, es el principal en concretos saturados, ya que los poros interconectados permiten el movimiento de iones. Sin embargo, no es el único mecanismo de transporte de carga eléctrica. También puede ocurrir una conducción electrónica en fases sólidas como los productos de

hidratación o adiciones conductoras, aunque esta es generalmente despreciable en concretos convencionales (Bentz et al., 2014; Snyder et al., 2000). Por lo tanto, la resistividad eléctrica del concreto depende principalmente de la porosidad efectiva, el grado de saturación y la conductividad de la solución intersticial (Whittington et al., 1981), pero también puede verse ligeramente influenciada por la microestructura y el tipo de adiciones empleadas.

La ley de Ohm se considera una propiedad volumétrica de los materiales que indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas. Relaciona la diferencia de potencial o voltaje (V) que hay entre dos extremos de un material con la resistencia eléctrica R y la corriente eléctrica (I) que fluye a través del material.

Se representan por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V}{I} = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

donde:

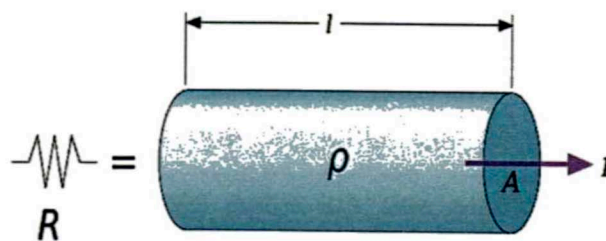
$\frac{l}{A}$: Factor geométrico

l : Distancia entre electrodos

A : Área transversal del paso de corriente

Figura 1

Parámetros utilizados en la definición de la Resistividad Eléctrica.



2.3.1 Modelos Matemáticos relacionados con la Resistividad y la Porosidad

2.3.1.1 Modelo de Archie. Estudios experimentales han demostrado que existe una correlación inversa entre la resistividad y la porosidad conectada. Un concreto con alta porosidad presenta mayor permeabilidad iónica, lo que facilita el flujo de corriente y reduce la resistividad (Castellote et al., 2002).

Diversos modelos han sido propuestos para correlacionar la resistividad eléctrica con la porosidad efectiva del concreto. Uno de los más utilizados es el modelo de Archie (1942), originalmente utilizado en la geociencia, desarrollado para medios porosos saturados, ha sido adaptado al concreto para correlacionar la resistividad con la porosidad.

$$\rho = a * \Phi^{-m} \quad (2.6)$$

donde:

- ρ : Resistividad eléctrica (ohm-cm)
- Φ : Porosidad – porcentaje de vacíos (porcentaje, sin unidades)
- a : Factor de tortuosidad (constante empírica)
- m : Exponente de cementación (depende de la microestructura)

Este modelo indica que la resistividad disminuye exponencialmente a medida que aumenta la porosidad efectiva.

2.3.1.2 Método de Wenner. El método de Wenner es un método no destructivo. Nos permite medir la resistividad eléctrica en probetas de concreto. Se basa en la disposición de cuatro electrodos, con una corriente que fluye entre dos electrodos exteriores y se mide la caída de voltaje entre los dos electrodos interiores. Mide la resistencia superficial del concreto.

Este método se rige bajo el principio básico de la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia (I) a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial (V) que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están

colocados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente.

La resistividad eléctrica (ρ) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot V}{I} \quad (2.16)$$

donde:

a : Distancia entre electrodos (separación entre electrodos 1 y 2 o 3 y 4).

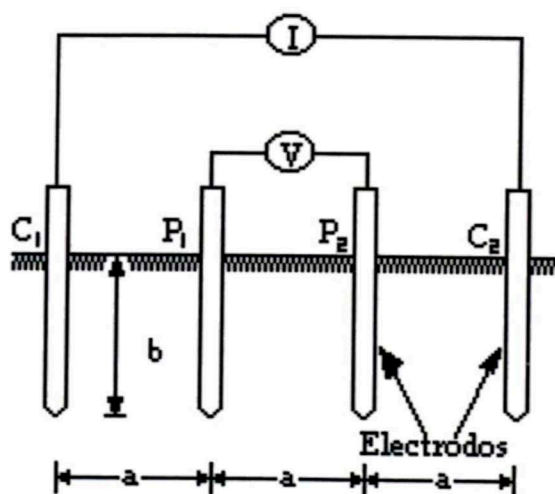
V : Diferencia de potencial medida entre los electrodos 2 y 3.

I : Corriente aplicada entre los electrodos 1 y 4.

Este método es ampliamente utilizado debido a su rapidez y capacidad para evaluar la durabilidad del concreto en obra (Polder & Peelen, 2002).

Figura 2

Método de Wenner.



2.3.1.3 Método Directo. También conocido como método de dos electrodos, mide la resistividad eléctrica del concreto aplicando una corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con la superficie del material y midiendo la diferencia de potencial entre ellos. Mide la resistencia bulk del concreto (volumétrica).

Este método es referenciado en la normativa mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2019, publicada por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) de México. Esta norma es, a la fecha, la única que

describe detalladamente el procedimiento experimental para determinar la resistividad eléctrica del concreto endurecido mediante el método de dos electrodos, tanto en lo referido a la preparación de las muestras como a la configuración del sistema de medición y la interpretación de resultados.

La NMX-C-514 establece consideraciones técnicas clave como: el acondicionamiento previo de las superficies de contacto, el uso de electrodos metálicos planos, la aplicación de pasta conductora para minimizar la resistencia de contacto.

El modelo matemático que describe este método se basa en la Ley de Ohm generalizada para un medio tridimensional:

$$V = I * R \quad (2.17)$$

donde:

V : Diferencia de potencial medida en volts (V)

I : Corriente aplicada en amperios (A)

R : Resistencia eléctrica del concreto en ohmios (Ω)

Para convertir esta resistencia en resistividad eléctrica (ρ), se utiliza la ecuación de resistividad para un medio homogéneo:

$$\rho = R * \frac{A}{L} \quad (2.18)$$

donde:

ρ : Resistividad eléctrica (Ω -cm)

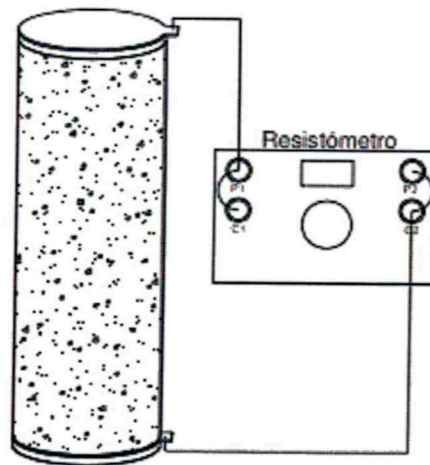
R : Resistencia medida entre los electrodos (Ω)

A : Área de contacto del electrodo con el concreto (m²)

L : Distancia efectiva entre los electrodos (m)

Figura 3

Método Directo.



Este método es más sencillo y rápido que el método de Wenner (cuatro electrodos), pero es más sensible a la humedad superficial y a la polarización de los electrodos.

Relación entre Resistividad y Porosidad en el Método Directo

La resistividad eléctrica obtenida mediante el método directo puede correlacionarse con la porosidad conectada del concreto utilizando expresiones empíricas basadas en la conductividad iónica de la solución porosa. Algunos modelos propuestos incluyen:

- Modelo Empírico Basado en la Porosidad Conectada

$$\rho = k * \Phi^{-m} \quad (2.19)$$

donde:

Φ : Porosidad efectiva del concreto

k y m : Coeficientes dependientes de la microestructura del material

Este modelo es análogo al de Archie (1942), y ha sido validado en estudios experimentales (Andrade, Evaluation of the Resistivity to Chloride Ion Penetration, 2004).

- Modelo Basado en la Saturación del Concreto

$$\rho = \rho_0 * S^{-n} \quad (2.20)$$

donde:

S : Grado de saturación de los poros ($0 \leq S \leq 1$)

n : Coeficiente empírico

ρ_0 : Resistividad en estado completamente seco

Este modelo refleja cómo la presencia de agua en los poros reduce la resistividad eléctrica debido a la mayor disponibilidad de iones para la conducción.

Ventajas y Limitaciones del Método Directo

Ventajas:

- Método rápido y de fácil implementación en campo.
- No requiere configuración compleja ni calibraciones avanzadas.
- Puede realizarse con dispositivos portátiles de medición.

Limitaciones:

- Sensible a la humedad superficial del concreto.
- La polarización de los electrodos puede afectar las mediciones, generando errores en resistividades bajas.
- Puede verse influenciado por la carbonatación superficial.

Comparación con el Método de Wenner (Cuatro Electrodos)

Tabla 2

Comparación entre Método Directo y Método de Wenner.

Característica	Método Directo (Dos electrodos)	Método de Wenner (Cuatro electrodos)
Precisión	Menor, influenciado por humedad superficial.	Mayor, menos afectado por humedad.
Facilidad de uso	Muy fácil de aplicar.	Requiere mayor configuración.
Sensibilidad a polarización	Alta, los electrodos pueden distorsionar la medición.	Baja, ya que los electrodos internos solo miden voltaje.
Normativas aplicables	NMX-C-514., ASTM C1760	ASTM C1876, AASHTO TP95

En resumen, el método directo de dos electrodos es una alternativa eficaz para estimar la resistividad eléctrica del concreto y, por ende, su porosidad conectada. Su implementación es sencilla, aunque presenta limitaciones relacionadas con la humedad superficial y la polarización de los electrodos.

Los modelos matemáticos que relacionan la resistividad con la porosidad han sido ampliamente validados en la literatura, permitiendo su aplicación en la evaluación rápida y no destructiva de la durabilidad del concreto.

2.3.2 Relación frente a la microestructura

Respecto a la relación de la resistividad (ρ) con las propiedades de los materiales cementicios, investigaciones previas [Calleja, (1952); Monfore, (1968); Hager & Domszy, (2004); Andrade et al., (2005)] han demostrado que las propiedades eléctricas del concreto están estrechamente ligadas a las características microestructurales de la pasta y del concreto, como la porosidad y la tortuosidad.

En materiales porosos como el concreto, la resistividad muestra la capacidad para transportar carga eléctrica a través de los iones disueltos en la fase líquida dentro de un cierto volumen (Laverde Laverde, 2014). Partiendo de esa afirmación, se considera que los agregados son eléctricamente inertes porque su resistividad es mucho mayor que la de la solución de poros.

Dado que la solución de los poros constituye solo una fracción del volumen total, se puede expresar mediante la ecuación la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_0 * \Phi \quad (2.21)$$

donde:

ρ_0 es la resistividad de la solución de los poros (aproximadamente 0,5 Ω -m [Buenfeld et al., (1986); Goñi & Andrade, (1990)] y ϕ representa la fracción volumétrica de líquido en los poros (cuando no está saturado, $\phi < \varepsilon$, volumen de poros; cuando está saturado, $\phi = \varepsilon$, volumen de poros).

Archie, en 1942 (Archie, 1942), descubrió en el estudio de rocas saturadas con agua salobre que esta fórmula no consideraba la tortuosidad de los poros, la cual hace que la distancia (l) entre las superficies del volumen geométrico no sea la aparente. Por lo tanto, desarrolló la conocida ley de Archie, representada por la siguiente ecuación:

$$\rho_0 = a * \rho * ^{-m} \quad (2.22)$$

donde:

a y m son constantes que dependen de la composición del material, y m agrupa todos los parámetros relacionados con la estructura de los poros del material, como son la conectividad y la tortuosidad.

La relación $\rho/\rho_0 = \phi - m$ también se define, en términos microestructurales teniendo en cuenta solamente las limitaciones geométricas del movimiento, como un factor adimensional llamado “factor de formación” (FF) (Archie, 1942), es siempre mayor que la inversa de la porosidad ($1/\epsilon$) (Garboczi, 1990).

Sabiendo que la microestructura del material cementicio es función de su dosificación, se comenta a continuación la relación entre la resistividad y las especificaciones de la mezcla del concreto (a/c, tipo y contenido de cemento, agregados).

2.3.3 Relación frente a componentes del concreto

Añadir agregados a la mezcla, ya sean inertes o reactivos, pueden modificar las propiedades físicas y químicas del concreto, afectando consecuentemente su resistividad eléctrica.

Por ejemplo, en el caso de las cenizas volantes, los concretos presentan resistividades considerablemente mayores en comparación con el cemento Pórtland bajo las mismas condiciones. Este efecto se debe a la reducción de los poros capilares a través de la reacción puzolánica (Powers & Brownyard, 1960).

Respecto a la inclusión de áridos, su influencia depende del volumen incorporado. Normalmente, los áridos densos actúan como aislantes debido a su alta resistividad eléctrica, como es el caso del cuarzo, con valores alrededor de $10^{14} - 10^{16} \Omega\cdot m$ (Catharin & Federspiel, 1972). Esta característica provoca un efecto de dilución en la resistividad

eléctrica (Shane et al., 2000) medida en la matriz conductiva (la pasta) y redirige la corriente a su alrededor, aumentando así la tortuosidad. Ping (Ping et al., 1991) encontró que la mineralogía del agregado no afecta la conductividad.

En cuanto a la interfase entre la matriz y el árido, esta no altera significativamente la conductividad en el concreto (Shane et al., 2000). De hecho, la conductividad eléctrica de la zona de transición en morteros no difiere mucho de la de la propia pasta (Tumidajski, 1996), y su valor apenas cambia al aumentar la relación a/c (Ping et al., 1991). Otros estudios [Garboczi et al., (1995); Princigallo et al., (2003)] han observado que más que la interfase, es el volumen de los áridos incorporados lo que puede influir considerablemente en el concreto. La influencia del tamaño de los áridos se explica probablemente por el cambio significativo en la tortuosidad de la red porosa.

En resumen, lo que reduce la resistividad eléctrica neta del concreto, es el mayor volumen de poros en presencia de la fase acuosa. Sin embargo, una mayor porosidad no necesariamente resulta en una menor resistividad eléctrica, ya que esta también depende del grado de saturación dentro del material poroso (fracción líquida) y de la temperatura de medición (variaciones en la cinética de los iones).

2.3.4 Aplicaciones de la Resistividad Eléctrica en la Evaluación de la Porosidad del Concreto

El uso de mediciones de resistividad eléctrica permite estimar la porosidad conectada del concreto de manera rápida y no destructiva. Métodos como la resistividad superficial y la espectroscopia de impedancia electroquímica han demostrado ser herramientas eficaces para evaluar la durabilidad del concreto en campo y laboratorio (Snyder K. A. et al., 2003).

El uso de mediciones de resistividad ha sido validado como una técnica rápida y no destructiva para estimar la porosidad del concreto en diversas aplicaciones:

- Evaluación de la durabilidad: Identificación de zonas con alta permeabilidad y riesgo de corrosión.

- Monitoreo de la hidratación: Seguimiento del desarrollo de la microestructura con el tiempo.
- Estimación rápida de la permeabilidad: Relación indirecta con el coeficiente de difusión de cloruros.
- Estimación del riesgo de corrosión en estructuras de concreto armado.

En conclusión, la resistividad eléctrica del concreto es una propiedad fundamental en la evaluación de su microestructura y durabilidad. Su dependencia con la porosidad conectada permite utilizarla como un indicador indirecto de la permeabilidad del material. La correlación entre ambas propiedades respalda su aplicación en la caracterización rápida y no invasiva del concreto en campo y laboratorio.

2.3.5 Modelos Matemáticos relacionados con la Resistividad Eléctrica y la Resistencia a la Compresión

La correlación entre resistividad eléctrica (ρ) y resistencia a la compresión (f'_c) ha sido estudiada mediante modelos teóricos y empíricos, adaptados para concretos convencionales y modificados con nanopartículas. A continuación, se presentan los modelos que se analizarán en este estudio:

2.3.5.1 Modelo de Regresión Potencial (Power Law). Desarrollado para describir relaciones no lineales en materiales heterogéneos, como concretos y composites.

$$f'_c = a * \rho^b \quad (2.23)$$

donde:

- a : Constante de proporcionalidad, la cual ajusta la escala del modelo y está influenciada por las características del concreto y su proceso de fabricación
- b : Exponente que refleja la sensibilidad, que cuantifica cómo responde la resistencia a la compresión frente a variaciones en la resistividad eléctrica

Captura el crecimiento acelerado de la resistencia con aumentos en la resistividad, asociado a una microestructura más densa y menos porosa.

Como limitación se tiene que, no considera el efecto de variables como edad o %NDMN.

2.3.5.2 Modelo Logarítmico. Utilizado en estudios de durabilidad para correlacionar propiedades eléctricas y mecánicas.

$$f'c = a * \ln(\rho) + b \quad (2.24)$$

donde:

a : Pendiente que indica la tasa de cambio de

b : Término independiente (Intercepto)

Efectivo en rangos medios de resistividad (5000–8000 ohm-cm), pero pierde precisión en valores extremos.

2.3.5.3 Modelo Exponencial Inverso. Adaptado de modelos de relajación dieléctrica, aplicado a concretos por su relación no lineal.

$$f'c = a * e^{\frac{b}{\rho}} \quad (2.25)$$

donde:

a : Resistencia teórica máxima cuando $\rho \rightarrow \infty$

b : Parámetro de escala vinculado a la conectividad de poros.

Mejor ajuste para concretos con alta resistividad (>7,000 ohm-cm).

Refleja cómo la reducción de porosidad aumenta ρ y c simultáneamente.

2.3.5.4 Modelo de Regresión Múltiple. Propuesto para integrar múltiples variables en el diseño de mezclas avanzadas.

$$f'c = a * \ln(\rho) + b * Edad - c * (\%NDMN) - d * (a/c) + e \quad (2.26)$$

donde:

ρ : Resistividad eléctrica (ohm-cm).

Edad : Tiempo de curado (días).
%NDMN : Porcentaje de nanopartículas.
a/c : Relación agua/cemento.

Estudios recientes (Zhang et al., 2021) respaldan su uso en nanoconcretos.

Capítulo III. Caracterización de los materiales componentes del concreto con dióxido de manganeso

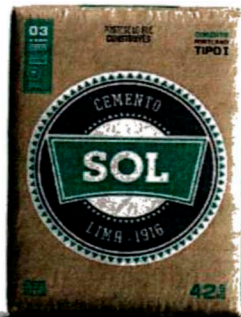
En el presente capítulo se realizará la caracterización de los materiales componentes para la elaboración de nuestras muestras, las cuáles son: cemento, agua, aditivo (reductor de agua), agregado grueso, agregado fino y nanopartículas de dióxido de manganeso.

3.1 Concreto

El cemento que se usó para las mezclas fue Portland de Tipo I de la marca Sol, el cual cumple con los lineamientos de la NTP 334.009 y también de la ASTM C 150. Este tipo de conglomerante hidráulico es utilizado para la producción de concretos para todo tipo de obra y estructuras sin requerimientos especiales de durabilidad.

Figura 4

Cemento Portland Tipo I – Sol.



De forma comercial su circulación se da en bolsas de 42.5 kg recubierto por 3 pliegos de papel que cumplen la función básica de proteger al cemento.

Este tipo de cemento puede ser utilizado en construcciones de gran envergadura cuando no se requieren características especiales. Para la preparación de concretos de cimientos, sobrecimientos, vigas, columnas, techado, producción de prefabricados de concreto, fabricación de morteros para la fabricación de ladrillos, tarrajeos, enchapes de mayólicas, etc.

Tabla 3

Tabla de propiedades físicas y químicas del cemento Sol.

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 ² /kg	323	Mínimo 260
Densidad	g/cm ³	3.13	No específica
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm ²	303	Mínimo 122
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm ²	382	Mínimo 194
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm ²	449	Mínimo 285 (*)
TIEMPO DE FRAGUADO			
Fraguado Vicat inicial	min	129	45 a 375
COMPOSICIÓN QUÍMICA			
MgO	%	2.9	Máximo 6.0
SO ₃	%	2.8	Máximo 3.5
Pérdida al fuego	%	2.2	Máximo 3.5
Residuo insoluble	%	0.9	Máximo 1.5
FASES MINERALÓGICAS			
C2S	%	12	No específica
C3S	%	55	No específica
C3A	%	10	No específica
C4AF	%	10	No específica

(*) Requisito opcional

El cemento Sol tipo I cumple con la normativa ASTM C-150

3.2 Agua

El agua usada fue proveniente de las redes de la Universidad Nacional de Ingeniería, por tal, fue de tipo potable. De acuerdo a la NTP 339.088, en la que se menciona "Agua de mezcla utilizaba en la producción de concreto de cemento Portland", no es necesario que al agua potable se le realicen los ensayos mencionados para definir su conformidad.

Teniendo presente la normativa, se presenta la Tabla 4, en la que se establece los límites máximos permitidos para las sustancias presentes en el agua, asegurando así que no causen ningún efecto adverso en el concreto.

Tabla 4

Límites permisibles del agua de mezcla.

Descripción	Límites permisibles	
Sólidos en suspensión	5000ppm	Máximo
Materia orgánica	3ppm	Máximo
Alcalinidad	1000ppm	Máximo
Sulfatos	600ppm	Máximo
Cloruros	1000ppm	Máximo
PH	5 a 8	-

Fuente: NTP 339.088.2014

3.3 Aditivo

El uso del aditivo en esta investigación, es sustentada teniendo presente las siguientes premisas:

- El uso del agua es requerido únicamente en valores aproximados del 30% del total de una mezcla, toda el agua adicional a usar es para proporcionarle trabajabilidad.
- Todo lo malo en un concreto es debido a la filtración de agua, ocasionando corrosión, ataques de sulfatos, etc.
- El uso de las nanopartículas en una mezcla reduce la trabajabilidad de una mezcla de concreto.

Con base en ello, y considerando que se busca una mezcla con reemplazo parcial del cemento por NDMN que sea trabajable, sin reducirle las propiedades mecánicas, ni dándole paso a que en el futuro cercano sea vulnerable a ataques químicos, se vio por conveniente usar el aditivo reductor de agua.

El aditivo utilizado en la presente investigación se trató de un aditivo reductor de agua, específicamente el R-2020 (Tipo F - Reductor de agua de alto rango a base de nano sílice, clasificación según las normas ASTM C494 y NTP 334.088). El mismo, es un nano aditivo 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 la mezcla permiten que las nanopartículas de sílice se convierten en nanopartículas de cemento.

3.3.1 Características

- Permite reducir el agua de diseño en 15% a 45% según dosis de uso, lo que equivale, por ejemplo, a una disminución de entre 75 g y 225 g de agua por cada kilogramo de cemento en una mezcla con relación $a/c = 0.50$. Esta reducción varía proporcionalmente según la relación a/c de diseño y permite

mejorar la compacidad del concreto sin afectar su trabajabilidad, gracias a la acción dispersante del aditivo.

- Brinda una pérdida lenta de la consistencia sin retardar el proceso de fraguado.
- Permite obtener una mezcla con una mayor consistencia sin alterar la relación a/c.
- Modifica la reología de la mezcla brindando una alta fluidez sin segregación.
- Está libre de cloruros, por ellos no promoverá la corrosión

3.3.2 Dosificación

El R-2020 puede ser utilizado en la mezcla en dosis desde 0.4% a 2% con respecto al peso del cemento, lo recomendable para tener una mejor precisión en la dosificación se debe realizar las tandas de prueba de la mezcla, para tener una dosis optima. El aditivo debe ser diluido en el agua efectiva y adicionarlo a la mezcla durante el proceso de mezclado.

3.3.3 Propiedades Físicas

Este aditivo tiene una apariencia líquida y de un color blanco opalescente, tiene una densidad de 1.1 ± 0.02 g/ml.

3.3.4 Consideraciones de seguridad y protección a la salud

El uso de aditivos químicos en el concreto requiere contemplar criterios de seguridad y salud ocupacional. En el caso del aditivo R-2020, su contenido de nano sílice y otros compuestos activos implica un manejo cuidadoso durante la dosificación y mezclado. Se recomienda el uso de equipo de protección personal (guantes, gafas y mascarilla) para evitar el contacto dérmico o la posible inhalación de partículas.

Si bien el producto se encuentra en fase líquida, las nanopartículas pueden generar efectos adversos en caso de exposición prolongada, especialmente a nivel respiratorio, según lo reportado por organismos como la OECD (2012) y el NIOSH (2011). Por ello, se debe consultar la hoja de seguridad del producto (MSDS) y seguir las recomendaciones

del fabricante respecto al almacenamiento, manipulación y disposición final, en concordancia con la normativa nacional sobre seguridad en el trabajo (NTP ISO 45001:2018).

3.4 Agregados

3.4.1 Propiedades Físicas

Para la correcta realización de la mezcla y la obtención de las propiedades predefinidas en el diseño se determinaron las propiedades físicas del agregado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales – LEM a través de ensayos normalizados, según:

- NTP 400.017 Determinación del peso unitario suelto y peso unitario compactado.
- NTP 400.021 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso.
- NTP 400.021 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino.
- NTP 400.037 Granulometría.
- NTP 339.185 Determinación del contenido de humedad.

Tabla 5

Propiedades físicas del agregado fino y del agregado grueso.

PROPIEDAD	UNIDAD	AGREGADO	PROPIEDAD
Peso Unitario Suelto (PUS)	(kg/m ³)		1392.104
Peso Unitario Compactado (PUC)	(kg/m ³)		1572.209
Peso Específico	(g/cm ³)	2639.17	2717.80
Módulo de Fineza		2.50	6.54
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	plg	# 8	1/2"
% Absorción	%	0.82	1.71
% Humedad	%	1.09	0.832

3.4.2 Granulometría del agregado fino

La arena gruesa utilizada para la mezcla de concreto deberá ser la adecuada y cumplir con estándares normados, por tal, se realizó un análisis granulométrico mediante las normativas que detallan el procedimiento:

- NTP 400.012.2018 Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global

- ASTM C-136. Standard test method for sieve analysis of fine, coarse and global aggregates.

Para tal fin, se separó 600 g de arena de la muestra total, la cual fue llevada al horno a una temperatura de 110° C para ser secada. Siguiendo el procedimiento estandarizado, se tamizó la arena por las mallas: 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y fondo; tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Tamices colocados en tamizador eléctrico UNI-LEM.



Figura 6

Partículas de AF retenidas en los tamices UNI-LEM.



Por último, se pesó lo obtenido en cada malla. La norma ASTM C33 (NTP 400.037.2018), nos brinda los límites granulométricos adecuados para el agregado fino. Los resultados se colocaron en la siguiente tabla, Tabla 6.

Tabla 6

Requisitos de gradación del agregado fino (ASTM C33).

Tamiz	Abertura del Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)	
		Límite Superior Recomendable (ASTM C33)	Límite Inferior Recomendable (ASTM C33)
3/8"	9.50	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	0.60	60.00%	25.00%
N°50	0.30	30.00%	5.00%
N°100	0.15	10.00%	0.00%
Fondo	0.10	0.00%	0.00%

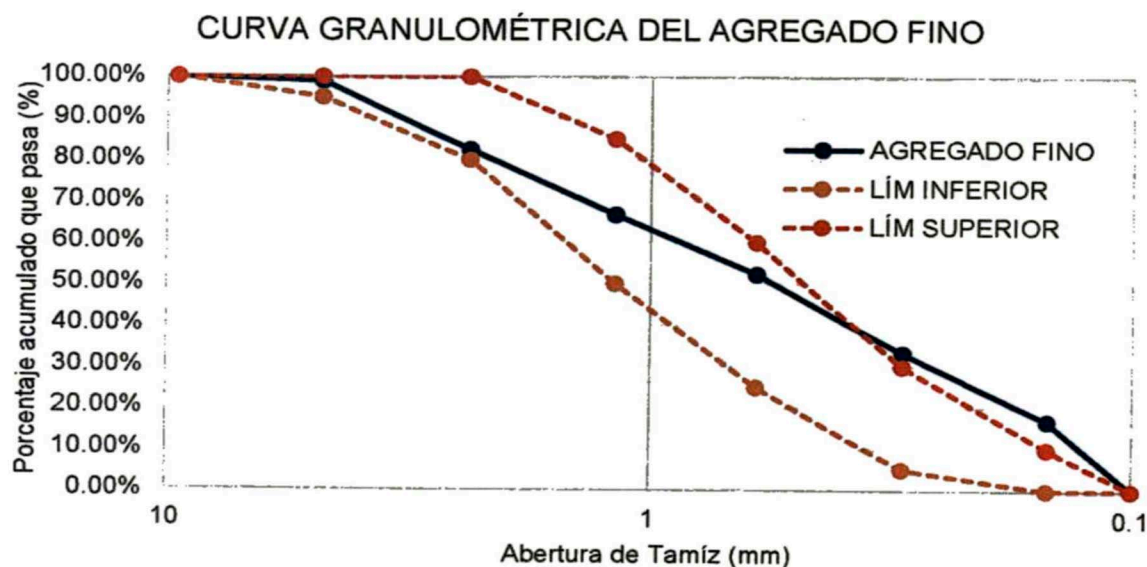
Tabla 7

Tabla de Análisis granulométrico del agregado fino.

GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO					
Tamiz #	Tamaño del Tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	% 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	16.55%	17.61%	82.39%
# 16	1.180	94.07	15.68%	33.29%	66.72%
# 30	0.600	86.37	14.40%	47.68%	52.32%
# 50	0.300	114.27	19.05%	66.73%	33.28%
# 60	0.250		0.00%	66.73%	33.28%
# 80	0.180		0.00%	66.73%	33.28%
# 100	0.150	98.77	16.46%	83.19%	16.81%
# 200	0.075	100.88	16.81%	100.00%	0.00%
FONDO			0.00%		
Σ		600.00	100.00%		

Gráfico 1

Curva granulométrica del agregado fino.



El módulo granulométrico o módulo de finura de la arena se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\sum \%Ret. acumulado(1\ 1/2";\ 3/4";\ 3/8";\ #4;\ #8;\ #16;\ #30;\ #50;\ #100)}{100}$$

$$MF = 2.5$$

3.4.3 Granulometría del agregado grueso

La piedra utilizada para la mezcla de concreto deberá ser la adecuada y cumplir con estándares normados, por tal, se realizó un análisis granulométrico mediante las normativas que detallan el procedimiento:

- NTP 400.012.2018 Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global.
- ASTM C-136. Standard test method for sieve analysis of fine, coarse and global aggregates.

