

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



TESIS

**“EVALUACIÓN AL CONCRETO CON ADICIÓN DE
NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE MANGANESO FRENTE
ATAQUES QUÍMICOS PARA RELACIONES A/C:
0.40,0.45,0.50”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

**YILMAR JUAN HERRERA SAENZ
ID: 0009-0003-8668-2240**

ASESOR

**MSc. ANA VICTORIA TORRE CARRILLO
ID: 0000-0002-4531-4033**

LIMA – PERÚ

2024

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

Herrera Saenz, Yilmar Juan

yherrer@uni.pe

959040756

DEDICATORIA

A mi madre, Luz María Sáenz Castañeda por sus consejos, motivación y apoyo incondicional a lo largo de todo mi proceso de formación.

A mi padre, Juan Herrera Valois por su esfuerzo, por estar siempre apoyándome y guiándome ante todas las situaciones que se me presentan.

A mi tío Pedro, que está orgulloso por lo que estoy logrando.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en especial a la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo brindado por medio del IIFIC en el concurso de proyectos de investigación. A mi asesora de tesis, a la profesora Msc. Ana Torre Carrillo por sus enseñanzas y sus recomendaciones en la realización de la tesis.

Al Ing. Diego Alva Gálvez, le doy las gracias sus enseñanzas y apoyo que me brindó en todo el proceso de la elaboración de Tesis.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, que me brindaron sus conocimientos en las diferentes ramas de la Ingeniería Civil, en especial a los encargados del Laboratorio del LEM N°1-FIC por su disposición en el uso del Laboratorio.

A mis compañeros de laboratorio y amigos de investigación, que siempre estuvieron prestos a apoyarme incondicionalmente cuando lo necesitaba.

ÍNDICE

Resumen	5
Abstract.....	6
Prólogo.....	7
Lista de tablas.....	8
Lista de figuras.....	10
Lista de gráficas	12
Capítulo I: Introducción.....	13
1.1 Generalidades.....	13
1.2 Antecedentes	13
1.3 Planteamiento del problema de investigación	16
1.4 Descripción del problema de investigación	17
1.5 Formulación del problema de investigación	17
1.5.1 Problema General	17
1.5.2 Problema Específicos.....	18
1.6 Justificación de la investigación.....	18
1.7 Objetivos del estudio	19
1.7.1 Objetivo General	19
1.7.2 Objetivos Específicos.....	19
1.8 Hipótesis del estudio.....	19
1.8.1 Hipótesis General.....	19
1.8.2 Hipótesis Específicos	19
1.9 Metodología	20
1.9.1 Método de Investigación	20
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	21
2.1 Concreto	21
2.2 Componentes del concreto	22
2.2.1 Cemento	22
2.2.1.1 Composición química del cemento.....	22
2.2.1.2 Clasificación del cemento portland.....	23
2.2.2 Agregados	24

2.2.2.1	Tipos de Agregados	24
2.2.3	Agua	25
2.2.4	Aditivos	25
2.3	Propiedades del concreto.....	26
2.3.1	Trabajabilidad	26
2.3.2	Consistencia	26
2.3.3	Segregación.....	26
2.3.4	Resistencia	27
2.3.5	Durabilidad.....	27
2.4	Vida útil	28
2.5	Causas del deterioro del concreto.....	28
2.5.1	Deterioro del Concreto por Sustancias Químicas.....	28
2.5.1.1	Ataque por Sulfatos.....	29
2.5.1.2	Ataque de Cloruros	30
2.5.1.3	Penetración de Cloruros	30
2.5.1.4	Corrosión del acero de refuerzo y exposición a iones cloruro	34
2.5.1.5	Carbonatación del concreto	37
2.6	Nanopartículas.....	39
2.6.1	Nanopartículas en la industria de la construcción	39
2.6.2	Nanopartículas adicionadas al concreto.....	40
Capítulo III: Determinación de las características de los materiales componentes del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso.....		41
3.1	Caracterización de cemento.....	41
3.1.1	Cemento Sol Tipo I	41
3.1.1.1	Propiedades físicas y químicas.....	41
3.1.1.2	Normativas y Estándares	42
3.2	Caracterización de los agregados	43
3.2.1	Análisis granulométrico	43
3.2.1.1	Agregado fino.....	43
3.2.1.2	Agregado grueso	49
3.2.2	Peso Unitario Suelto y Compactado.....	56
3.2.2.1	Peso Unitario Suelto	56
3.2.2.2	Peso Unitario Compactado	58
3.2.2.3	Porcentaje de Humedad	60
3.3	Caracterización del agua.....	62

3.4	Aditivo	63
3.4.1	Características	63
3.4.2	Dosificación.....	63
3.4.3	Propiedades Físicas.....	63
3.5	Caracterización del dióxido de manganeso	63
3.5.1	Contenido de Humedad	64
3.5.2	Evaluación del pH	65
3.5.3	Reactividad Térmica del cemento con NDMA	67
3.5.4	Determinación del Tamaño de Partículas y Composición Química	68
3.5.5	Determinación de la densidad.....	71
3.5.6	Acondicionamiento de la muestra	72
3.6	Resumen de las propiedades de los componentes del concreto.....	73
Capítulo IV: Diseño de mezclas de concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso		74
4.1	Método de bolomey.....	74
4.1.1	Selección de la Resistencia Promedio Requerida	74
4.1.2	Selección del Asentamiento	75
4.1.3	Selección de Contenido de Aire	75
4.1.4	Selección del Volumen Unitario de Agua	75
4.1.5	Determinación del Peso del Cemento	76
4.1.6	Determinación del Porcentaje del Cemento	77
4.1.7	Determinación de la Curva de Bolomey	77
4.1.8	Determinación del Contenido de Agregado Grueso y Fino.....	79
4.1.8.1	Método por Módulo de Fineza.....	79
4.1.8.2	Diseño de mezcla $a/c=0.40$, $a/c=0.45$ y $a/c=0.5$	80
4.1.9	Determinación de Volúmenes Absolutos (agua y aire)	83
4.1.9.1	Diseño de Mezcla $a/c=0.40$, $a/c=0.45$ y $a/c=0.5$	84
4.1.10	Determinación del Volumen Absoluto de los Agregados	84
4.1.10.1	Diseño de Mezcla $a/c=0.40$, $a/c=0.45$ y $a/c=0.5$	84
4.1.11	Determinación del Volumen Absoluto de los Agregados (Incluido el Cemento).....	84
4.1.12	Determinación de Pesos Secos de los Agregados.....	85
4.1.13	Ajuste por Humedad de los Agregados.....	86
4.1.14	Diseño con Aditivo Superplastificante	87
4.1.15	Diseño con Adición de Nanopartículas de Dióxido de Manganeso.....	87
4.1.16	Resumen de Dosificaciones.....	89

Capítulo V: Evaluación de las propiedades químicas del concreto con nanopartículas de dióxido de manganeso.....	90
5.1 Evaluación de resistencia a los sulfatos	90
5.1.1 Procedimiento	90
5.1.2 Cálculos	92
5.1.3 Resultados.....	93
5.1.3.1 Diseño de Mezcla a/c=0.40	93
5.1.3.2 Diseño de mezcla a/c=0.45	94
5.1.3.3 Diseño de mezcla a/c=0.50	96
5.2 Evaluación frente a la exposición a cloruros.....	98
5.2.1 Procedimiento	99
5.2.2 Cálculos	102
5.2.3 Resultados.....	103
5.2.3.1 Diseño de Mezcla a/c=0.40	103
5.2.3.2 Diseño de Mezcla a/c=0.45	104
5.2.3.3 Diseño de Mezcla a/c=0.50	104
5.3 Evaluación de corrosión de acero de refuerzo	105
5.3.1 Procedimiento	106
5.3.2 Criterios de Evaluación	107
5.3.3 Resultados.....	108
5.3.3.1 Diseño de Mezcla a/c=0.40	108
5.3.3.2 Diseño de Mezcla a/c=0.45	109
5.3.3.3 Diseño de Mezcla a/c=0.50	110
5.4 Ensayo de carbonatación en condiciones aceleradas	111
5.4.1 Procedimiento	111
5.4.2 Resultados.....	114
Conclusiones	118
Recomendaciones	120
Referencia bibliográfica	121
Anexos	125

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en la evaluación de la durabilidad del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) ante ataques químicos para las siguientes relaciones agua-cemento (a/c): 0.40, 0.45 y 0.50. Los ataques químicos, tales como la corrosión de armaduras y la degradación química, representan desafíos significativos para las estructuras de concreto en ambientes agresivos.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico frente ataques químicos para relaciones a/c: 0.40,0.45,0.50 ensayos de resistencia a la penetración de cloruros, resistencia a los sulfatos, resistencia a la carbonatación y resistencia a la corrosión de las armaduras, para así evaluar las propiedades de resistencia química del concreto con adición.

Los resultados de esta investigación revelaron que la incorporación de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) en el concreto mejoró significativamente su resistencia a la penetración de cloruros, resistencia a la corrosión de las armaduras, ataques de sulfatos y carbonatación; especialmente a relaciones A/C bajas de 0.40 y 0.45. Además, se observó una reducción en la absorción de agua y un aumento en la resistencia a la compresión con la adición de dióxido de manganeso (MnO_2), lo que indica una mejora en la durabilidad y la capacidad mecánica del concreto.

Este estudio proporciona información valiosa para la industria de la construcción y la ingeniería civil. Sugiere que la adición de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) puede ser un material estratégico y efectivo para mejorar la resistencia y durabilidad del concreto en ambientes expuestos a ataques químicos. Estos hallazgos tienen el potencial de influir en la formulación de recomendaciones para la construcción de estructuras más duraderas y resistentes en condiciones desafiantes.

Palabras clave: Nanopartículas de Dióxido de Manganeso Anódico, propiedades físicas, propiedades químicas, Resistencia a los Sulfatos, Resistencia a la Corrosión, cemento Portland tipo I.

ABSTRACT

The present study focuses on assessing the durability of concrete with the addition of anodic manganese dioxide (NDMA) nanoparticles against chemical attacks for the following water-cement (a/c) ratios: 0.40, 0.45 and 0.50. Chemical attacks, such as armor corrosion and chemical degradation, pose significant challenges for concrete structures in aggressive environments.

The main objective of this research is to evaluate concrete with addition of nanoparticles of anodic manganese dioxide against chemical attacks for a/c relationships: 0.40,0.45,0.50 tests of resistance to the penetration of chlorides, sulfate resistance, carbonation resistance and corrosion resistance of armor, to assess the chemical resistance properties of concrete by addition.

The results of this research revealed that the incorporation of anodic manganese dioxide (NDMA) nanoparticles into concrete significantly improved its resistance to chloride penetration, armor corrosion resistance, sulphate attacks and carbonation; especially to low A/C ratios of 0.40 and 0.45. In addition, a reduction in water absorption and an increase in compression resistance was observed with the addition of manganese dioxide (MnO_2), indicating an improvement in the durability and mechanical capacity of concrete.

This study provides valuable insights for the construction and civil engineering industry. It suggests that the addition of anodic manganese dioxide (NDMA) nanoparticles can be a strategic and effective material for improving concrete strength and durability in chemical-attacked environments. These findings have the potential to influence the formulation of recommendations for building more durable and durable structures under challenging conditions.

Keywords: Anodic Manganese Dioxide Nanoparticles, Physical Properties, Chemical Property, Resistance to Sulfates, Corrosion resistance, Portland cement type I.

PRÓLOGO

Es un honor presentar esta tesis titulada " Evaluación al concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso frente ataques químicos para relaciones a/c: 0.40,0.45 y 0.50", resultado de un exhaustivo estudio en el área de la ingeniería civil enfocado en mejorar la resistencia y durabilidad del concreto.

La elección de este tema surgió de la necesidad de abordar los desafíos que enfrentan las estructuras de concreto en ambientes agresivos, donde los ataques químicos, como la corrosión de armaduras y la degradación química, representan amenazas significativas para su integridad y vida útil.

El objetivo principal de esta investigación ha sido evaluar el impacto de la adición de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) en la resistencia del concreto ante ataques químicos, mediante pruebas de resistencia a la penetración de cloruros, sulfatos, carbonatación y corrosión de las armaduras, a diferentes relaciones agua-cemento.

La metodología empleada incluyó ensayos de laboratorio meticulosos y análisis detallados de los resultados obtenidos. Los hallazgos revelaron que la incorporación de NDMA en el concreto mejoró significativamente su resistencia a diversos ataques químicos, especialmente con 5% de NDMA, lo cual sugiere su potencial como material estratégico para mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto en ambientes agresivos.

Esta tesis se estructura en cinco capítulos, comenzando por una revisión exhaustiva de la literatura en el Capítulo I, seguido por un marco conceptual en el Capítulo II. El Capítulo III detalla la caracterización de los materiales, el capítulo IV se desarrolla el diseño de mezcla, mientras que el Capítulo VI presenta y analiza los resultados de los ensayos de la investigación.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi asesora de tesis, MSc. Ing. Ana Torre Carrillo, por su orientación experta y apoyo continuo a lo largo de este proyecto. También agradezco a mis compañeros de laboratorio y a todas las personas que contribuyeron de alguna manera a esta investigación.

Espero que esta tesis sirva como un aporte significativo al campo de la ingeniería civil, específicamente en el ámbito de la durabilidad del concreto, y que motive futuras investigaciones y desarrollos en esta área vital para la construcción de infraestructuras más resilientes.