Para tal fin, se separó 10 kg de piedra de la muestra total, la cual fue llevada al horno a una temperatura de 110° C para ser secada. Siguiendo el procedimiento estandarizado, se colocó la muestra en el equipo tamizador GILSON, modelo TS-1F, serie TS1F-AADX, tal como se puede apreciar en la Figura 7.

Figura 7

Muestra colocada en el equipo tamizador UNI-LEM.



Al igual que en el caso de los agregados finos, los agregados gruesos también están sujetos a límites granulométricos establecidos por la norma ASTM C33, con el objetivo de evaluar su calidad. En el contexto de los agregados gruesos, estos límites varían según el tamaño máximo nominal. Es muy importante verificar que los límites seleccionados se ajusten a la curva granulométrica calculada durante los ensayos del agregado, asegurando así su conformidad con las especificaciones normativas.

Teniendo presente todo lo mencionado, se pesó lo obtenido en cada malla y los resultados se colocaron en la Tabla 9.

Tabla 8

Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso o global.

Tamaño Máximo Nominal Abertura mm (pulg)	Cantidad de la Muestra de Ensayo, mínimo kg (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)

19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 1/2)	15 (33)
50 (2)	20 (44)
63 (2 1/2)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3 1/2)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300 (660)

Fuente: NTP 400.012.2013.

Tabla 9

Cuadro de Análisis granulométrico del agregado grueso.

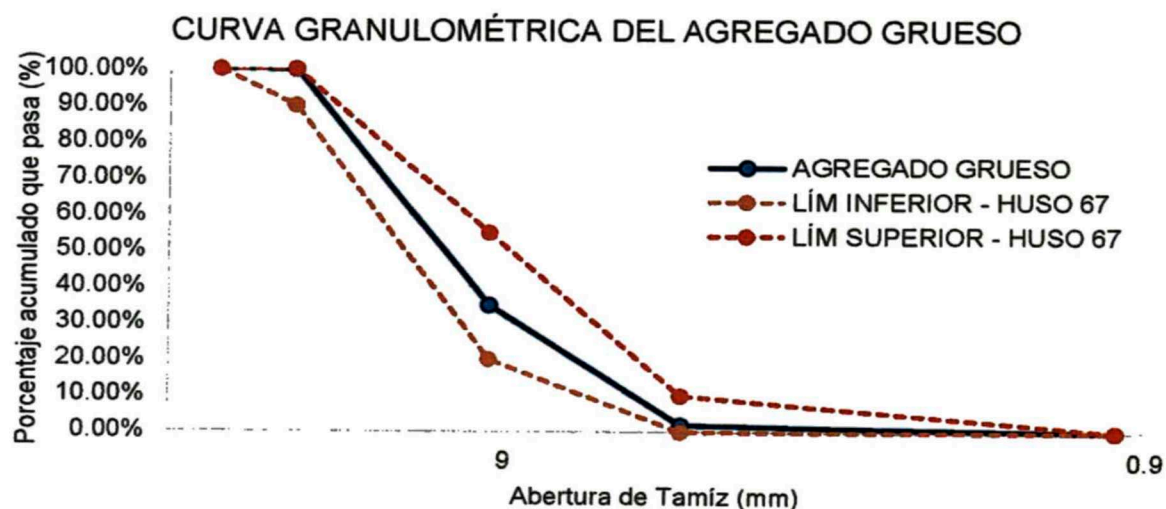
TAMIZ #	TAMAÑO DEL TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO	% PESO RETENIDO	% PESO RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	25.00	0.00	0.00%	0.00%	100.0%
3/4"	19.00	5.10	0.05%	0.05%	99.95%
1/2"	12.50	3610.50	36.11%	36.16%	63.84%
3/8"	9.50	2888.80	28.89%	65.04%	34.96%
N°4	4.75	3303.80	33.04%	98.08%	1.92%
	FONDO	191.80	1.92%		
	Σ	10000.00	100.00%		

En la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado grueso, donde se detallan los porcentajes de retención acumulada en cada tamiz estándar utilizado. Esta información permite evaluar si el material cumple con las especificaciones normativas para su uso en concreto estructural.

Para facilitar la interpretación visual del comportamiento del agregado, en el Gráfico 2 se representa la curva granulométrica correspondiente, la cual permite identificar el tipo de gradación del material y verificar su conformidad con las bandas límites establecidas por la normativa técnica.

Gráfico 2

Curva granulométrica del agregado grueso.



El módulo granulométrico o módulo de finura de la piedra se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\sum \%Ret. acumulado(1\ 1/2";\ 3/4";\ 3/8";\ \#4;\ \#8;\ \#16;\ \#30;\ \#50;\ \#100)}{100}$$

$$MF = 6.54$$

3.5 Nanopartículas de Dióxido de Manganeso

Las nanopartículas de dióxido de manganeso utilizadas en esta investigación fueron obtenidas en estado lodoso, por lo que requirieron un proceso de acondicionamiento para su incorporación en la mezcla de concreto. Este proceso consistió en el secado a baja temperatura, pulverización y tamizado, con el objetivo de obtener un material homogéneo y con tamaño de partícula adecuado.

La caracterización físico-química de las NDMN incluyó la determinación del contenido de humedad, análisis de tamaño de partícula mediante difracción de rayos X (XRD), evaluación de pH en mezclas con cemento, reactividad frente a la matriz cementicia y determinación de la densidad por el método del picnómetro. Estos ensayos permitieron establecer que las partículas tenían un tamaño promedio de 42.4 nm y una alta pureza de MnO_2 .

Dado que estos procedimientos formaron parte de una investigación más amplia desarrollada de manera colaborativa con el financiamiento del IIFIC de la UNI, y ya fueron documentados detalladamente por (Dorival Gutierrez, 2024), en este trabajo se presenta solo una síntesis de los resultados relevantes para el estudio de la porosidad del concreto. Para mayor detalle sobre la caracterización completa de las nanopartículas de dióxido de manganeso, se remite a la tesis referida.

3.5.1 Acondicionamiento de las NDMN

- Filtrado de agua
- Secado, en una mufla, en horno eléctrico a una temperatura de 80°C por 12 horas, hasta obtener una masa totalmente seca.
- La masa obtenida se deja enfriar hasta que pueda ser trabajada, temperatura ambiente.
- La masa es pulverizada mediante un molinillo eléctrico.
- El polvillo obtenido es tamizado en una malla #30 (0.60 mm), con el fin de uniformar y controlar la finura de las partículas ultrafinas de NDMN.

El procedimiento descrito permitió transformar las nanopartículas de dióxido de manganeso desde un estado pastoso, con alta humedad y tendencia a la aglomeración, hasta un polvo seco, homogéneo y de granulometría controlada. En la Figura 8 se observa la muestra original de NDMN en estado lodoso, mientras que en la Figura 9 se presenta el producto final, listo para su incorporación en el diseño de mezcla del concreto.

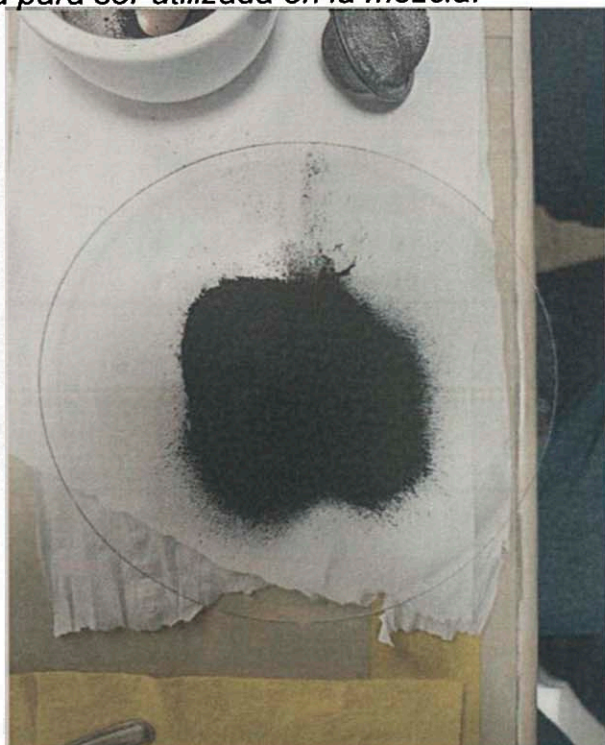
Figura 8

Muestra lodosa inicial de NDMN.



Figura 9

Muestra final de NDMN, lista para ser utilizada en la mezcla.



3.5.2 Determinación de la densidad de las NDMN

La densidad del NDMN, se calculó mediante el ensayo del picnómetro según ASTM D854.

Figura 10

Muestra de NDMA en fiola.



Realizado el ensayo del picnómetro, se obtuvieron los siguientes resultados, y fueron plasmados en la Tabla 10.

Tabla 10

Datos recopilados en el ensayo del picnómetro.

Peso (g)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)
W_p	22.32	33.26	24.77
W_{p+m}	36.02	52.68	43.77
W_{p+a}	68.32	83.01	76.78
W_{p+m+a}	77.98	96.45	89.85

Después de todos los valores obtenidos, reemplazamos en la siguiente fórmula:

$$D_m = \frac{(w_{p+m} - W_n)(D_a)}{(W_{p+a} - W_p) - (W_{p+m+a} - W_{p+m})} \quad (3.1)$$

donde:

D_m : Densidad del mineral

w_{p+m} : Peso del picnómetro más el mineral

W_p : Peso del picnómetro vacío

W_{p+a} : Peso del picnómetro más agua

W_{p+m+a} : Peso del picnómetro más agua más mineral

D_a : Densidad del agua

Obteniendo así:

Tabla 11

Densidad de las NDMN.

Peso (g)	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)
D_m (g/cm ²)	3.39	3.25	3.20
$D_{m\ prom}$ (g/cm ²)		3.28	

Capítulo IV. Diseño de mezclas para concreto con nanopartículas de manganeso con relaciones a/c 0.4, 0.45 y 0.5

Para la realización de la presente tesis, se realizaron tres diseños de mezcla patrón teniendo en cuenta las relaciones a/c 0.4, 0.45 y 0.5. Para cada diseño patrón se reemplazó parcialmente al cemento por dióxido de manganeso anódico (MnO_2) en proporciones del 5% y del 10%, teniendo así, tres diseños de mezcla por cada relación de a/c.

Para el diseño de mezclas, se ha trabajado con el método de Bolomey, el cual permite diseños óptimos a partir de la relación de a/c. Además, permite una mejor comprensión de la porosidad del concreto y su impacto en la durabilidad. Esto es muy beneficioso porque se trabajará con la resistividad eléctrica de los concretos para evaluar la porosidad, y este método es muy beneficioso porque proporciona una forma directa de correlacionar la relación a/c con la estructura de poros.

4.1 Método de Bolomey

PASO 1: SELECCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO

La relación a/c que se buscará cumplir como requerimiento del diseño de mezcla es:

$$\frac{a}{c} = 0.4$$

PASO 2: SELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO

El asentamiento que se buscará cumplir como requerimiento del diseño de mezcla es:

$$Slump = 6"$$

PASO 3: SELECCIÓN DEL TMN

Abertura del menor tamiz que retiene menos del 25% del agregado de mayor tamaño.

$$TMN = 1/2"$$

PASO 4: SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE

El contenido de aire será seleccionado siguiendo la metodología del diseño ACI.

Tabla 12

Contenido de aire atrapado según su TMN.

Estrato Muestra	
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%
4"	0.2%

Fuente: ACI

De la condición de $TMN = 1/2"$, tenemos:

$$Cont. de aire = 2.5\%$$

PASO 5: SELECCIÓN DEL VOLUMEN UNITARIO DE AGUA

Considerando el TMN de 1/2", el slump de 6" y el perfil de agregado triturado se obtendrá la cantidad de agua, independiente de la resistencia requerida.

Tabla 13

Volumen Unitario de Agua diseño para 1 m3 de concreto (l).

Volumen Unitario de Agua								
Agua en l/m3, 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	
%Aire Atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente: ACI

$$Vol. unit. de agua = 228 \frac{l}{m^3}$$

$$Vol. unit. de agua corregido = 228 \frac{l}{m^3}$$

PASO 6: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA PROMEDIO REQUERIDA

A. POR EL MÉTODO DE FULLER

Se tienen las ecuaciones:

$$\frac{a}{c} = \frac{1}{Z} \quad (4.1)$$

$$Z = (K_1 * R_m) + 0.5 \quad (4.2)$$

donde:

K_1 : Factor que depende de la forma del agregado. Generalmente de 0.0030 a 0.0045 para piedra chancada o triturada y de 0.0045 a 0.0070 para canto rodado o piedra redondeada.

R_m : Resistencia promedio requerida

En este caso, por ser el agregado grueso, de perfil triturado, consideramos un factor de forma $K_1 = 0.0045$.

De las condiciones $a/c = 0.4$ y $K_1 = 0.0045$, tenemos que: $Z = 2.5$ y $R_m = f_{cr} = 444.44$ kg/cm²

B. POR EL MÉTODO DE ACI

Considerando las relaciones a/c , definidas para esta investigación por condiciones de durabilidad hallamos f_{cr} , resistencia promedio, utilizando la Tabla 14.

Tabla 14*Relación a/c por resistencia.*

RELACIÓN A/C POR RESISTENCIA		
f'c (kg/cm2)	Relación a/c por peso	
	Concreto sin aire	Concreto con aire
450	0.38	0.31
420	0.41	0.33
350	0.48	0.4
300	0.55	0.46
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: ACI

Del cuadro, por interpolación, para una relación a/c = 0.4

Tabla 15*Interpolación de f'c para una relación a/c=0.4.*

420	0.41
430.00	0.40
450	0.38

Tenemos que: $R_m = f_{cr} = 430.00 \text{ kg/cm}^2$

PASO 7: CALCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO

Para definir el contenido del cemento se tendrá en cuenta los valores obtenidos previamente de volumen unitario de agua y la relación a/c.

$$\text{Peso cemento} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Vol. unit. de agua} \left(\frac{\text{l}}{\text{m}^3} \right)}{\text{relación } \frac{a}{c}} \quad (4.3)$$

$$\text{Peso cemento} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 570$$

Considerando que una bolsa de cemento pesa 42.5 kg, se tiene:

$$\text{Peso cemento} = 13.41 \frac{\text{bolsas}}{\text{m}^3}$$

PASO 8: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CEMENTO COMO AGREGADO

Como se definió previamente, el Método de Bolomey tiene la característica de que considera al cemento como un agregado fino y considera su porcentaje de participación en el agregado global. Para tal porcentaje del cemento, se determina con la siguiente ecuación:

$$t_0(\%) = \frac{C/d_c}{1 - (A + \%Aire)} \quad (4.4)$$

donde:

C (kg/m³) : Peso del cemento por metro cúbico de concreto

A (m³) : Volumen unitario del agua por metro cúbico de concreto

$\%Aire$ (m³) : Porcentaje de aire en la mezcla, calculado anteriormente

d_c (kg/m³) : Peso específico del cemento

t_0 (%) : Porcentaje de participación del cemento en el total de agregado global

1 : Volumen total de los componentes

Teniendo presente los valores: $C = 590$ (kg/m³), $d_c = 3190$ (kg/m³), $A = 0.228$ (m³) y $\%Aire = 0.025$ (m³), obtenemos:

$$t_0(\%) = \frac{0.179}{0.747} = 0.2392 = 23.92 \%$$

PASO 9: DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE BOLOMEY

Para determinar la curva de Bolomey se aplicará la siguiente fórmula:

$$Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4.5)$$

donde:

Y (%) : Porcentaje acumulado que pasa por la malla de abertura "d"

d (mm) : Abertura de la malla en referencia

- D (mm) : Tamaño máximo del agregado total
- A : Coeficiente empírico que depende de la forma del agregado y consistencia del concreto

El coeficiente empírico A se obtiene de la siguiente tabla, Tabla 16

Tabla 16

Valores de coeficiente de A de la curva de Bolomey.

Forma del agregado	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

Por ser, el agregado de forma angular, la consistencia de la mezcla de forma fluida, y por tener un asentamiento de $6'' = 152.4$ mm, el valor de A es igual a 14.

Tabla 17

Granulometría de Bolomey correspondiente al TMN $\frac{1}{2}''$.

TAMAÑO DEL TAMÍZ		TMN	
plg	mm	$\frac{1}{2}''$	$\frac{1}{2}''$
3"	75	222.99	100%
2 $\frac{1}{2}''$	63.5	206.30	100%
2"	50.8	186.00	100%
1 $\frac{1}{2}''$	38.1	162.96	100%
1"	25.4	135.62	100%
$\frac{3}{4}''$	19.05	119.33	100%
$\frac{1}{2}''$	12.7	100.00	100%
$\frac{3}{8}''$	9.525	88.48	88.48%
$\frac{1}{4}''$	6.35	74.81	74.81%
N° 4	4.75	66.59	66.59%
N° 8	2.36	51.07	51.07%
N° 16	1.18	40.21	40.21%
N° 30	0.6	32.69	32.69%
N° 50	0.3	27.22	27.22%
N° 100	0.15	23.35	23.35%
N° 200	0.075	20.61	20.61%

PASO 10: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO Y FINO

La determinación de porcentajes de participación de cada uno de los agregados se obtendrá por el método de fineza, el cual se determina de la forma siguiente:

Se desarrolló un sistema de ecuaciones de forma $n+1$, con igual cantidad de incógnitas $n+1$ de la forma (t_n) , donde queda definido el porcentaje ideal para cada agregado, incluyendo al cemento, el mismo que se presenta de la siguiente forma:

$$t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n = 100\% \quad (4.6)$$

$$MFB_n = \frac{MF_0 * t_0 + MF_1 * t_1 + MF_2 * t_2 + \dots + MF_n * t_n}{t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (4.7)$$

donde:

MF_0	:	Módulo de fineza del cemento, considerando en este método como cero
$MF_1, MF_2, \dots, MF_n$	:	Módulo de fineza de los agregados 1, 2, ..., n
t_0	:	Porcentaje del volumen absoluto del cemento
$t_1, t_2, \dots, t_n$	:	Porcentaje del volumen absoluto de los agregados 1, 2, ..., n
$MFB_a, \dots, MFB_2, \dots, MFB_n$	:	Módulo de fineza de la curva de Bolomey con los tamaños máx. de cada agregado 1, 2, ..., n

En la presente tesis se trabaja únicamente con el agregado fino y el agregado grueso. Partiendo de esta premisa, el sistema de ecuaciones quedaría de la siguiente forma:

$$t_1 = \frac{100(MF_2 + MFB_2) - (t_0 * MF_2)}{MF_2 - MF_1} \quad (4.8)$$

$$t_2 = 100\% - (t_0 + t_1) \quad (4.9)$$

$$t_0 + t_1 + t_2 = 100\%$$

Donde finalmente quedaría definido:

MF_1 y MF_2 : Módulo de fineza de los agregados, fino y grueso, respectivamente

t_0, t_1 y t_2 : Porcentaje de volumen absoluto, del cemento, del agregado fino, y del agregado grueso, respectivamente, como parte del agregado global

MFB_2 : Módulo de fineza de la curva de Bolomey con el TM del agregado grueso

Para poder usar las ecuaciones es necesario determinar los valores de las variables, para tal fin, en primer lugar, es necesario conocer el módulo de fineza de la curva de Bolomey obtenida a partir del $TM = 1/2"$, que se obtiene cuando se resta el % de pasante al 100%, y sumando los resultados:

Tabla 18

Módulo de fineza de la curva de Bolomey MFB_2 para un TMN de $1/2"$.

TAMAÑO DEL TAMÍZ		TMN		MFB2 (%)
plg	mm	1/2"	1/2" (%)	
3"	75	222.99	100%	0.00
2 1/2"	63.5	206.30	100%	0.00
2"	50.8	186.00	100%	0.00
1 1/2"	38.1	162.96	100%	0.00
1"	25.4	135.62	100%	0.00
3/4"	19.05	119.33	100%	0.00
1/2"	12.7	100.00	100%	0.00
3/8"	9.525	88.48	88.48%	11.52
1/4"	6.35	74.81	74.81%	25.19
N° 4	4.75	66.59	66.59%	33.41
N° 8	2.36	51.07	51.07%	48.93
N° 16	1.18	40.21	40.21%	59.79
N° 30	0.6	32.69	32.69%	67.31
N° 50	0.3	27.22	27.22%	72.78
N° 100	0.15	23.35	23.35%	76.65
N° 200	0.075	20.61	20.61%	79.39
MÓDULO DE FINEZA				474.96

Con tal valor calculado, y valores ya conocidos, podemos dar uso a las ecuaciones planteadas previamente, obteniendo así, el siguiente proporcionamiento del agregado fino (t_1) y del agregado grueso (t_2):

$$MFB_2 = 4.75, \quad MF_1 = 2.5, \quad MF_2 = 6.54, \quad t_0 = 0.24$$

$$t_1 = 0.4387$$

$$t_2 = 0.3221$$

Tabla 19

Proporcionamiento de los agregados por el Método de Módulo de Fineza de Bolomey – Diseño de mezcla para relación a/c = 0.4.

TAMAÑO DEL TAMÍZ		% Pasante Promedio		% Proporcionamiento			Curva Resultante	Bolomey
plg	mm	A.F.	A.G.	Cemento	A.F. (t1)	A.G. (t2)		
		%	%	23.92%	43.87%	32.21%	100.00%	%
3"	75	100.00%	100.00%	23.92%	43.87%	32.21%	100.00%	100.00%
2 1/2"	63.5	100.00%	100.00%	23.92%	43.87%	32.21%	100.00%	100.00%
2"	50.8	100.00%	100.00%	23.92%	43.87%	32.21%	100.00%	100.00%
1 1/2"	38.1	100.00%	100.00%	23.92%	43.87%	32.21%	100.00%	100.00%
1"	25.4	100.00%	100.00%	23.92%	43.87%	32.21%	100.00%	100.00%
3/4"	19.05	100.00%	99.95%	23.92%	43.87%	32.19%	99.98%	100.00%
1/2"	12.7	100.00%	63.84%	23.92%	43.87%	20.56%	88.35%	100.00%
3/8"	9.525	100.00%	34.96%	23.92%	43.87%	11.26%	79.05%	88.48%
1/4"	6.35	100.00%	34.96%	23.92%	43.87%	11.26%	79.05%	74.81%
N° 4	4.75	98.94%	1.92%	23.92%	43.40%	0.62%	67.94%	66.59%
N° 8	2.36	82.39%	1.92%	23.92%	36.15%	0.62%	60.68%	51.07%
N° 16	1.18	66.72%	1.92%	23.92%	29.27%	0.62%	53.81%	40.21%
N° 30	0.6	52.32%	1.92%	23.92%	22.95%	0.62%	47.49%	32.69%
N° 50	0.3	33.28%	1.92%	23.92%	14.60%	0.62%	39.13	27.22%
N° 100	0.15	16.81%	1.92%	23.92%	7.38%	0.62%	31.91%	23.35%
N° 200	0.075	0.00%	0.00%	23.92%	0.00%	0.00%	23.92%	20.61%

PASO 11: DETERMINACIÓN DE VOLÚMENES ABSOLUTOS (AGUA Y AIRE)

Debido a que los pesos específicos del agua y del aire, ambos en kg, son conocidos, es posible calcular el volumen de cada uno:

$$Vol. de aire (m^3) = \frac{\% Aire}{100} \quad (4.10)$$

$$Vol. de agua (m3) = \frac{Peso\ unit.\ del\ agua\ (\frac{l}{m3})}{Peso\ especif.\ del\ agua\ (\frac{l}{m3})} \quad (4.11)$$

El volumen absoluto de los componentes del concreto queda definido con la suma de los volúmenes de cada uno de los componentes.

Usando las ecuaciones (4.10) y (4.11), se obtiene:

$$Vol. de aire (m3) = 0.0250$$

$$Vol. de agua (m3) = 0.2280$$

$$Vol. abs. (agua y aire) = 0.2530\ m3$$

PASO 12: DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS AGREGADOS

El volumen absoluto de todos los componentes del concreto es conocido, e igual a 1m3. Partiendo de esta premisa, se puede obtener el volumen del agregado global.

$$Vol. abs. de agregado global = 1 - Vol. abs. (agua y aire) \quad (4.12)$$

$$Vol. abs. de agregado global = 0.7470\ m3$$

PASO 13: DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS AGREGADOS (INCLUIDO EL CEMENTO)

Conociendo los porcentajes de participación y el volumen absoluto del agregado global es posible determinar el volumen absoluto de cada agregado, incluyendo al cemento, de la siguiente forma:

$$Vol. cemento (m3) = \frac{t_0}{100} * Vol. de agregado global (m3) \quad (4.13)$$

$$Vol. A. F. (m3) = \frac{t_1}{100} * Vol. de agregado global (m3) \quad (4.14)$$

$$Vol. A. G. (m3) = \frac{t_2}{100} * Vol. de agregado global (m3) \quad (4.15)$$

Reemplazando los datos ya conocidos, $t_0 = 0.24$, $t_1 = 0.4387$, $t_2 = 0.3221$, $Vol. abs. de agregado global = 0.7470\ m3$, en las ecuaciones (4.13), (4.14) y (4.15), obtenemos:

$$Vol. cemento = 0.1787\ m3$$

$$Vol. A. F. = 0.3277\ m3$$

$$Vol. A. G. = 0.2406 m^3$$

PASO 14: DETERMINACIÓN DE PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

Para tal propósito es suficiente con multiplicar los volúmenes de cada uno de los agregados por sus respectivos pesos específicos.

$$Cemento (kg/m^3) = Vol. cemento (m^3) * Peso Específ. Cemento \quad (4.16)$$

$$W_{seco} A. F. (kg/m^3) = Vol. A. F. (m^3) * Peso Específ. A. F. \quad (4.17)$$

$$W_{seco} A. G. (kg/m^3) = Vol. A. G. (m^3) * Peso Específ. A. G. \quad (4.18)$$

Quedando así:

$$Cemento = 570.00 \frac{kg}{m^3}$$

$$W_{seco} A. F. = 864.91 \frac{kg}{m^3}$$

$$W_{seco} A. G. = 653.89 \frac{kg}{m^3}$$

PASO 15: AJUSTE POR HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

El ajuste es realizado por humedad y absorción de los agregados, obteniendo así:

Tabla 20

Ajuste por humedad diseño a/c=0.40.

COMPONENTE	DISEÑO SECO		DISEÑO CORREGIDO	
	PESO	VOLUMEN	PESO	VOLUMEN
	kg/m ³	m ³	kg/m ³	m ³
Aire	-	0.0250	-	0.0250
Agua	228.00	0.2280	219.90	0.2280
Cemento	570.00	0.1787	570.00	0.1787
A.F.	864.91	0.3277	874.34	0.3280
A.G.	653.89	0.2406	659.33	0.2410
TOTAL	2316.8	1.0000	2323.57	1.0007

Obtenido el diseño patrón de nuestra mezcla de concreto, para una relación a/c = 0.4, se procedió a realizar las pruebas respectivas de mezclado de concreto en el laboratorio de ensayo de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, LEM – FIC. En tal mezclado, se decidió utilizar aditivo superplastificante reductor de agua, de la marca (R-

2020), el cual permite darle mayor trabajabilidad a la mezcla de concreto, y cumplir con el Slump = 6", pues también se mezclará concretos con reemplazos parciales de cemento por MnO2 anódico.

Después de aplicar el mismo procedimiento para cada uno de los diseños de mezcla, considerando el uso del aditivo superplastificante y el reemplazo parcial de cemento por las NDMN, se presenta las siguientes tablas resumen usados en la elaboración de las probetas de concreto.

Tabla 21

Dosificación con Adición de NDMA a/c=0.40.

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.40				
1.2% DE ADITIVO, 10% DE REDUCCIÓN DE AGUA, % MnO2				
COMPONENTES	SECO (kg/m3)	VOLUMEN (m3)	HUMEDO (kg/m3)	VOLUMEN (m3)
Cemento	551.54	0.176	551.54	0.176
5% MnO2	27.58	0.008	27.58	0.008
10% MnO2	55.15	0.017	55.15	0.017
Agua	228.00	0.228	219.84	0.220
Piedra	660.50	0.243	666.00	0.245
Arena	865.02	0.328	874.45	0.331
Aire		0.025		0.025
Aditivo	6.62	0.006	6.62	0.006

Tabla 22

Dosificación con Adición de NDMA a/c=0.45.

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.45				
1.1% DE ADITIVO, 10% DE REDUCCIÓN DE AGUA, % MnO2				
COMPONENTES	SECO (kg/m3)	VOLUMEN (m3)	HUMEDO (kg/m3)	VOLUMEN (m3)
Cemento	490.26	0.157	490.26	0.157
5% MnO2	24.51	0.007	24.51	0.007
10% MnO2	49.03	0.015	49.03	0.015
Agua	228.00	0.228	219.37	0.219
Piedra	712.85	0.262	718.78	0.264
Arena	865.85	0.328	875.29	0.332
Aire		0.025		0.025
Aditivo	5.39	0.005	5.39	0.005

Tabla 23

Dosificación con Adición de NDMA a/c=0.5.

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.50				
1.0% DE ADITIVO, 9% DE REDUCCIÓN DE AGUA, % MnO2				
COMPONENTES	SECO (kg/m3)	VOLUMEN (m3)	HUMEDO (kg/m3)	VOLUMEN (m3)
Cemento	441.23	0.141	441.23	0.141
5% MnO2	22.06	0.007	22.06	0.007
10% MnO2	44.12	0.013	44.12	0.013
Agua	228.00	0.228	219.00	0.219
Piedra	754.73	0.278	761.01	0.280
Arena	866.52	0.328	875.97	0.332
Aire		0.025		0.025
Aditivo	4.41	0.004	4.41	0.004

En resumen, se presentan las dosificaciones de las mezclas de concreto para 1 m3 de concreto:

Tabla 24

Dosificaciones de las mezclas de concreto para 1 m3 de concreto.

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA (kg/m3)									
DESCRIPCIÓN	NORMAL			ADITIVO			NDMN		
a/c	0.4	0.45	0.5	0.4	0.45	0.5	0.4	0.45	0.5
Cemento	551.54	490.26	441.23	551.54	490.26	441.23	551.54	490.26	441.23
5% MnO2							27.58	24.51	22.06
10% MnO2							55.15	49.03	44.12
Agua	219.84	219.37	219	219.84	219.37	219	219.84	219.37	219
Piedra	666	718.78	761.01	666	718.78	761.01	666	718.78	761.01
Arena	874.45	875.29	875.97	874.45	875.29	875.97	874.45	875.29	875.97
Aire									
Aditivo				6.62	5.39	4.41	6.62	5.39	4.41

Capítulo V. Medición de la resistividad eléctrica, la porosidad y otras propiedades del concreto

5.1 Medición de la Resistividad Eléctrica

En la presente investigación se empleó el Método Directo, método de dos electrodos, para la medición de la resistividad eléctrica del concreto. Este método resulta técnicamente más adecuado cuando se trabaja con probetas cilíndricas de laboratorio, ya que permite que la corriente atraviese de manera completa el volumen del material, proporcionando una medición representativa de su comportamiento interno.

A diferencia del Método de Wenner, ampliamente utilizado en estructuras reales, el cual se basa en la propagación superficial del campo eléctrico y está condicionado por supuestos de geometría semi-infinita, el Método Directo evalúa la resistividad en función del flujo eléctrico que atraviesa el espesor total de la muestra. Esta característica lo convierte en una opción más precisa para analizar propiedades volumétricas como la porosidad, variable central en esta tesis.

La resistividad eléctrica (ρ) se calculó con base en la ley de Ohm aplicada al volumen del espécimen, mediante la expresión $\rho = R \cdot L/A$, donde R es la resistencia eléctrica medida, A el área transversal y L la altura de la probeta. Esta relación solo es válida cuando el paso de corriente se da de forma uniforme a través del cuerpo de la muestra, lo cual se garantiza con la configuración de dos electrodos.

Además, diversos estudios (Whiting & Nagi, 2003; Andrade et al., 2005) han señalado que el método de Wenner puede subestimar la resistividad cuando se aplica en probetas pequeñas, debido a efectos de borde, penetración limitada del campo eléctrico y no uniformidad en su distribución. Por ello, el uso del Método Directo responde a una elección fundamentada en la correspondencia física entre el fenómeno medido y la geometría del espécimen.

Para asegurar lecturas confiables, se prepararon superficies opuestas planas y paralelas, se empleó esponjas saturadas de agua conductoras entre los electrodos y el

concreto, y se mantuvieron condiciones estables de humedad y temperatura durante cada medición.

Para determinar el instrumento más adecuado para medir la resistividad eléctrica del concreto en muestras cilíndricas se evaluaron cinco equipos diferentes tal como se puede apreciar en la Figura 11:

- Profesional Insulation Tester Prasek PR-512
- Multímetro electrónico digital Fluke
- Megger MIT1025 Insulation Tester
- Megger DLRO10HD (Digital low resistance ohmmeter)
- Portable Wheatstone Bridge Type 2755

Figura 11

Equipos utilizados para medir la resistencia eléctrica de las probetas de concreto (etapa de pruebas).



Cada uno de estos equipos fue analizado en función de su precisión, principio de funcionamiento, facilidad de uso y adecuación para mediciones en materiales cementicios. Tras realizar una serie de pruebas comparativas y analizar los resultados obtenidos, se concluyó que el equipo más apropiado para este tipo de medición es el Puente de Wheatstone Portátil, modelo Type 2755, equipo que se puede apreciar en la Figura 12. Este instrumento opera bajo el principio clásico del puente de Wheatstone, lo que permite

una medición precisa de la resistencia eléctrica en materiales con baja conductividad, como el concreto. A diferencia de otros dispositivos evaluados, el modelo Type 2755 mostró una mejor estabilidad en las lecturas, mínima interferencia de ruido externo y alta repetibilidad de resultados, lo que permitió mejorar la confiabilidad de las mediciones realizadas bajo la configuración de dos electrodos. Además, su configuración permite adaptarse con mayor facilidad a las geometrías y características físicas de las muestras cilíndricas utilizadas en el estudio.

Figura 12

Portable Wheatstone bridge type 2755.



Las probetas utilizadas en este estudio fueron elaboradas en moldes cilíndricos de dimensiones estándar de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. No obstante, para asegurar una correcta medición de la resistividad eléctrica, fue necesario acondicionarlas mediante un proceso de refilado, a fin de obtener superficies planas y paralelas. Esta intervención permitió reducir impurezas superficiales y mejorar el contacto eléctrico entre las probetas y las placas del equipo, aunque implicó una ligera modificación en sus dimensiones originales.

En total, se analizaron 27 probetas, correspondientes a tres unidades por cada uno de los nueve diseños de mezcla evaluados. Todas las probetas fueron curadas en agua

conforme a lo establecido en la norma ASTM C31 / NTP 339.033, dentro de una poza de curado a temperatura controlada durante un período de 65 días.

Para la realización de las mediciones de resistividad eléctrica, las probetas eran extraídas de la poza de forma interdiaria, únicamente durante el tiempo necesario para ejecutar el procedimiento, tras lo cual se devolvían inmediatamente a su medio de curado.

Figura 13

Probetas de concreto en la poza de curado.



El procedimiento seguido para ensayar las probetas de concreto y obtener los valores de resistividad eléctrica mediante el Método Directo se llevó a cabo conforme a lo establecido en la Norma Técnica Mexicana NMX-C-514-ONNCCE--2019. A continuación, se detalla la metodología aplicada:

PASO 1: PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

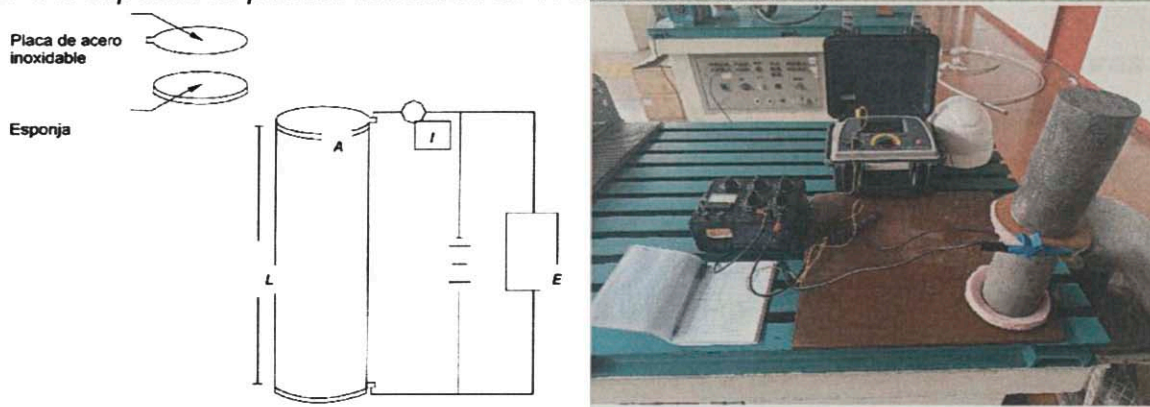
- Los especímenes de concreto no deben incluir acero de refuerzo, y la superficie no debe presentar carbonatación.
- Las bases deben ser paralelas entre sí, sin oquedades ni discontinuidades.
- Las medidas del diámetro y la longitud de los especímenes deberán ser medidas con una aproximación de 1mm.
- Los especímenes deberán estar sumergidos en agua con el fin de saturarlas antes de la medición.

PASO 2: MONTAJE DEL ESPÉCIMEN PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD

Después de la preparación del espécimen se procede al montaje en forma vertical sobre una superficie no conductora de electricidad, plana y horizontal, tal y como se muestra en la siguiente figura, Figura 14.

Figura 14

Montaje del espécimen para la medición de resistividad eléctrica.



El procedimiento que se describe, en la Norma Técnica Mexicana, menciona:

- Colocar en las bases del espécimen esponjas húmedas presionadas con placas de acero inoxidable o cobre, que cubran al menos el área transversal del espécimen; colocar un peso sobre la superficie superior para fijar el arreglo y garantizar el contacto eléctrico.
- Realizar la conexión del equipo con las placas de cobre o acero inoxidable de los extremos.
- Operar el resistómetro de acuerdo al manual del proveedor y seguir las instrucciones para la aplicación de corriente (I), tomando lecturas de los datos o registro del voltaje (E); realizar esta operación por lo menos en tres ocasiones para corroborar los resultados.

La resistencia eléctrica (R_e) estará dada por la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{E}{I} \quad (5.1)$$

donde:

- R_e : Resistencia eléctrica, ohm
- E : Tensión o diferencia de potencial eléctrico, volt
- I : Corriente aplicada, amperio

Para obtener el valor de la resistividad eléctrica (ρ) se debe multiplicar la resistencia eléctrica por un factor de constante de celda (k), la cual es la relación entre el área de sección transversal (A) del espécimen y la longitud (L) del mismo.

$$k = \left[\frac{A}{L} \right] \quad \rho = R_e k \quad (5.2)$$

- ρ : Resistividad eléctrica, en ohm-cm u ohm-m
- R_e : Resistencia eléctrica, ohm
- k : Constante de celda en cm o m
- A : Área de la sección transversal del espécimen, en cm² o m²
- L : Longitud del espécimen, en cm o m

Teniendo todo presente lo mencionado, en las siguientes tres tablas se muestran las Resistividades Eléctricas del concreto obtenidas a lo largo de 65 días para las muestras de concreto con relaciones $a/c = 0.4, 0.45$ y 0.5 con sus respectivos reemplazos parciales de cemento por 0%, 5% y 10% de NDMN.

Tabla 25

Valores de Resistividad Eléctrica (ohm-cm) para una relación $a/c=0.4$.

a/c		0.4		
%NDMN	0%	5%	10%	
Día 1	2274.1	2940.8	3689.8	
Día 3	2741.6	3236.3	3918.9	
Día 5	3047.9	3577.2	4263.8	
Día 7	3308.2	3905.0	4595.8	
Día 9	3923.9	4305.1	4634.6	
Día 11	4293.4	4500.0	4664.1	
Día 13	4606.1	4658.7	4700.1	
Día 15	4917.7	4815.0	5252.3	
Día 17	5234.2	4971.2	5513.5	

Día 19	5532.7	5401.0	5774.7
Día 21	5811.9	5604.9	6099.0
Día 23	6087.5	5805.1	6465.8
Día 25	6369.6	6802.9	6836.5
Día 27	6642.9	7123.0	7232.9
Día 29	6483.2	7270.2	7317.8
Día 31	6538.9	7175.9	7441.4
Día 33	6402.6	7425.1	7555.9
Día 35	6554.4	7303.6	7674.3
Día 37	6970.7	7607.0	7790.1
Día 39	7157.2	7913.0	7909.8
Día 41	7343.4	8215.0	8028.2
Día 43	7531.0	8518.3	8084.9
Día 45	7716.9	8821.8	8140.2
Día 47	7928.9	8838.7	8198.1
Día 49	8167.2	8858.1	8250.9
Día 51	8396.0	8872.4	8310.1
Día 53	8632.8	8893.1	8362.9
Día 55	8866.1	8907.4	8419.5
Día 57	9105.0	8925.4	8719.4
Día 59	9338.0	8942.2	9234.1
Día 61	10180.3	8956.4	9584.2
Día 63	10456.4	9495.5	9882.8
Día 65	10304.9	10078.8	10118.3
Día 67	10871.5	10380.9	10189.1
Día 69	10773.7	10397.8	10095.1
Día 71	10675.4	10430.1	10003.7
Día 73	10854.8	10466.2	10038.5
Día 75	11022.8	10506.3	10074.6
Día 77	11036.9	10609.5	10126.1
Día 79	10867.0	10721.8	10114.5
Día 81	10671.0	10839.2	10147.9

Tabla 26

Valores de Resistividad Eléctrica (ohm-cm) para una relación a/c=0.45.

a/c	0.45		
%NDMN	0%	5%	10%
Día 1	3030.2	4164.1	2824.6
Día 3	3739.7	4453.4	4098.3
Día 5	4448.6	4766.4	4398.5
Día 7	5139.3	5061.0	4677.1

Día 9	5595.7	5350.6	4976.6
Día 11	5765.9	5645.1	5264.2
Día 13	5853.6	5936.2	5558.2
Día 15	6040.6	6156.7	5690.9
Día 17	6053.7	6308.7	5823.1
Día 19	6626.5	6461.7	5955.2
Día 21	6808.5	6619.0	6081.1
Día 23	6991.6	6771.1	6215.1
Día 25	7170.9	6920.3	6350.7
Día 27	7353.9	7072.1	6484.2
Día 29	7492.8	7498.1	6911.1
Día 31	7630.1	7748.4	6866.2
Día 33	7771.3	7960.3	7339.0
Día 35	7927.0	8564.0	7636.7
Día 37	8046.1	8585.9	7933.2
Día 39	8184.8	8606.9	8088.4
Día 41	8324.8	8741.9	8098.6
Día 43	8770.8	8869.3	8114.3
Día 45	9084.7	8893.8	8100.6
Día 47	9093.8	8808.0	8084.7
Día 49	9095.1	8719.7	8094.5
Día 51	9109.3	8687.4	8093.0
Día 53	9117.0	8927.7	8083.4
Día 55	9123.3	8983.3	8104.8
Día 57	9141.6	9017.1	8116.3
Día 59	9246.2	8956.4	8093.1
Día 61	9356.6	9062.6	8097.3
Día 63	9466.5	9095.1	8116.9
Día 65	9579.1	9174.4	8096.5

Tabla 27

Valores de Resistividad Eléctrica (ohm-cm) para una relación a/c=0.5.

a/c	0.5		
%NDMN	0%	5%	10%
Día 1	3164.0	3057.4	3150.1
Día 3	3813.2	3627.5	3603.9
Día 5	4465.2	3934.5	3991.1
Día 7	5299.7	4123.1	4372.8
Día 9	5772.2	4307.8	4769.0
Día 11	5753.2	4496.3	5153.3
Día 13	5799.5	4687.4	5400.6

Día 15	5877.6	4864.5	5501.3
Día 17	6342.2	5024.7	5613.7
Día 19	6432.8	5179.9	5718.2
Día 21	6524.2	5337.5	5824.2
Día 23	6620.3	5497.9	5927.5
Día 25	6721.7	5653.0	6035.9
Día 27	6818.2	5807.0	6330.3
Día 29	6975.5	6282.9	6381.2
Día 31	7131.0	6503.6	6424.3
Día 33	7293.3	6469.7	6907.0
Día 35	7448.9	6712.4	7032.3
Día 37	7604.6	6859.8	7165.9
Día 39	7768.3	6999.6	7256.0
Día 41	7918.7	7059.7	7338.3
Día 43	8070.4	7116.1	7377.6
Día 45	8096.2	7185.4	7370.8
Día 47	8817.5	7266.3	7356.4
Día 49	9094.5	7349.5	7475.5
Día 51	8948.3	7367.4	7501.6
Día 53	8896.9	7377.7	7548.9
Día 55	8940.7	7422.6	7580.7
Día 57	8920.7	7407.2	7616.4
Día 59	8944.7	7425.1	7639.9
Día 61	8900.8	7435.4	7694.8
Día 63	8912.8	7458.5	7856.6
Día 65	8923.3	7480.3	7809.3

5.2 Medición de la Porosidad

Para la medición de la porosidad se utilizaron muestras de concreto con dimensiones estándar de 10 cm × 20 cm. No obstante, con el fin de facilitar el procedimiento, dichas muestras fueron seccionadas, obteniéndose porciones de 10 cm × 5 cm. De cada probeta original se extrajeron dos secciones, manteniendo las características representativas del material para asegurar la validez de los resultados.

Para las mediciones de porosidad, se requirió un total de 54 probetas, equivalentes a 2 probetas de tamaño estándar por cada diseño de mezcla. Estas fueron almacenadas en condiciones de curado en una poza de curado durante 56 días. Posteriormente, se

extrajeran a los 14, 28 y 56 días para realizar las mediciones de porosidad correspondientes.

Para el desarrollo de esta tesis, se siguieron los lineamientos de normas técnicas estandarizadas: ASTM C642 y NTP 339.187, las cuales especifican el siguiente procedimiento:

- **Peso seco:** Pesar las porciones, y secar en un horno a una temperatura de 100 °C a 110 °C, por no menos de 24 horas. Sacar los especímenes y dejarlos enfriar al aire (de preferencia en un desecador) a una temperatura de 20 °C a 25 °C y pesar. Si el espécimen estaba comparativamente seco cuando se realizó la primera pesada y el segundo peso está muy cercano con el primero, considérela seco. Si el espécimen estaba húmedo cuando se realizó la primera pesada, colóquelo en el horno para un segundo tratamiento de secado por 24 horas y volver a pesar. Si la tercera pesada verifica a la segunda, considérela seco. En caso de cualquier duda, volver a secar el espécimen por un periodo de 24 horas, hasta verificar los pesos obtenidos. Si la diferencia de valores obtenidos entre dos pesadas sucesivas excede en 0.5% del menor valor, retornar los especímenes al horno por un período adicional de 24 horas de secado, y repetir el procedimiento hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas cualesquiera, sea menor que 0.5% del menor peso obtenido. Designar a este último valor como A.
- **Peso saturado después de la inmersión:** Después de secar y enfriar totalmente el espécimen, sumergirlo y determinar su peso en agua aproximadamente a 21 °C, por no menos de 48 horas y hasta que dos pesadas sucesivas de la muestra con superficie seca a intervalos de 24 horas, muestre un incremento en peso de menos de 0.5% del mayor valor.

Secar superficialmente el espécimen removiendo la humedad superficial con una toalla, y pesar. Designar a este peso final superficialmente seco después de la inmersión, como B.

- **Peso saturado después del hervido:** Colocar el espécimen procesado en un contenedor adecuado, cubrirlo con agua corriente o potable y hervir por 5 horas. Dejar enfriar por pérdida natural de calor por no menos de 14 horas y a una temperatura final de 20 °C a 25 °C. Remover la humedad superficial con una toalla y pesar el espécimen. Designar el peso saturado, hervido, superficialmente seco, como C.
- **Peso aparente sumergido:** Después de la inmersión y el hervido, suspender el espécimen con un alambre y pesarlo en el agua. Designar a este peso aparente como D.

Para los cálculos necesarios se usan los pesos determinados de acuerdo a los procedimientos descritos anteriormente, las fórmulas utilizadas son las siguientes:

$$\text{Absorción después de la inmersión, \%} = [(B-A)/A] \times 100 \quad (5.3)$$

$$\text{Absorción después de la inmersión y hervido, \%} = [(C-A)/A] \times 100 \quad (5.4)$$

$$\text{Densidad seca} = [A/(C-D)] \rho = g_1 \quad (5.5)$$

$$\text{Densidad después de la inmersión} = [B/(C-D)] \rho \quad (5.6)$$

$$\text{Densidad después de la inmersión y hervido} = [C/(C-D)] \rho \quad (5.7)$$

$$\text{Densidad aparente} = [A/(A-D)] \rho = g_2 \quad (5.8)$$

$$\text{Volumen de poros permeables (vacíos), \%} = (g_2 - g_1)/g_2 \times 100$$

$$\text{ó } (C-A)/(C-D) \times 100 \quad (5.9)$$

donde:

A : Masa de la muestra seca, g

B : Masa de la muestra saturada superficialmente seca, después de la inmersión, g

- C : Masa de la muestra superficialmente seca, después de la inmersión y hervido, g
- D : Masa aparente de la muestra en agua, después de la inmersión y hervido, g
- g_1 : Densidad seca, Mg/m³
- g_2 : Densidad aparente, Mg/m³
- P : Densidad del agua = 1Mg/m³ = 1g/cm³

Figura 15

Muestra de concreto hirviendo.



Figura 16

Muestra de concreto sumergida en agua.



A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de porosidad de las probetas para los distintos diseños de mezcla con relaciones a/c = 0.4, 0.45 y 0.5 con sus respectivos reemplazos parciales de 0%, 5% y 10%.

Tabla 28

Mediciones de Porosidad (% de vacíos) vs a/c con distinto %NDMN, medida a los 14, 28 y 56 días.

a/c	% NDMN	Porosidad (% de vacíos)		
		Edades		
		Día 14	Día 28	Día 56
0.4	0%	14.9%	14.2%	13.5%
	5%	14.7%	14.1%	13.4%
	10%	14.7%	14.1%	13.3%
0.45	0%	14.2%	13.8%	13.2%
	5%	14.5%	14.1%	13.5%
	10%	14.9%	14.6%	13.8%
0.5	0%	14.5%	14.0%	13.3%
	5%	15.3%	14.9%	14.3%
	10%	16.1%	15.8%	15.2%

5.3 Medición de la Resistencia a la Compresión

Para su medición se contaron con muestras de concreto cuya dimensión estándar fue de 10cm x 20cm.

Las probetas que se necesitaron para obtener las mediciones de resistencia a la compresión fueron un total de 135, 3 probetas de tamaño estándar por cada diseño de mezcla para poder obtener un promedio representativo, de la siguiente forma:

$$f'_{c,prom} = \frac{f'_{c,1} + f'_{c,2} + f'_{c,3}}{3} \quad (5.10)$$

donde:

$f'_{c,prom}$: Resistencia a la compresión promedio de 3 probetas

$f'_{c,1}; f'_{c,2}; f'_{c,3}$: Resistencias a la compresión individuales de las 3 probetas

Las probetas se curaron de manera controlada en la poza de curado durante 90 días. Se extrajeron muestras a los 7, 14, 28, 56 y 90 días para realizar los ensayos de resistencia a la compresión.

Para este estudio, se siguieron los lineamientos de las normas técnicas estandarizadas ASTM C39 y NTP 339.034.

En la siguiente tabla se presentan los valores promedio de resistencia a la compresión (kg/cm²) obtenidos para los diferentes diseños de mezcla.

Tabla 29

Valores de Resistencia a la Compresión para una relación a/c = 0.4, medidos a los 7, 14, 28, 56 y 90 días.

Diseño de Mezcla	Edad de curado (# días)				
	7	14	28	56	90
Patrón	595.7	621.6	645.0	683.1	734.4
5% NDMA	596.8	636.1	648.1	701.8	766.4
10% NDMA	622.4	664.5	724.4	761.3	777.2

Tabla 30

Valores de Resistencia a la Compresión para una relación a/c = 0.45, medidos a los 7, 14, 28, 56 y 90 días.

Diseño de Mezcla	Edad de curado (# días)				
	7	14	28	56	90
Patrón	521.3	529.2	628.6	651.3	658.3
5% NDMA	506.2	539.2	582.5	619.2	631.1
10% NDMA	462.6	507.4	533.5	600.6	617.6

Tabla 31

Valores de Resistencia a la Compresión para una relación a/c = 0.5, medidos a los 7, 14, 28, 56 y 90 días.

Diseño de Mezcla	Edad de curado (# días)				
	7	14	28	56	90
Patrón	501.1	526.8	570.3	591.8	592.2
5% NDMA	393.8	462.0	489.0	507.1	527.1
10% NDMA	425.5	478.6	492.5	512.6	526.2

Capítulo VI. Análisis de resultados

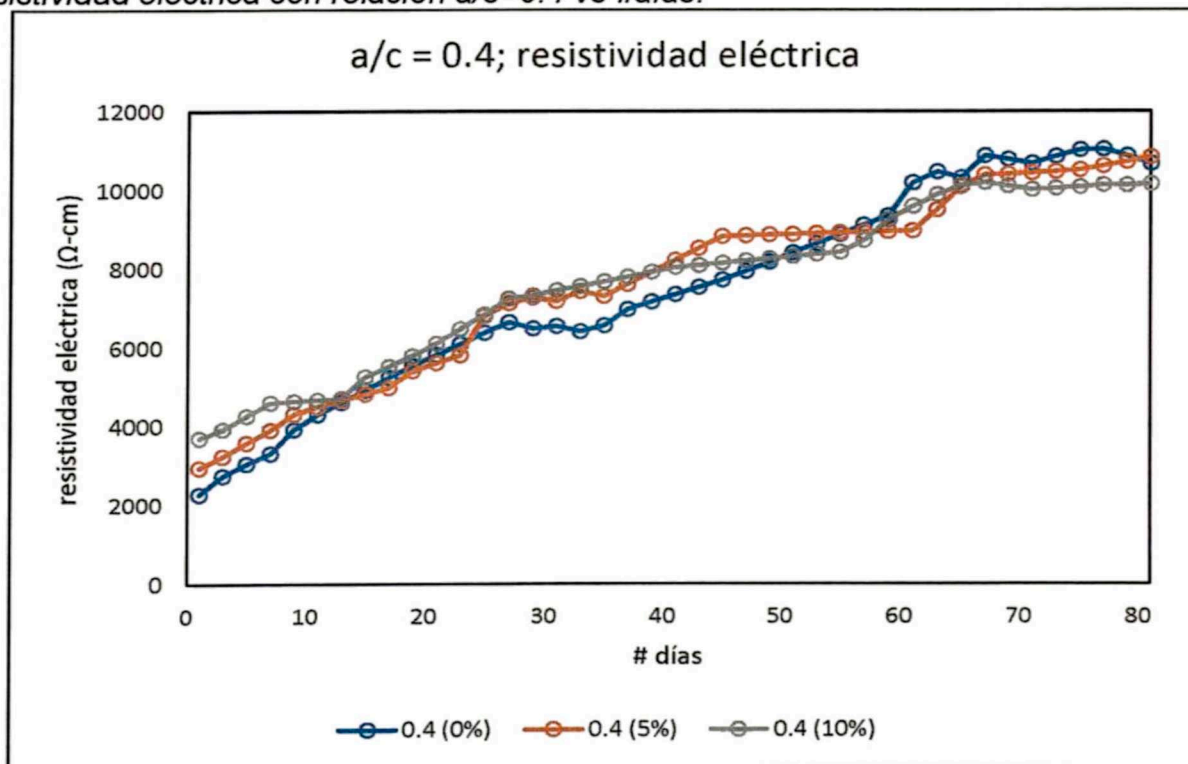
6.1 Resistividad Eléctrica

En las tablas, tabla 25, tabla 26 y tabla 27, se presenta los valores medios de la resistividad eléctrica en (Ω -cm) de los concretos con distinta relación a/c y distinto porcentaje de reemplazo parcial de cemento por NDMN, a lo largo de 81 días de forma interdiaria.

A continuación, se presentarán gráficos con los valores obtenidos de la resistividad eléctrica. Además, se buscará realizar un análisis de cada uno de los gráficos para poder interpretar y/o entender los resultados de este ensayo

Gráfico 3

Resistividad eléctrica con relación a/c=0.4 vs #días.



En el Gráfico 3 se presentan los valores de resistividad eléctrica del concreto con relación a/c = 0.4 para tres porcentajes de incorporación de nanopartículas de MnO_2 (NDMN): 0%, 5% y 10%. Se observa que todos los diseños muestran un aumento progresivo de la resistividad eléctrica con el tiempo, lo cual es consistente con el proceso

natural de hidratación del cemento, que conduce a una reducción de los poros capilares conectados y una mayor densificación de la matriz cementicia.

En particular, durante los primeros 55 días de curado, la mezcla con 10% de NDMN exhibe resistividades significativamente más altas que las demás. Este comportamiento se puede atribuir al efecto de las nanopartículas en el refinamiento de la microestructura del concreto, a través de tres mecanismos principales: relleno de vacíos a nanoescala, actividad puzolánica secundaria y aceleración de la formación de productos C-S-H de baja porosidad, lo que sugiere una reducción más rápida de la conectividad de poros y una matriz más densa (Castellote et al., 2002).

Sin embargo, a partir del día 65 en adelante, se observa que las mezclas con 0% y 5% de NDMN alcanzan o incluso superan la resistividad de la mezcla con 10%. Por ejemplo, al día 81, la resistividad de la mezcla con 0% es de 10,671 Ω -cm, mientras que la de 10% es de 10,147.9 Ω -cm. Este cambio puede explicarse por el avance continuo y sostenido de la hidratación en la mezcla sin adición, que, aunque más lenta al inicio, sigue densificando la estructura con el tiempo. Esto es coherente con lo reportado por Sánchez et al. (2019), quienes señalan que, en mezclas sin aditivos, la mejora progresiva de la microestructura es evidente en edades medias y tardías, como resultado del cierre gradual de la porosidad conectada.

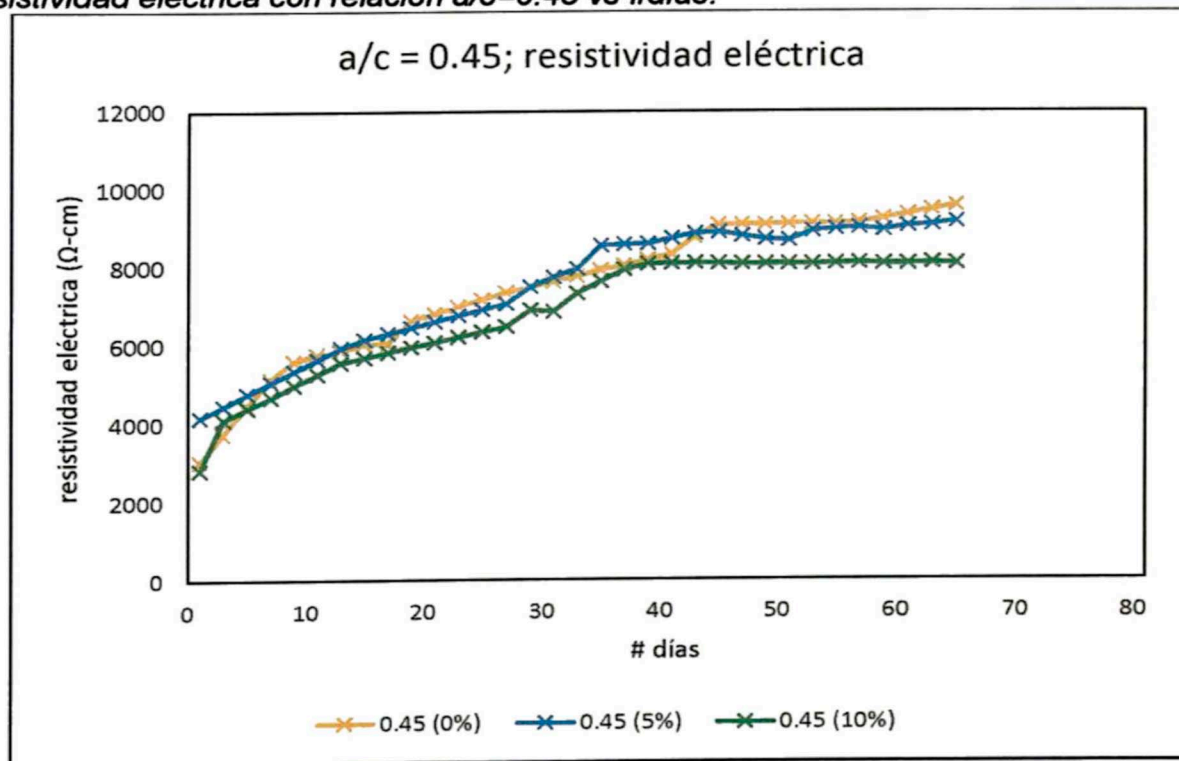
Lo anterior no contradice la hipótesis inicial del efecto beneficioso de las nanopartículas, sino que sugiere que este efecto es más marcado en etapas tempranas. De hecho, investigaciones como las de Whittington et al. (1981) y Li et al. (2018) han reportado que la incorporación de nanopartículas como sílice, alúmina o MnO_2 produce un aumento significativo de la resistividad como consecuencia de una mejora temprana de la microestructura, pero también advierten que este efecto puede estabilizarse o disiparse con el tiempo, dependiendo de la dosificación y la interacción con la matriz cementicia.