ASESORA

LISTA DE TABLAS

Tabla N°1: Proporciones de los componentes del concreto	22
Tabla N°2: Parámetros permisibles del agua	25
Tabla N°3: Clasificación de aditivos	26
Tabla N°4: Vida de proyecto de estructuras de concreto armado	28
Tabla N°5: Cuadro de valores de evaluación de potenciales de media celda....	37
Tabla N°6: Tabla de propiedades físicas y químicas	42
Tabla N°7: Requisitos de gradación del agregado fino (ASTM C33)	44
Tabla N°8: Cuadro de Análisis granulométrico del agregado fino	45
Tabla N°9: Recomendación del uso del concreto con el módulo de finura del agregado fino	46
Tabla N°10: Prueba de peso específico del agregado fino	48
Tabla N°11: Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso o global	50
Tabla N°12: Cuadro de Análisis granulométrico del agregado grueso	51
Tabla N°13: Prueba de peso específico de agregado grueso	55
Tabla N°14: Peso unitario suelto del agregado fino	58
Tabla N°15: Peso unitario suelto del agregado grueso	58
Tabla N°16: Peso unitario compactado del agregado fino	60
Tabla N°17: Peso unitario compactado del agregado grueso	60
Tabla N°18: Tamaño de la muestra de agregado (NTP 339.185.2021)	61
Tabla N°19: Contenido de humedad del agregado fino	62
Tabla N°20: Contenido de humedad del agregado grueso	62
Tabla N°21: Límites permisibles del agua de mezcla (NTP 339.088.2014)	63
Tabla N°22: Evaluación de reactividad térmica de mortero con NDMA	68
Tabla N°23: Tamaño de partículas de NDMA	70
Tabla N°24: Porcentaje de compuestos del material	71
Tabla N°25: Densidad del NDMA	72
Tabla N°26: Resumen de propiedades de los materiales componentes del concreto	73
Tabla N°27: Relación a/c por resistencia (ACI-211)	74
Tabla N°28: Resistencia promedio requerida (ACI)	75
Tabla N°29: Contenido de aire incorporado según su TMN - ACI	75
Tabla N°30: Volumen Unitario de Agua diseño para 1 m ³ de concreto (Its)	76
Tabla N°31: Valores de coeficiente de A de la curva de Bolomey	78
Tabla N°32: Distribución granulométrica de Bolomey para TMN de ½"	78
Tabla N°33: Módulo de fineza de la curva de Bolomey MFB2 para un TMN de ½"	80
Tabla N°34: Porcentaje de participación de los agregados por el método de fineza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.40	81
Tabla N°35: Porcentaje de participación de los agregados por el método de fineza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.45	82
Tabla N°36: Porcentaje de participación de los agregados por el método de fineza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.50	83
Tabla N°37: Ajuste por humedad diseño a/c=0.40	86
Tabla N°38: Ajuste por humedad diseño a/c=0.45	86
Tabla N°39: Ajuste por humedad diseño a/c=0.50	86
Tabla N°40: Dosificación con aditivo a/c=0.40	87
Tabla N°41: Dosificación con aditivo a/c=0.45	87
Tabla N°42: Dosificación con aditivo a/c=0.50	87
Tabla N°43: Dosificación con Adición de NDMA a/c=0.40	88

Tabla N°44: Dosificación con Adición de NDMA $a/c=0.45$	88
Tabla N°45: Dosificación con Adición de NDMA $a/c=0.50$	88
Tabla N°46: Dosificaciones de las mezclas de concreto para 1 m^3 de concreto	89
Tabla N°47: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.40$ y 0% de NDMA.....	93
Tabla N°48: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.40$ y 5% de NDMA.....	93
Tabla N°49: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.40$ y 5% de NDMA.....	94
Tabla N°50: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.45$ y 0% de NDMA.....	95
Tabla N°51: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.45$ y 5% de NDMA.....	95
Tabla N°52: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.45$ y 0% de NDMA.....	95
Tabla N°53: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.50$ y 0% de NDMA.....	96
Tabla N°54: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.50$ y 5% de NDMA.....	97
Tabla N°55: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.50$ y 10% de NDMA.....	97
Tabla N°56: Penetrabilidad del ion cloruro basada en la carga pasada.....	102
Tabla N°57: Intensidad de corriente y cargas en el concreto con $a/c=0.40$	103
Tabla N°58: Intensidad de corriente y cargas en el concreto con $a/c=0.45$	104
Tabla N°59: Intensidad de corriente y cargas en el concreto con $a/c=0.50$	104
Tabla N°60: Resumen de Penetrabilidad del ion cloruro en concreto con NDMA.	105
Tabla N° 61: Cuadro de valores de evaluación de potenciales de media celda. Fuente: ASTM C-876-91.....	108
Tabla N° 62: Potencial eléctrico de corrosión-Ecorr para $a/c=0.40$	108
Tabla N°63: Potencial eléctrico de corrosión-Ecorr para $a/c=0.45$	109
Tabla N°64: Ecorr (V) para concreto $a/c=0.45$	110
Tabla N°65: Profundidad de carbonatación en concreto con NDMA	115
Tabla N°66: Coeficientes de carbonatación acelerada del concreto con NDMA y diferentes relaciones a/c	115
Tabla N°67: Coeficientes de carbonatación ambiental del concreto con NDMA y diferentes relaciones a/c	116
Tabla N°68: Tiempo que tarda el carbonato en llegar al refuerzo y provocar la corrosión.....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura N°1: Componentes del concreto	21
Figura N°2: Difusión de iones	31
Figura N°3: Formación de la pila de corrosión	35
Figura N°4: Proceso de corrosión en el acero de refuerzo. Como proceso electroquímico, existen reacciones anódica $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ y catódica $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$ y un flujo de electrones del ánodo al cátodo	36
Figura N°5: Relación entre las áreas corroídas (ánodo) y sanas (cátodo) del refuerzo, el proceso de corrosión puede darse como una microcelda a), o macrocelda b).	36
Figura N°6: Cemento sol tipo I.....	41
Figura N°7: Tamices colocados en tamizador eléctrico UNI-LEM	43
Figura N°8: Partículas de AF retenidas en los tamices UNI-LEM.....	44
Figura N°9: Muestra colocada en el equipo tamizador UNI-LEM	50
Figura N° 10: Retiro de la muestra del equipo tamizador	51
Figura N°11: Muestra representativa del agregado grueso	54
Figura N°12: Muestra saturada superficialmente seca	54
Figura N°13: Pesado de la muestra superficialmente seca en canastilla.	55
Figura N°14: Colocación de muestras en horno UNI-LEM	57
Figura N°15: Llenado de agregado grueso en molde UNI-LEM	57
Figura N°16: Llenado por capas en molde UNI-LEM	59
Figura N°17: Extracción de muestra representativa de NDMA.....	64
Figura N°18: Balanza de humedad con muestra de NDMA	65
Figura N°19: Muestras de cemento tipo I con el NDMA	65
Figura N°20: Medición de pH.....	66
Figura N°21: Muestras de cemento con NDMA	67
Figura N°22: Agitador magnético con medidor de temperatura.....	67
Figura N°23: Difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance.....	69
Figura N°24: Estructura cristalina $MnO_2-\alpha$	70
Figura N°25: Muestra de NDMA en fiola	71
Figura N°26: Muestra de NDMA en mufla.....	72
Figura N°27: Muestra de NDMA en polvillo.....	72
Figura N°28: Llenado de moldes con mortero UNI-LEM	90
Figura N°29: Cubos de mortero ensayo de compresión UNI-LEM	91
Figura N°30: sulfato de magnesio	91
Figura N°31: Muestras sumergidas en solución de sulfato de magnesio	92
Figura N°32: Medición en comparador de longitud UNI-LEM.....	92
Figura N°33: Esquema del ensayo del ensayo de penetración de iones cloruro.	99
Figura N°34: Probetas de 100mm x 200 mm UNI-LEM.....	99
Figura N°35: Disco de 50 mm UNI-LEM	99
Figura N°36: Muestra sumergida en agua destilada UNI-LEM.....	100
Figura N°37: Impermeabilización de la muestra con silicona líquida UNI-LEM	100
Figura N°38: Recipientes de vidrio UNI-LEM	101
Figura N°39: Recipiente con las mallas y conectas a la fuente UNI-LEM.....	101
Figura N°40: Sistema completo más multitester UNI-LEM.....	102
Figura N°41: Preparación de probetas de 150x300 mm UNI-LEM	106

Figura N°42: Equipo de medición de potencial eléctrico MC MILLER Co UNI-LEM	106
Figura N°43: Voltímetro configurado UNI-LEM	107
Figura N°44: Electrodo de referencia en medición UNI-LEM	107
Figura N°45: Componentes de la cámara de carbonatación acelerada.....	112
Figura N°46: Muestras en cámara de carbonatación UNI-LEM.....	113
Figura N°47: Corte axial de probeta UNI-LEM	113
Figura N° 48: Medición de profundidad de carbonatación UNI-LEM	114
Figura N° 49: Medición de pH de muestra carbonatada UNI-LEM	114

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfico N°1: Curva granulométrica del agregado fino	45
Gráfico N°2: Curva granulométrica del Agregado Fino	52
Gráfico N°3: Valores de PH para diferentes combinaciones del cemento con nanopartículas de dióxido de manganeso	66
Gráfico N°4: Tiempo de reactividad del cemento con NDMA	68
Gráfico N°5: Gráfica del XRD	69
Gráfico N°6: Curva de Bolomey para un TMN de 1/2"	79
Gráfico N°7: Porcentaje de participación de los agregados por el método de fineza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.40	81
Gráfico N°8: Porcentaje de participación de los agregados por el método de fineza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.45	82
Gráfico N°9: Porcentaje de participación de los agregados por el método de fineza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.50	83
Gráfico N°10: Cambio de longitud unitaria acumulada a/c=0.40	94
Gráfico N°11: Cambio de longitud unitaria acumulada a/c=0.45	96
Gráfico N°12: Cambio de longitud unitaria acumulada a/c=0.50	97
Gráfico N°13: Ecorr (V) para concreto a/c=0.40.....	109
Gráfico N°14: Ecorr (V) para concreto a/c=0.45.....	109
Gráfico N°15: Ecorr (V) para concreto a/c=0.50.....	110
Gráfico N°16: Coeficiente de carbonatación del concreto con NDMA para diversas relaciones a/c.....	117

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el impacto del Nanóxido de Manganeso Anódico (NDMA) en las propiedades químicas del concreto, con el fin de determinar su viabilidad como sustituto parcial del cemento en las mezclas de concreto. El Nanóxido de Manganeso Anódico (NDMA) ha sido objeto de investigación debido a su potencial influencia en la durabilidad y resistencia del concreto. Al evaluar el efecto del NDMA, se busca comprender cómo impacta en las propiedades del material y determinar si puede ser considerado como una alternativa viable en la industria de la construcción.

El dióxido de manganeso se origina como un subproducto durante el refinado del zinc, y dado que Perú es el segundo mayor productor mundial de zinc, es esencial comprender este proceso. El concentrado de zinc se envía a la refinería, donde atraviesa una serie de procesos para transformarse en el producto final refinado. En Perú, la única refinería de zinc es Cajamarquilla, operada por Nexa Resources, con una capacidad de 320,000 toneladas al año. Al finalizar los procesos electroquímicos, se obtiene Dióxido de Manganeso adherido al ánodo, representando aproximadamente 140 toneladas mensuales. A pesar de ello, existen pocos estudios que hayan evaluado los efectos de este subproducto nanométrico en las propiedades macroscópicas del concreto. Esta investigación tiene como parte de su objetivo caracterizar las nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) para su posible reutilización como sustituto parcial cementicia en la elaboración de concreto.

Uno de los desafíos principales en la construcción de estructuras es la exposición a ambientes agresivos que pueden deteriorar el concreto, disminuyendo su vida útil. Por tanto, es crucial buscar materiales que fortalezcan las propiedades del concreto frente a estos agentes agresivos. Además, la posibilidad de sustituir parcialmente el cemento puede conducir a un menor consumo de este material. En este contexto, se plantea la utilización de dióxido de manganeso, un subproducto del refinado del zinc, para mejorar la durabilidad del concreto frente a ataques químicos como sulfatos, cloruros, carbonatación y corrosión. Este enfoque no solo busca elevar la calidad del concreto, sino también reducir el desperdicio de dióxido de manganeso, contribuyendo así a la preservación del medio ambiente.

1.2 ANTECEDENTES

El concreto se destaca como un material conglomerado de uso frecuente, especialmente en la edificación de estructuras como puentes, muelles, edificaciones y vías. Su popularidad se atribuye a propiedades clave como la trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad, que le confieren un rendimiento destacado para resistir diversas condiciones de exposición a lo largo de su vida útil. A pesar de su alta resistencia y durabilidad, el concreto enfrenta desafíos vinculados a factores deteriorantes, incluyendo la corrosión inducida por cloruros, carbonatación, ataques por sulfatos y reacción álcali-sílice. Estos problemas pueden surgir en ambientes urbanos o costeros, impactando la integridad del material a lo largo del tiempo.

En los últimos años, se han realizado varios estudios sobre la durabilidad del concreto, incluida la investigación sobre el impacto de las nanomoléculas de sílice en la durabilidad del concreto. Por ejemplo, el estudio de Rebeca Aguilar titulado "Identificando el impacto de las nanomoléculas de sílice en el concreto en su durabilidad: influencia de factores" (Aguilar, 2007) examinó mezclas de concreto con relaciones agua-cemento (a/c) de 0.55 y 0.65, con la adición de nanosílice. Los resultados mostraron que cuando la relación a/c era de 0.65, las muestras expuestas a una solución de sulfato de sodio presentaron un mayor deterioro. Esta investigación destaca la importancia de considerar el impacto de las nanomoléculas de sílice en la durabilidad del concreto, especialmente en relación con la relación agua-cemento y la exposición a ambientes agresivos.

Adicionalmente a lo mencionado anteriormente, surge otro factor crítico: la exposición al rocío de agua de mar, una condición común para las estructuras ubicadas en áreas costeras o marinas. Esta exposición somete al concreto a agentes extremadamente agresivos, generando principalmente tres capas de deterioro. En la primera capa, se observa un ataque de magnesio (Mg) que afecta la composición del concreto al sustituir el calcio (Ca) del silicato cálcico hidratado (C-S-H) por componentes de magnesio (Mg), formando silicato de magnesio hidratado (M-S-H). Este reemplazo es especialmente perjudicial ya que el C-S-H es esencial para la unión de la pasta y el desarrollo de la resistencia del concreto. La segunda capa se caracteriza por el ataque de azufre (S), que reacciona con el concreto para formar productos como taumasita y etringita, reduciendo así su resistencia. La tercera capa es predominantemente afectada por el cloro (Cl), que reacciona con el concreto para formar sales de Friedel. Estas sales debilitan la pasta y, en elementos que contienen acero de refuerzo (concreto armado), aumentan el riesgo de corrosión en los elementos de acero, afectando la resistencia y funcionalidad de la estructura (Jakobsen et al., 2016).

Además, se ha explorado el uso de dióxido de manganeso como reemplazo parcial del cemento para mejorar la durabilidad de las barras de acero y brindar protección adicional contra la corrosión. Utilizando desechos electroquímicos de dióxido de manganeso en una concentración del 10% en peso, se demostró que la corrosión disminuye la profundidad de carbonización. Además, se observó que la masa de acero se conservaba mejor en comparación con las muestras de hormigón convencionales (Batis, Chousidis, Ioannou y Rakanta, 2015).

El uso de nanopartículas de sílice en morteros ha demostrado mejorar significativamente sus propiedades de transporte y microestructura. Cruz Moreno (2014) llevó a cabo un estudio en el que se introdujeron nanopartículas de sílice en morteros mediante la aplicación de un campo eléctrico, logrando mejoras tanto en las propiedades de transporte como en la microestructura. Los resultados mostraron un aumento en la resistividad eléctrica, una reducción en la penetración de CO₂ y la producción de un material con menor porosidad. Además, se observó una mayor producción de productos de hidratación, lo que resulta en la fabricación de estructuras de concreto con una durabilidad mejorada. Esta investigación destaca el potencial del uso de nanopartículas de sílice y campos eléctricos para mejorar las propiedades de morteros y estructuras de concreto.

La combinación de nano-SiO₂ y cenizas volantes en concreto fresco ha tenido un efecto interesante en la estructura del material. Li G.Y. (2004) llevó a cabo un estudio en el que se mezclaron nano-SiO₂ y cenizas volantes con concreto, lo que

resultó en una disminución del tamaño de los poros. La alta actividad del nano-SiO₂ y la nucleación promovida por las cenizas contribuyen a esta reducción. Además, la presencia de estas partículas finas actúa como un "relleno" en los poros, disminuyendo su tamaño efectivo. A medida que aumenta el tiempo de curado, los poros de todas las muestras de concreto tienden a disminuir de tamaño debido a la maduración gradual del material. Esta investigación destaca el potencial del uso de nano dióxido de silicio y cenizas volantes para mejorar la estructura y las propiedades del concreto.

Diversos estudios han demostrado que la adición de nanomateriales, como nanoarcilla, nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃, nanotubos de carbono, grafeno y óxido de grafeno, mejora los recubrimientos. Estos nanomateriales fortalecen la matriz del recubrimiento, mejoran su resistencia al desgaste y reducen la absorción de agua. Además, crean una barrera contra la difusión de sustancias dañinas, lo que aumenta la protección anticorrosión del sustrato metálico. (H. Qu., 2023)

Se realizaron estudios sobre la resistencia a la carbonatación del cemento portland, el cual fue sustituido por un 20% de humo de sílice o polvo de cuarzo después de 28 días de curado. Después de este periodo, se observó que el contenido de hidróxido de calcio (CH) en la mezcla de cuarzo aumentó un 16% en comparación con la mezcla de PC de control, mientras que en la mezcla de humo de sílice disminuyó en un 59%. La profundidad de carbonatación, medida tras 28 días de exposición al CO₂, fue aproximadamente un 28% y un 56% mayor en la mezcla de humo de sílice y cuarzo respectivamente, en comparación con la mezcla de control. A pesar de que la mezcla de cuarzo tenía alrededor de un 75% más de contenido de CH que la mezcla de humo de sílice, mostró un mayor grado de carbonatación. (V. Shah, J. R. Mackechnie, 2002)

Se agregó un 2% en peso de nanopartículas de dióxido de sílice a una muestra de concreto, lo que resultó en la obstrucción de los poros dentro del concreto y una reducción en su volumen. Este efecto llevó a una disminución del coeficiente de difusión de los cloruros en un 85.3% y permitió controlar la permeabilidad del cloruro. Sin embargo, la adición de altos porcentajes de nanopartículas mostró un efecto negativo en la resistencia a los cloruros debido a la formación de zonas débiles y defectuosas originadas por las fuerzas de Van der Waals. (Li, 2021)

Se emplearon nanopartículas de dióxido de cerio en una solución de NaCl para mejorar la resistencia a la corrosión del acero en el concreto armado, actuando como un inhibidor anticorrosivo. Al aplicar un recubrimiento que combinaba diversas concentraciones de nanopartículas de dióxido de cerio con una resina epóxica acuosa, se logró evidenciar un efecto inhibitorio sobre la corrosión. (Ananthkumar y Thiruvoth, 2022)

Se investigó el impacto de la resistencia a los sulfatos en el concreto reforzado con nanotubos de carbono de pared múltiple. Se añadió un 0.05% en peso de nanotubos de carbono a una mezcla de concreto, lo que condujo a un buen rendimiento frente al ataque de los sulfatos. Esto se debió a la dispersión de las partículas de nanotubos de carbono en la mezcla, lo que ralentiza el desarrollo de grietas resultantes de tensiones expansivas en el concreto. Este proceso reduce la penetración de iones de sulfato en el concreto (Praseda & Srinivasa, 2022).

Cuando se produce carbonatación, el pH disminuye, aumentando así la

vulnerabilidad a la corrosión de las barras de refuerzo incrustadas. Entre los factores que influyen están: el tiempo que los morteros están expuestos a la presión parcial de CO₂, la humedad, la porosidad del mortero, las fisuras previas, etc. Evidentemente la composición de conglomerante cementoso también es un punto clave para determinar el efecto y la velocidad del proceso de carbonatación. (A. Bautista, S.M. Alvarez, E.C. Paredes, F. Velasco, S. Guzman, 2015)

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Se carece de suficientes referencias que aborden los beneficios derivados de la incorporación de nano aditivos o nano adiciones en la elaboración de concreto. En la actualidad, existe una creciente necesidad de desarrollar concretos con mayor resistencia mecánica y con mayor durabilidad, especialmente para erigir edificaciones altas en espacios reducidos. Este interés se intensifica en áreas urbanas de gran envergadura, donde la presión del aumento demográfico es cada vez más pronunciada (Márquez, 2018).

Globalmente, alrededor del 40% de todas las estructuras de concreto reforzado se estima que requieren algún tipo de mantenimiento o rehabilitación, mientras que el resto debe ser completamente reemplazado. La corrosión del acero de refuerzo emerge como una de las principales causas que impulsan la necesidad de realizar tanto mantenimiento como reparaciones en todo el mundo (Ligia, 2010).

Así mismo en las elevadas regiones andinas, la mayoría de las viviendas se ven afectadas por fenómenos como la carbonatación, cloruros, sulfatos y los ciclos de congelamiento y deshielo. Esta problemática adquiere una destacada importancia en la economía nacional, especialmente al enfocarse en estas zonas específicas del país. En este contexto, las estructuras de concreto no logran alcanzar la duración prevista para la que fueron originalmente diseñadas (López y Mamani, 2017).

Se debe considerar, en el diseño de mezclas, no solo la resistencia, sino también la durabilidad frente a los agentes medioambientales y condiciones adversas. El concreto ha sido el material predominante en el sector de la construcción durante muchos años, pero su producción a través de la industria cementera contribuye significativamente, emitiendo entre el 5% y el 8% de dióxido de carbono (López y Mamani, 2017).

El deterioro del concreto puede ser causado por diversos factores, como las condiciones ambientales, los procedimientos de elaboración, la calidad de los materiales y la exposición a entornos agresivos. La durabilidad de las estructuras de concreto es un tema de gran importancia, ya que involucra la influencia de múltiples variables (Sanjuan y Castro, 2001).

En este contexto, la investigación sobre la reutilización de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) en la industria de la construcción ha demostrado ser una solución prometedora para crear concretos de alta durabilidad. Actualmente, las NDMA no tienen un propósito productivo en el proceso industrial, lo que las convierte en un problema y en un gasto para su eliminación. Sin embargo, esta investigación ha encontrado una forma de darles un nuevo uso dentro de la cadena de producción de la industria de la construcción.

La incorporación de NDMA en la producción de concreto puede fortalecer su resistencia frente a diversos tipos de deterioro, incluidos los daños físicos, químicos, biológicos y estructurales. Esta solución no solo mejora la durabilidad del concreto, sino que también fomenta la sostenibilidad y el compromiso ambiental al reutilizar un residuo que de otra manera se eliminaría como un desperdicio.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El Perú es considerado como el segundo mayor productor de zinc en el mundo, el dióxido de manganeso se origina como un subproducto durante el refinado del zinc, es esencial comprender este proceso. El concentrado de zinc se envía a la refinería, donde atraviesa una serie de procesos para transformarse en el producto final refinado. En Perú, la única refinería de zinc es Cajamarquilla, operada por Nexa Resources, con una capacidad de 320,000 toneladas al año. Al finalizar los procesos electroquímicos, se obtiene Dióxido de Manganeso adherido al ánodo, representando aproximadamente 140 toneladas mensuales. Dicha empresa obtiene sus insumos de sus unidades mineras (Cerro Lindo, Atacocha y El Porvenir) y luego procesa el zinc en la refinería de Cajamarquilla.

En el proceso de electrólisis del refinado de zinc, durante la fase de limpieza y mantenimiento de las celdas, se produce un precipitado de MnO_2 que se deposita en el fondo de las celdas y debe ser eliminado periódicamente. Este procedimiento se lleva a cabo mediante un sistema de limpieza por succión que permite retirar el lodo de las celdas sin afectar la producción de zinc. Cada celda cuenta con una tubería perforada en su fondo para facilitar la extracción del lodo, la cual está conectada a una manguera flexible para recolectar el lodo mediante vacío. El análisis microscópico de estos lodos reveló que se componen mayoritariamente de nanopartículas de dióxido de manganeso, con un tamaño del orden de 54 nm.

El uso generalizado del concreto en la construcción se debe a su versatilidad y resistencia, aunque su durabilidad puede verse afectada por la acción de agentes químicos como sulfatos y cloruros, los cuales causan corrosión, fisuras y pérdida de resistencia. Para contrarrestar estos efectos, se emplean aditivos impermeabilizantes que actúan como barreras protectoras, disminuyendo la penetración de estos elementos agresivos.

Además de los aditivos mencionados, se implementan estrategias como la selección cuidadosa de materiales, el diseño preciso de las mezclas, la aplicación de tratamientos protectores en la superficie y la realización de inspecciones periódicas. Estas medidas, adaptadas a las condiciones ambientales y de exposición, son fundamentales para garantizar la resistencia y durabilidad del concreto en diferentes entornos de construcción.

En este contexto, es crucial explorar soluciones innovadoras como la aplicación de nanopartículas de dióxido de manganeso para mejorar las propiedades de resistencia y durabilidad del concreto en proyectos de construcción.

1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.5.1 Problema General

¿Cuál es la influencia de la adición de nanopartículas de dióxido de manganeso frente a ataques químicos, tales como su resistencia a sales de sulfatos, cloruro y carbonatos, así como en la corrosión, para relaciones agua/cemento (a/c): 0.40,0.45,0.50; en lima metropolitana?

1.5.2 Problema Específicos

- ¿Cuáles son las características de los materiales componentes del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso?
- ¿Cuál es la dosificación de mezcla óptima para el concreto con adiciones de nanopartículas de dióxido de manganeso?
- ¿Cuál es la influencia de las nanopartículas de dióxido de manganeso frente a ataques químicos del concreto?

1.6 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las nanopartículas de dióxido de manganeso (NDMA) son residuos anódicos generados en el proceso de obtención del zinc, y su eliminación resulta complicada y costosa, representando un desafío significativo para la industria minera. Actualmente, entre el 80% y el 85% del zinc a nivel mundial se obtiene mediante el proceso hidrometalúrgico tradicional, generando grandes volúmenes de residuos de lixiviación (Tang et al., 2009).

En nuestro país se generan aproximadamente 6000 toneladas anuales de este subproducto, los cuales deben ser reutilizados para evitar la contaminación del medioambiente; por otro lado, el concreto armado es el material de construcción más utilizado en el mundo, debido a sus altas propiedades mecánicas; durante el diseño del concreto, la durabilidad de las estructuras es un aspecto relegado, en muchos casos, a un segundo plano por quienes diseñan y construyen nuestros proyectos. Tradicionalmente hemos tenido en cuenta factores como la resistencia del concreto. Sin embargo, en presencia de humedad y sales (como es el caso de la costa peruana); pueden deteriorarse por reacciones dañinas entre los compuestos químicos del cemento y agentes externos como: sales, cloruros, y carbonatos; y presencia de humedad relativa alta; reduciendo así la vida útil de las construcciones, y generando costos muy altos de reparación y mantenimiento; Uno de los mayores desafíos para la industria del concreto es ayudar en la transformación de la sociedad basada en el consumo a una sociedad sostenible ayudando a reducir la contaminación del medio ambiente natural y prevenir el agotamiento de los recursos naturales (Mehra et al., 2016)

La industria de la construcción tiene el desafío de incorporar la sostenibilidad en sus actividades de producción mediante la reutilización de subproductos como adiciones en el concreto en este caso; la influencia de la adición de residuos NDMA, en el desempeño del concreto se fundamenta en que debido a su alta superficie específica, y contenidos de hierro; esta adición actuará como un activador puzolánico en el proceso de hidratación del cemento generando más aluminio ferrita (C4AF) en el concreto, disminuyendo de esta forma el riesgo de corrosión del acero; mejorando además las propiedades

electroquímicas, físicas y mecánicas del concreto armado; existen algunas investigaciones que demuestran la mejora de la resistencia a la compresión; mientras que los temas de resistencia a ataques químicos (sulfatos, cloruros, carbonatación), electroquímica (corrosión) y físico como la porosidad; aún no han sido estudiados de forma exhaustiva, sin embargo; debido a la fineza de estas nanopartículas se podría producir una matriz más densa cuando se optimice el empaquetamiento en el diseño de concreto (Castro & Ferreira, 2016).

Aunque existen investigaciones que respaldan la mejora de la resistencia a la compresión, aún falta un estudio exhaustivo sobre la resistencia a ataques químicos, así como la porosidad del concreto. Sin embargo, debido a la finura de las nanopartículas, se espera que puedan generar una matriz más densa en el diseño del concreto, lo que representa una oportunidad para desarrollar materiales con propiedades específicas que mejoren su durabilidad.

En este contexto, proponemos llevar a cabo una investigación que fomente la innovación en la aplicación de nanopartículas en el sector de la construcción, brindando nuevas oportunidades para desarrollar materiales más durables y resistentes.

1.7 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.7.1 Objetivo General

Evaluar el concreto con adiciones de nanopartículas de dióxido de manganeso frente a ataques químicos, tales como su resistencia a sales de sulfatos, cloruro y carbonatos, así como en la corrosión, para relaciones agua/cemento (a/c): 0.40,0.45,0.50; en lima metropolitana.

1.7.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características de los materiales componentes del concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso.
- Diseñar mezclas de concreto con adiciones de nanopartículas de dióxido de manganeso.
- Evaluar las propiedades químicas del concreto con nanopartículas de dióxido de manganeso.