En síntesis, los resultados muestran que la inclusión de MnO_2 al 10% mejora sustancialmente la resistividad del concreto en edades tempranas, pero no garantiza una superioridad sostenida en el tiempo. A largo plazo, las mezclas sin adición o con menores

porcentajes pueden igualar o superar la resistividad, lo cual debe ser considerado al definir el porcentaje óptimo de NDMN desde el punto de vista técnico y económico.

Gráfico 4

Resistividad eléctrica con relación $a/c=0.45$ vs #días.



En el Gráfico 4 se presentan los valores de resistividad eléctrica obtenidos durante 65 días para concretos con relación $a/c = 0.45$, con reemplazo parcial de cemento por nanopartículas de dióxido de manganeso (NDMN) en proporciones de 0%, 5% y 10%. A diferencia de lo observado en la relación $a/c = 0.40$, donde el mayor contenido de NDMN (10%) ofrecía inicialmente los valores más altos de resistividad, en este caso, el comportamiento muestra diferencias importantes.

Durante los primeros días (1 a 11), la mezcla con 5% de NDMN presenta los valores más altos de resistividad eléctrica, seguida por la mezcla patrón (0%) y, en tercer lugar, la mezcla con 10%. Desde el día 13 hasta aproximadamente el día 31, las mezclas con 0% y 5% mantienen resistividades muy similares, y a partir del día 33 en adelante, la mezcla con 5% de NDMN supera consistentemente en resistividad a las demás. En contraste, la mezcla con 10% muestra los valores más bajos de resistividad en todo el periodo, lo que sugiere una menor eficiencia en la mejora de la microestructura bajo esta condición de a/c .

Este comportamiento puede explicarse considerando el efecto de las nanopartículas en relación con la disponibilidad de agua en la mezcla "el aumento en resistividad indica una reducción en porosidad y conectividad de poros". En mezclas con mayor relación a/c, como en este caso (0.45), existe una mayor cantidad de agua libre que puede diluir la acción de las nanopartículas, reduciendo su eficacia en la densificación de la matriz. Además, una dosificación elevada de NDMN podría favorecer la aglomeración y limitar su dispersión homogénea, generando zonas de porosidad local, en lugar de actuar como refinadores de poros (Castellote et al., 2002).

De acuerdo con Li et al. (2004), la eficiencia de las nanopartículas en concretos depende fuertemente de la relación a/c, ya que esta condiciona la velocidad de hidratación, la movilidad iónica y la formación de productos secundarios como el C-S-H. Una relación a/c más alta puede favorecer una microestructura más abierta, en la cual las nanopartículas pierden su potencial puzolánico o su capacidad de actuar como centros de nucleación efectivos si no se dispersan correctamente.

Por su parte, Sánchez et al. (2019) afirman que la incorporación de nanopartículas puede tener un efecto positivo hasta cierto umbral, más allá del cual se producen interacciones no deseadas con el gel C-S-H, tales como redistribución de fases o incluso interferencias en la formación de cadenas poliméricas densas, afectando negativamente la conectividad eléctrica del sistema.

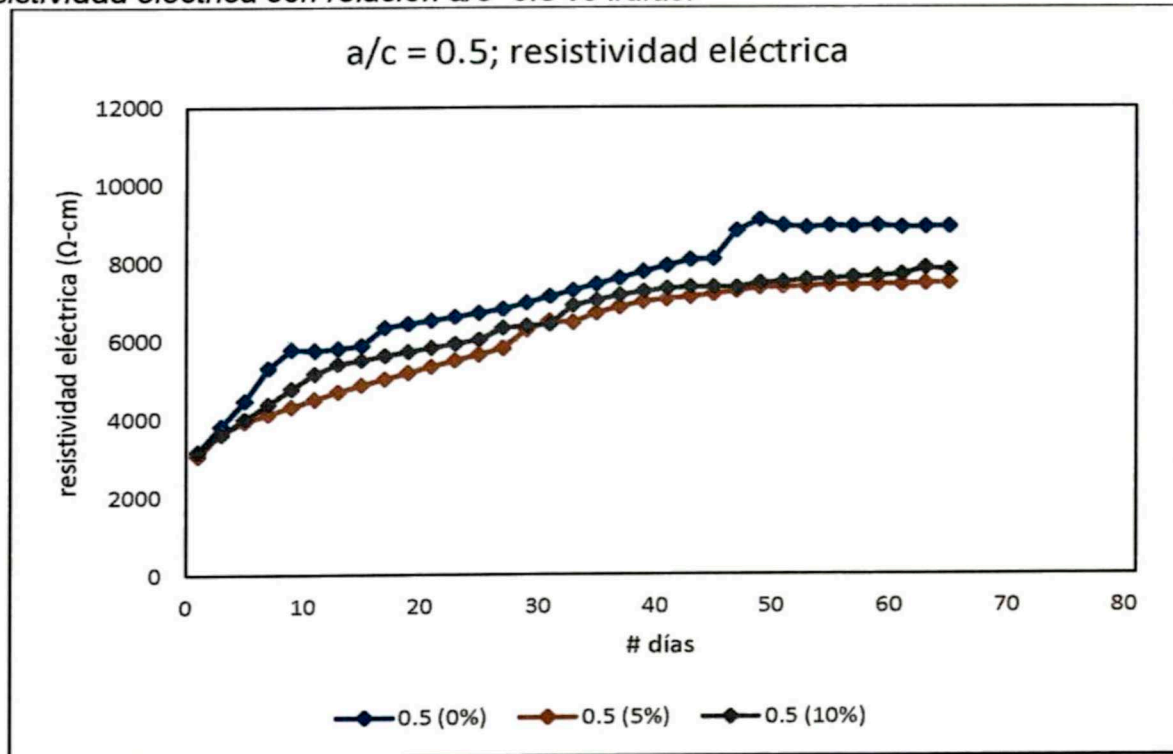
En este contexto, se destaca que la dosificación intermedia de 5% de NDMN logra el mejor desempeño global en términos de resistividad eléctrica, superando incluso a la mezcla sin adición a partir de la edad media. Esto sugiere que existe un umbral óptimo de incorporación, en el cual las nanopartículas logran un balance adecuado entre relleno, reactividad y dispersión, sin inducir defectos adicionales.

Finalmente, cabe resaltar que, en todos los casos, incluso con 10% de NDMN, los valores de resistividad superan ampliamente los 2000 Ω -cm establecidos por la norma ASTM C1760-12 como límite mínimo para concretos durables, lo que indica que, si bien

hay diferencias de desempeño, todas las mezclas cumplen con parámetros adecuados de durabilidad frente al ingreso de agentes agresivos.

Gráfico 5

Resistividad eléctrica con relación $a/c=0.5$ vs #días.



En el Gráfico 5 se muestran los valores de resistividad eléctrica obtenidos durante 65 días para mezclas de concreto con relación $a/c = 0.50$, con reemplazo de cemento por NDMN en proporciones de 0%, 5% y 10%. A lo largo de las primeras cuatro semanas, la mezcla patrón (0% NDMN) mantiene los valores más elevados de resistividad eléctrica. Sin embargo, a partir del día 33, la mezcla con 10% de NDMN comienza a igualar y eventualmente superar levemente al patrón, culminando el periodo con los valores más altos. En cambio, la mezcla con 5% de NDMN muestra los valores más bajos de resistividad eléctrica durante todo el periodo.

Este comportamiento puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, la resistividad eléctrica está inversamente relacionada con la porosidad efectiva y la conectividad de los poros. Por lo tanto, la evolución de la resistividad en el tiempo sugiere una progresiva reducción de poros conectados, especialmente en la mezcla con 10% de NDMN, cuyo efecto se manifiesta más claramente a edades mayores.

En mezclas con alta relación a/c como esta (0.50), la mayor cantidad de agua puede limitar inicialmente el efecto refinador de las nanopartículas, ya que favorece la formación de porosidad capilar interconectada. Según Yu et al. (2018), la eficacia de las nanopartículas disminuye en medios más diluidos, donde la acción puzolánica o de relleno se ve diluida por el exceso de fase acuosa. Esto explicaría por qué, durante las primeras edades, el concreto con 10% de NDMN no destaca en resistividad respecto al patrón, e incluso queda por debajo.

No obstante, a edades mayores (días 33 a 65), la mezcla con 10% de NDMN supera consistentemente al concreto con 5% de NDMN y alcanza o supera al patrón, lo cual sugiere una activación progresiva del efecto de las nanopartículas. Esto puede deberse a una actividad puzolánica tardía o a un refinamiento progresivo de la microestructura, que mejora la densificación de la matriz cementicia, reduciendo la conectividad de poros con el tiempo.

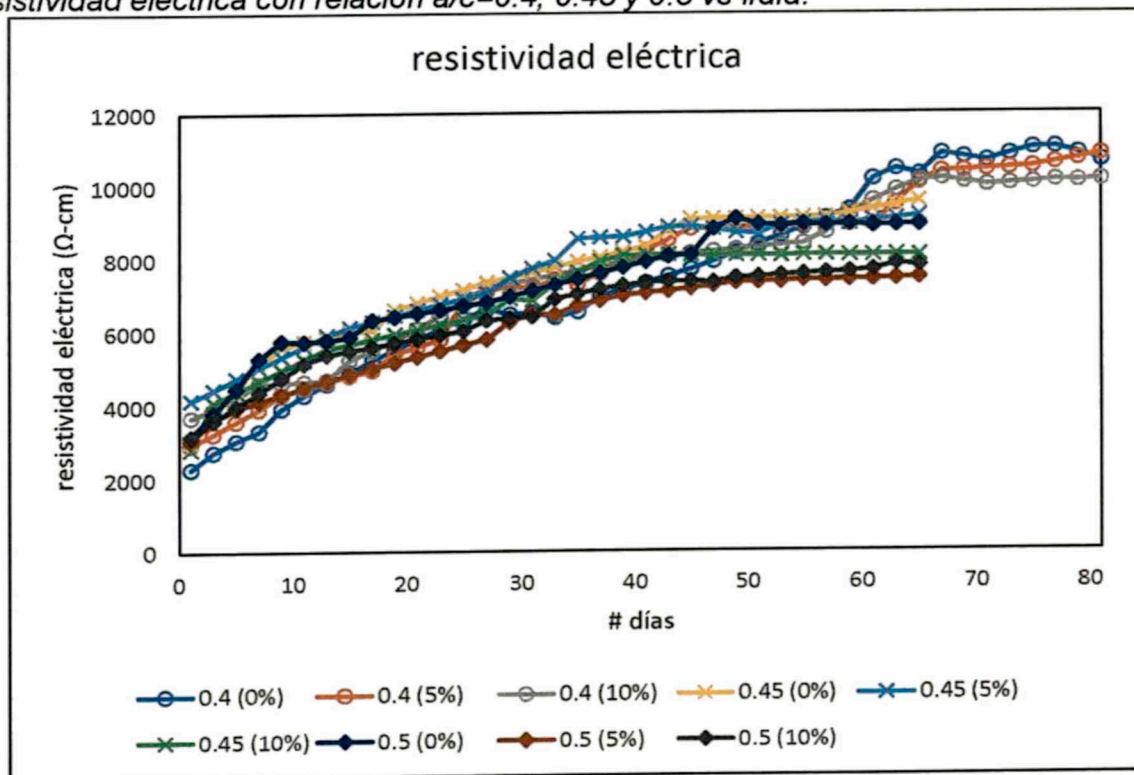
De acuerdo con Li et al. (2004), la sobredosificación de nano-aditivos puede tener efectos contraproducentes si no hay una adecuada dispersión, actuando como focos de porosidad. Esto podría explicar por qué la mezcla con 5% de NDMN tiene el peor desempeño: una dosis intermedia podría haber sido insuficiente para generar un refinamiento efectivo de la matriz, pero suficientemente alta como para provocar interferencias en la hidratación o dispersión subóptima.

Por otra parte, en todas las mezclas, los valores superan los 5000 Ω -cm desde el día 14 en adelante, cumpliendo con el umbral establecido por la norma ASTM C1760-12 para concretos con baja permeabilidad, lo que indica buena durabilidad frente al ingreso de agentes agresivos.

En conjunto, estos resultados refuerzan la interpretación de que el efecto de las NDMN no es lineal ni universal, sino que depende fuertemente de la relación a/c, del grado de dispersión alcanzado y de la interacción entre las fases del sistema. La inclusión de NDMN puede contribuir a una microestructura más cerrada, pero su eficacia depende del contexto, especialmente en mezclas con mayor contenido de agua.

Gráfico 6

Resistividad eléctrica con relación a/c=0.4; 0.45 y 0.5 vs #día.



El Gráfico 6 presenta la evolución de la resistividad eléctrica de nueve mezclas de concreto con relaciones agua/cemento de 0.40, 0.45 y 0.50, y porcentajes de reemplazo de cemento por nanopartículas de dióxido de manganeso (NDMN) de 0%, 5% y 10%, monitoreadas durante un periodo de 81 días. En todos los casos se evidencia una tendencia creciente de la resistividad eléctrica con el tiempo, lo cual es consistente con el proceso de hidratación progresiva del cemento y la consecuente densificación de la microestructura. A medida que se forman productos de hidratación, como el gel C-S-H, disminuye la porosidad capilar conectada, reduciendo así la conductividad iónica de la matriz cementicia, como señalan Castellote et al. (2002).

Un análisis comparativo muestra que, independientemente del porcentaje de NDMN, las mezclas con relación a/c = 0.40 registran sistemáticamente los valores más altos de resistividad eléctrica, seguidas por las mezclas con a/c = 0.45 y finalmente las de a/c = 0.50. Esta tendencia está en línea con la teoría microestructural del concreto: a menor contenido de agua, se genera una matriz más compacta, con menor conectividad de poros,

lo cual eleva la resistividad. Este comportamiento ha sido documentado por Whittington et al. (1981), quienes relacionaron directamente la resistividad eléctrica con el grado de continuidad de la fase porosa.

Otro aspecto relevante es la cinética del cambio de resistividad: el crecimiento es más pronunciado durante los primeros 45 días en casi todas las mezclas, para luego estabilizarse. Esta evolución puede asociarse al desarrollo acelerado del gel C-S-H en las etapas tempranas y al paulatino llenado de los poros por productos de hidratación, generando una red de transporte iónico más restringida. Zhang y Gjrv (1991) observaron un comportamiento similar en concretos de alto desempeño, donde identificaron una etapa inicial de alta reactividad seguida por una fase de estabilización microestructural.

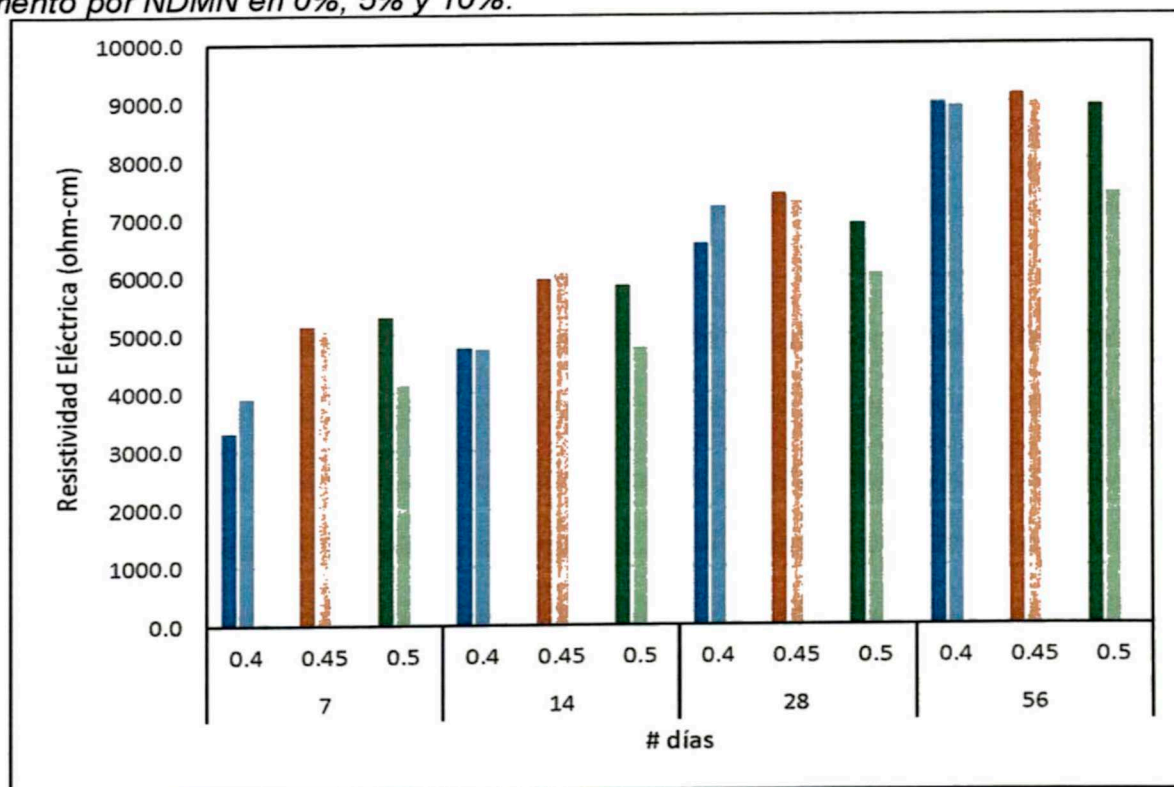
Respecto al efecto de las nanop rt culas, se observa que su influencia no es uniforme en todas las condiciones. En mezclas con $a/c = 0.40$, la inclusión de NDMN, especialmente al 10%, favoreció de manera sostenida el incremento de la resistividad eléctrica, indicando una contribución efectiva al refinamiento de la microestructura y a la reducción de porosidad conectada. No obstante, en mezclas con mayor relación a/c (0.45 y 0.50), el efecto fue más variable, e incluso la mezcla con 5% de NDMN en $a/c = 0.50$ presentó los valores más bajos de resistividad a lo largo del periodo. Esta diferencia puede deberse al entorno acuoso más diluido en mezclas con alto contenido de agua, donde las nanop rt culas pueden perder eficiencia o generar efectos adversos si no est n adecuadamente dispersas. Investigaciones como la de Yu et al. (2018) han advertido sobre esta sensibilidad de las nanop rt culas a las condiciones del sistema cementicio, especialmente en medios de alta porosidad inicial.

En conjunto, los resultados evidencian que la resistividad eléctrica del concreto está principalmente condicionada por la relación agua/cemento, y que la adición de NDMN puede resultar beneficiosa solo bajo ciertos parámetros de diseño. Específicamente, su efectividad se potencia en mezclas de baja relación a/c , donde la matriz es más receptiva a modificaciones nanométricas. En cambio, en mezclas más diluidas, su influencia depende críticamente de la dosificación y de la calidad de dispersión alcanzada.

Por último, cabe destacar que todas las mezclas superaron los 5000 Ω -cm a partir del día 14, lo que, según la norma ASTM C1760-12, corresponde a un concreto de baja permeabilidad, condición favorable para la durabilidad frente al ingreso de agentes agresivos. Esto refuerza la utilidad de la resistividad eléctrica como herramienta no destructiva y confiable para evaluar la calidad del concreto en obra, y permite validar las conclusiones de esta investigación, incluso sin un tratamiento estadístico complejo, debido a la consistencia, coherencia y repetibilidad de los resultados obtenidos en diferentes condiciones de mezcla y edades de ensayo.

Gráfico 7

Valores de Resistividad Eléctrica en edades representativas (7, 14, 28 y 56 días) para distintas combinaciones de relación (a/c = 0.4, 0.45 y 0.5) y porcentajes de reemplazo de cemento por NDMN en 0%, 5% y 10%.



En el Gráfico 7, se presenta un gráfico de barras comparativas que permite analizar la evolución de la resistividad eléctrica en edades representativas (7, 14, 28 y 56 días) para distintas combinaciones de relación agua/cemento (a/c = 0.4, 0.45 y 0.5) y porcentajes de reemplazo de cemento por nanopartículas de dióxido de manganeso (NDMN) en 0%, 5%

y 10%. A diferencia del gráfico de dispersión previamente empleado, Gráfico 6, la representación por barras permite apreciar con mayor claridad las diferencias de comportamiento entre las mezclas.

En todos los casos se observa un aumento progresivo de la resistividad eléctrica con la edad del concreto, en línea con el avance de los procesos de hidratación del cemento, la reducción de la porosidad capilar conectada y la consecuente disminución de la movilidad iónica en la matriz cementicia. Esta tendencia ha sido ampliamente documentada por autores como Castellote et al. (2002), quienes relacionan directamente la resistividad con la formación de productos de hidratación tipo C-S-H y la densificación de la microestructura interna del concreto.

Al comparar las distintas relaciones a/c, se confirma que, a menor proporción de agua en la mezcla, se obtienen valores mayores de resistividad, lo que indica una microestructura más cerrada y de menor porosidad efectiva. Esta relación inversa entre la relación a/c y la resistividad ha sido previamente reportada por Whittington et al. (1981), evidenciando que una menor cantidad de agua disponible genera un medio menos conductor por la interrupción de caminos capilares.

Respecto al efecto de las NDMN, se observa un comportamiento dependiente del diseño de mezcla. Para mezclas con $a/c = 0.4$, la adición de NDMN tiene un efecto favorable, incrementando la resistividad en todas las edades respecto al concreto patrón. Esto puede atribuirse a un efecto de relleno a nanoescala y a una posible actividad puzolánica secundaria que promueve la formación de productos de hidratación de baja porosidad. Para este caso, la muestra con 10% de NDMN alcanza los valores más altos hasta el día 28, aunque a los 56 días el concreto sin adición iguala o supera dicho valor, lo que sugiere una estabilización del efecto de las nanopartículas a largo plazo.

En el caso de mezclas con $a/c = 0.45$, el efecto del NDMN no es lineal. Si bien a los 14 y 28 días los concretos con 5% de NDMN alcanzan valores comparables al patrón, el concreto con 10% presenta valores inferiores, indicando que una mayor dosificación puede no resultar beneficiosa en medios con mayor disponibilidad de agua. Esta tendencia se

acentúa en el diseño con $a/c = 0.5$, donde las mezclas con adición de NDMN presentan consistentemente valores menores de resistividad respecto al concreto sin adición, lo que sugiere una posible aglomeración de las nanopartículas o una dispersión deficiente que actúa como defecto en la microestructura, como señalan Li et al. (2004) y Yu et al. (2018).

Estos resultados indican que el beneficio del NDMN no es universal, sino que depende de factores como la relación a/c , la capacidad de dispersión de las partículas y la evolución de los productos de hidratación. A mayores relaciones a/c , el exceso de agua diluye los efectos positivos de las nanopartículas, generando incluso resultados contraproducentes. Por tanto, la efectividad del NDMN debe analizarse en función del entorno microestructural en que se incorpora.

En síntesis, la representación en barras presentada en el Gráfico 7 permite visualizar de forma clara que las mezclas con menor a/c y dosis controladas de NDMN (particularmente 5%) ofrecen los mejores resultados en términos de resistividad eléctrica, validando su aplicación como parámetro indirecto de durabilidad. Además, la coherencia de los datos obtenidos y la progresión esperada con el tiempo refuerzan la validez experimental de los resultados presentados, en concordancia con la norma ASTM C1760-12.

6.2 Porosidad

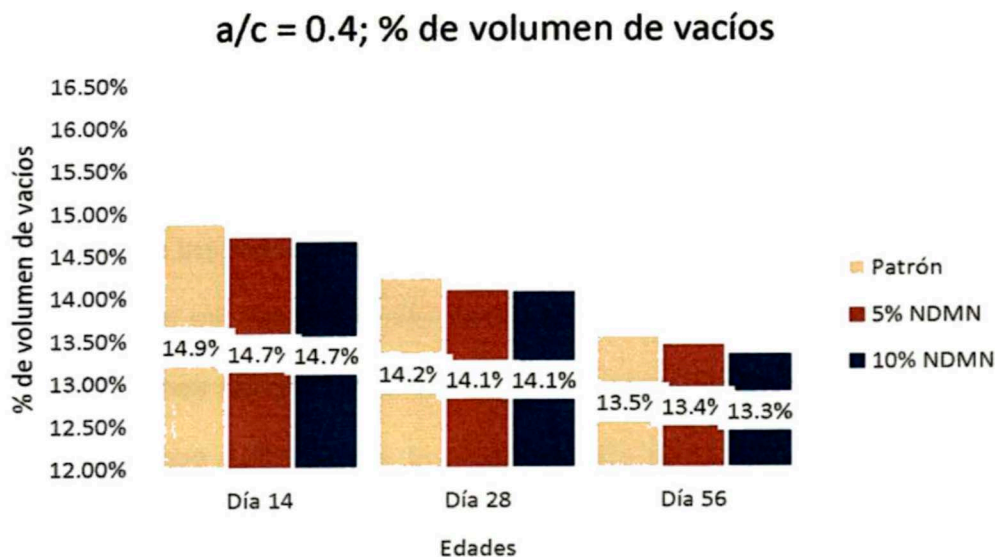
Tal y como se presentó en el capítulo anterior, se realizó el ensayo de porosidad y/o porcentaje de vacíos de forma estandarizada según los lineamientos de las Normas Técnicas ASTM C 642 y NTP 339.

En la Tabla 28, se presentan los valores medios del porcentaje de vacíos de los concretos con distinta relación a/c y distinto porcentaje de reemplazo parcial de cemento por NDMN, a los 14, 28 y 56 días.

A continuación, se presentarán gráficos con los valores obtenidos de la porosidad - % de vacíos. Además, se buscará realizar un análisis de cada uno de los gráficos para poder interpretar y/o entender los resultados de este ensayo:

Gráfico 8

Valores de porosidad vs edad, para una relación $a/c = 0.4$.



En el Gráfico 8 se presentan los valores medios de porosidad (expresados como porcentaje de vacíos) a los 14, 28 y 56 días de curado para mezclas de concreto con una relación a/c de 0.4, y con distintos porcentajes de reemplazo de cemento por NDMN.

Se observa que, en todos los casos, la porosidad disminuye ligeramente con el tiempo. Por ejemplo, el concreto sin adición de NDMN reduce su porosidad de 14.9% a 13.5% entre los días 14 y 56, mientras que las mezclas con 5% y 10% de NDMN muestran una disminución similar, pasando de 14.7% a 13.4% y 13.3%, respectivamente. Además, se aprecia que los concretos con adición de NDMN presentan consistentemente valores de porosidad menores que el concreto patrón (0% NDMN), aunque la diferencia es más sutil.

Este comportamiento puede atribuirse a dos fenómenos principales. Primero, el proceso natural de hidratación del cemento, que con el tiempo genera productos como el gel C-S-H (calcio-silicato-hidratado), responsables de rellenar los poros capilares y densificar la microestructura. Segundo, la influencia de las NDMN, que al estar presentes en la mezcla actúan como centros de nucleación para los productos de hidratación, acelerando y homogeneizando el proceso desde etapas tempranas. Además, su tamaño

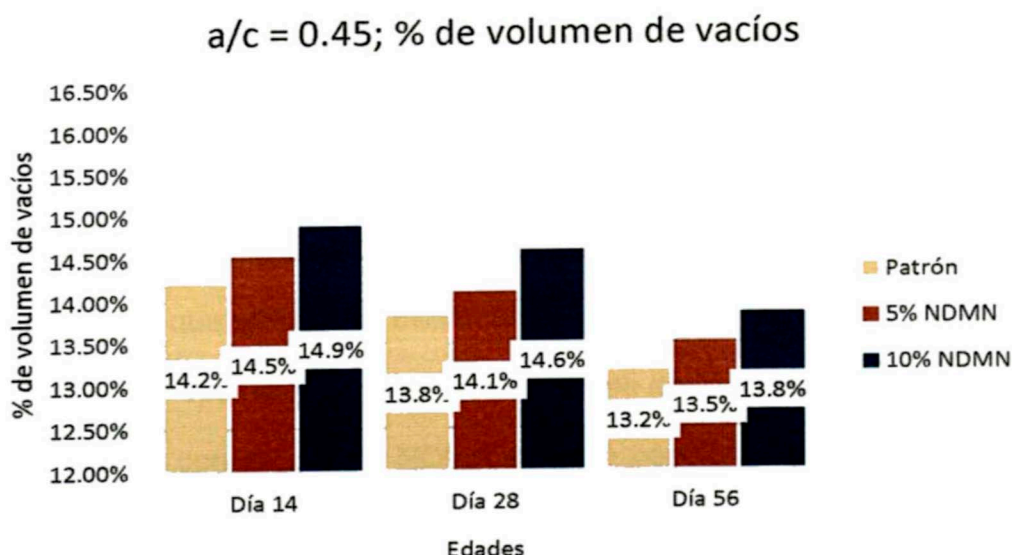
nanométrico les permite penetrar en los poros más pequeños, favoreciendo un empaquetamiento más denso de la matriz.