1.8 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

1.8.1 Hipótesis General

La adición de nanopartículas de dióxido de manganeso influencia en las propiedades químicas del concreto, tales como su resistencia a sales de sulfatos, cloruro y carbonatos, así como en la corrosión, para relaciones agua/cemento (a/c) de 0.40, 0.45 y 0.50, en Lima Metropolitana.

1.8.2 Hipótesis Específicos

- El contenido de nanopartículas de dióxido de manganeso en las mezclas adicionadas afectaría las propiedades químicas del concreto.
- Las relaciones agua – cemento de las mezclas de concreto con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso afectaría las propiedades químicas del concreto.

1.9 METODOLOGÍA

1.9.1 Método de Investigación

La presente investigación se llevará a cabo mediante un enfoque experimental. En este estudio, se evaluará la durabilidad del concreto, específicamente al introducir nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA). La comparación y análisis de los resultados experimentales nos brindarán una comprensión más profunda del fenómeno estudiado. A partir de esta comprensión, se generarán sugerencias y recomendaciones para el diseño de concretos, con el objetivo de desarrollar mezclas capaces de resistir ataques de sulfatos, cloruros y corrosión, además de ser resistentes a la carbonatación. Esto, en última instancia, aspira a producir un concreto más duradero y con una vida útil prolongada.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 CONCRETO

El concepto de concreto, se define como una mezcla de diversos materiales que incluyen agregados finos y gruesos, agua, cemento, aditivos, fibras, entre otros, donde las partículas se encuentran fuertemente unidas entre sí. Las propiedades del concreto están directamente influenciadas por la calidad y las características de estos componentes. La unión entre las partículas se puede clasificar en dos categorías: atracción física y adherencia química. La atracción física ocurre cuando las partículas sólidas tienen poros de gel en su superficie, lo que resulta en una unión debido a una mayor energía en la superficie que supera las fuerzas internas. La adherencia química, por otro lado, se produce cuando la mezcla reacciona y experimenta un esponjamiento limitado, logrando una unión química de tipo iónico y covalente entre las partículas (López Rivva, 2000)

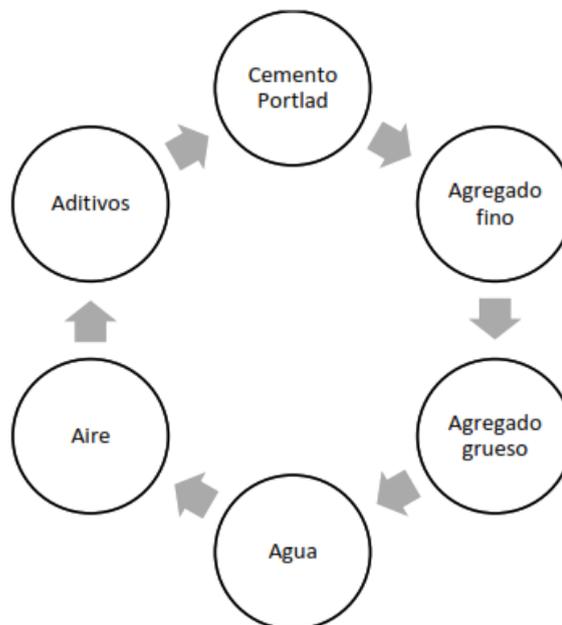


Figura N°1: Componentes del concreto.
Fuente: (Abanto, 2017)

La fase continua del concreto, conocida como medio ligante o pasta, se forma a través de la reacción química entre el cemento y el agua. Por otro lado, la fase discontinua, constituida por el agregado, se caracteriza porque las partículas están separadas por la pasta endurecida. La pasta ejerce una influencia directa en la calidad del concreto endurecido al llenar los espacios vacíos entre las partículas del agregado y proporcionar lubricación durante el proceso de endurecimiento (Guido, 2018).

De acuerdo con Pasquel (2018), el concreto experimenta inicialmente una estructura moldeable y plástica que, después de la hidratación, se transforma en una consistencia rígida debido a la adhesión química de sus componentes. En la tabla se detallan las proporciones usuales de los componentes que conforman el concreto.

Tabla N°1: Proporciones de los componentes del concreto Fuente: (Pasquel, 2018)

Componentes	Volumen Absoluto (%)
Aire	1% - 3%
Cemento	7% - 15%
Agua	15% - 22%
Agregados	60% - 75%

2.2 COMPONENTES DEL CONCRETO

2.2.1 Cemento

El cemento es un polvo extremadamente fino y un aglomerante hidrófilo que se produce al calcinar rocas calizas, arcillas y areniscas. Al mezclarse con agua, experimenta un proceso de endurecimiento para desarrollar propiedades de adherencia y resistencia. Aunque es el componente menos abundante en la composición del concreto, es crucial para determinar su comportamiento según lo requerido (Pasquel, 2018).

La producción del cemento Portland implica la molienda del clinker hasta obtener un polvo fino. A pesar de ser el componente más costoso por unidad, es también el más activo en la mezcla de concreto. La selección y aplicación meticulosa del cemento son fundamentales para lograr las características deseadas; las diversas marcas y tipos de cemento exhiben variaciones en su composición y finura (López Rivva, 2000).

El cemento es el componente más costoso en términos de volumen con respecto a los demás componentes y es, a menudo, el factor determinante en el costo por metro cúbico de concreto. Por esta razón, de acuerdo con las directrices del ASTM C150, que establece normas para el cemento Portland, es fundamental que el cemento se encuentre en óptimas condiciones, sin que agentes externos puedan alterar o modificar su composición. Además, se debe garantizar un almacenamiento adecuado y un cuidado apropiado del cemento con el fin de mantener su calidad, por las mismas razones mencionadas anteriormente.

2.2.1.1 Composición química del cemento

Según Abanto (2009) El cemento está compuesto por una variedad de componentes, lo que hace que sea difícil proporcionar una fórmula química precisa. Sin embargo, es posible identificar los componentes principales que contribuyen en un 90% a la elaboración del cemento. Estos componentes son:

➤ Silicato Tricálcico (C_3S)

El silicato tricálcico es el componente principal del cemento Portland también conocido como alita, presente en una proporción que oscila entre el 30% y el 60%. Este componente desempeña un papel crucial en los procesos de fraguado y endurecimiento del cemento, ya que, al reaccionar químicamente con el agua, genera altas resistencias en un período de tiempo relativamente corto (Abanto Castillo, 2009).

➤ **Silicato Dicálcico (C₂S)**

El silicato dicálcico conocido también como Belita, desempeña un papel fundamental en la composición del cemento Portland, representando aproximadamente entre el 15% y el 37% de su contenido total. Su función es esencial en la formación de productos hidratados que contribuyen de manera significativa a la resistencia y durabilidad del concreto. Aunque su capacidad de reacción es menor en comparación con el silicato tricálcico, tiene buena estabilidad química, el uso de cementos con alto contenido de silicato dicálcico puede producir concretos resistentes a ataque de sulfatos (Abanto Castillo, 2009).

➤ **Aluminato Tricálcico (C₃A)**

El aluminato tricálcico, un componente presente en el cemento Portland en una proporción que oscila entre un 7% y un 15% de su composición total, juega un papel de relevancia en el proceso de fraguado inicial y en el desarrollo de la resistencia temprana del cemento. No obstante, su interacción con los sulfatos y su influencia en la resistencia a largo plazo requieren una atención cuidadosa y una gestión adecuada para evitar posibles problemas de expansión y deformación prematura. Además, la reacción del aluminato tricálcico con el yeso contenido en el cemento permite regular el tiempo de fraguado (Abanto Castillo, 2009).

➤ **Ferroaluminato Tetracálcico (Ca₄AlFe)**

El ferroaluminato tetracálcico conocido también como Celita, un componente que se encuentra en el cemento Portland en un porcentaje que varía entre el 8% y el 10% de su composición total, no tiene un impacto sustancial en la resistencia del cemento en sí. Sin embargo, desempeña un papel significativo en la coloración del cemento y en las reacciones de hidratación que pueden influir en la expansión y la resistencia a largo plazo del concreto en condiciones particulares. Durante la producción del cemento, se ajusta su contenido para cumplir con las especificaciones y los requisitos de rendimiento específicos de cada aplicación (Abanto Castillo, 2009).

2.2.1.2 Clasificación del cemento portland

En Perú, se producen diversos tipos de cemento con diferentes composiciones y adiciones que modifican sus propiedades típicas. La elección del tipo de cemento es un paso crucial en la construcción y debe realizarse con cuidado para cumplir eficientemente con los requisitos específicos de la estructura a construir y evitar gastos innecesarios. Aquí se presentan algunos de los tipos de cemento más comunes en el Perú:

- **Cemento Portland Tipo I:** Este es el tipo de cemento más versátil y ampliamente utilizado. Es adecuado para una variedad de aplicaciones de construcción general.
- **Cemento Portland Tipo IP:** Este tipo de cemento contiene puzolana como adición, lo que mejora su resistencia y durabilidad. Es apropiado para proyectos que requieren un concreto más resistente y duradero.
- **Cemento Portland Tipo II:** Este cemento es resistente a los sulfatos y es

adecuado para proyectos en áreas donde se espera una exposición a sulfatos en el suelo o el agua.

- **Cemento Portland Tipo V:** Diseñado para resistir la acción de los sulfatos, es apropiado para proyectos en regiones con suelos o aguas con alto contenido de sulfatos.
- **Cemento Portland Blanco:** Este tipo de cemento se utiliza cuando se busca un acabado de concreto estéticamente agradable o cuando se requiere un concreto de color claro.
- **Cemento Portland con Adiciones Especiales:** Además de los tipos mencionados, se pueden encontrar cementos con adiciones especiales como ceniza volante o escoria de alto horno, diseñados para cumplir con requisitos específicos de proyectos.

La elección del tipo de cemento depende de las necesidades particulares del proyecto, considerando factores como el clima, la exposición a agentes corrosivos y los requerimientos de resistencia y durabilidad. Se recomienda consultar con un ingeniero o especialista en materiales de construcción para tomar la decisión adecuada.

2.2.2 Agregados

El agregado, un componente esencial del concreto, generalmente representa el porcentaje más alto de la mezcla. La influencia del agregado es de gran importancia en el concreto, tanto en su estado fresco como endurecido y en su fase plástica. Sus características físicas, químicas y mecánicas contribuyen a la trabajabilidad del concreto, manteniendo su consistencia en el estado plástico y, así al final tener una adecuada calidad del concreto. Es muy importante que el agregado utilizado tenga partículas limpias y una clasificación adecuada, además de poseer la capacidad de absorción y resistencia a la abrasión. También debe ser capaz de soportar cambios físicos o químicos para evitar futuros deterioros y fisuras en el concreto.

También podemos definir los agregados como, un conjunto de partículas inorgánicas, que pueden ser de origen natural o artificial y cuyas dimensiones se encuentran dentro de los rangos establecidos en la Norma NTP 400.011. Estos elementos representan la fase discontinua del concreto, es decir, son materiales que se encuentran dispersos en la pasta y ocupan aproximadamente entre el 62% y el 78% del volumen total del concreto en una unidad cúbica. (Rivva López, 2000)

2.2.2.1 Tipos de Agregados

- **Agregado Grueso:** Este tipo de agregado se compone de partículas más grandes, como grava o piedra triturada, cuyos tamaños oscilan desde 4.75 mm (3/16 de pulgada) hasta 50 mm (2 pulgadas). El agregado grueso aporta resistencia estructural al concreto y por lo general se emplea en una mayor proporción que el agregado fino (Rivva López, 2000).
- **Agregado Fino:** Por otro lado, el agregado fino consiste en partículas más pequeñas, generalmente arena, que varían en tamaño desde 0.075 mm

(malla 200) hasta 4.75 mm (3/16 de pulgada). El agregado fino tiene la función de llenar los espacios entre las partículas de cemento y agregado grueso, lo que mejora la trabajabilidad y la cohesión del concreto (Rivva López, 2000).

- **Piedra chancada:** El agregado conocido como piedra triturada se obtiene mediante la trituración manual de rocas. Siempre que la piedra sea resistente, duradera y esté libre de impurezas, puede emplearse en la mezcla de concreto. Investigaciones señalan que el concreto elaborado con piedra triturada o partida tiende a ser ligeramente más resistente que aquel elaborado con piedra de forma redondeada. La piedra triturada tiene un peso que oscila entre 1450 y 1500 kg/m³. (Abanto Castillo, 2009).

2.2.3 Agua

El agua es un elemento importante para el concreto, permite realizar los ensayos previos, durante y después del vaciado. El agua que se usa no debe generar reacciones desfavorables, previamente a su uso se debe realizar estudios que certifique que su uso no generara ningún cambio en la composición y características del concreto.

El agua al ser mezclado con el cemento genera una reacción química logrando la formación del gel y permite la manipulación, trabajabilidad y, colocación en su estado fresco, el mayor problema que tiene el agua en la mezcla es debido a las impurezas y la cantidad que contengan que puedan reaccionar químicamente alterando la estructura del concreto y en su estado endurecido en el curado. (Rivva Lopez, 2000)

Tabla N°2: Parámetros permisibles del agua. Fuente: (Norma Técnica Peruana 339.088, 2014)

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	-

2.2.4 Aditivos

Se considera aditivo a aquellas sustancias que se incorporan a los componentes principales del concreto con el propósito de alterar sus propiedades (Abanto Castillo, 2017). Según el RNE, este elemento difiere del agua y otros componentes, siendo introducido en el concreto antes o durante el proceso de mezclado para ajustar sus características. La clasificación de los aditivos, de acuerdo con su influencia, sigue los requisitos de la ASTM C494/C494M (2017), como se detalla en la Tabla.

Tabla N°3: Clasificación de aditivos. Fuente: (ASTM C 494)

Tipo	Descripción
A	Reductores de agua
B	Retardantes de fragua
C	Acelerantes
D	Reductores de agua y retardantes de agua
E	Reductores de agua y acelerantes
F	Super reductores de agua
G	super reductores de agua y acelerantes

2.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO

Las propiedades del concreto le otorgan características de incrementar su resistencia con el tiempo, contribuyendo así a la preservación de recursos, ya que sigue siendo un material de alta calidad con escasa o nula necesidad de ser reemplazado o mantenido. Esto se debe a su resistencia a la descomposición, al calor y a la oxidación, lo que garantiza un entorno estable y seguro (Jiménez, K y Lozano, H. 2018)

El concreto exhibe diversos estados, y en cada uno de ellos, sus características experimentan cambios significativos gracias al control de sus ingredientes y factores como la temperatura. Por ejemplo, en su estado fresco, las propiedades más destacadas son su trabajabilidad, viscosidad y temperatura. Además, el calor de hidratación, una propiedad térmica resultante de la interacción entre el agua y el cemento, origina la formación de cristales endurecidos en la mezcla, lo que da como resultado una resistencia mecánica durante el proceso de hidratación.

Las propiedades que se mencionaran son esenciales para determinar la forma de trabajar y los resultados obtenidos al mezclar concreto, y la durabilidad es la que se considerara en la investigación actual.

2.3.1 Trabajabilidad

Es la facilidad que presenta el concreto fresco para ser mezclado, colocado, compactado y acabado sin segregación y exudación durante estas operaciones (Abanto Castillo, 2009)

2.3.2 Consistencia

La fluidez de la pasta es crucial para determinar la consistencia, lo que implica que cuanto más fluida sea la mezcla, el concreto se desplazará con mayor facilidad durante su colocación. Es importante destacar que la trabajabilidad y la consistencia, aunque relacionadas, no son conceptos idénticos (Rivva López, 2000).

2.3.3 Segregación

Es una propiedad del concreto fresco, que implica la descomposición de este en sus partes constituyentes o lo que es lo mismo, la separación del agregado grueso del mortero (Abanto Castillo, 2009)

La segregación ocurre cuando una parte del concreto se desplaza más rápido que otra, como sucede al transportar concreto en una carretilla y la vibración provoca que los agregados gruesos se desplacen hacia abajo, mientras que la lechada se acumula en la parte superior. De manera similar, se puede observar cuando se vierte concreto desde una altura superior a medio metro o cuando hay cambios bruscos de dirección. Un exceso de vibración también contribuye a la segregación, lo que resulta en la formación de "cangrejas" y puede afectar la resistencia y durabilidad del concreto (Guillermo Raúl, 2018)

2.3.4 Resistencia

La resistencia del concreto es una característica que se evalúa en el concreto una vez que ha alcanzado su estado endurecido. A través de pruebas de resistencia a la compresión, se determina la carga máxima que un espécimen de concreto puede soportar por unidad de área. Para cumplir con los estándares, es fundamental que la resistencia requerida al 99% sea alcanzada a los 28 días posteriores a su fabricación y tras un adecuado proceso de curado.

2.3.5 Durabilidad

El concreto utilizado en una estructura debe poseer la durabilidad y resistencia necesarias, teniendo en cuenta los agentes químicos y físicos presentes en su entorno. Para lograr que el concreto se desarrolle adecuadamente a lo largo de su vida útil, es posible mejorar su durabilidad mediante el uso de un tipo especial de cemento o la incorporación de aditivos como incorporadores de aire, entre otros métodos (Coasaca Condori, 2018)

Según la definición del ACI, se refiere a una característica de los materiales que engloba su capacidad para resistir las influencias del entorno, los impactos físicos, los agentes químicos, la abrasión y otros procesos de deterioro. En otras palabras, un concreto o mortero considerado duradero mantendrá su forma, calidad y funcionalidad originales incluso cuando se exponga al medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida previsto, requiriendo un mínimo mantenimiento. No obstante, cuando el material pierde sus propiedades originales y su uso se convierte en una amenaza debido a posibles daños estructurales, y la reparación o sustitución resulta poco rentable, se llega al final de su período de utilidad (Castañeda Cisneros, 2020).

Los mecanismos importantes de degradación del concreto son los siguientes:

1. Daño por congelamiento y secado
2. Reacción álcali-agregado
3. Ataque de sulfatos
4. Ataque microbiológico
5. Corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto, por:
 - a) carbonatación del concreto
 - b) penetración de cloruros
6. Abrasión
7. Cargas mecánicas

El término "durabilidad" se emplea para describir ampliamente la capacidad de un

concreto para resistir diversos tipos de agresiones, tanto físicas como químicas, cuya intensidad puede variar según el mecanismo involucrado. Investigaciones recientes han demostrado que las mezclas de concreto destinadas a entornos severos no pueden ser impermeables al aire, agua y iones cloruro si no alcanzan una resistencia mínima a la compresión de 50 MPa a los 28 días. La proporción agua-cemento es el factor primordial que influye en la impermeabilidad del concreto y, por ende, en su durabilidad (Aitcin,1993).

2.4 VIDA ÚTIL

La vida útil de un elemento estructural debe considerarse desde el momento de su construcción, abarcando tanto el período de inicio como el de propagación de la corrosión. No es necesario establecer una separación entre ambos periodos, ya que el período de inicio está vinculado a la difusión de cloruros y la carbonatación, lo que significa que está directamente relacionado con la calidad del concreto de recubrimiento y la agresividad del ambiente. Por otro lado, en el período de propagación, los fenómenos se basan principalmente en procesos de corrosión electroquímica. (Helene,2003)

Tabla N°4: Vida de proyecto de estructuras de concreto armado. Fuente: (Mena, 2005)

Tipos de estructura	Vida de proyecto (años)
Pistas de aeropuertos	30-50
Puentes	120
Presas	50-100
Edificios residenciales	60
Obras portuarias	80
Fábricas	25-50
Oficinas, tiendas	50-100

2.5 CAUSAS DEL DETERIORO DEL CONCRETO

Las causas de deterioro del concreto se pueden clasificar en dos categorías: las físicas, que son el resultado de factores como la abrasión o accidentes, y las químicas, que incluyen el congelamiento y deshielo, la reacción álcali-sílice, la carbonatación, ataque por cloruros y sulfatos. (Kosmatka, S., 2017).

2.5.1 Deterioro del Concreto por Sustancias Químicas

El concreto puede experimentar daños que pueden alterar sus características físicas y mecánicas debido a la exposición a sulfatos, cloruros, CO₂ y, en algunas situaciones, debido a reacciones químicas inherentes a la composición de los materiales utilizados en la mezcla. Estos daños pueden ser irreversibles y, en casos extremos, pueden llegar a restringir el desempeño de las estructuras de concreto.

A continuación, se describen los principales ataques químicos que causan un mayor deterioro en el concreto:

2.5.1.1 Ataque por Sulfatos

Uno de los problemas abordados en esta investigación es el ataque de los sulfatos, que constituye uno de los principales desafíos en el deterioro de materiales basados en cemento. Muchos sulfatos presentes en el suelo y el agua pueden dañar y degradar el concreto si no se ha diseñado adecuadamente. Los sulfatos, como el sulfato de calcio, el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio, pueden atacar el concreto al reaccionar con los compuestos hidratados presentes en la pasta de cemento. Estas reacciones pueden generar presiones lo suficientemente altas como para romper la pasta de cemento, lo que resulta en la desintegración del concreto, incluyendo la pérdida de cohesión de la pasta y de resistencia (Kosmatka, S., 2017).

La acción de los sulfatos afecta principalmente al hidróxido de calcio y, en gran medida, al aluminato de calcio (C_3A) y al ferro aluminato tetracálcico (C_3FA). El ataque por sulfatos se manifiesta mediante la exudación de una sustancia blanquecina y el desarrollo de grietas progresivas que conducen a que el concreto adquiera una textura quebradiza, e incluso suave.

- La acción del sulfato de calcio es relativamente simple; ataca al aluminato tricálcico y, en menor medida, al ferro aluminato tetracálcico, lo que resulta en la formación de sulfoaluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).
- La acción del sulfato de sodio es dual, ya que primero reacciona con el hidróxido de calcio durante la hidratación del cemento, generando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez, el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico, formando etringita.
- La acción del sulfato de magnesio es la que causa un mayor daño, ya que actúa sobre las fases de la pasta de cemento, particularmente los silicatos cálcicos, mediante una serie de complejas interacciones que modifican el pH de las pastas de concreto.

De los cuatro compuestos que componen el cemento Portland (aluminato tricálcico, aluminato tetracálcico, silicato bicalcico y silicato tricálcico), el más susceptible a la acción de los sulfatos es el aluminato tricálcico (C_3A). Este compuesto reacciona con el sulfato de calcio ($CaSO_4$) y 32 moléculas de agua (32 H_2O), dando lugar a la formación de un sulfoaluminato cálcico conocido como etringita ($C_3A \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$). La etringita es poco soluble y provoca una significativa expansión en volumen, aproximadamente 2.3 veces el volumen original, lo que genera una gran presión interna en el concreto.



El sulfato de calcio es más agresivo que el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio cuando se trata de su efecto sobre el concreto. Su ataque al concreto puede ser de naturaleza física o fisicoquímica, y se produce a través de una reacción con el aluminato cálcico hidratado, lo que da como resultado la formación de yeso en los capilares y espacios vacíos del concreto. Inicialmente, este efecto aumenta la compacidad del concreto, pero dado que el yeso es un compuesto expansivo, con el tiempo deteriora el material (Gómez Cortes, 2002).

Teniendo en cuenta estos aspectos, se han desarrollado diversas recomendaciones y normas que establecen ciertas características necesarias para obtener un concreto duradero y resistente a los sulfatos. En esencia, las características que debe cumplir un concreto para mitigar el impacto del ataque de los sulfatos son las siguientes:

1. Garantizar baja permeabilidad y porosidad del concreto. Para lograr baja permeabilidad, se recomienda reducir la relación agua-cemento en la mezcla, siempre teniendo en cuenta que esto no provoque fisuración posterior debido a la contracción del concreto causada por el calor de hidratación de la pasta de cemento.
2. Reducir la reacción de los sulfatos con el aluminato tricálcico. Esta característica depende en gran medida del tipo de cemento utilizado en la mezcla. Según la norma ASTM C 150, existen cementos de alta resistencia a los sulfatos, como el Tipo V y el Tipo II, que contienen cantidades moderadas de aluminato tricálcico, lo que reduce la vulnerabilidad de la mezcla a reaccionar ante la presencia de sulfatos.

2.5.1.2 Ataque de Cloruros

La presencia de cloruro puede causar daños al concreto cuando los iones de cloruro penetran en el material. Este fenómeno puede ocurrir a través de los elementos utilizados en la mezcla, como aditivos, áridos, materiales cementantes y agua de amasado. Además, la exposición a sustancias anticongelantes, al agua de mar o al aire con altas concentraciones de sal en las zonas costeras también puede favorecer este proceso. Una vez que los iones de cloruro ingresan al concreto, atacan la capa protectora de óxido que se forma alrededor del acero estructural dentro del concreto. Este deterioro debilita la resistencia del concreto a la compresión y flexión de la estructura (Kosmatka et al., 2004).

Investigaciones previas respaldan la teoría previamente expuesta al afirmar que el ion cloruro, presente en el entorno, ingresa al concreto inicialmente por permeación, seguido de absorción y finalmente mediante la acción capilar, propagándose por toda la estructura de concreto. Además, se distinguen dos categorías de iones de cloruros: los iones de cloruros libres y los iones de cloruros unidos. Es relevante notar que la velocidad de corrosión del acero en el concreto se acelera cuando se trata de un ion de cloruro libre. Por consiguiente, se concluye que cuanto menor sea la presencia de iones de cloro libre, menor será el deterioro del concreto (Feng et al., 2018)

2.5.1.3 Penetración de Cloruros

Existe una relación directa entre la penetración de cloruros en el concreto y su permeabilidad la cual nos determina la facilidad con la que este material puede saturarse de agua. Esta característica, a su vez, esta asocia con la facilidad del concreto a la congelación. Asimismo, la permeabilidad del concreto desempeña un papel crucial en la hermeticidad de estructuras la cual tiene como función a contener líquidos. Además, el ingreso de humedad en el concreto puede tener repercusiones en sus propiedades de aislamiento térmico (Montaña Muñoz; 2015)

La permeabilidad del concreto no solo está determinada por su porosidad, sino que también está dependiente del tamaño, la distribución y la continuidad de los poros. Las propiedades del cemento desempeñan un papel crucial en la permeabilidad del concreto. Bajo una misma relación a/c, si comparamos un cemento de granulometría gruesa y fina, el cemento grueso tiende a originar una pasta más porosa. La composición del cemento incide en la permeabilidad al influir en la velocidad de hidratación, si bien el grado final de porosidad y permeabilidad no se ve afectado. Un concreto con baja relación a/c, una gradación adecuada de agregados, fácil de manejar y bien compactado, es más probable que sea impermeable, siendo así muy duradero (Montaña Muñoz, 2015).

Mecanismos de Transporte de Cloruros

El transporte de cloruros se fundamenta en fenómenos naturales, lo cual conlleva distintos tipos que varían en función de los factores predominantes en el proceso. Entre estos se encuentran la difusión, la convección, la migración y la permeación. (Guzman S., 2010)

Difusión: La difusión es el desplazamiento de moléculas o iones desde una región de alta concentración hacia una de baja concentración, siguiendo un gradiente de concentración o potencial químico. (NT Build 492, 1999)

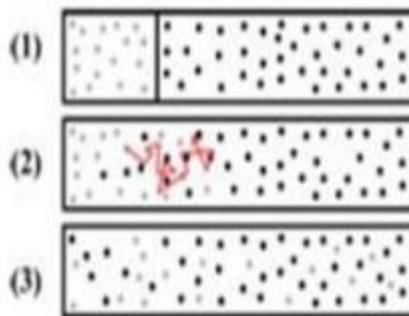


Figura N°2: Difusión de iones Fuente: NT Build 492

La difusión es un proceso donde se establece un flujo irreversible de materia desde regiones de alta concentración hacia regiones de baja concentración. Este fenómeno implica el transporte neto de materia mediante el movimiento atómico, con intercambio de energía, masa o momentos dentro del sistema. La difusión es impulsada por gradientes de concentración, lo que permite que los iones se desplacen entre las soluciones hasta alcanzar la misma concentración. Su descripción se basa en modelos matemáticos, siendo la ley de Fick la más utilizada. Las ideas modernas sobre la difusión se atribuyen principalmente a los trabajos de dos científicos: Thomas Graham y Adolf Fick.

Estudio de la difusión

La difusión fue investigada y conceptualizada como una teoría fenomenológica por el médico y fisiólogo alemán Adolf Fick (1829 - 1901). A pesar de haber mostrado interés en matemáticas y física al inicio de su educación, finalmente se decantó por la medicina por influencia de su hermano y se graduó en 1852. En la primera mitad del siglo XIX, el entendimiento del concepto de difusión en líquidos aún era incipiente y las opiniones sobre la disolución de sales eran confusas. La distinción

entre mezcla física, fases, soluciones y componentes se fue clarificando gradualmente, y la Ley de Difusión de Fick (1855) se basó en las observaciones de Thomas Graham sobre gases. (Juárez Valencia, 2015).