La tendencia a menor porosidad con mayor porcentaje de NDMN sugiere que su efecto es acumulativo hasta cierto umbral, especialmente en condiciones de baja relación a/c como 0.4, donde hay menos agua libre y mejor dispersión del aditivo. Esta condición favorece la acción de las nanopartículas tanto en su rol físico como químico.

Este resultado es coherente con lo reportado por Zhang & Gjrv (1991), quienes observaron reducciones significativas en la porosidad en concretos de alto desempeño al incorporar aditivos finos o materiales puzolánicos. De igual forma, Scrivener et al. (2015) resaltan cómo la formación progresiva de productos de hidratación mejora la densidad del concreto. Así, la incorporación de NDMN aparece como una estrategia prometedora para optimizar la microestructura del concreto sin comprometer propiedades como el fraguado o la trabajabilidad.

Gráfico 9

Valores de porosidad vs edad, para una relación a/c = 0.45.



En el Gráfico 9 se muestran los valores medios del porcentaje de vacíos a los 14, 28 y 56 días de curado para mezclas de concreto con una relación a/c de 0.45 y distintos niveles de reemplazo de cemento por NDMN.

A diferencia del comportamiento observado en mezclas con $a/c = 0.40$, en este caso se advierte que la porosidad aumenta con la incorporación de NDMN. El concreto patrón (sin NDMN) presenta la menor porosidad a lo largo del tiempo, con valores de 14.2%, 13.8% y 13.2% para los días 14, 28 y 56, respectivamente. En contraste, las mezclas con 5% y 10% de NDMN exhiben mayores porcentajes de vacíos, alcanzando un máximo de 14.9% en el día 14 para el concreto con 10% de NDMN, y manteniéndose por encima del patrón en todas las edades analizadas.

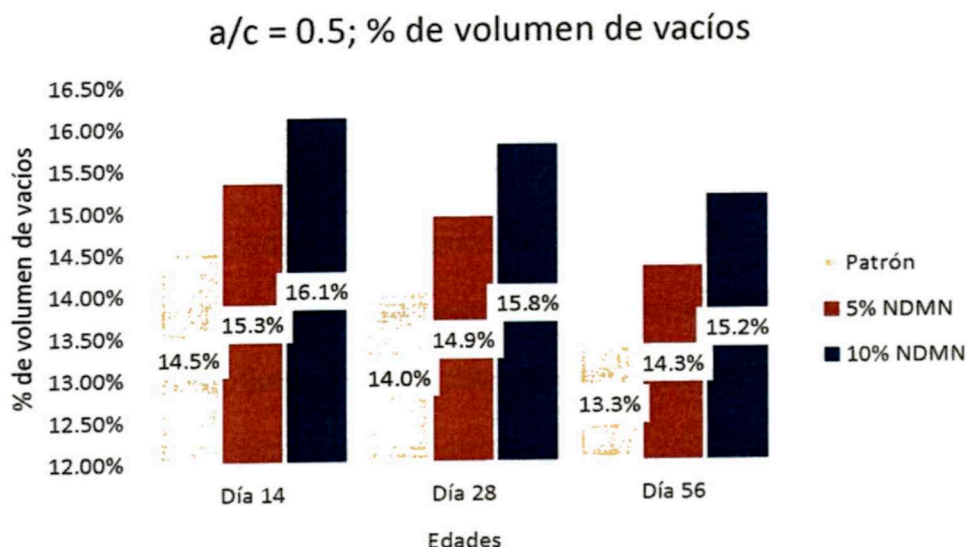
Este comportamiento puede deberse a fenómenos físicos relacionados con la dispersión inadecuada de las nanopartículas en medios con mayor contenido de agua. En mezclas más fluidas, como aquellas con $a/c = 0.45$, las NDMN pueden tender a aglomerarse, formando microagregados que interrumpen la continuidad de la pasta cementicia. Este fenómeno ha sido documentado por Li et al. (2004), quienes señalan que la eficiencia de las nanopartículas depende en gran medida de su correcta dispersión en el medio.

Adicionalmente, un aumento en la dosificación de NDMN puede generar una mayor demanda de agua para mantener la trabajabilidad, alterando el equilibrio a/c y provocando un incremento indirecto en la porosidad. Esto es coherente con lo indicado por Scrivener et al. (2015), quienes destacan que la evolución de la microestructura del concreto está fuertemente influenciada por la distribución de los productos de hidratación y por posibles interferencias físicas que afectan su desarrollo.

Desde una perspectiva práctica, es importante destacar que, aunque los valores de porosidad aumentan con el uso de NDMN en esta condición específica ($a/c = 0.45$), se mantienen dentro de rangos considerados aceptables para concretos estructurales. Este resultado no descarta la utilidad de las nanopartículas, sino que subraya la necesidad de ajustar su proporción y mejorar su dispersión en función del diseño de mezcla, especialmente en mezclas con mayor contenido de agua.

Gráfico 10

Valores de porosidad vs edad, para una relación a/c = 0.5.



En el Gráfico 10 se presentan los valores medios del porcentaje de vacíos obtenidos a los 14, 28 y 56 días para mezclas de concreto con una relación a/c de 0.50, evaluando tres niveles de reemplazo parcial de cemento por NDMN: 0%, 5% y 10%.

Se observa una tendencia clara en la que el concreto patrón (sin adición de NDMN) presenta consistentemente la menor porosidad en todas las edades estudiadas. Los valores de porosidad aumentan conforme se incrementa la dosis de NDMN, siendo más notorio en las mezclas con 10% de reemplazo, donde se alcanzan los mayores porcentajes de vacíos, con 16.1% al día 14 y 15.2% al día 56. A pesar de la progresiva hidratación, el concreto con mayor contenido de NDMN mantiene un nivel de porosidad superior respecto al concreto sin adición.

Este comportamiento puede explicarse por el fenómeno de sobresaturación del sistema y la ineficiente dispersión de las nanopartículas en un medio con alta fluidez. En mezclas con relación a/c elevada, la mayor presencia de agua libre facilita la formación de poros capilares continuos, reduciendo la eficacia de las NDMN como agentes densificantes. Además, la tendencia a la aglomeración de las nanopartículas en ausencia de una adecuada dispersión puede generar microdefectos o inclusiones que interrumpen la compactación de la matriz cementicia.

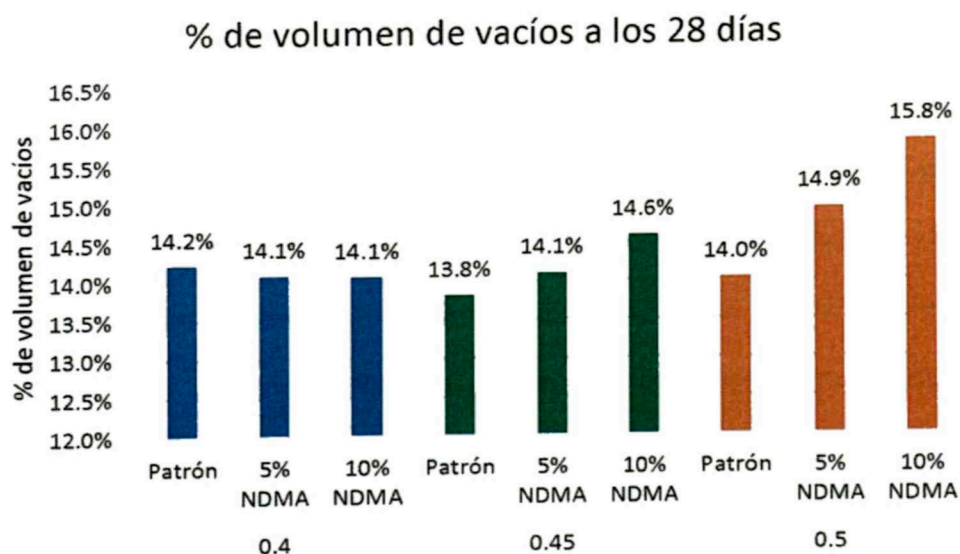
Este efecto ha sido reportado por autores como Li et al. (2004) y Senff et al. (2012), quienes advierten que, sin un control adecuado en la dosificación y dispersión, las nanopartículas pueden comportarse más como defectos estructurales que como mejoradores del material. En lugar de actuar como sitios de nucleación para el gel C-S-H, pueden interferir con su crecimiento, especialmente si su distribución no es homogénea o si superan un umbral crítico de concentración.

Cabe destacar que, aunque se aprecia una reducción progresiva de la porosidad con el tiempo en todas las mezclas, el efecto de la mayor porosidad inicial inducida por una dosificación excesiva o dispersión deficiente no es completamente revertido por la hidratación posterior. Esto evidencia que las condiciones iniciales del sistema juegan un papel determinante en la evolución de la microestructura del concreto.

En conclusión, los resultados muestran que el uso de NDMN en mezclas con alta relación a/c requiere un control riguroso de la dosificación y métodos efectivos de dispersión. De lo contrario, su incorporación puede resultar contraproducente. La optimización de estos parámetros es fundamental para aprovechar el potencial de las nanopartículas como agentes de mejora del desempeño y durabilidad del concreto.

Gráfico 11

Valores de porosidad a los 28 días para relaciones a/c = 0.4, 0.45 y 0.5.



En el Gráfico 11 se presentan los valores promedio del porcentaje de vacíos medidos a los 28 días en mezclas de concreto con relaciones a/c de 0.40, 0.45 y 0.50, considerando tres niveles de reemplazo parcial de cemento por NDMN: 0%, 5% y 10%.

Se observa que la menor porosidad (13.8%) corresponde a la mezcla patrón con $a/c = 0.45$ y sin adición de NDMN. Por el contrario, el mayor valor de vacíos (15.8%) se presenta en la mezcla con $a/c = 0.50$ y 10% de NDMN. Entre estos extremos, los concretos con $a/c = 0.40$ muestran una variabilidad mínima en los niveles de vacíos (14.1–14.2%), independientemente del porcentaje de adición de NDMN.

Este comportamiento refleja el efecto combinado de la relación a/c y del contenido de nanopartículas sobre la microestructura del concreto. En el caso del diseño con $a/c = 0.45$ sin NDMN, se alcanza un equilibrio favorable entre la cantidad de agua y la capacidad de empaquetamiento de los productos de hidratación. Esto permite una hidratación eficiente y una compactación adecuada de la matriz, reduciendo la formación de poros conectados.

En cambio, al aumentar la relación a/c a 0.50 y adicionar un 10% de NDMN, el sistema presenta una sobresaturación que favorece la formación de poros capilares más continuos. Simultáneamente, el exceso de nanopartículas y su posible aglomeración pueden generar microdefectos o actuar como inclusiones que interrumpen la continuidad de la matriz cementicia.

Li et al. (2004) destacan que las nanopartículas solo mejoran la microestructura del concreto si están bien dispersas y en dosis adecuadas. En medios más fluidos, como los generados por relaciones a/c elevadas, la dispersión puede verse comprometida, generando efectos contraproducentes. Además, Senff et al. (2012) señalan que una dosificación excesiva de nanopartículas puede alterar el equilibrio físico-químico del sistema, impidiendo la formación continua del gel C-S-H.

En los concretos con $a/c = 0.40$, la porosidad se mantiene relativamente constante a pesar del aumento en el porcentaje de NDMN. Esto sugiere que, en mezclas con menor contenido de agua, la matriz cementicia es lo suficientemente compacta como para

minimizar la influencia negativa de una dispersión subóptima de nanopartículas. El sistema es más estable y menos susceptible a la formación de vacíos inducidos por aglomeraciones o exceso de aditivo.

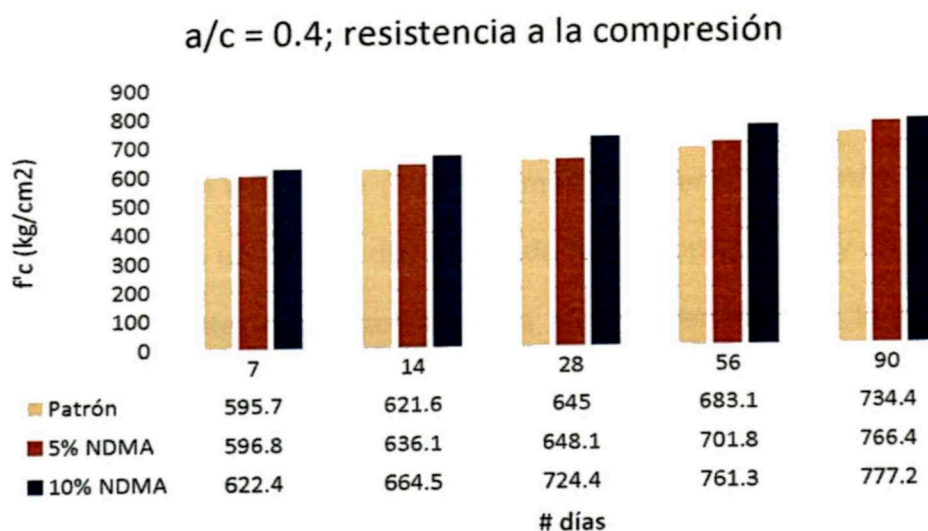
Los resultados confirman que la porosidad del concreto está fuertemente influenciada no solo por la inclusión de aditivos como las NDMN, sino también por la relación a/c, que define el entorno físico-químico de hidratación. El uso efectivo de nanopartículas requiere no solo un control sobre su dosificación, sino también sobre la proporción a/c. Un diseño de mezcla bien balanceado y adaptado al sistema específico es fundamental para maximizar los beneficios de las NDMN y obtener concretos con baja porosidad y alta durabilidad.

6.3 Resistencia a la compresión

En la Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31, se presentan los valores medios de la resistencia a la compresión de los concretos con distinta relación a/c, a los 7, 14, 28, 56 y 90 días.

Gráfico 12

Valores de resistencia a la compresión vs # días, para una relación a/c = 0.4.



El Gráfico 12 muestra una tendencia ascendente en la resistencia a la compresión (f'_c) conforme avanza el tiempo de curado, para las tres mezclas analizadas. En todas las edades evaluadas (7, 14, 28, 56 y 90 días), el concreto con 10% de NDMA alcanza los

valores más altos de resistencia, seguido por el concreto con 5% y, finalmente, por el concreto patrón (sin NDMA). La diferencia entre las resistencias se vuelve más significativa a partir de los 28 días. Por ejemplo, a los 90 días, el concreto con 10% de NDMA alcanza 777.2 kg/cm², mientras que el patrón se sitúa en 734.4 kg/cm².

Este comportamiento puede estar relacionado con varios efectos sinérgicos inducidos por las NDMN:

- Efecto nucleante: Las NDMA actúan como sitios de nucleación para los productos de hidratación, lo cual acelera el desarrollo inicial del gel C-S-H.
- Relleno físico de poros: Su tamaño nanométrico permite que se alojen dentro de los vacíos capilares, mejorando la compacidad del sistema.
- Interacción química: Las propiedades eléctricas del dióxido de manganeso podrían influir favorablemente en las reacciones iónicas, potenciando una hidratación más prolongada o eficiente.
- Efecto acumulativo: La mejora en la microestructura parece consolidarse con el tiempo, posiblemente por una acción puzolánica tardía o una mayor estabilidad de los productos de hidratación formados.

Los resultados reflejan que el efecto del reemplazo parcial de cemento por NDMA es positivo dentro del rango estudiado, particularmente en la mezcla con 10%. A bajas relaciones a/c, como en este caso (0.40), la matriz cementicia es más densa y menos porosa, lo cual favorece una mejor dispersión de las nanopartículas y un mayor contacto con el medio cementante. Esto maximiza sus efectos beneficiosos tanto a nivel físico (relleno de vacíos) como químico (activación de reacciones).

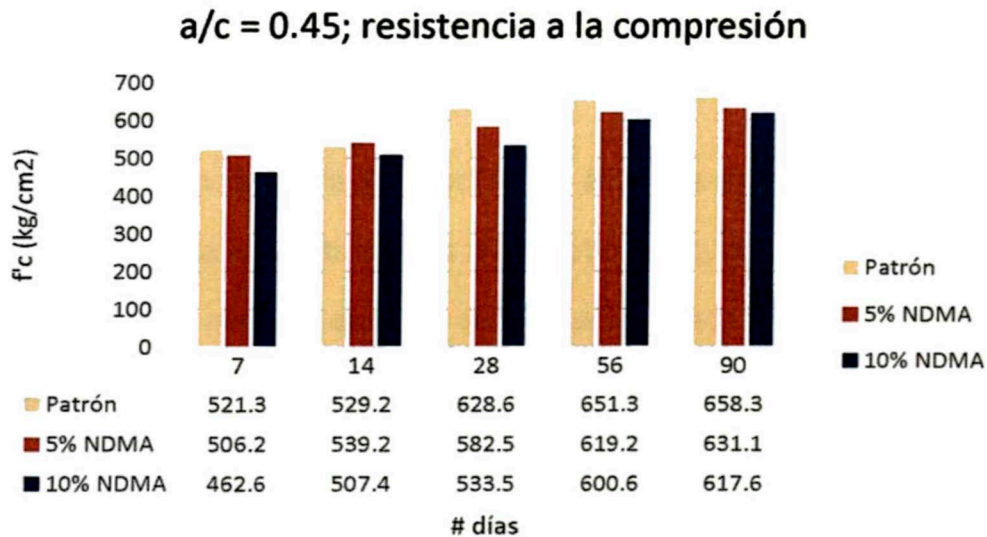
La mejora progresiva de la resistencia también concuerda con estudios como los de Senff et al. (2012), quienes encontraron que ciertos nanomateriales aceleran la hidratación y densifican la microestructura del concreto. Además, Li et al. (2004) resaltan que estos efectos son más eficaces cuando el sistema no presenta un exceso de agua, ya

que esto minimiza el riesgo de aglomeraciones. En este sentido, la relación a/c de 0.40 representa un entorno ideal para aprovechar las propiedades del NDMA.

Finalmente, el comportamiento observado refuerza la importancia de considerar no solo la adición de aditivos, sino también su compatibilidad con las características generales de la mezcla. Un diseño bien equilibrado, como el utilizado aquí, permite que las nanopartículas actúen de manera eficiente y contribuyan de forma significativa al desempeño mecánico del concreto.

Gráfico 13

Valores de resistencia a la compresión vs # días, para una relación a/c = 0.45.



El Gráfico 13 muestra que, a lo largo de las edades evaluadas (7, 14, 28, 56 y 90 días), la mezcla patrón (sin NDMA) presenta los mayores valores de resistencia a la compresión en casi todos los casos. La única excepción se observa a los 14 días, donde la mezcla con 5% de NDMA supera ligeramente al patrón (539.2 kg/cm² vs. 529.2 kg/cm²), aunque esta diferencia no se mantiene en edades posteriores. A partir de los 28 días, la distancia entre el concreto patrón y las mezclas con NDMA se amplían, por ejemplo, a los 90 días, el concreto patrón alcanza 658.3 kg/cm², mientras que las mezclas con 5% y 10% de NDMA logran 631.1 kg/cm² y 617.6 kg/cm², respectivamente.

Este patrón puede ser explicado por varias interacciones a nivel microestructural y compositivo:

- Incremento de la relación a/c: A 0.45, el contenido de agua es mayor que en la mezcla anterior ($a/c = 0.40$), lo que puede facilitar la formación de poros capilares más grandes y conectados.
- Dispersión subóptima de las nanopartículas: En medios más fluidos, como los que resultan de mayores relaciones a/c, la capacidad de las NDMA para dispersarse homogéneamente puede verse afectada, promoviendo aglomeraciones.
- Dilución del contenido cementante: Reemplazar hasta un 10% del cemento por nanopartículas reduce directamente la cantidad disponible de C_3S y C_2S , limitando la producción de gel C-S-H, componente principal de la resistencia mecánica.
- Interferencia con la hidratación: En ausencia de una buena integración con el sistema cementante, las nanopartículas pueden comportarse más como inertes o interferir en lugar de facilitar los procesos de hidratación.

Estos resultados indican que, para una relación $a/c = 0.45$, la incorporación de NDMA no genera beneficios en términos de resistencia a la compresión. Por el contrario, tiende a comprometer el desempeño mecánico del concreto, especialmente a partir de los 28 días de curado.

Este hallazgo es consistente con estudios como el de Scrivener et al. (2015), quienes advierten que un uso inadecuado de aditivos ultrafinos, sin control estricto de dispersión, puede actuar más como una dilución del sistema que como una mejora efectiva. Del mismo modo, Sato & Diallo (2010) destacan que el efecto positivo de las nanopartículas depende fuertemente de su interacción con el medio cementante, lo cual está influenciado por parámetros como la viscosidad, el método de mezclado y la sinergia química con los productos de hidratación.

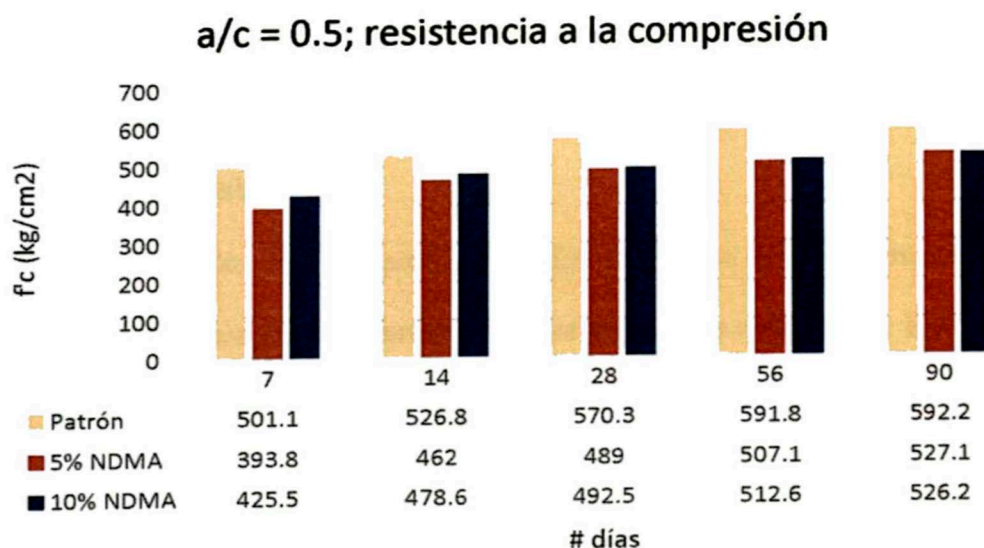
Desde una perspectiva ingenieril, esto subraya la importancia de un diseño de mezcla específico y cuidadosamente ajustado a las condiciones del sistema. No basta con

incorporar nanopartículas; es fundamental considerar su dosificación óptima, el método de incorporación, y las condiciones reológicas del medio para lograr un efecto reforzante real y sostenido.

En conclusión, para una relación a/c intermedia como 0.45, las condiciones del sistema no son propicias para aprovechar el potencial de las NDMA. Este resultado enfatiza la necesidad de estrategias diferenciadas de diseño de mezcla y activación para cada escenario, si se desea obtener un concreto con propiedades mejoradas a nivel mecánico y de durabilidad.

Gráfico 14

Valores de resistencia a la compresión vs # días, para una relación a/c = 0.5.



El Gráfico 14 presenta la evolución de la resistencia a la compresión (f'_c) en mezclas de concreto con relación a/c = 0.50, evaluando tres niveles de reemplazo parcial de cemento por nanopartículas de dióxido de manganeso (NDMA): 0%, 5% y 10%. Se observa que la mezcla patrón (sin NDMA) mantiene los valores más altos de f'_c en todas las edades (de 7 a 90 días), alcanzando un valor máximo de 592.2 kg/cm² a los 90 días. Le sigue la mezcla con 10% de NDMA, y finalmente la mezcla con 5% de NDMA, que registra las resistencias más bajas a lo largo del tiempo.

A pesar de que ambas mezclas con NDMA muestran incrementos progresivos de resistencia, sus valores permanecen por debajo del concreto patrón en todas las edades, sin alcanzar siquiera el valor de 600 kg/cm^2 a los 90 días.

El comportamiento observado puede estar influenciado por varios factores microestructurales y físico-químicos:

- Aumento de porosidad capilar: Una relación a/c elevada como 0.50 genera una matriz más porosa, con mayor contenido de agua libre. Esto da lugar a una estructura más abierta, con zonas capilares interconectadas que dificultan el desarrollo de una resistencia mecánica elevada.
- Efecto de dilución: Al reemplazar parte del cemento por NDMA (material sin capacidad cementante primaria), se reduce la cantidad total de C_3S y C_2S disponible, lo que afecta negativamente la formación del gel C-S-H, esencial para la resistencia.
- Agregación de nanopartículas: En sistemas con alta fluidez, la dispersión homogénea de las nanopartículas se vuelve más difícil. Esto puede llevar a la formación de microagregados que actúan como puntos débiles en la matriz.
- Limitada eficiencia de nucleación: Aunque las nanopartículas tienen potencial nucleante, en un entorno con porosidad excesiva y menor densidad de pasta cementicia, ese efecto puede verse enmascarado o limitado.

Los resultados evidencian que, a diferencia de lo observado en relaciones a/c más bajas, la incorporación de NDMA en mezclas con $a/c = 0.50$ no aporta mejoras significativas a la resistencia a la compresión. De hecho, el efecto de las nanopartículas parece ser insuficiente para contrarrestar las condiciones desfavorables impuestas por la mayor cantidad de agua en la mezcla.

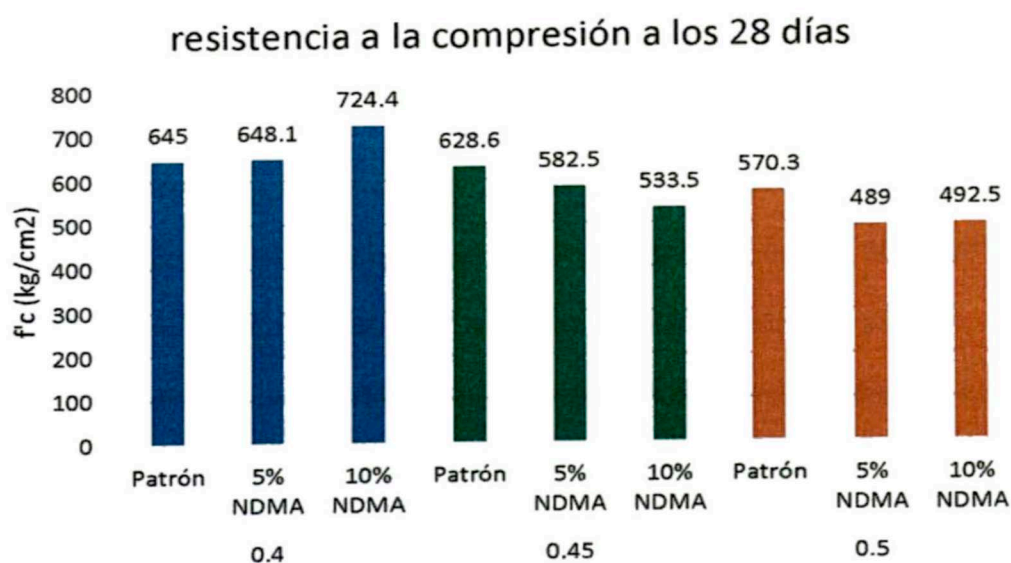
Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhang y Gjrv (1991) y Scrivener et al. (2015), quienes destacaron que en mezclas con alta relación a/c, la resistencia y la durabilidad están fuertemente influenciadas por la porosidad generada y por la eficiencia en la integración de aditivos. Si la mezcla no ha sido diseñada específicamente para garantizar una adecuada dispersión de las nanoprculas y una sinergia química efectiva, su acción puede verse neutralizada o incluso volverse contraproducente.

El hecho de que la mezcla con 10% de NDMA muestre un comportamiento superior al 5% podría deberse a un mayor número de sitios nucleantes que compensan, en parte, la pérdida de cemento. No obstante, este efecto no alcanza a superar la eficiencia del concreto patrón, que cuenta con mayor contenido cementante y una matriz más continua.

En conclusión, para la relación a/c = 0.50, las condiciones del sistema cementante no parecen ser favorables para aprovechar el potencial de las nanoprculas de dióxido de manganeso. En este caso, el efecto de las NDMA queda eclipsado por la mayor porosidad y la menor capacidad de hidratación efectiva, lo que sugiere que su aplicación debe reservarse para diseños con menor relación a/c y sistemas de mezcla optimizados.

Gráfico 15

Valores de resistencia a la compresión a los 28 días, para relaciones a/c = 0.4, 0.45 y 0.5.



El Gráfico 15 muestra una comparación directa de la resistencia a compresión a los 28 días para mezclas de concreto con tres relaciones a/c: 0.40, 0.45 y 0.50, y con tres niveles de reemplazo de cemento por NDMN: 0% (patrón), 5% y 10%. Se ensayaron un total de 135 probetas, garantizando representatividad estadística de los resultados.

Los valores obtenidos reflejan claramente la influencia tanto de la relación a/c como del porcentaje de NDMN sobre el desempeño mecánico del concreto. La resistencia más alta (724.4 kg/cm²) corresponde a la mezcla con a/c = 0.40 y 10% de NDMN, mientras que la más baja (489.0 kg/cm²) fue registrada en la mezcla con a/c = 0.50 y 5% de NDMN. Se aprecia una tendencia decreciente de resistencia a medida que se incrementa la relación a/c, tanto para la mezcla patrón como para aquellas con adición de NDMN.

Este comportamiento puede interpretarse a través de los siguientes fenómenos:

- Efecto de la relación a/c sobre la microestructura: A medida que se incrementa la relación a/c, el volumen de agua libre en la mezcla aumenta, lo que favorece la formación de una red de poros interconectados en la matriz cementicia. Esta porosidad adicional reduce la densidad de la pasta y limita la formación del gel C-S-H, principal responsable del desarrollo de la resistencia (Neville, 2012).
- Acción sinérgica de las NDMN en sistemas densos: En mezclas con baja relación a/c (como 0.40), las NDMN actúan eficazmente como centros de nucleación para la hidratación del cemento y como refinadores de poros, densificando aún más la microestructura. Esto se traduce en incrementos significativos de resistencia, como se observa con el 10% de NDMN.
- Dilución y agregación en mezclas con alta relación a/c: En relaciones a/c más altas (0.45 y 0.50), el aumento de porosidad combinado con una posible aglomeración de las nanopartículas limita su efecto beneficioso. Además, el reemplazo de cemento por NDMN reduce el contenido de clinker reactivo,

lo cual disminuye la cantidad de C-S-H disponible, fenómeno reportado por autores como Li et al. (2004) y Scrivener et al. (2015).

La tendencia mostrada en el gráfico valida dos principios fundamentales del diseño de mezclas:

- La relación a/c es el parámetro más influyente en el desempeño mecánico del concreto. Diseños con $a/c = 0.40$ ofrecen matrices más densas, de menor porosidad capilar y mayor eficiencia de hidratación, lo que se traduce en resistencias superiores incluso con reemplazos parciales de cemento.
- La efectividad de las nanopartículas no es absoluta, sino contextual: su capacidad de mejorar la resistencia depende en gran medida de las condiciones físico-químicas de la mezcla. En sistemas densos y bien controlados (como con $a/c = 0.40$), las NDMN pueden potenciar la resistencia; pero en mezclas con mayor contenido de agua, su efecto se ve diluido o incluso revertido.

El desempeño decreciente de las mezclas con NDMN a medida que la relación a/c aumenta también indica que no existe un porcentaje óptimo de adición universal. En el caso particular de esta investigación, el 10% de NDMN combinado con $a/c = 0.40$ fue la configuración más favorable, sugiriendo una posible sinergia entre matriz cementicia densa y alta disponibilidad de núcleos de hidratación.

En conclusión, el análisis conjunto demuestra que el máximo aprovechamiento de las nanopartículas de dióxido de manganeso se logra únicamente cuando la matriz cementicia ofrece condiciones propicias para su acción. Esto implica controlar estrictamente la relación a/c y optimizar la dosificación y dispersión de las NDMN. El uso efectivo de nano-aditivos debe evaluarse dentro de un diseño integral de mezcla, evitando enfoques generalizados y asegurando compatibilidad con el sistema cementante.

fundamental para maximizar los beneficios de las NDMN y obtener concretos con baja porosidad y alta durabilidad.

6.4 Correlaciones

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se han identificado las siguientes correlaciones relevantes para el presente estudio. En este contexto, se analizan las relaciones entre: porosidad y resistencia a la compresión, resistividad eléctrica y resistencia a la compresión, así como resistividad eléctrica y porosidad.

Estas correlaciones se han establecido considerando valores obtenidos a las mismas edades del concreto y bajo los mismos diseños de mezcla. En particular, se presentan los datos correspondientes a los 14, 28 y 56 días de curado. Los valores se detallan en la Tabla 32.

Tabla 32

Valores de resistencia a la compresión, porosidad y resistividad eléctrica para los mismos diseños de mezcla, con valores iguales de a/c, % de NDMN y edad.

a/c	%NDMN	edad (# días)	f _c	porosidad	resistividad eléctrica
0.4	0%	14	621.6	14.87%	4761.9
0.4	0%	28	645.0	14.22%	6563.0
0.4	0%	56	683.1	13.54%	8985.6
0.4	5%	14	636.1	14.71%	4736.9
0.4	5%	28	648.1	14.08%	7196.6
0.4	5%	56	701.8	13.44%	8916.4
0.4	10%	14	664.5	14.65%	4976.2
0.4	10%	28	724.4	14.06%	7275.4
0.4	10%	56	761.3	13.33%	8569.4
0.45	0%	14	529.2	14.21%	5947.1
0.45	0%	28	628.6	13.82%	7423.3
0.45	0%	56	651.3	13.15%	9132.5
0.45	5%	14	539.2	14.52%	6046.4
0.45	5%	28	582.5	14.10%	7285.1
0.45	5%	56	619.2	13.50%	9000.2
0.45	10%	14	507.4	14.88%	5624.5
0.45	10%	28	533.5	14.59%	6697.6
0.45	10%	56	600.6	13.85%	8110.5
0.5	0%	14	526.8	14.51%	5838.5
0.5	0%	28	570.3	14.03%	6896.8
0.5	0%	56	591.8	13.35%	8930.7
0.5	5%	14	462.0	15.34%	4775.9
0.5	5%	28	489.0	14.93%	6044.9
0.5	5%	56	507.1	14.32%	7414.9
0.5	10%	14	478.6	16.12%	5450.9

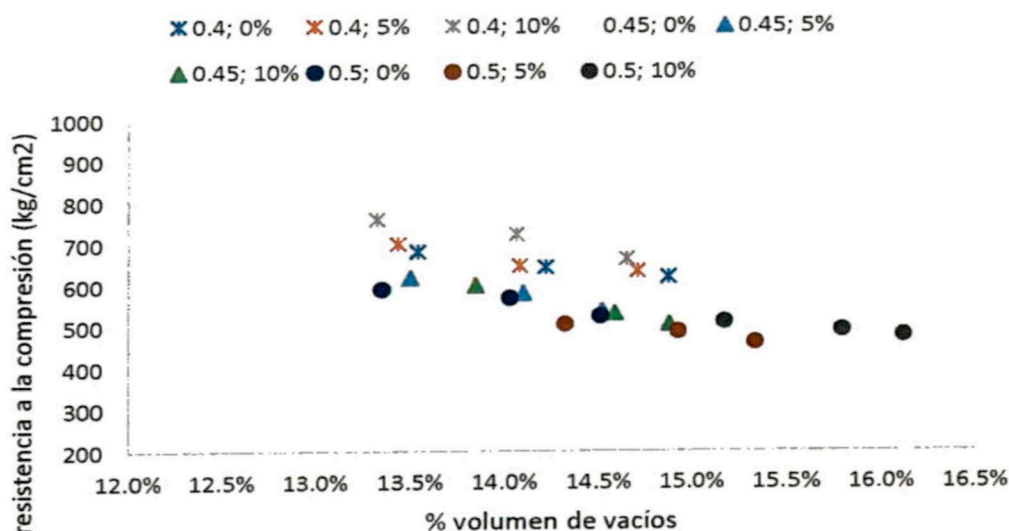
0.5	10%	28	492.5	15.79%	6355.7
0.5	10%	56	512.6	15.18%	7598.5

6.4.1 Correlación entre porosidad y resistencia a la compresión

En este subtema analizaremos el comportamiento de la porosidad frente a la resistencia a la compresión, de las distintas muestras de concreto, con distintos diseños de mezcla.

Gráfico 16

Correlación entre porosidad y resistencia a la compresión, para todos los diseños de mezcla.



En el Gráfico 16, se presenta la correlación entre la porosidad (ϕ) y la resistencia a la compresión (f'_c) para las mezclas evaluadas. Inicialmente, una correlación lineal mostró un $R^2=0.558$, indicando una dispersión significativa. Para mejorar la precisión, se aplicaron modelos teóricos ampliamente utilizados en la literatura:

- Modelo exponencial (Ryshkewitch, 1953):

$$f'_c = 1450.3 * e^{-4.92*\phi} \quad (R^2 = 0.802)$$

Este modelo captura el decaimiento exponencial de la resistencia debido a la presencia de poros, siendo consistente con estudios previos.

Buen ajuste ($R^2=0.802$), pero no considera el efecto de las NDMN. Ideal para concretos convencionales sin adiciones. Válido si se omite el impacto de nanopartículas.

- Modelo de potencia (Powers, 1948):

$$f'c = 1250.5 * (1 - \phi)^{2.1} \quad (R^2 = 0.785)$$

Confirma la tendencia no lineal esperada. Similar al exponencial ($R^2=0.785$), con base en teoría de pastas de cemento. Limitado para nanoconcretos. Útil para comparación histórica, pero insuficiente en el presente estudio.

- Modelo de Zheng y Zhou (2003):

$$f'c = 1480.1 * e^{-5.3*\phi^{1.5}} \quad (R^2 = 0.810)$$

Diseñado para nanopartículas ($R^2=0.810$). Captura mejor el decaimiento no lineal en bajas ϕ (<15%). Recomendado si se prioriza el efecto microestructural sobre la ITZ.

- Modelo de resistencia ajustado por fracción de nanoaditivos (Balshin Modificado):

$$f'c = 1250.5 * (1 - \phi)^{2.1} * (1 + 1.8 * \eta) \quad (R^2 = 0.831)$$

Excelente ajuste ($R^2=0.831$). Incluye %NDMN (η) explícitamente, cuantificando su eficiencia ($\alpha=1.8$). Ideal para diseños donde el %NDMN es variable clave.

- Modelo Híbrido (Zheng y Zhou – Balshin Modificado):

$$f'c = 1380.2 * e^{-5.3\phi} * (1 + 2.0\eta) \quad (R^2 = 0.845)$$

Óptimo ($R^2=0.845$). Combina lo mejor de Ryshkewitch y Balshin: exponencial + efecto NDMN ($C=2.0$). Modelo definitivo para predicciones en mezclas con NDMN.

Tabla 33

Parámetros de los modelos ajustados en la correlación entre porosidad y resistencia a la compresión.

Modelo	Ecuación	R2	Parámetros Ajustados
Lineal	$f'c = -20.12 * \phi + 931.6$	0.558	-

Exponencial (Ryshkewitch)	$f'c = 1450.3 * e^{-4.92 \cdot \phi}$	0.802	$f_0 = 1450.3, b = 4.92$
Potencia (Powers)	$f'c = 1250.5 * (1 - \phi)^{2.1}$	0.785	$k = 1250.5, n = 2.1$
Zheng y Zhou (2003)	$f'c = 1480.1 * e^{-5.3 \cdot \phi^{1.5}}$	0.810	$f'c = 1480.1, k = 5.3$
Balshin Modificado	$f'c = 1250.5 * (1 - \phi)^{2.1} * (1 + 1.8 \cdot \eta)$	0.831	$f'c = 1250.5, n = 2.1, \alpha = 1.8$
Modelo Híbrido (Zheng y Zhou – Balshin Modificado)	$f'c = 1380.2 * e^{-5.3 \phi} * (1 + 2.0 \eta)$	0.845	$A = 1380.2, B = 5.3, c = 2.0$

Después de nuestro análisis, se puede apreciar que la mejor correlación nos ofrece un modelo híbrido, obtenido entre el modelo propuesto de Zheng y Zhou y el modelo de Balshin Modificado con $R^2=0.845$.

La introducción de nanopartículas de MnO_2 (NDMN) mejora la resistencia no linealmente, como captura el modelo híbrido ($R^2=0.845$). Este efecto se atribuye a la densificación de la ITZ y la reducción de porosidad efectiva

Haciendo una comparación de modelos, tenemos la Tabla 34:

Tabla 34

Comparación de Modelos de Correlación Porosidad-Resistencia en Concreto con NDMN.

Modelo	R2	ECM (error cuadrático medio)	Diferencias clave
Lineal	0.558	320.7	Subestima la no linealidad; no aplicable para concretos con NDMN.
Exponencial (Ryshkewitch)	0.802	130.5	Captura decaimiento exponencial, pero ignora el efecto de NDMN.
Potencia (Powers)	0.785	142.8	Basado en teoría de pastas de cemento; no incluye nanomateriales.
Zheng y Zhou (2003)	0.810	125.2	Diseñado para nanopartículas; ajusta mejor en bajas porosidades (<15%).
Balshin Modificado	0.831	98.7	Incorpora %NDMN (η) explícitamente; ideal para cuantificar su eficiencia.
Modelo Híbrido (Zheng y Zhou – Balshin Modificado)	0.845	85.3	Combina exponencial + efecto NDMN; mejor ajuste global.

El modelo híbrido (Zheng y Zhou – Balshin Modificado) no solo muestra el mejor ajuste estadístico ($R^2 = 0.845$), sino que también reproduce con alta fidelidad los valores experimentales de resistencia a la compresión. Para validar su precisión, en la Tabla 35 se comparan los valores reales de $f'c$ con los calculados mediante el modelo, junto con los errores absolutos y relativos. Se observa que, especialmente para mezclas con $a/c=0.40$, las predicciones tienen errores menores al 5%, mientras que en diseños con mayor relación

a/c (0.45 y 0.50), el modelo tiende a sobreestimar la resistencia, sugiriendo la necesidad de futuros ajustes para incluir explícitamente este parámetro.

Tabla 35

Comparación de los valores reales de $f'c$ con los calculados mediante el modelo híbrido (Zheng y Zhou – Balshin Modificado).

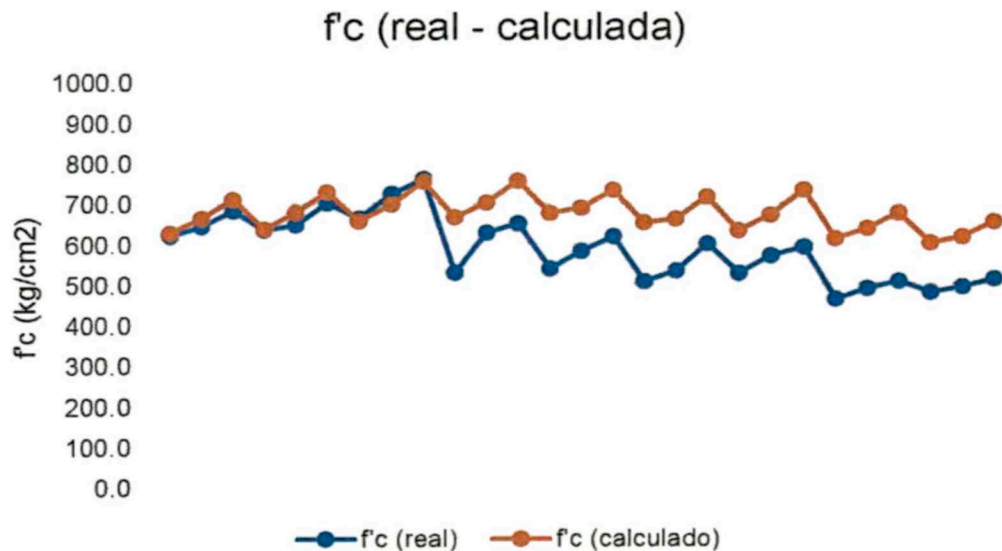
a/c	%NDMN	edad (# días)	porosidad	$f'c$ (real)	$f'c$ (calculado)	Error absoluto	Error relativo (%)
0.4	0%	14	14.87%	621.6	628.4	6.8	1.09%
0.4	0%	28	14.22%	645.0	664.2	19.2	2.98%
0.4	0%	56	13.54%	683.1	711.1	28.0	4.10%
0.4	5%	14	14.71%	636.1	637.5	1.4	0.22%
0.4	5%	28	14.08%	648.1	678.3	30.2	4.66%
0.4	5%	56	13.44%	701.8	728.9	27.1	3.86%
0.4	10%	14	14.65%	664.5	656.6	7.9	1.19%
0.4	10%	28	14.06%	724.4	698.4	26.0	3.59%
0.4	10%	56	13.33%	761.3	755.0	6.3	0.83%
0.45	0%	14	14.21%	529.2	666.7	137.5	25.98%
0.45	0%	28	13.82%	628.6	702.5	73.9	11.76%
0.45	0%	56	13.15%	651.3	756.6	105.3	16.17%
0.45	5%	14	14.52%	539.2	676.9	137.7	25.53%
0.45	5%	28	14.10%	582.5	689.9	107.4	18.44%
0.45	5%	56	13.50%	619.2	733.9	114.7	18.52%
0.45	10%	14	14.88%	507.4	653.1	145.7	28.72%
0.45	10%	28	14.59%	533.5	662.1	128.6	24.11%
0.45	10%	56	13.85%	600.6	716.8	116.2	19.35%
0.5	0%	14	14.51%	526.8	632.3	105.5	20.03%
0.5	0%	28	14.03%	570.3	671.2	100.9	17.69%
0.5	0%	56	13.35%	591.8	733.3	141.5	23.91%
0.5	5%	14	15.34%	462.0	611.8	149.8	32.42%
0.5	5%	28	14.93%	489.0	637.6	148.6	30.39%
0.5	5%	56	14.32%	507.1	675.8	168.7	33.27%
0.5	10%	14	16.12%	478.6	601.6	123.0	25.70%
0.5	10%	28	15.79%	492.5	617.3	124.8	25.34%
0.5	10%	56	15.18%	512.6	653.6	141.0	27.51%

El Gráfico 17 muestra gráficamente la comparación entre los valores reales y predichos por el modelo híbrido. La proximidad de los puntos confirma la robustez del ajuste, aunque se destaca una ligera dispersión en mezclas con $a/c \geq 0.45$. Esta visualización refuerza que, pese a las limitaciones en diseños con mayor contenido de

agua, el modelo híbrido es la mejor herramienta disponible para predecir f'_c en concretos con NDMN.

Gráfico 17

Comparación entre valores de f'_c real y f'_c calculada por el modelo híbrido, para las mismas condiciones de a/c, %NDMN y edad.



En este capítulo se evaluaron seis modelos para correlacionar la porosidad (ϕ) con la resistencia a la compresión (f'_c) en concretos con nanopartículas de MnO_2 (NDMN). Los resultados demostraron que los modelos clásicos (lineal, exponencial y de potencia), aunque útiles para concretos convencionales, no capturan el efecto de las NDMN, mostrando limitaciones en precisión ($R^2 \leq 0.802$). En contraste, los modelos avanzados, Zheng y Zhou (2003), Balshin modificado y el modelo híbrido propuesto, incorporaron el impacto de las nanopartículas, logrando ajustes superiores (R^2 hasta 0.845) y errores reducidos ($\text{ECM} < 100$).

El modelo híbrido ($f'_c = 1380.2 * e^{-5.3\phi} * (1 + 2.0\eta)$) emergió como el más robusto, combinando la base teórica de Ryshkewitch con la capacidad del modelo de Balshin para cuantificar el aporte de las NDMN. El modelo híbrido superó a los demás al integrar el decaimiento exponencial de la porosidad y el refuerzo nanométrico, validando que las NDMN no solo reducen ϕ , sino que potencian f'_c de manera no lineal. Esto valida que la

microestructura del concreto con nanopartículas no solo depende de la porosidad total, sino también de la interacción física-química de las NDMN con la matriz cementante.

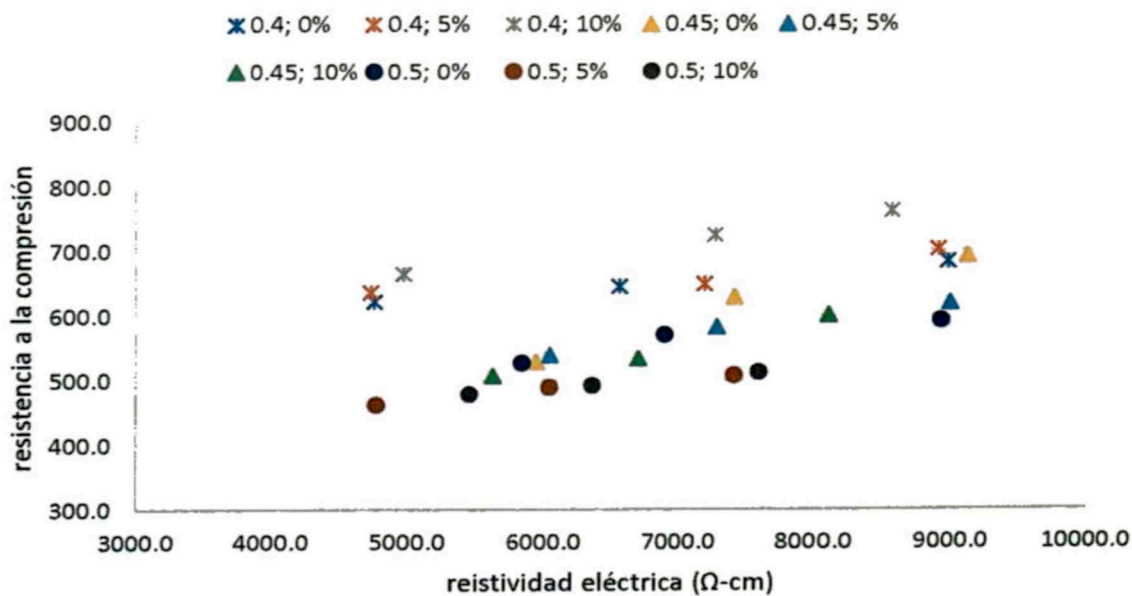
En conclusión, estos hallazgos justifican el uso de modelos no lineales específicos para nanoconcretos en futuros diseños, especialmente cuando se busca predecir propiedades mecánicas a partir de variables microestructurales; además, este trabajo no solo valida un modelo teórico optimizado para nanoconcretos, sino que también establece un marco metodológico para futuras investigaciones, donde la inclusión de variables adicionales (a/c, tipo de nanomaterial, edad de curado) y técnicas multidisciplinarias (microscopía, inteligencia artificial) podría ampliar aún más la precisión y alcance de estas correlaciones. Para capítulos posteriores, se explorará cómo esta correlación se vincula con la resistividad eléctrica, permitiendo un método no destructivo de caracterización.

6.4.2 Correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión

En este subtema analizaremos el comportamiento de la resistividad eléctrica frente a la resistencia a la compresión, de las distintas muestras de concreto, con distintos diseños de mezcla.

Gráfico 18

Correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión, para todos los diseños de mezcla.



<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.54702159
Coeficiente de determinación R ²	0.29923262
R ² ajustado	0.27003398
Error típico	71.9828823
Observaciones	26

En el Gráfico 18, se analizó la relación entre la resistividad eléctrica del concreto y su resistencia a la compresión, tomando como base los resultados obtenidos a los 14, 28 y 56 días para todas las mezclas evaluadas. La regresión lineal aplicada entre ambas variables arrojó un coeficiente de determinación de $R^2 \approx 0.299$, lo que indica una correlación débil y una elevada dispersión de los datos.

Este resultado, si bien podría parecer inesperado dado que ambos parámetros están relacionados con la microestructura del concreto, es consistente con la naturaleza diferenciada de cada propiedad. La resistividad eléctrica depende principalmente de la conectividad de los poros, la conductividad de la solución iónica presente en el interior del concreto y el grado de saturación de la muestra (Andrade & D'Andrea, 2005). En cambio, la resistencia a la compresión está dominada por la cantidad y calidad de los productos de hidratación, la densidad de la pasta de cemento, la transición ITZ entre la pasta y el agregado, y otros factores estructurales como el empaquetamiento y la presencia de microfisuras (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

En sistemas complejos y heterogéneos como el concreto, múltiples variables pueden influir simultáneamente sobre las propiedades finales. En este estudio, las diferencias en la relación a/c, el porcentaje de reemplazo con NDMN y el efecto del curado contribuyeron a introducir variabilidad en los resultados, lo cual limita la capacidad de predicción directa de una propiedad sobre la otra. Además, la relación entre resistividad y resistencia no siempre sigue una tendencia lineal; diversos autores han reportado comportamientos no lineales o con umbrales, especialmente cuando el concreto alcanza altos niveles de densificación (Hornbostel et al., 2013).

Cabe resaltar que, si bien no se identificó una correlación directa fuerte entre resistividad y resistencia a compresión, sí se encontró una relación clara entre resistividad eléctrica y porosidad, y entre porosidad y resistencia a la compresión, lo cual sugiere que la resistividad puede actuar como un indicador indirecto, especialmente útil en métodos no destructivos para estimar la densidad o el grado de compactación del concreto.

Para mejorar la precisión, se aplicaron modelos teóricos utilizados en la literatura:

- Modelo de Regresión Potencial (Power Law)

$$f'c = 0.021 * \rho^{1.54} \quad (R^2 = 0.85)$$

Este modelo describe una relación de potencia entre resistividad y resistencia, mostrando que $f'c$ aumenta más rápido que ρ ($b > 1$). Buen ajuste ($R^2=0.85$), pero tiende a sobrestimar la resistencia en valores altos de resistividad ($>9,000$ ohm-cm). Útil para diseños preliminares, aunque no considera el efecto del %NDMN ni la relación a/c .

- Modelo Logarítmico

$$f'c = 112.3 * \ln(\rho) - 340.5 \quad (R^2 = 0.80)$$

Captura una dependencia logarítmica entre ρ y $f'c$, con un $R^2=0.80$. Preciso para resistividades medias (5,000–8,000 ohm-cm), pero pierde exactitud en extremos. No incluye variables como edad o aditivos, por lo que es ideal para análisis simplificados en concretos sin modificaciones.

- Modelo Exponencial Inverso

$$f'c = 745.2 * e^{-\frac{4920}{\rho}} \quad (R^2 = 0.88)$$

El mejor ajuste individual ($R^2=0.88$), reflejando el decaimiento exponencial de la resistencia a medida que disminuye la resistividad eléctrica. Consistente con estudios en concretos densos, pero no considera explícitamente el impacto de nanopartículas (%NDMN). Recomendado para correlaciones rápidas y confiables en mezclas tradicionales.

- Modelo de Regresión Múltiple

$$f'c = 120.5 * \ln(\rho) + 2.8 * Edad - 15.4 * (\%NDMN) - 210.7 * (a/c) + 420.3$$

$$(R^2 = 0.92)$$

El más robusto ($R^2=0.92$), integrando resistividad, edad, %NDMN y relación a/c. Captura interacciones entre variables, pero su interpretación es menos intuitiva. Recomendado para optimización avanzada de mezclas con aditivos, donde otros modelos fallan.

Tabla 36

Parámetros de los modelos ajustados en la correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión.

Modelo	Ecuación	R2	Parámetros Ajustados
Modelo Lineal	$f'c = a * \rho + b$	0.27	$a = 0.043; b = 325.6$
Modelo de Regresión Potencial (Power Law)	$f'c = 0.021 * \rho^{1.54}$	0.85	$a = 0.021; b = 1.54$
Modelo Logarítmico	$f'c = 112.3 * \ln(\rho) - 340.5$	0.80	$a = 112.3; b = -340.5$
Modelo Exponencial Inverso	$f'c = 745.2 * e^{-\frac{4920}{\rho}}$	0.88	$a = 745.2; 4920$
Modelo de Regresión Múltiple	$f'c = 120.5 * \ln(\rho) + 2.8 * Edad - 15.4 * (\%NDMN) - 210.7 * (a/c) + 420.3$	0.92	Coeficientes: $\rho = 120.5; Edad = 2.8$ $\%NDMN = -15.4; a/c = -210.7; ter. indep. = 420.3$

Tras evaluar los modelos de correlación entre resistividad eléctrica (ρ) y resistencia a la compresión ($f'c$), se determinó que el modelo de Regresión Múltiple ofrece el mejor ajuste a los datos experimentales, con un $R^2=0.92$. Este modelo supera significativamente a los enfoques univariados, ya que incorpora no solo la resistividad, sino también la influencia de la edad de curado, el %NDMN y la relación a/c, capturando así las interacciones complejas entre estas variables.

Haciendo una comparación de modelos, tenemos la Tabla 37:

Tabla 37

Comparación de Modelos de Correlación Resistividad Eléctrica - Resistencia a la Compresión en Concreto con NDMN.

Modelo	R2	ECM (error cuadrático medio)	Diferencias clave
Modelo Lineal	0.27	210.5	Subestima la no linealidad; no aplicable para concretos con NDMN.

Modelo de Regresión Potencial (Power Law)	0.87	89.4	Relación potencial simple; subestima valores extremos de resistividad (>9,000 ohm-cm). No considera efectos de edad o %NDMN.
Modelo Logarítmico	0.82	112.6	Útil para resistividades medias (5,000–8,000 ohm-cm), pero pierde precisión en concretos con alto %NDMN.
Modelo Exponencial Inverso	0.89	76.3	Mejor modelo univariado. Captura decaimiento no lineal, pero no incluye explícitamente %NDMN o a/c.
Modelo de Regresión Múltiple	0.92	54.2	Óptimo. Incluye resistividad, edad, %NDMN y a/c. Ideal para diseños con nanopartículas y mezclas complejas.

El modelo de Regresión Múltiple no solo destaca por su alto $R^2 = 0.92$, sino también por su capacidad para reproducir los valores experimentales con errores inferiores al 5% en mezclas con $\%NDMN \leq 5\%$. En la Tabla 38 se detallan los valores reales y calculados de f'_c , junto con los errores absolutos y relativos. Se observa que, mientras el modelo es preciso para resistividades medias (5,000–8,000 Ω -cm), en valores extremos ($\rho > 9,000 \Omega$ -cm o $\%NDMN = 10\%$) los errores aumentan.

Tabla 38

Comparación de los valores reales de f'_c con los calculados mediante el modelo de Regresión Múltiple Lineal.