Ley de Fick

La Ley de Fick es una ecuación diferencial cuantitativa que describe varios casos de difusión de materia en un medio inicialmente sin equilibrio químico o térmico. Este flujo se dirige en sentido opuesto al gradiente de concentración y, cuando este gradiente es débil, puede aproximarse mediante el primer término de la serie de Taylor, dando lugar a la Ley de Fick. Si suponemos que la concentración varía a lo largo del eje X, la densidad de corriente de partículas, representada por J, es el número de partículas que atraviesan en unidad de tiempo un área unitaria perpendicular a la dirección de la difusión. La Ley de Fick establece que esta densidad de corriente es proporcional al gradiente de concentración.

Primera ley de Fick

Cuando el fenómeno no cambia en el tiempo, es decir, tanto la concentración como la velocidad de difusión permanecen constantes, se dice que el fenómeno es estacionario. En esta condición, la relación entre el flujo de iones (J) y la concentración (n) está definida por la primera Ley de Fick de la Ecuación (2)

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2)$$

La ecuación mencionada, donde D es el coeficiente de difusión (m²/s), J es el flujo (mol/m²/s) y x (m) representa la profundidad de penetración, no es adecuada para describir un modelo de vida útil, ya que no incluye la variable temporal.

Segunda ley de Fick

Para incorporar el tiempo en el fenómeno de difusión utilizando la primera Ley de Fick, se postula que la concentración de la especie iónica, C, disminuye en el tiempo a una tasa proporcional al flujo iónico de la misma especie iónica en un punto x. Esto se expresa como indica la Ecuación (3):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial J}{\partial x} \quad (3)$$

Al sustituir esta relación en la ecuación anterior, obtenemos la ecuación conocida como la segunda ley de Fick. Esta ecuación es muy valiosa ya que relaciona los valores de concentración de una especie iónica, C, en función del tiempo y del espacio a través de un único parámetro, como el coeficiente de difusión, D. El coeficiente de difusión en la segunda ley de Fick suele ser denominado coeficiente aparente de difusión, D_{app}.

Difusión de cloruros en concretos

Los iones cloruro pueden ser corrosivos cuando entran en contacto con la superficie del concreto, penetrando a través de este hasta alcanzar un estado de equilibrio en la concentración de iones. Si la concentración de iones en la

superficie es alta, la difusión puede llevar a concentraciones que provocan la corrosión del refuerzo. La relación agua-cemento (a/c) influye en el coeficiente de difusión: cuanto menor sea esta relación, menor será el coeficiente de difusión para un conjunto dado de materiales. Los materiales cementantes suplementarios, como el humo de sílice, reducen aún más el coeficiente de difusión. (S. H. K. W. et al Kosmatka, 2004)

Coeficiente de difusión

El coeficiente de difusión en el concreto indica cuán fácilmente los iones pueden moverse a través de sus poros. A veces se usa como un indicador indirecto de la calidad o durabilidad del concreto. En las leyes de Fick, este coeficiente puede ser efectivo o aparente, dependiendo de cómo cambie el proceso de migración con el tiempo. Se puede calcular el coeficiente de difusión de una muestra de concreto utilizando la segunda ley de Fick. Sin embargo, la migración de iones es un proceso complejo influenciado por la estructura porosa del concreto.

Convección: En este modelo, el transporte de cloruros se destaca principalmente a través de las variaciones de humedad en los poros del concreto. Dado que los iones están disueltos en el agua, cualquier cambio en la humedad resultará en una alteración en la cantidad de cloruros presentes. Este proceso se caracteriza como físico en su naturaleza (Gálvez Ruiz, 2010).

Migración: En este modelo, la predominancia del transporte de cloruros se debe a una diferencia de potencial en el concreto, donde los iones cloruro son atraídos hacia áreas de menor potencial. Este proceso se caracteriza como eléctrico. La ecuación que rige este fenómeno es la ecuación de Nerst generalizada, la cual calcula el coeficiente de difusión aparente para el transporte de un ión en un campo magnético (Altaf A., 2013).

Ensayo de migración

En el pasado, los ensayos de difusión eran utilizados para evaluar cómo los cloruros penetran el concreto, pero su lentitud se debía a la falta de una fuerza externa para acelerar la migración. Hoy en día, gracias a avances tecnológicos, los ensayos de migración ofrecen una alternativa más rápida y eficiente, proporcionando resultados en aproximadamente una hora. Estos ensayos implican la introducción controlada de iones en la solución mediante un campo eléctrico, lo que acelera su movimiento a través del concreto y permite una evaluación rápida de la permeabilidad a los cloruros.

Muy utilizados hoy, estos ensayos permiten evaluar diseños de mezclas, seleccionar materiales adecuados y observar el comportamiento del concreto para modificarlo si es necesario. Ejemplos representativos de estos ensayos incluyen el ASTM C1202 y el NT BUILD 492. Este último, específicamente, evalúa la penetración, durabilidad y calidad del concreto mediante la obtención del coeficiente de difusión, utilizando un campo eléctrico para reaccionar los iones de cloruro y aplicando nitrato de plata para resaltar la zona de penetración. Dado que los cloruros son una preocupación significativa para la durabilidad del concreto, estos ensayos son esenciales para caracterizar el material y tomar medidas preventivas adecuadas. (Diego Tellez, 2020)

Permeación: En este modelo, el predominio del transporte de cloruros se atribuye a una diferencia de presión, donde los cloruros diluidos en el agua son desplazados hacia zonas saturadas cuando existen variaciones de presión, como en corrientes marinas. Este proceso se clasifica como físico. La ecuación que rige este modelo es la ley de Darcy generalizada (Guzmán Ruiz, 2010).

2.5.1.4 Corrosión del acero de refuerzo y exposición a iones cloruro

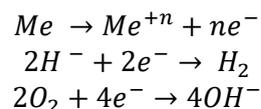
Los cloruros, especialmente aquellos provenientes de entornos marinos o de sales en los suelos, representan uno de los principales agentes corrosivos para el acero de refuerzo en el concreto. La corrosión es un proceso electroquímico que resulta de la interacción de un metal con su entorno, llevando al deterioro de sus propiedades físicas y químicas, y eventualmente a su destrucción. Los iones cloruro penetran a través de los poros capilares del concreto, debilitando el acero de refuerzo y desencadenando reacciones que culminan en la formación de óxido entre las barras de acero y el concreto. Este óxido puede alcanzar hasta el doble del diámetro del acero de refuerzo, lo que puede dar lugar a la formación de grietas y al desprendimiento del concreto. (Kosmatka S., 2017).

Celda de corrosión

La corrosión es un fenómeno natural que comúnmente se define cuando ocurre el deterioro de una sustancia que por lo general es un metal o sus propiedades debido a la reacción con su entorno (Koch et al, 2002). Es un proceso de oxidación química o electroquímica, en la que el metal transfiere electrones al medio ambiente y sufre un cambio de valencia de cero a un valor positivo, el medio ambiente puede ser un líquido, gas o híbridos suelo-líquido (Pérez, 2004).

La corrosión constituye un proceso electroquímico, siendo el medio acuoso el más común para el deterioro del acero, aunque también puede ocurrir por ataques químicos. Este proceso se asemeja al funcionamiento de una batería, con un ánodo donde se da la oxidación electroquímica, un cátodo donde tiene lugar la reducción electroquímica, un conductor eléctrico y un medio acuoso llamado electrolito. Cualquier superficie metálica afectada por la corrosión se compone de ánodos y cátodos que están conectados eléctricamente entre sí. Las reacciones en los ánodos y cátodos son comúnmente denominadas "reacciones de media celda", donde el ánodo, actuando como el polo negativo, implica la oxidación del hierro en iones ferrosos.

En una batería, se lleva a cabo el siguiente proceso: los electrones son liberados y viajan a lo largo del metal hacia otra ubicación donde participan en una reacción que resulta en la reducción de una sustancia presente en el electrolito. En entornos ácidos, esta sustancia suele ser iones de hidrógeno, mientras que, en medios alcalinos y neutros, se trata de oxígeno disuelto en el agua.



Entonces, el proceso de corrosión implica la formación de una pila electroquímica, como se ilustra en la figura La corrosión ocurre a través del metal y del electrolito entre el ánodo y el cátodo, lo que implica el funcionamiento de un circuito cerrado.

Si dicho circuito se ve interrumpido en algún punto, la pila no puede operar y, como resultado, la corrosión se detiene.

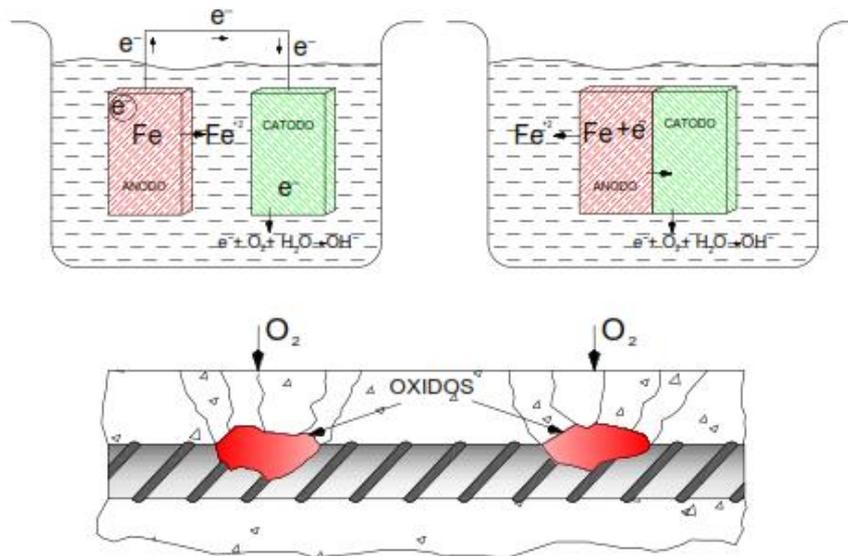


Figura N°3: Formación de la pila de corrosión. Fuente: (Maldonado, 2008)

Ingreso y ataque de iones cloruro

Los iones cloruro se identifican como la principal causa de un deterioro prematuro en estructuras afectadas por la corrosión (W. Chale, 2007). Sin embargo, la corrosión puede también ocurrir en circunstancias donde la presencia de iones cloruro es nula, como es el caso de la carbonatación, un proceso que resulta de la disminución de la alcalinidad del concreto. Aunque la carbonatación suele ser un proceso más lento en concretos con relaciones agua-cemento bajas, es importante destacar que la corrosión inducida por iones cloruro es más común que la carbonatación inducida (T.Y Lo, 2008). Dado que los iones cloruro son abundantes en la naturaleza y su presencia suele ser detectada en pequeñas cantidades en los ingredientes del concreto, esta contribuye de manera significativa al proceso corrosivo.

Mecanismos de corrosión del acero en el concreto

La diferencia entre la corrosión del acero expuesto al medio ambiente y la del acero incorporado en el concreto reforzado radica en que, en este último caso, el concreto actúa como una barrera física y química que resguarda al acero. El concreto presenta una porción llamada recubrimiento, que sirve para prevenir el acceso de agentes perjudiciales al acero. En esta barrera química, durante el proceso de hidratación del cemento, se crea un entorno altamente alcalino con un pH que oscila entre 13 y 13,8. Esto se debe principalmente a la producción de $Ca(OH)_2$, además de $NaOH$ y KOH , presentes en la pasta de cemento (Jarrah et al., 1995).

En esta zona alcalina, los componentes termodinámicamente estables del acero, Fe_3O_4 o $\gamma-Fe_2O_3$ (Batis et al., 1999), generan una fina capa de óxido protectora conocida como capa pasiva. Esta capa se forma de manera espontánea con un espesor de unos pocos nanómetros, esto hace que sea bastante difícil estudiar

sus propiedades. No obstante, la barrera física proporcionada por el concreto no es completamente impermeable, permitiendo que agentes nocivos pasen por sus poros y dañen dicha capa pasiva (Cabrera G. et al., 1995).

Generalmente, una vez que los iones de hierro se liberan del acero, reaccionan con el oxígeno circundante para formar óxidos químicamente más estables. Estos óxidos se depositan en la superficie del acero, dando lugar a un fenómeno similar a una celda electrolytica, donde la parte no corroída actúa como cátodo y la parte corroída como ánodo (Castorena González, 2011). Debido al crecimiento de estos óxidos, que tienen una menor densidad volumétrica que el acero original (con un volumen hasta 1.7 y 6.25 veces mayor que el del acero), ya no pueden ocupar el mismo espacio que correspondía al acero. Como resultado, se expanden alrededor del refuerzo, generando esfuerzos que, al ser mayores que los de tensión del concreto, provocan grietas en este último, en casos más severos, incluso su desprendimiento (Pantazopoulou J. et al., 2001).

La corrosión del refuerzo puede ocurrir en una microcelda, donde las reacciones anódica y catódica prácticamente tienen lugar en el mismo sitio, o en una macrocelda, donde se pueden distinguir claramente el área corroída del refuerzo (ánodo) y la parte no corroída (cátodo), dependiendo de la ubicación específica del ánodo y el cátodo (González A. et al., 1994 y Elsener B., 2002).

En la siguiente figura se ilustran estos casos. El escenario de la macrocelda es de gran relevancia, dado que la reducción de la sección del refuerzo puede acelerarse debido a la significativa relación entre las áreas catódica y anódica, generando tasas de corrosión considerablemente elevadas (Raupach M. et al., 2001).

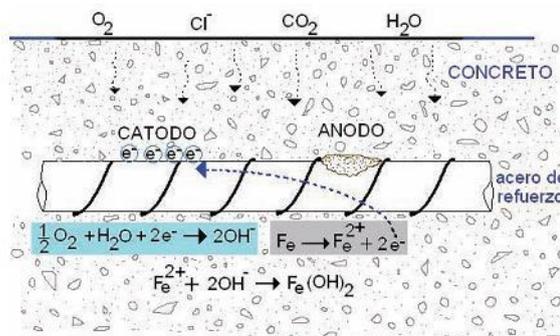


Figura N°4: Proceso de corrosión en el acero de refuerzo. Como proceso electroquímico, existen reacciones anódica $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ y catódica $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ y un flujo de electrones del ánodo al cátodo Fuente: (Castorena González, 2011).