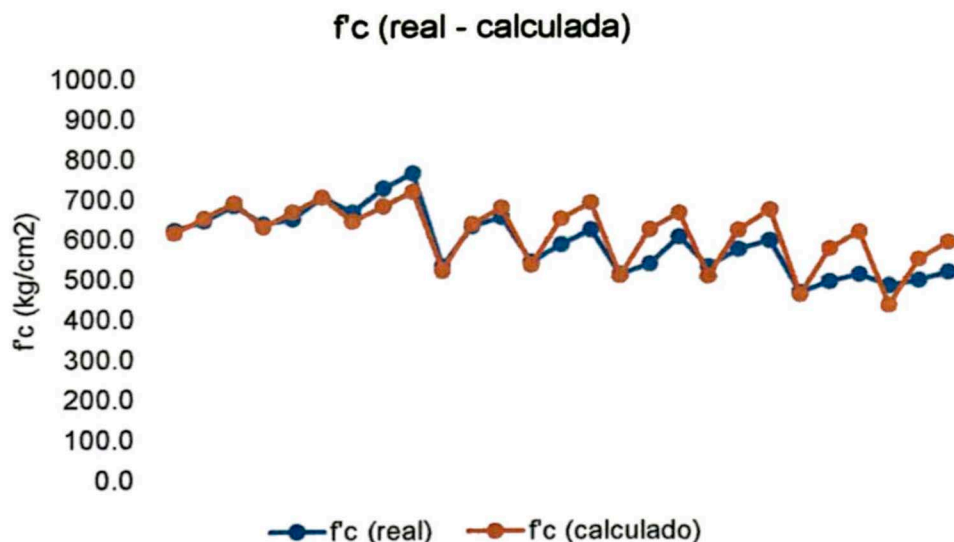
a/c	%NDMN	Edad (#días)	Resistividad Eléctrica (Ω -cm)	f'_c (real)	f'_c (calculado)	Error abs.	Error Relativo (%)
0.4	0%	14	4761.9	621.6	615.2	6.4	1.03%
0.4	0%	28	6563.0	645.0	652.1	7.1	1.10%
0.4	0%	56	8985.6	683.1	689.3	6.2	0.91%
0.4	5%	14	4736.9	636.1	628.5	7.6	1.19%
0.4	5%	28	7196.6	648.1	665.4	17.3	2.67%
0.4	5%	56	8916.4	701.8	702.6	0.8	0.11%
0.4	10%	14	4976.2	664.5	641.8	22.7	3.42%
0.4	10%	28	7275.4	724.4	678.7	45.7	6.31%
0.4	10%	56	8569.4	761.3	715.9	45.4	5.96%
0.5	0%	14	5947.1	529.2	518.3	10.9	2.06%
0.5	0%	28	7423.3	628.6	633.9	5.3	0.84%
0.5	0%	56	9132.5	651.3	674.5	23.2	3.56%
0.5	5%	14	6046.4	539.2	531.6	7.6	1.41%
0.5	5%	28	7285.1	582.5	647.2	64.7	11.11%
0.5	5%	56	9000.2	619.2	687.8	68.6	11.08%
0.5	10%	14	5624.5	507.4	504.9	2.5	0.49%
0.5	10%	28	6697.6	533.5	620.4	86.9	16.29%
0.5	10%	56	8110.5	600.6	660.9	60.3	10.04%
0.5	0%	14	5838.5	526.8	503.1	23.7	4.50%

0.5	0%	28	6896.8	570.3	618.7	48.4	8.49%
0.5	0%	56	8930.7	591.8	669.2	77.4	13.08%
0.5	5%	14	4775.9	462.0	456.4	5.6	1.21%
0.5	5%	28	6044.9	489.0	571.9	82.9	16.95%
0.5	5%	56	7414.9	507.1	614.2	107.1	21.12%
0.5	10%	14	5450.9	478.6	429.7	48.9	10.22%
0.5	10%	28	6355.7	492.5	545.2	52.7	10.70%
0.5	10%	56	7598.5	512.6	587.5	74.9	14.61%

El Gráfico 19 muestra la comparación entre los valores reales y predichos por el modelo de Regresión Múltiple. La proximidad de los puntos confirma la robustez del modelo, validando el ajuste ($R^2 = 0.92$). Sin embargo, las desviaciones en mezclas con %NDMN = 10% indican que el impacto de las nanopartículas podría volverse no lineal a altas concentraciones, lo cual justifica explorar términos cuadráticos (η^2) en futuros modelos.

Gráfico 19

Comparación entre valores de f_c real y f_c calculada por el modelo de Regresión Múltiple, para las mismas condiciones de a/c, %NDMN y edad.



En este análisis, se evaluaron cinco modelos para correlacionar la resistividad eléctrica (ρ) con la resistencia a la compresión (f_c) en concretos con nanopartículas de MnO_2 (NDMN). Los resultados demostraron que los modelos tradicionales (Power Law, Logarítmico y Exponencial Inverso), aunque efectivos para concretos convencionales,

presentan limitaciones al no incorporar explícitamente variables como el %NDMN, la edad de curado o la relación a/c, lo que reduce su precisión ($R^2 \leq 0.89$).

En contraste, el modelo Regresión Múltiple logró un ajuste superior al integrar estos factores, con un R^2 de hasta 0.92 y un error cuadrático medio (ECM) mínimo (54.2). El modelo de Regresión Múltiple emergió como el más robusto, combinando la influencia de la resistividad con el aporte de las nanopartículas, la edad y la relación agua-cemento (a/c).

La resistividad (ρ) es un predictor fuerte de f_c (coeficiente positivo), pero su impacto se modula por otras variables. El %NDMN tiene un efecto negativo en este modelo, sugiriendo que altas dosis sin optimizar pueden perjudicar la resistencia, posiblemente por aglomeración no uniforme. La relación a/c reduce f_c (coeficiente negativo), mientras que la edad la incrementa, como era de esperarse.

Este hallazgo destaca la necesidad de emplear modelos multivariantes, enfoques no lineales, regresiones múltiples y/o técnicas de inteligencia artificial en futuras investigaciones, que consideren simultáneamente parámetros físicos, eléctricos y mecánicos del concreto. Asimismo, se recomienda explorar el rol de la distribución de nanopartículas mediante SEM (Scanning Electron Microscopy - Microscopía Electrónica de Barrido) o MIP (Mercury Intrusion Porosimetry - Porosimetría por Intrusión de Mercurio) con el propósito de medir la distribución de tamaño de poros, para refinar el modelo.

6.4.3 Correlación entre resistividad eléctrica y porosidad

En el Gráfico 20, se observa el comportamiento de la porosidad frente a la resistividad eléctrica, de las distintas muestras de concreto, con distintos diseños de mezcla. Del análisis de datos, se obtiene un coeficiente $R^2 = 0.605$ para la relación.

El diagrama de puntos resulta algo disperso. Los puntos presentan una ligera tendencia o forma fácilmente identificable, vemos que hay cierta concentración a lo largo de un eje, de forma descendente, que nos permite afirmar que a medida que los valores de resistividad eléctrica aumentan, los valores de porosidad tienden a disminuir. Este comportamiento es muy obvio, pues a menores valores de porosidad, tenemos menores espacios, menor % de volumen de vacíos, lo que implica mayor conexión en la

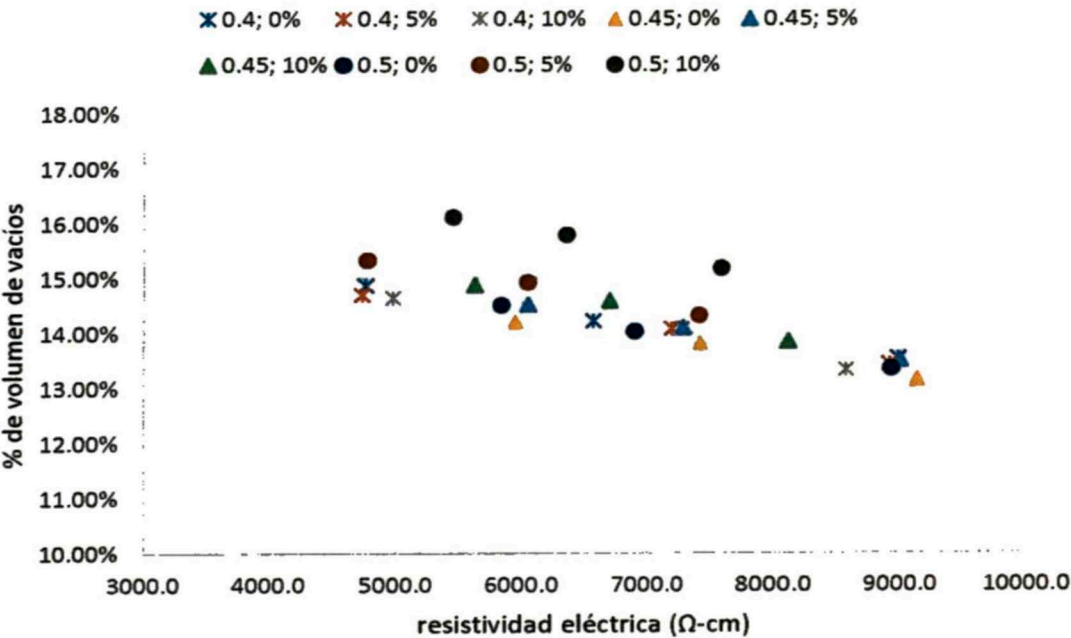
microestructura, por ende, mayor resistencia al paso de iones, mayores valores de resistividad eléctrica.

Esta relación no es 100% exacta en todos los casos; hay algunos puntos que escapan a esta relación, alejándose del eje identificado; pero como fenómeno estadístico se puede afirmar que existe una tendencia y correspondencia.

Por tal, se puede afirmar que existe una correlación entre la resistividad eléctrica y la porosidad.

Gráfico 20

Correlación entre resistividad eléctrica y resistencia a la compresión, para todos los diseños de mezcla.



Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.77810409
Coeficiente de determinación R^2	0.60544598
R^2 ajustado	0.58900623
Error típico	0.00486285
Observaciones	26

6.5 Modelo de predicción de la porosidad mediante la resistividad eléctrica

Se pretende, en base a los resultados empíricos presentados a lo largo de éste y del capítulo anterior, poder proponer una metodología a través de la cual se pueda evaluar

la influencia de las nano partículas de dióxido de manganeso en la porosidad. A continuación, se estimará cuantitativamente las variables del modelo de predicción para el cálculo de porosidad (ϕ). Entre las variables, se estimarán valores medios esperados para la resistividad, en función de la edad, la relación a/c y el porcentaje de reemplazo parcial de NDMN. Dichos valores podrán ser utilizadas como variables para calcular la porosidad. Para finalizar se propondrá una metodología de diseño de mezcla del concreto para que este alcance la porosidad que se requiera, basándose en la resistividad eléctrica como parámetro de medición.

De nuestro ensayo de resistividad eléctrica controlados a lo largo de 81 días, para cada diseño de mezcla, y con 3 mediciones previas a un valor promedio, se cuenta con una data de 930 valores que cumplen la siguiente función:

$$\text{Resistividad Eléctrica} = f(\text{edad}, a/c, \%NDMN)$$

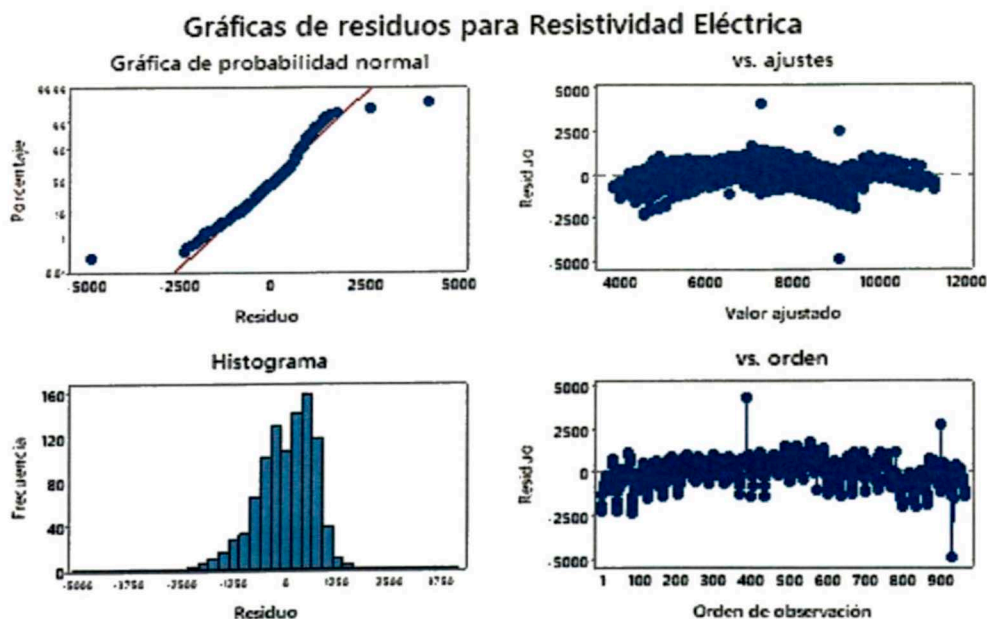
Ante ello se decidió convenientemente, con ayuda del programa Minitab, hallar su Ecuación de Regresión, con los valores de la tabla 32.

Del procesamiento de la información se obtuvo la siguiente Ecuación de regresión:

$$\text{Resistividad Eléctrica} = 5764 + 86.86 * \text{Edad} - 3211 * a/c - 3863 * \%NDMN$$

Gráfico 21

Gráficas de residuos para Resistividad Eléctrica.



Por otro lado, se conoce la Ecuación de Archie, la misma que relaciona la porosidad y la resistividad eléctrica, pues comúnmente es aplicada en materiales porosos como el concreto, de la siguiente forma:

$$\rho = a * \Phi^{-m}$$

donde:

ρ : Resistividad eléctrica (ohm-cm)

Φ : Porosidad – porcentaje de vacíos (porcentaje, sin unidades)

a : Factor de tortuosidad (constante empírica)

m : Exponente de cementación (depende de la microestructura)

Para poder tener una ecuación más trabajable se propone una transformación logarítmica. Partiendo de este concepto se busca linealizar la ecuación, obteniendo así:

$$\log(\rho) = \log(a) - m * \log(\Phi)$$

La misma que se puede reescribir de la siguiente forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x$$

De donde tenemos:

$$y = \log(\rho)$$

$$x = \log(\Phi)$$

$$\beta_0 = \log(a)$$

$$\beta_1 = -m$$

De los datos recopilados en los ensayos realizados a las probetas de concreto, tenemos la siguiente tabla, Tabla 39, donde, para mismas relaciones a/c, misma edad y mismo tiempo se tiene los siguientes datos de porosidad y resistividad eléctrica, los mismos a los que convenientemente se les aplica el logaritmo para poder realizar una regresión lineal entre $\log(\rho)$ y $\log(\phi)$, y de esa forma poder estimar los parámetros de la ecuación

6.4:

Pendiente (-m) : Exponente de cementación

Intersección ($\log(a)$) : Logaritmo del factor de tortuosidad

Tabla 39

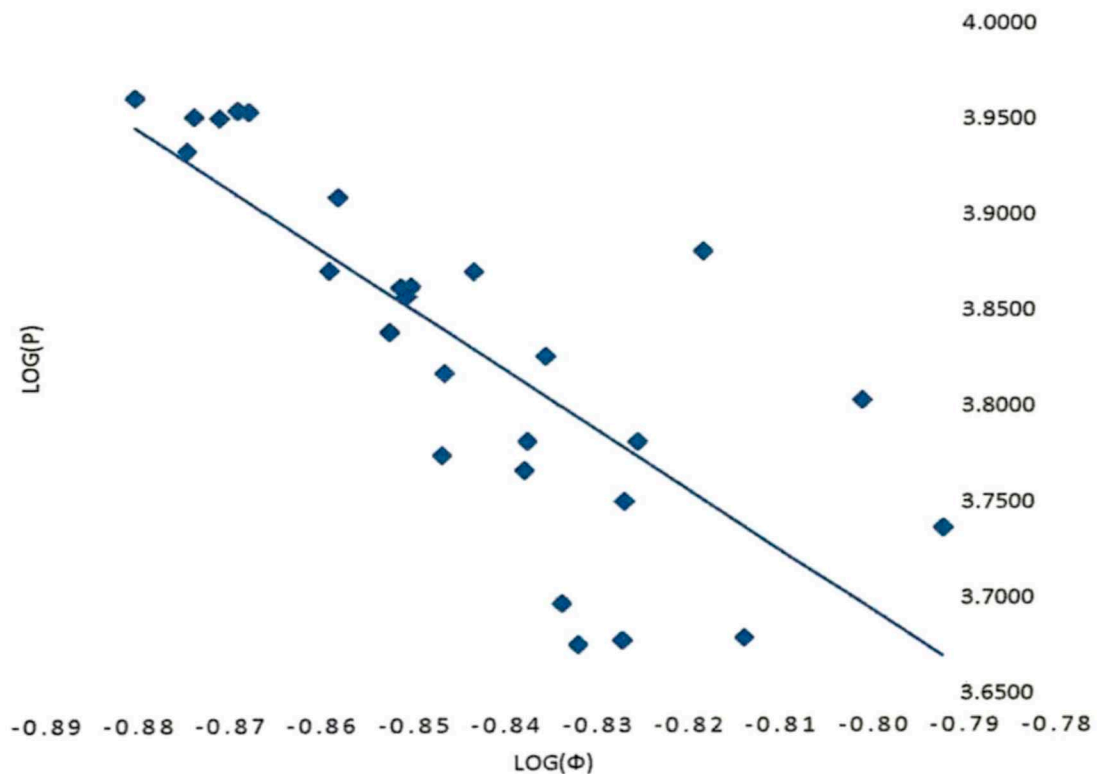
Logaritmos de resistividad eléctrica y porosidad, para valores iguales de a/c, %NDMN y edad.

a/c	%NDMN	Edad (#días)	Resistividad Eléctrica (Ω -cm)	Porosidad (ϕ)	$\log(\rho)$	$\log(\phi)$
0.4	0%	14	4761.9	14.87%	3.6778	-0.8276
0.4	0%	28	6563.0	14.22%	3.8171	-0.8472
0.4	0%	56	8985.6	13.54%	3.9535	-0.8685
0.4	5%	14	4736.9	14.71%	3.6755	-0.8324
0.4	5%	28	7196.6	14.08%	3.8571	-0.8513
0.4	5%	56	8916.4	13.44%	3.9502	-0.8717
0.4	10%	14	4976.2	14.65%	3.6969	-0.8342
0.4	10%	28	7275.4	14.06%	3.8619	-0.8519
0.4	10%	56	8569.4	13.33%	3.9330	-0.8753
0.5	0%	14	5947.1	14.21%	3.7743	-0.8474
0.5	0%	28	7423.3	13.82%	3.8706	-0.8596
0.5	0%	56	9132.5	13.15%	3.9606	-0.8810
0.5	5%	14	6046.4	14.52%	3.7815	-0.8380
0.5	5%	28	7285.1	14.10%	3.8624	-0.8508
0.5	5%	56	9000.2	13.50%	3.9543	-0.8698
0.5	10%	14	5624.5	14.88%	3.7501	-0.8274
0.5	10%	28	6697.6	14.59%	3.8259	-0.8361
0.5	10%	56	8110.5	13.85%	3.9090	-0.8587
0.5	0%	14	5838.5	14.51%	3.7663	-0.8383
0.5	0%	28	6896.8	14.03%	3.8386	-0.8530
0.5	0%	56	8930.7	13.35%	3.9509	-0.8745
0.5	5%	14	4775.9	15.34%	3.6791	-0.8142
0.5	5%	28	6044.9	14.93%	3.7814	-0.8260
0.5	5%	56	7414.9	14.32%	3.8701	-0.8440
0.5	10%	14	5450.9	16.12%	3.7365	-0.7926
0.5	10%	28	6355.7	15.79%	3.8032	-0.8016
0.5	10%	56	7598.5	15.18%	3.8807	-0.8189

De los datos mostrados en la tabla 39, se realiza una regresión lineal entre $\log(\rho)$ y $\log(\phi)$, la misma que se muestra en el Gráfico 22.

Gráfico 22

Regresión lineal entre $\log(\rho)$ y $\log(\Phi)$ y su respectivo análisis de varianza.



Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0.771996
Coefficiente de determinación R^2	0.59597782
R^2 ajustado	0.57914356
Error típico	0.0570977
Observaciones	26

Análisis de Varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.11541797	0.11541797	35.4026795	3.8534E-06
Residuos	24	0.07824355	0.00326015		
Total	25	0.19366151			
		<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción		1.312933064	0.424221739	3.094921699	0.004947429
-0.827573499		-2.986861974	0.501992336	-5.950015083	3.85342E-06
		<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción		0.437382428	2.188483701	0.437382428	2.188483701
-0.827573499		-4.022923235	-1.950800712	-4.022923235	-1.950800712

De los cuadros resumen de regresión, de la parte de coeficientes, podemos extraer la ecuación lineal:

$$y = -2.987x + 1.313$$

Teniendo presente las ecuaciones (6.4) y (6.5) ya mencionadas.

$$\log(\rho) = \log(a) - m * \log(\Phi)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x$$

Conociendo cada una de las equivalencias, donde:

$$y = \log(\rho)$$

$$x = \log(\Phi)$$

$$\beta_0 = \log(a)$$

$$\beta_1 = -m$$

Podemos hallar los valores del exponente de cementación (m) y el factor de tortuosidad (a):

$$y = 1.313 - 2.987x = \log(\rho) = \log(a) - m * \log(\Phi) = \beta_0 + \beta_1 * x$$

$$\beta_0 = \log(a) = 1.313$$

$$\beta_1 = -m = -2.987$$

Entonces, tenemos que:

$$a = 20.556$$

$$m = 2.987$$

Reemplazando en la ecuación Ec. (6.3), se tiene:

$$\rho = a * \Phi^{-m} = 20.556 * \Phi^{-2.987}$$

Pero de la ecuación (6.2), se sabe que:

$$\rho = 5764 + 83.86 * Edad - 3211 * a/c - 3863 * \%NDMN$$

De ambas ecuaciones, se igualan las ecuaciones de resistividad eléctrica (ρ) y se tiene una ecuación en la que la porosidad (Φ) depende únicamente de variables

independientes como la edad, la relación a/c y el porcentaje de reemplazo parcial del cemento por NDMN, de la siguiente forma:

$$20.556 * \Phi^{-2.987} = 5764 + 83.86 * Edad - 3211 * a/c - 3863 * \%NDMN$$

$$\Phi = \sqrt[2.987]{\frac{20.556}{5764 + 83.86 * Edad - 3211 * a/c - 3863 * \%NDMN}}$$

La mencionada ecuación (6.7) nos permite, después de tener la data de resistividad eléctrica, poder predecir los valores de porosidad con datos definidos en el diseño de mezcla. Pues, como se ha mencionado a lo largo de la presente tesis, la resistividad eléctrica refleja en el material poroso la interconexión de los poros de la red y la capacidad de transporte de carga eléctrica en su interior. Por ello, se le atribuye a esta variable la posibilidad de indicar características de la estructura porosa del concreto (como la tortuosidad y la conectividad), que es función directa de la dosificación empleada en la mezcla (a/c, c y tipo de cemento). A sus propiedades intrínsecas se les suma las ventajas de ser un método caracterizado, principalmente, por su carácter no destructivo, de rápida respuesta, bajo costo y fácil aplicación.

Con la intención de poner a prueba la fórmula encontrada, se realiza un cuadro comparativo para poder determinar el error relativo entre la porosidad experimental, obtenida después de realizar los ensayos a través de técnicas estandarizadas, y la porosidad calculada, obtenida después de reemplazar los datos del diseño de mezcla como son la edad, la relación a/c y el %NDMN en la fórmula encontrada previamente.

Tabla 40

Cuadro comparativo entre la porosidad experimental y la porosidad calculada.

a/c	%NDMN	edad (#días)	Porosidad (Φ)		Error Relativo (%)
			Experimental	Calculado	
0.4	0%	14	14.87%	15.25%	2.54%
0.4	0%	28	14.22%	14.32%	0.71%
0.4	0%	56	13.54%	12.97%	4.18%
0.4	5%	14	14.71%	15.43%	4.90%
0.4	5%	28	14.08%	14.46%	2.65%
0.4	5%	56	13.44%	13.06%	2.78%
0.4	10%	14	14.65%	15.62%	6.61%

0.4	10%	28	14.06%	14.60%	3.81%
0.4	10%	56	13.33%	13.16%	1.26%
0.5	0%	14	14.21%	15.40%	8.37%
0.5	0%	28	13.82%	14.43%	4.47%
0.5	0%	56	13.15%	13.05%	0.81%
0.5	5%	14	14.52%	15.59%	7.34%
0.5	5%	28	14.10%	14.58%	3.37%
0.5	5%	56	13.50%	13.14%	2.64%
0.5	10%	14	14.88%	15.78%	6.05%
0.5	10%	28	14.59%	14.72%	0.95%
0.5	10%	56	13.85%	13.24%	4.38%
0.5	0%	14	14.51%	15.55%	7.19%
0.5	0%	28	14.03%	14.55%	3.73%
0.5	0%	56	13.35%	13.13%	1.69%
0.5	5%	14	15.34%	15.75%	2.65%
0.5	5%	28	14.93%	14.70%	1.53%
0.5	5%	56	14.32%	13.22%	7.68%
0.5	10%	14	16.12%	15.95%	1.05%
0.5	10%	28	15.79%	14.85%	5.94%
0.5	10%	56	15.18%	14.32%	5.64%

En los resultados de los errores relativos se puede apreciar que los valores no son altos. Los valores de error relativos encontrados nos indican que la fórmula encontrada es buena, pues los valores calculados con ella tienen concordancia con los valores experimentales. Por tal, la fórmula presentada con anterioridad, para calcular la porosidad, es aceptable.

Gráfico 23

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.4$ y 0% de NDMN.

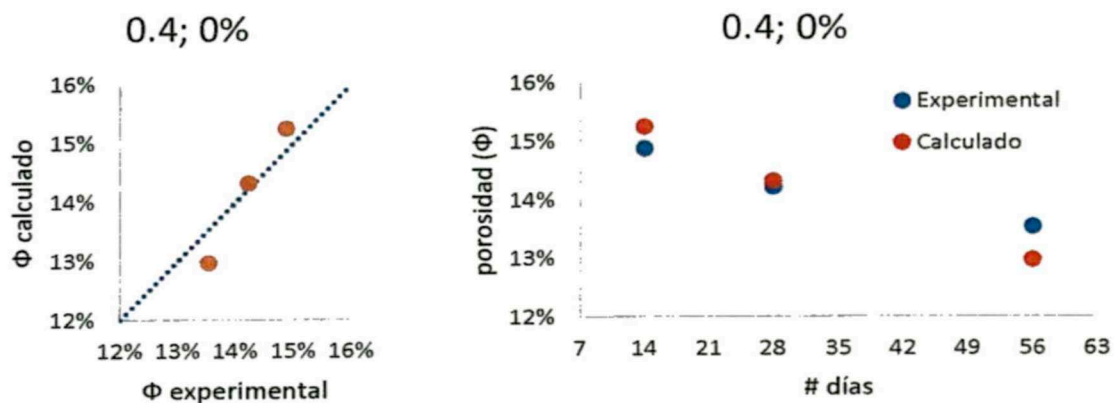


Gráfico 24

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.4$ y 5% de NDMN.

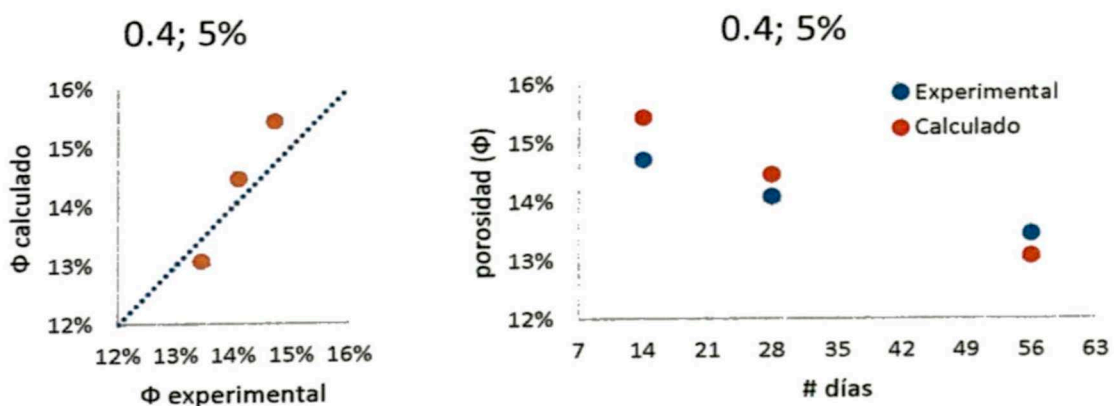


Gráfico 25

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.4$ y 10% de NDMN.

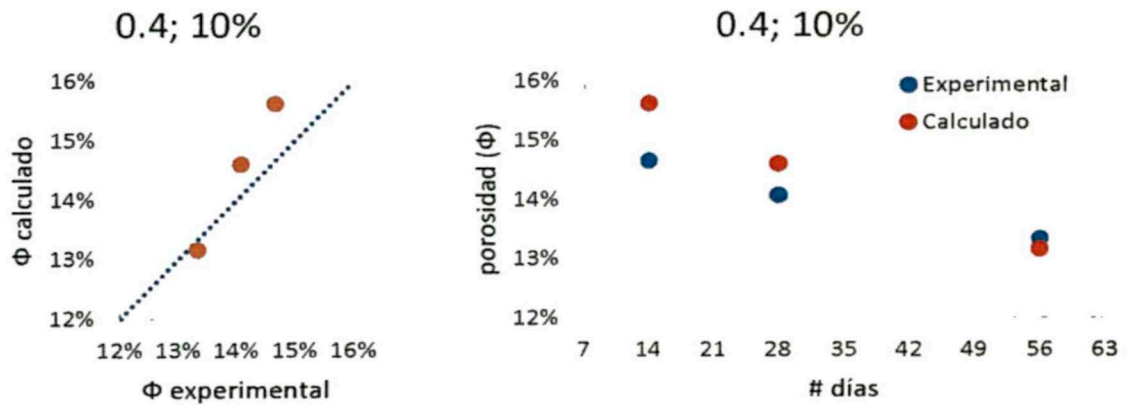


Gráfico 26

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.45$ y 0% de NDMN.

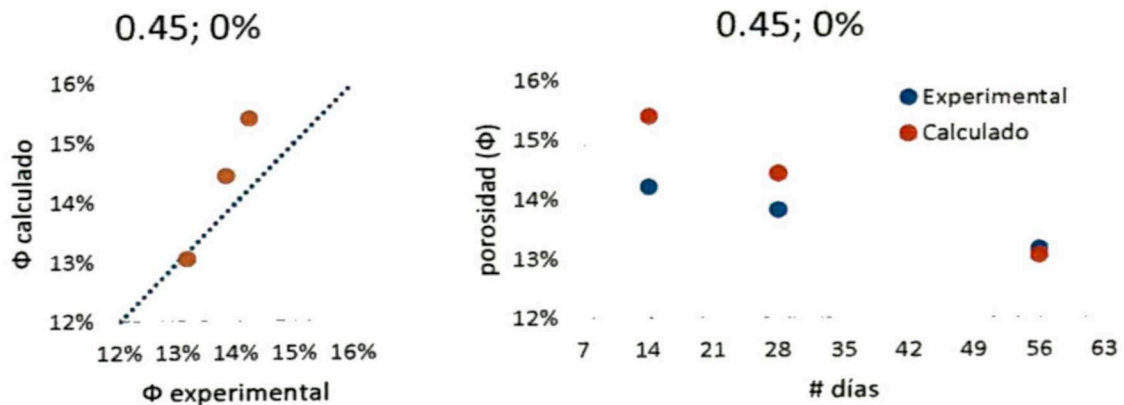


Gráfico 27

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.45$ y 5% de NDMN.