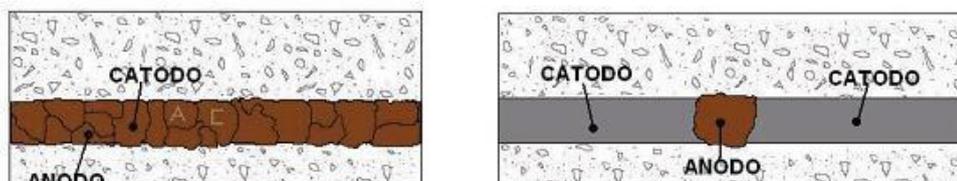


Figura N°5: Relación entre las áreas corroídas (ánodo) y sanas (cátodo) del refuerzo, el proceso de corrosión puede darse como una microcelda a), o macrocelda b) Fuente: (Castorena González, 2011).

Medición del potencial de corrosión

La corrosión de un metal en un entorno acuoso, como el acero de refuerzo en el concreto, involucra dos semirreacciones de oxidación-reducción. En una, el Fe (hierro) se oxida a Fe^{2+} , mientras que, en la otra, se reduce el oxígeno. La intensidad del proceso anódico y catódico es igual y se identifica como la intensidad de corrosión del proceso, I_{corr} , una magnitud eléctrica que sirve como medida de la velocidad de corrosión. En estas condiciones, el metal se corroe a un potencial característico de su naturaleza y del medio, conocido como potencial de corrosión (E_{corr}) (Reyes Diaz, 2012)

El E_{corr} no proporciona una cuantificación precisa de la proporción de metal corroído por unidad de área. Por esta razón, estos valores deben considerarse como indicativos y tener validez exclusivamente cualitativa. No se puede establecer una relación constante entre E_{corr} y la cinética del proceso de corrosión en todas las condiciones de exposición. La interpretación de las medidas de potencial de corrosión suele realizarse clasificando el riesgo de corrosión según los criterios establecidos por la norma ASTM C-876-91.

Tabla N°5: Cuadro de valores de evaluación de potenciales de media celda.
Fuente: ASTM C-876-91.

Potencial de corrosión (E_{corr}) Cu/CuSO ₄	Criterio
Más positivos que -200 mV	10% de probabilidad de que no exista corrosión
Entre -200 y -350 mV	Incertidumbre
Más negativo que -350 mV	90% de probabilidad de corrosión

2.5.1.5 Carbonatación del concreto

Los procesos corrosivos implican la oxidación destructiva de metales, evidenciada visualmente por la presencia de un aspecto oxidado en los elementos metálicos, usualmente asociado con la pérdida de propiedades mecánicas. No obstante, hay un tipo de corrosión que no es apreciable a simple vista desde su inicio, como es el caso de la corrosión del acero en el concreto reforzado. Durante la fase inicial de corrosión en estas estructuras, los daños no son detectables mediante una inspección visual convencional, siendo necesario recurrir a otros ensayos, de preferencia no destructivos, tales como las técnicas electroquímicas (Millard S., 1995)

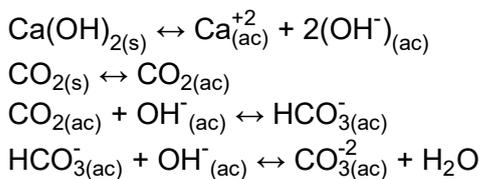
Estos daños tienen como principales causas dos fenómenos naturales. En primer lugar, la presencia de cloruros en el concreto, los cuales pueden haber estado presentes desde la fabricación del material o haberse difundido desde el exterior. Estos cloruros, al alcanzar las armaduras de acero, desencadenan una despasivación local que reduce la efectividad de la defensa natural del concreto contra la corrosión. En segundo lugar, se encuentra la carbonatación, un fenómeno en el cual el CO_2 presente en la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del cemento hidratado, provocando una pérdida de alcalinidad en el concreto. Este proceso resulta en una brusca disminución del pH, generando una región neutralizada conocida como frente carbonatado, que, al alcanzar la armadura, la despasiva de manera generalizada.

(Moreno E., 1999)

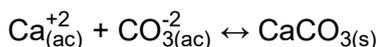
Mecanismo de carbonatación

Como se ha mencionado previamente, el proceso de carbonatación se inicia cuando el dióxido de carbono (CO_2) gaseoso presente en la atmósfera penetra en el concreto a través de su red de poros. Una vez dentro, se disuelve en la solución alcalina que llena estos poros y reacciona con los iones calcio (Ca^{++}) presentes en la solución, dando lugar a la formación de carbonato de calcio (CaCO_3), un compuesto altamente insoluble. (Papadakis V., 1989)

El mecanismo de carbonatación se produce de la siguiente manera:



De la primera y última ecuaciones tenemos:



Este proceso de reacción química elimina los iones calcio (Ca^{++}) de la solución de poros, lo cual provoca una disminución del valor del pH que su valor se encuentra entre 12.5 y 8.0 aproximadamente. Es por esta razón que la carbonatación también se conoce como neutralización (Moreno E., 1999).

La velocidad de carbonatación se refiere a la variación en el tiempo de la profundidad del frente carbonatado en el interior del concreto. Bajo condiciones atmosféricas normales, la carbonatación se ve principalmente influenciada por la cantidad de cemento en la mezcla de concreto, la porosidad del mismo y el grado de saturación de agua dentro de sus poros (Moreno E., 1999).

Dado que el producto resultante de la carbonatación es CaCO_3 , cualquier alteración en la concentración de calcio en el cemento impactará la cantidad de carbonato de calcio que puede formarse por unidad de volumen de concreto, definida como capacidad enlazante. Esta capacidad enlazante guarda proporción con el contenido de CaO en el cemento y por ello está vinculada al contenido de cemento. En consecuencia, las estructuras con una baja cantidad de cemento por unidad de volumen pueden experimentar una carbonatación más rápida que aquellas con una mayor cantidad (Papadakis V., 1991).

La porosidad del concreto está determinada por la cantidad de espacios vacíos por unidad de volumen, formados después de la evaporación del exceso de agua agregada o debido a la retención de aire durante el vaciado. Por lo tanto, no es sorprendente que a medida que aumenta la relación a/c en la mezcla de concreto, la porosidad resultante también aumente, proporcionando un camino más libre para la difusión del CO_2 en la masa del concreto y por ello el incrementando la velocidad de penetración del frente de carbonatación (Ho D., 1987).

La cantidad de humedad o la saturación de agua desempeña un papel crucial en el proceso de carbonatación del concreto. Un exceso de agua puede inhibir este proceso al reducir el coeficiente de difusión efectiva de gases en el concreto. Por otro lado, una escasez de agua puede impedir la carbonatación al no proporcionar un medio acuoso adecuado para la reacción. Varios investigadores han identificado un rango óptimo de humedad relativa, situado entre el 50% y el 70%, como propicio para una carbonatación rápida (Papadakis V., 1991).

2.6 NANOPARTÍCULAS

Una nanopartícula se define como un material cuyas dimensiones se expresan en nanómetros, y en la mayoría de los casos, una de sus dimensiones es menor de 10 nanómetros (nm). Las propiedades físicas y químicas de las partículas de tamaño nanométrico difieren significativamente de las de los materiales convencionales. Esto se debe principalmente a la alta relación entre el área superficial y el volumen de estas partículas, ya sean granos, cilindros o placas, que tienen un tamaño en la escala nanométrica. Además, estas diferencias se deben a los efectos cuánticos que surgen como resultado del confinamiento espacial de las partículas a esta escala de tamaño nanométrico (Teizer et al., 2012).

Las propiedades de las nanopartículas están vinculadas al tamaño, lo que resulta en diversos colores debido a la absorción en la región visible. Aspectos como su reactividad y dureza, entre otras propiedades, también dependen de su tamaño, forma y estructura únicos. Debido a estas características distintivas, se presentan como candidatos ideales para diversas aplicaciones tanto comerciales como domésticas, abarcando áreas como la catálisis, la imagenología, aplicaciones médicas, investigaciones basadas en energía y aplicaciones medioambientales (Khan et al., 2019).

2.6.1 Nanopartículas en la industria de la construcción

Las nanopartículas más utilizadas en las industrias de construcción son TiO₂, que aumenta el grado de hidratación y actúa como autolimpiante en el concreto, y SiO₂, que proporciona mayor resistencia mecánica, resistencia al fuego en cerámica y propiedades antirreflejo en ventanas. A lo largo de décadas, se han logrado avances significativos en el rendimiento del concreto mediante la incorporación de partículas extremadamente finas, como cenizas volantes, humo de sílice, metacaolín y ahora nanosílice (Chaudhery Mustansa, 2020).

También en otras investigaciones se ha observado que la nanotecnología será la próxima revolución industrial, impactando tanto en la construcción como en los materiales de construcción. Actualmente, es posible examinar la estructura a niveles atómicos, medir la dureza y resistencia de las fases a escala mesoscópica de materiales compuestos. Un avance significativo en este campo ha sido el descubrimiento de que el gel C-S-H, un subproducto de la hidratación del cemento, exhibe una estructura altamente ordenada cuando se observa a nivel nanométrico. Esto ha llevado al desarrollo de materiales con propiedades autolimpiantes, resistencia a la decoloración, protección antigrafiti, así como materiales de alta resistencia al rayado y dureza, impactando considerablemente en la industria de la construcción (Castillo Linton, 2015).

2.6.2 Nanopartículas adicionadas al concreto

La adición de nanopartículas tiene un impacto significativo en el proceso de hidratación del cemento, dando lugar a una nueva generación de concreto con mayor resistencia y durabilidad. Esta influencia abarca tanto la nanoestructura como la microestructura del gel C-S-H, abriendo la posibilidad de nuevas aplicaciones y propiedades innovadoras. Las nanopartículas llenan los espacios entre los granos de cemento y los áridos, actuando como núcleos activos que potencian la hidratación del cemento gracias a la alta reactividad de su superficie. Esto mejora las propiedades resistentes del concreto, reduce su porosidad y disminuye la retracción que puede causar fisuras, contribuyendo así a prevenir su degradación a largo plazo (Caballero Arredondo, 2019).

CAPÍTULO III: DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPONENTES DEL CONCRETO CON ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE MANGANESO

3.1 CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO

3.1.1 Cemento Sol Tipo I

El cemento Sol Tipo I es el más común utilizado en proyectos de construcción, su composición principal incluye clinker, yeso y posibles adiciones, este tipo de cemento destaca por su versatilidad y se aplica en una amplia variedad de proyectos, desde estructuras pequeñas hasta grandes obras civiles. Se caracteriza por ofrecer una buena resistencia tanto inicial como final, siendo especialmente útil en situaciones que requieren un rápido endurecimiento. Su uso contribuye a la construcción de estructuras duraderas y de alta calidad, cumpliendo con las normativas y estándares de la industria de la construcción. En resumen, el cemento Sol Tipo I desempeña un papel fundamental al asegurar la seguridad y durabilidad de las construcciones.

Para esta investigación se utilizará el cemento tipo I, se sabe que este tipo de cemento no son buenas a ataque químicos, así como a cloruros, sulfatos y también a la carbonatación, se sabe que estos problemas se dan en las construcciones de estructuras.



Figura N°6: Cemento sol tipo I

3.1.1.1 Propiedades físicas y químicas

El Cemento Sol Tipo I es un Cemento Portland de uso general. Aquí están algunas de sus propiedades físicas y químicas:

- Contenido de aire: 7%
- Expansión autoclave: 0.09%
- Superficie específica: 323 m²/kg
- Densidad: 3.13 g/cm³

Resistencia a la compresión:

- A 3 días: 303 kg/cm²
- A 7 días: 382 kg/cm²
- A 28 días: 449 kg/cm²
- Tiempo de fraguado Vicat inicial: 129 minutos

Composición química:

- MgO: 2.9%
- SO₃: 2.8%
- Pérdida al fuego: 2.2%
- Residuo insoluble: 0.9%

Fases mineralógicas:

- C2S: 12%
- C3S: 55%
- C3A: 10%
- C4AF: 10%

Este cemento es adecuado para construcciones en general y se utiliza en cimientos, vigas, columnas y techados

Tabla N°6: Tabla de propiedades físicas y químicas Fuente: Cemento sol

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

3.1.1.2 Normativas y Estándares

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

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

En esta investigación, se utilizó agregado grueso proveniente de la Cantera “Jicamarca” la arena fueron adquiridas en bolsas de 50 kg del almacén de Promart. La selección de los agregados se basó en las destacadas características observadas durante su inspección inicial. Posteriormente, se llevaron a cabo los ensayos para validar y respaldar la elección de estos agregados que se detallan a continuación.

3.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Determinar la distribución volumétrica de partículas en los agregados en estado seco se realiza mediante el análisis granulométrico, un ensayo que proporciona una representación numérica de la gradación. Este proceso implica el paso de los materiales a través de tamices granulométricos normalizados, dispuestos de mayor a menor tamaño de abertura. Las normativas que detallan el procedimiento y las consideraciones para llevar a cabo este ensayo son las siguientes:

- 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.

3.2.1.1 Agregado fino

Para realizar el ensayo granulométrico de acuerdo a ASTM C 136 se debe usar la cantidad mínima representativa de agregado fino de 300 gramos la muestra usada en esta investigación fue de 600 gramos. Este ensayo se llevara a cabo utilizando los tamices estándares indicados en ASTM C 33, los cuales fueron ordenados de manera decreciente (mayor abertura arriba y menor abajo), se utilizó el agitador automático de tamices, la cual se mueve hacia arriba a una velocidad de 150 veces por minuto girando un sexto de revolución por cada 25 golpes, esto se da aproximadamente por 3 minutos, luego se retiran los tamices de la máquina, para inmediatamente proceder a pesar la cantidad retenida en cada malla utilizada; como se observa en la figura N°7:



Figura N°7: Tamices colocados en tamizador eléctrico
UNI-LEM Fuente: Propia

norma ASTM C33 (NTP 400.037.2018), nos brinda los límites granulométricos adecuados para el agregado fino. En la tabla N°7 representan los límites superior e inferior recomendados.