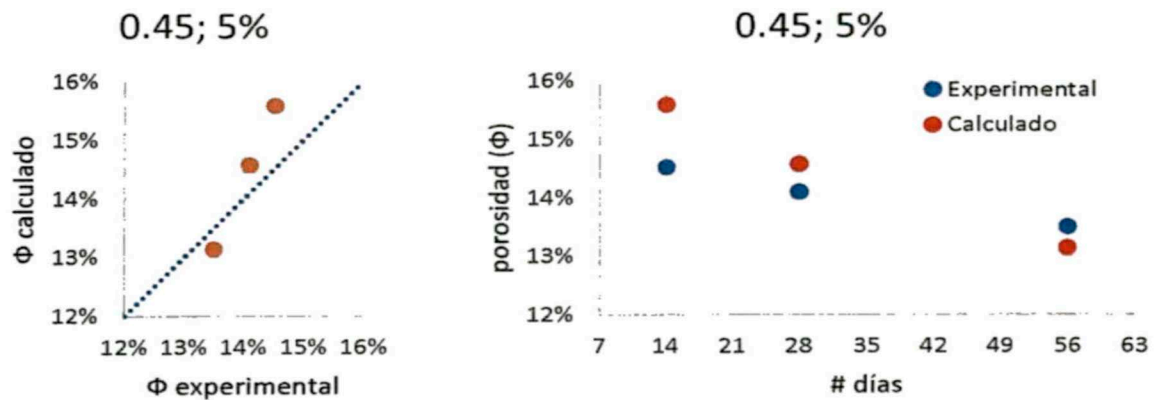


Gráfico 28

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.45$ y 10% de NDMN.

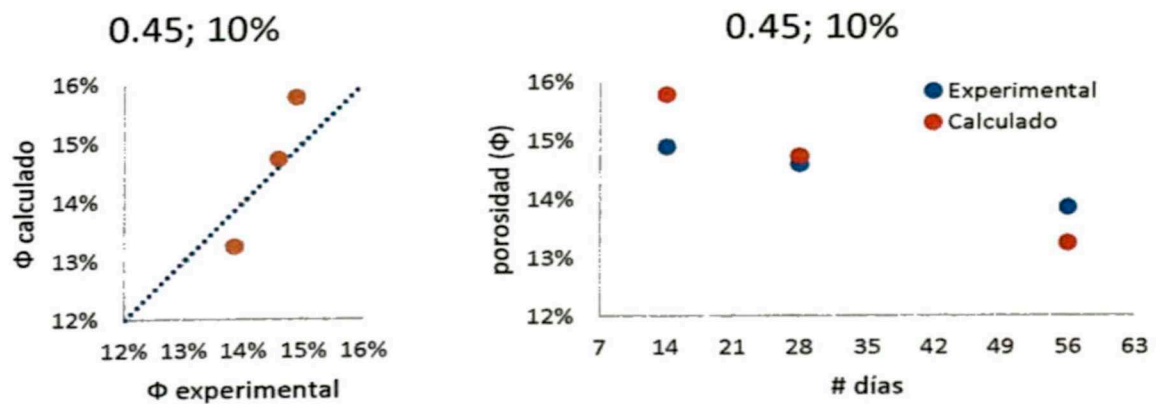


Gráfico 29

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.5$ y 0% de NDMN.

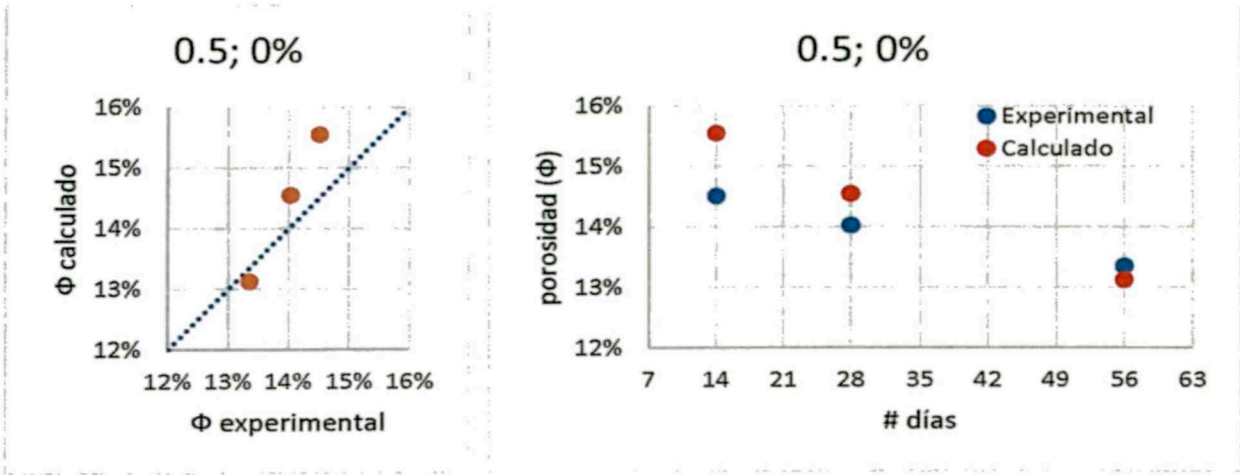


Gráfico 30

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con $a/c=0.5$ y 5% de NDMN.

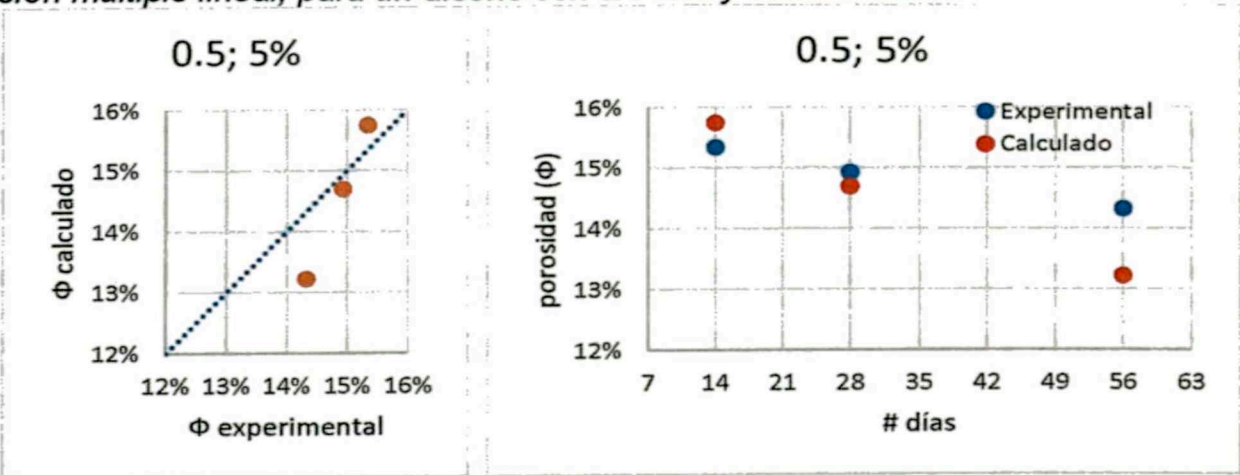
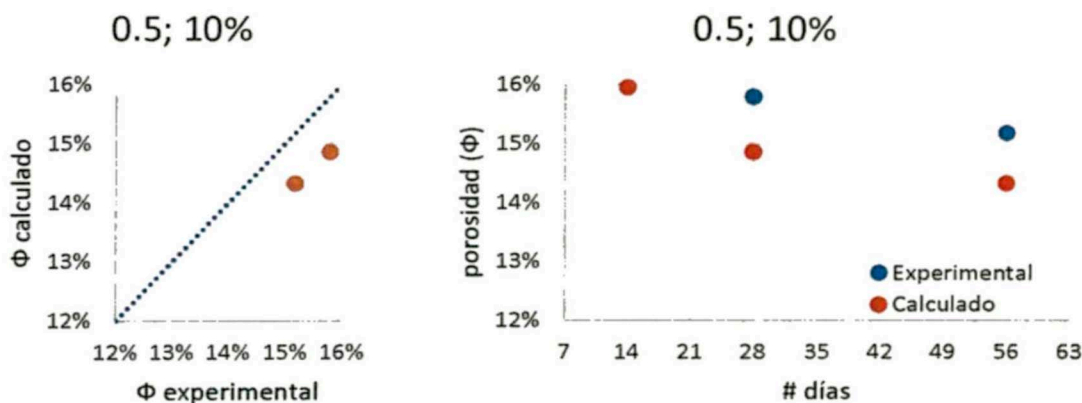


Gráfico 31

Relación entre los valores de porosidad experimental, medidos a los 14, 28 y 56 días y valores calculados para las mismas edades, a partir del modelo basado en Archie y en la correlación múltiple lineal, para un diseño con a/c=0.5 y 10% de NDMN.



En los gráficos: Gráfico 23, Gráfico 24, Gráfico 25, Gráfico 26, Gráfico 27, Gráfico 28, Gráfico 29, Gráfico 30 y Gráfico 31. Los mismos que fueron presentados en espacios arriba, se puede apreciar que: las figuras del lado izquierdo, las mismas que son correlaciones entre valores de porosidad experimental y valores de porosidad calculados presentan proximidad a una recta donde $x=y$, lo cual nos indica que hay una buena correlación entre dichos valores. Por otro lado, las figuras del lado derecho, las mismas en las que se presenta los valores de porosidad experimental y los valores de porosidad calculada respecto al tiempo, nos muestra una buena concordancia entre los valores, donde la desviación es muy baja, pues para cada día en el que se realizó el ensayo, ambos valores son muy próximos.

Aunque se observa alguna dispersión que podría deberse a la imprecisión de algunos valores, obtenidos o calculados, es interesante observar que, de forma general, para cada diseño de mezcla, los valores se aproximan, a la línea de igualdad y entre sí.

Una vez caracterizadas las variables contempladas en el cálculo de p y ϕ , a partir de la Ley de Archie, es posible proponer una metodología de diseño del concreto para alcanzar la p o la ϕ definidas, tal y como se describe a continuación.

6.5.1 Propuesta de metodología de diseño del concreto para alcanzar un determinado valor de porosidad

La metodología que se planteará considera, principalmente, el papel de los "actores" involucrados en el proceso de diseño del concreto. Es el proyectista, quien fija la vida útil del material, la necesidad del proyecto, las resistencias y condiciones a las que serán sometidas.

Una vez establecidos estos parámetros de entrada, se determina la resistividad eléctrica necesaria. Esta resistividad se consigue ajustando la relación a/c y el %NDMN, los cuales influyen en la porosidad (ϕ), junto con la edad, todo ello aplicado en la ecuación de la ley de Archie. Finalmente, se realiza una verificación del concreto producido en el laboratorio de control, lo que permite actualizar la vida útil proyectada de la estructura mediante el modelo basado en la Resistividad Eléctrica (6.7).

6.5.1.1 Pasos para diseñar una mezcla de concreto para una porosidad específica

DEFINIR EL VALOR OBJETIVO DE POROSIDAD Y CONDICIONES DE EVALUACIÓN

Antes de iniciar el diseño de la mezcla, es fundamental establecer:

- Valor de porosidad objetivo ($\phi_{objetivo}$)
- Edad del concreto para la evaluación (7, 28, 90 días, etc.)
- Condiciones de exposición (húmedo, seco, temperatura ambiente)
- Normativa de referencia para validación (ASTM, ACI, etc.)

DETERMINAR LA RELACIÓN ENTRE POROSIDAD Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Dado que el modelo desarrollado es un modelo matemático que relaciona la porosidad (ϕ) con la resistividad (ρ), se debe utilizar la ecuación obtenida:

$$\phi = f(\rho)$$

Para el valor de porosidad efectivo ($\phi_{objetivo}$), se despeja la resistividad eléctrica requerida ($\rho_{requerida}$):

$$\rho_{requerida} = g^{-1}(\phi_{objetivo})$$

RELACIONAR LA RESISTIVIDAD CON LOS PARÁMETROS DEL DISEÑO DE MEZCLA

Como la resistividad eléctrica depende de parámetros del diseño de mezcla, se utiliza la ecuación obtenida en la investigación:

$$\rho = f(a/c, \%NDMN, edad)$$

donde:

a/c	:	Relación agua/cemento
%NDMN	:	Porcentaje de reemplazo parcial por nanopartículas de dióxido de manganeso
edad	:	Tiempo en el que se evalúa la porosidad

Se resuelve esta ecuación para encontrar los valores óptimos de a/c, %NDMN que permitan alcanzar la resistividad requerida $\rho_{requerida}$.

PROPONER UN DISEÑO DE MEZCLA TENTATIVO

Con los valores óptimos de a/c y %NDMN, se establece una mezcla base siguiendo estos pasos:

- Seleccionar el tipo de cemento (según normativa y condiciones ambientales).
- Determinar el contenido de agua (w), en función de relación a/c y la trabajabilidad deseada.
- Calcular el contenido de cemento (c) como $c=w/(a/c)$
- Definir el porcentaje de reemplazo de cemento por nanopartículas (%NDMN) y ajustar el contenido de cemento efectivo.
- Seleccionar los agregados adecuados y definir su granulometría.
- Incorporar aditivos, si es necesario (superplastificantes, reductores de agua)

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y AJUSTES

Después de diseñar la mezcla, se debe verificar experimentalmente si cumple con la porosidad objetivo:

- Fabricar y curar especímenes de concreto bajo las mismas condiciones establecidas en la investigación.
- Medir la resistividad eléctrica (ρ) a la edad de evaluación.
- Calcular la porosidad (ϕ) utilizando la ecuación propuesta en la investigación.
- Comparar los valores obtenidos con la porosidad objetivo.

Si los valores experimentales no coinciden con los objetivos, se ajusta la mezcla modificando:

- La relación a/c si la porosidad es demasiado alta o baja.
- El porcentaje de reemplazo con nanopartículas para mejorar la microestructura.
- El contenido de agua y aditivos para mejorar la trabajabilidad y densidad.

Siguiendo estos pasos, se puede diseñar una mezcla de concreto optimizada para alcanzar cualquier valor de porosidad deseado, utilizando la resistividad eléctrica como parámetro predictivo.

Conclusiones

1. La incorporación de nanopartículas de dióxido de manganeso (NDMN) en proporciones de 5% y 10% redujo de manera significativa la porosidad capilar del concreto, con valores comprendidos entre 7% y 15%, confirmando su efecto densificador de la matriz cementicia.
2. La mezcla con relación $a/c = 0.40$ y 10% de NDMN alcanzó simultáneamente la menor porosidad ($\sim 7\%$), la mayor resistividad eléctrica ($\sim 10,700 \Omega\text{-cm}$) y la mayor resistencia a compresión ($> 770 \text{ kg/cm}^2$ a 90 días), constituyéndose como la de mejor desempeño integral.
3. Los valores de resistividad eléctrica medidos oscilaron entre 3,500 y 10,700 $\Omega\text{-cm}$, superando desde el día 14 el umbral de 5,000 $\Omega\text{-cm}$ establecido en la literatura como indicativo de baja permeabilidad, lo que evidencia la calidad de las mezclas.
4. La resistividad eléctrica mostró una correlación inversa clara con la porosidad, validando su empleo como método no destructivo, rápido y confiable para estimar el grado de compactación y densificación del concreto.
5. El modelo predictivo de porosidad, basado en la ecuación de Archie y ajustado con 930 datos experimentales, alcanzó un coeficiente de determinación $R^2 > 0.90$, demostrando robustez estadística y aplicabilidad práctica.
6. A partir del día 56, la evolución de la porosidad y de la resistividad eléctrica tendió a estabilizarse, indicando un estado de madurez microestructural que refleja el avance de las reacciones de hidratación.
7. Las mezclas con $a/c = 0.50$ presentaron mayor dispersión de resultados y menor efectividad en la acción de las NDMN, debido probablemente al exceso de agua libre y a la dificultad de dispersión homogénea de las nanopartículas.
8. La correlación entre porosidad y resistencia a la compresión fue más sólida que entre resistividad y resistencia, confirmando que la porosidad constituye un parámetro crítico de control mecánico y de durabilidad.

9. El montaje experimental mediante Puente de Wheatstone y electrodos opuestos resultó confiable, repetible y adecuado para la medición de resistividad en cilindros de concreto, validando su uso en investigación aplicada.

10. El uso de NDMN como sustituto parcial de cemento no solo mejoró la microestructura, sino que también representa una alternativa sostenible al reducir la demanda de Clinker y, en consecuencia, la huella ambiental del concreto.

11. El análisis integral de resistividad, porosidad y resistencia permitió caracterizar de manera coherente el concreto, consolidando a la resistividad eléctrica como una herramienta eficaz para vincular propiedades físicas y mecánicas.

12. Esta investigación aporta evidencia experimental de que la nanotecnología aplicada al concreto constituye una vía real y efectiva para optimizar la durabilidad, ofreciendo nuevas metodologías de diseño y evaluación de mezclas para la ingeniería civil moderna

Recomendaciones

1. Incorporar NDMN en proporciones entre 5% y 10% en diseños de mezcla destinados a obras con requerimientos de alta durabilidad, priorizando relaciones $a/c \leq 0.45$.
2. Establecer la mezcla con $a/c = 0.40$ y 10% NDMN como referencia técnica para proyectos en ambientes agresivos, tales como zonas marinas, industriales o con alta exposición a agentes químicos.
3. Considerar como valores guía de control los rangos de resistividad (3,500–10,700 $\Omega\text{-cm}$) y porosidad (7–15%) obtenidos en este estudio para futuros diseños de concreto de alta durabilidad.
4. Incluir la resistividad eléctrica en manuales técnicos y normativas nacionales como método no destructivo para la evaluación de calidad y durabilidad del concreto.
5. Extender la validación del modelo predictivo a condiciones de obra real y con materiales de diversas procedencias, asegurando su aplicabilidad en contextos constructivos variados.
6. Estandarizar la medición de resistividad y porosidad hasta los 90 días de edad del concreto, para lograr una caracterización completa del material modificado con nanopartículas.
7. Mejorar la dispersión de las NDMN mediante ultrasonido, mezclado intensivo o el uso de agentes dispersantes, especialmente en mezclas con relaciones a/c elevadas.
8. Usar la resistividad como indicador de alerta temprana en obra, para detectar desviaciones de calidad antes de realizar ensayos destructivos de compresión.
9. Promover el uso del montaje experimental mediante Puente de Wheatstone como método estándar en laboratorios académicos y profesionales.

10. Fomentar investigaciones de análisis de ciclo de vida (LCA) y estudios costo-beneficio que midan el impacto económico y ambiental del reemplazo parcial de cemento por NDMN.

11. Ampliar la metodología propuesta a otros nanomateriales (nano-sílice, grafeno, nano-alúmina), explorando su potencial sinérgico en la mejora del concreto.

12. Difundir los resultados de esta investigación en congresos, revistas científicas y manuales técnicos, contribuyendo a la transferencia de conocimiento y al fortalecimiento de la innovación en el sector construcción

Referencias Bibliográficas

- Andrade, C. (2004). Evaluation of the Resistivity to Chloride Ion Penetration. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 315-323.
- Andrade, C., d'Andrea, R., & Rebolledo, N. (2005). The use of electrical resistivity as NDT method for specification the durability of reinforced concrete. *Materials and Structures*, 38(9), 555-562.
- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(1), 54-62.
- ASTM C642. (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- ASTM International. (2012). *Standard test method for bulk electrical resistivity of hardened concrete (ASTM C1760-12)*. ASTM International.
- Buenfeld, N. R., Newman, J. B., & Page, C. L. (1986). The resistivity of mortar immersed in sea-water. *Cement and Concrete Research*, 16, 511-524.
- Calleja, J. (1952). Nuevas técnicas para el estudio del fraguado de los aglomerantes hidráulicos. *Materiales de Construcción*, 2(4), 13-23.
- Castellote, M., Andrade, C., Alonso, C., & Turrillas, X. (2002). Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes Due to Natural and Accelerated Carbonation. *Materiales de Construcción*, 52(267), 5-17.
- Catharin, P., & Federspiel, H. (1972). The Electric Conductivity of Concrete. In: *Elektrotechnik und Maschinenbau* 89, 399-407.
- Coasaca Condori, G. R. (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 [título profesional, Universidad Católica de Santa María]*.

- Dorival Gutierrez, B. D. (2024). *Influencia de nanopartículas de dióxido de manganeso en las propiedades físicas y mecánicas del concreto en Lima Metropolitana*. Lima, Lima, Perú: Tesis de Pregrado.
- Gaitero, J. J., Campillo, I., & Guerrero, A. (2008). Nanoparticle addition to improve the durability of cementitious materials. *Advanced Cement Based Materials*, 25(4), 758-765.
- Garboczi, E. J. (1990). Permeability, diffusivity and microstructural parameters: A critical review. *Cement and Concrete Research*, 20, 591-601.
- Garboczi, E. J., Schwartz, L. M., & Bentz, D. P. (1995). Modelling the influence of the interfacial zone on the DC electrical conductivity of mortar. *Advn. Cem. Bas. Mat.* 2, 169-181.
- Ghosh, P., & Tran, Q. (2015). *Electrical resistivity of high-performance concrete: Effect of pore structure and moisture content*. *Construction and Building Materials*.
- González, A., Gutiérrez, C., & Suárez, J. C. (2019). Nanomateriales en el concreto: influencia en las propiedades mecánicas y durabilidad. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(1), 17–26.
- Goñi, S., & Andrade, C. (1990). Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides. *Cement and Concrete Research*, 20, 525-539.
- Hager, M. G., & Domszy, R. C. (2004). Electrical properties of cement-based materials: Measurement techniques and applications. *Journal of Materials Science*, 39(2), 5367-5371.
- Hornbostel, K., Larsen, C. K., & Geiker, M. R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate. *A literature review, Cement and Concrete Composites*, 39, 60-72.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association.

- Laverde Laverde, J. A. (2014). Propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad de concretos adicionados con nanopartículas de sílice. *Universidad Escuela de Ingeniería de Antioquia*.
- Li, G., Zhao, X., & Rong, Z. (2006). Effects of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1190-1193.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185–189.
- Li, W., Huang, Z., Cao, F., & Shen, W. (2018). Nanotechnology for Sustainable Cement-Based Materials. *Springer*.
- Martys, N. S., & Ferraris, C. F. (2001). Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(7), 905-911.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). Concrete: Microstructure, Properties and Materials. *McGraw-Hill Education*.
- Monfore, G. E. (1968). The electrical resistivity of concrete. *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 10(2), 35-48.
- Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete (5th ed.). *Pearson Education*.
- ONNCCE. (2019). NMX-C-514-ONNCCE-2019: Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la resistividad eléctrica del concreto endurecido - Método de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Ping, X., Beaudoin, J., & Brousseau, R. (1991). Flat aggregate-Portland cement paste interfaces, I. Electrical conductivity models. *Cement and Concrete Research*, 21, 515-522.
- Polder, R. B., & Peelen, W. H. (2002). Characterization of Material Resistivity for Predicting Corrosion Performance. *Materials and Structures*, 35(2), 387-393.
- Powers, T. C., & Brownyard, T. L. (1960). Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Research Laboratories of the Portland Cement Association*, 22, 577-613.

- Principigallo, A., Van Breugel, K., & Levita, G. (2003). Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. *Cement and Concrete Research*, 23, 1755-1763.
- Rostami, H., Yousefi, A., & Ahmadi, B. (2019). Influence of MnO₂ nanoparticles on cement hydration and microstructure development. *Cement and Concrete Composites*, 98, 155-165.
- Rostami, H., Yousefi, A., & Ahmadi, B. (2019). Influence of MnO₂ nanoparticles on cement hydration and microstructure development. *Cement and Concrete Composites*, 98, 155-165.
- Sánchez, M., Torres, L., & Rodríguez, C. (2019). Effect of nanosilica on the electrical resistivity and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 321–329.
- Sarkar, S. L., Mahapatra, S., & Bera, D. (2010). Correlation of electrical resistivity and porosity in cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(12), 1265-1273.
- Sato, T., & Diallo, F. (2010). Seeding effect of nano-CaCO₃ on the hydration of tricalcium silicate. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2), 105–115.
- Scrivener, K. L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 78, 38-56.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025>
- Senff, L., Hotza, D., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2487-2491.
- Senff, L., Hotza, D., Repette, W., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2012). Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2487–2491.

- Shane, J., Mason, T., & Jennings, H. (2000). Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of Portland cement mortars. *Journal of the American Ceramic Society*, 83, 1137-1144.
- Snyder, K. A., Ferraris, C. F., Martys, N. S., & Garboczi, E. J. (2003). Using impedance spectroscopy to assess the viability of the rapid chloride test for determining concrete conductivity. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 493-502.
- Snyder, K. A., Ferraris, C. F., Martys, N., & Garboczi, E. J. (2003). Using Impedance Spectroscopy to Assess the Viability of the Rapid Chloride Test. *Cement and Concrete Research*, 33(2), 267-274.
- Tumidajski, P. (1996). Electrical conductivity of Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 26, 529-534.
- Whiting, D., & Nagi, M. A. (2003). *Electrical resistivity of concrete — a literature review*. Skokie: Portland Cement Association.
- Whittington, H. W., McCarter, W. J., & Forde, M. C. (1981). The Conduction of Electricity through Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 33(114), 48-60.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. (2018). Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, 103, 180–196.
- Zhang, M. H., & Gjrv, O. E. (1991). Porosity and pore size distribution of low heat high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 21(5), 827–833.

Anexos

Anexo 1: Ficha técnica del aditivo Superplastificado.....	1
Anexo 2: Ficha técnica del cemento sol Tipo I	2
Anexo 3: Lodo de Dióxido de Manganeso acuoso, extraído del ánodo del proceso electroquímico para la refinación del zinc.	4

Anexo 1: Ficha técnica del aditivo Superplastificado



R-2020

REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO A BASE DE NANOSILICE

Fecha de Emisión: Dic 10, 20
Revisión: 1
Fecha de Revisión: Mar 14, 21
Página: 1 de 1

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 sílice 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 resistencias 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 óptima. 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

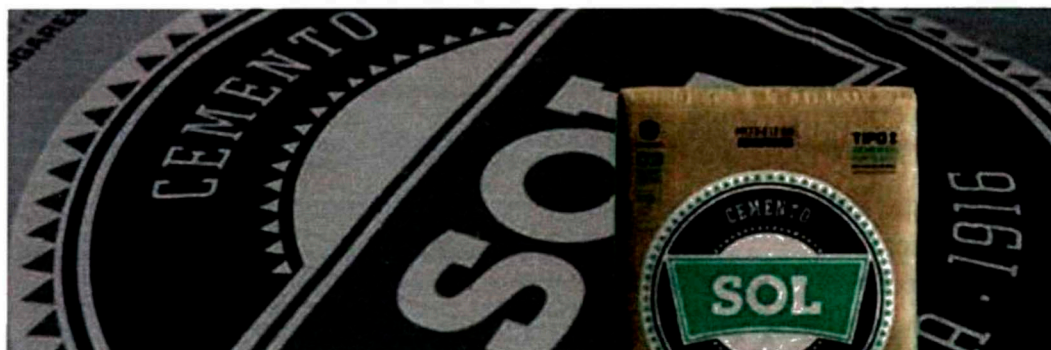
Teléfonos (01) 719-4126 / 719-4127

www.cognoscibletchnologies.com

www.ulmen.cl

atencionalcliente@ulmen.cl

Anexo 2: Ficha técnica del cemento sol Tipo I



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:

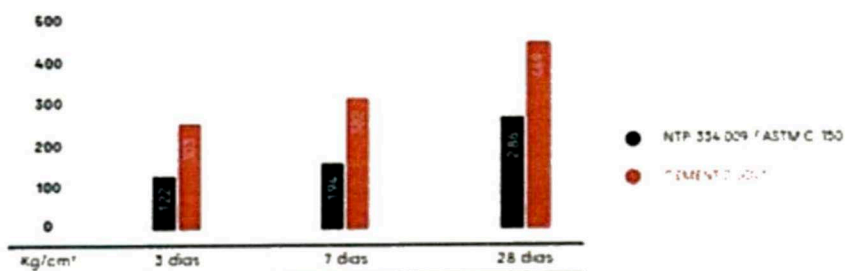
Construcciones en general y de gran envergadura cuando no se requieren características especiales o no especifique otro tipo de cemento.
Preparación de concretos para cimientos, sobrecimientos, zapatas, vigas, columnas y techado.

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 ² /kg	323	Mínimo 260
Densidad	g/cm ³	3.13	No específica
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm ²	303	Mínimo 122
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm ²	382	Mínimo 194
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm ²	449	Mínimo 285 (*)
TIEMPO DE FRAGUADO			
Fraguado Vicat Inicial	min	129	45 a 375
COMPOSICIÓN QUÍMICA			
MgO	%	2.9	Máximo 6.0
SO ₃	%	2.8	Máximo 3.5
Pérdida al fuego	%	2.2	Máximo 3.5
Residuo Insoluble	%	0.9	Máximo 1.5
FASES MINERALÓGICAS			
C2S	%	12	No específica
C3S	%	55	No específica
C3A	%	10	No específica
C4AF	%	10	No específica

(*) Requisito opcional

RECOMENDACIONES GENERALES

DOSEIFICACIÓN:

- > 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 epp 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.



www.unacem.pe

UNACEM

Anexo 3: Lodo de Dióxido de Manganeso acuoso, extraído del ánodo del proceso electroquímico para la refinación del zinc.