Tabla N°7: Requisitos de gradación del agregado fino (ASTM C33)

Tamiz	Abertura del Tamiz (mm)	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%



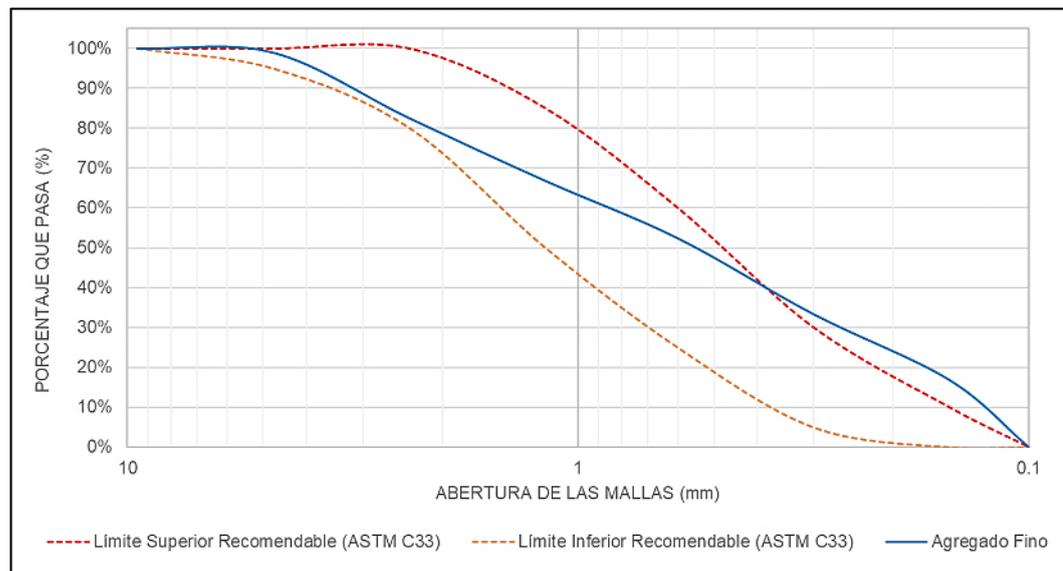
Figura N°8: Partículas de AF retenidas en los tamices UNI-LEM Fuente: Propia

Se realiza el ensayo para nuestra muestra representativa que se utilizará en esta investigación, en la tabla N°8 se presentan los datos del análisis granulométrico con los porcentajes retenidos para cada tamiz.

Tabla N°8: Cuadro 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	Error
3/8"	9.500		0.00%	0.00%	100.00%	0%
# 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 N°1: Curva granulométrica del agregado fino



➤ Módulo de Fineza

Conocido también como módulo de finura, este parámetro proporciona una idea de las propiedades del agregado, tales como su grosor y finura. Según la norma NTP 400.037.2018, para el agregado fino se deben considerar varios aspectos tales como, El módulo de fineza debe oscilar entre 2.3 y 3.1, en relación con el módulo de fineza base, no debe variar más de 0.2, y el rango normal del módulo de finura debe situarse entre 2.5 y 3.

Algunas bibliografías recomiendan el uso de módulo de finura según el tipo de concreto tal como se presenta en la siguiente tabla N°9:

Tabla N°9: Recomendación del uso del concreto con el módulo de finura del agregado fino. Fuente: Coasaca Condori, 2018

Módulo de Finura	Tipo de Concreto
2.2 - 2.8	Concreto de buena trabajabilidad y reducida segregación
2.8 - 3.2	Concreto de alta resistencia

Contar con partículas de arena que están fuera del rango especificado podría resultar un mayor consumo de cemento y agua. Por otro lado, un perfil excesivamente grueso daría lugar a mezclas con escasa cohesión y baja trabajabilidad. En caso de no cumplir con los intervalos mencionados, es factible emplear el agregado fino, siempre y cuando se hayan realizado pruebas previas para identificar la combinación óptima con el agregado grueso (Coasaca Condori, 2018).

El cálculo del módulo de fineza para el agregado fino se lleva a cabo sumando los porcentajes retenidos acumulados en las mallas #100, #50, #30, #16, #8, #4, 3/8", 3/4", 1 1/2", 3" y 6". El resultado de esta suma se divide entre 100, como se muestra en la expresión siguiente:

$$M.F._{AF} = \frac{\sum \%Ret. Acum (\#100, \#50, \#30, \#16, \#8, \#4, 3/8", 3/4", 1 \frac{1}{2}", 3" y 6")}{100} \quad (4)$$

De la ecuación 4 se realizan los cálculos para la muestra que se utilizará en esta investigación:

$$M.F._{AF} = \frac{0 + 1.06 + 17.60 + 33.27 + 47.67 + 66.70 + 83.16}{100} = \frac{249.5}{100}$$

$$M.F._{AF} = 2.495$$

De la tabla N°9 se puede observar que el valor de módulo de fineza del agregado fino esta entre 2.2 a 2.8 por lo que el tipo de concreto será de buena trabajabilidad y reducida segregación.

➤ **Peso Específico del Agregado Fino**

Esta propiedad nos proporciona el peso real de la mezcla, y este resultado se logra al dividir el peso total de las partículas entre el volumen total, excluyendo los espacios vacíos. Para obtener estos datos, la normativa establece un procedimiento mediante el cual podemos determinar el peso específico seco, saturado superficialmente seco, aparente y absorción de una muestra retirada en agua durante 24 horas. Las normas aplicables para este propósito son las siguientes:

NTP 400.022.2013. Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado fino.

ASTM C-128. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.

Al evaluar la calidad del agregado, una referencia clave es el peso específico. Un valor elevado indica un buen comportamiento, mientras que un valor bajo sugiere que el agregado puede ser deficiente, absorbente o poseer características débiles.

Equipos

- Balanza eléctrica
- Picnómetro (fiola)
- Molde cónico metálico
- Apisonador metálico
- Horno

Procedimiento

- Se realiza el muestreo y el cuarteo del agregado para una muestra representativa, se toma aproximadamente 1000 gr. de agregado fino seco.
- Se procede poner la muestra seca en un recipiente impermeable la cual se cubre con agua por 24 horas. Pasado el tiempo, el agregado fino se saca para pasarlo a una superficie plana así se sequen al aire libre, hasta que sus partículas no se adhieran marcadamente entre sí.
- Luego se realiza la prueba de absorción, para ello se utiliza un molde cónico donde se coloca el agregado fino llenándola en una sola capa la cual es compactada golpeando con un apisonador (barra de metal) en la superficie suavemente, se golpea de manera distribuida uniformemente 25 veces, estos golpes deben realizarse dejando caer aproximadamente 5mm encima del molde de cónico. Luego de ello se limpia los costados del molde y se pasa a levantar el molde verticalmente, si al levantar el molde el agregado esta firme y no se derrumba es porque está en estado húmedo, si sigue así se debe seguir secando y repitiendo la prueba hasta que, al levantar el molde cónico, esta llegue a mantenerse en forma cónica si desmoronarse, lo cual indica que la muestra esta superficialmente seca.
- De la muestra de agregado fino superficialmente seca se saca 500 gr. la cual se coloca en un picnómetro o fiola graduada y vacía, la cual se vierte 500 ml de agua.
- Se debe eliminar las burbujas de aire que están presentes, por la cual se gira circularmente, para luego pasar a dejar reposar por 15 minutos o hasta que las partículas se asienten, antes de pesar se debe dejar reposar por una hora.
- Luego se sacará la muestra de agregado fino de la fiola la cual se pondrá en un recipiente con peso conocido más la muestra, luego se lleva a un horno a 110 ± 5 °C, esto se debe realizar por 24 horas pasado ese tiempo

se debe enfriar a temperatura ambiente por ½ a 1 ½ horas y luego pesar la muestra seca.

de este procedimiento se obtiene los siguientes datos que se usaran par los cálculos:

Tabla N°10: Prueba de peso específico del agregado fino

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la arena Superficialmente Seca (g)	500.0
Peso de la arena Superficialmente Seca + Peso del balón (g) + Peso del agua (g)	1,005.2
Peso del balón (g)	193.1
Peso del agua (g)	312.1
Volumen del agua (cm ³)	312.1
Peso de la arena secada al horno (g)	495.9
Volumen del Balón (cm ³)	500.0

Cálculos

Peso Específico de Masa (Pem)

$$Pem = \frac{W_o}{(V - Va)} \quad (5)$$

Donde Va se determina con la siguiente expresión:

$$Va = P1 - P2 - Wss \quad (6)$$

Donde:

Wo (gr) = Peso de la muestra seca

V (ml) = Volumen del picnómetro (500 ml)

Va (cm³) = Peso o volumen del agua añadida al picnómetro

P1 = Peso del picnómetro + muestra + agua hasta la marca

P2 = Peso del picnómetro vacío

Wss (gr) = Peso de la muestra saturada superficialmente seca (500 gr)

Por lo tanto, de las ecuaciones 5 y 6 tenemos:

$$Pem = \frac{495.9}{(500 - 312.1)}$$

$$Pem = 2.639 \text{ gr/cm}^3$$

Peso Específico Saturado Superficialmente Seco

$$SSS = \frac{Wss}{V - Va} * 100 \quad (7)$$

Entonces de la ecuación 7 tenemos:

$$SSS = \frac{500}{(500 - 312.1)} * 100$$

$$SSS = 2.661 \text{ gr/cm}^3$$

Peso Específico Aparente

$$Pea = \frac{W_o}{(V - V_a) - (W_{ss} - W_o)} * 100 \quad (8)$$

Entonces de la ecuación 8 tenemos:

$$Pea = \frac{495.9}{(500 - 312.1) - (500 - 495.9)} * 100$$

$$Pea = 2.698 \text{ gr/cm}^3$$

Porcentaje de Absorción

$$\% \text{ Absorción} = \frac{W_{ss} - W_o}{W_o} * 100 \quad (9)$$

Entonces de la ecuación 9 tenemos:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{500 - 495.9}{495.9} * 100$$

$$\% \text{ Absorción} = 0.887\%$$

3.2.1.2 Agregado grueso

La norma ASTM C-136 (NTP 400.012.2013) establece cantidades mínimas de muestra en función del tamaño máximo nominal para llevar a cabo el análisis granulométrico. Estas cantidades están detalladas en la tabla N°11. En consecuencia, es esencial seleccionar la cantidad mínima representativa de muestra seca. Para esta investigación, se realizó el cuarteo para obtener una muestra representativa de 10 kg. Una vez obtenida la muestra seca, se somete al análisis granulométrico con el equipo tamizador diseñado para agregado grueso. Este dispositivo permite un zarandeo más efectivo de los agregados. Se disponen los tamices de mayor a menor tamaño en la máquina para lograr que la muestra se distribuya en cada tamiz al caer. El proceso de zarandeo tiene una duración aproximada de 5 minutos. Se recomienda aflojar los tornillos de ajuste de las mallas y mantener la puerta cerrada durante el funcionamiento de la máquina.

Tabla N°11: Cantidad mínima de la muestra de agregado grueso o global.
Fuente: NTP 400.012.2013

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)



Figura N°9: Muestra colocada en el equipo tamizador UNI-LEM Fuente: Propia



Figura N° 10: Retiro de la muestra del equipo tamizador.
Fuente: Propia

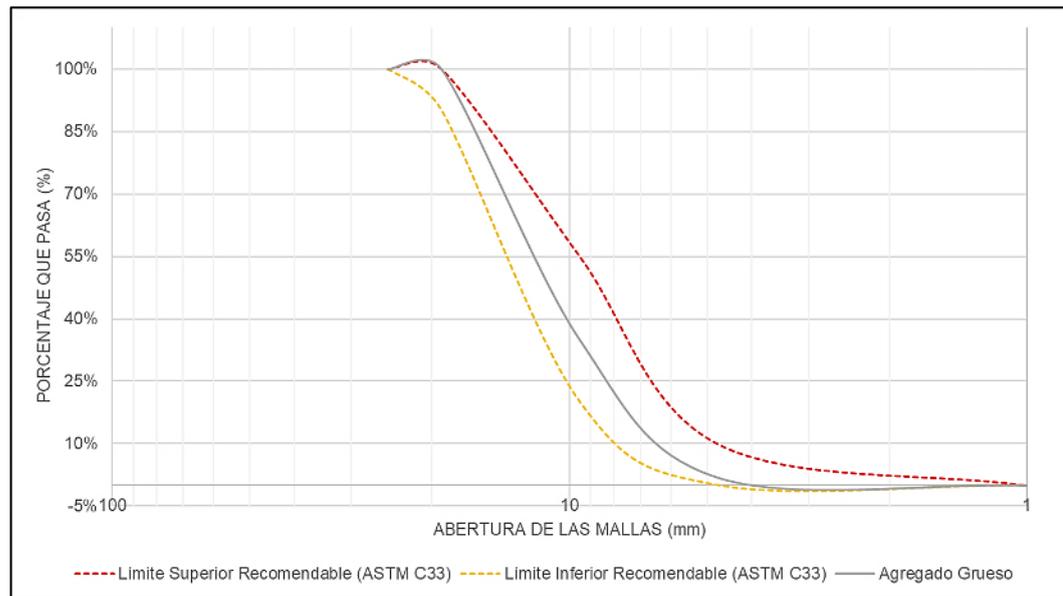
Al igual que en el caso de los agregados finos, los agregados gruesos también están sujetos a límites granulométricos establecidos por la norma ASTM C33 tal como se muestra en el anexo 5, con el objetivo de evaluar su calidad. En el contexto de los agregados gruesos, estos límites varían según el tamaño máximo nominal. Es crucial 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.

Se realiza el ensayo para nuestra muestra representativa que se utilizará en esta investigación, los datos se muestran en la tabla N°12 con los porcentajes retenidos para cada tamiz.

Tabla N°12: 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%	99.9%
1/2"	12.50	3610.50	36.11%	36.16%	63.8%
3/8"	9.50	2888.80	28.89%	65.04%	34.9%
N°4	4.75	3303.80	33.04%	98.08%	1.9%
	FONDO	191.80	1.92%		
	Σ	10000.00	100.00%		

Gráfico N°2: Curva granulométrica del Agregado Fino



La distribución granulométrica de la muestra corresponde al HUSO 67 según la tabla N°12 de la norma ASTM C33 como se aprecia en la gráfica N°2

➤ Módulo de fineza

El cálculo del módulo de fineza para el agregado grueso se lleva a cabo sumando los porcentajes retenidos acumulados en las mallas #100, #50, #30, #16, #8, #4, 3/8", 3/4", 1 1/2", 3" y 6". El resultado de esta suma se divide entre 100, como se muestra en la expresión de la ecuación 4:

Realizamos los cálculos para la muestra que se utilizará en esta investigación:

$$M.F._{AG} = \frac{0 + 0.05 + 65.04 + 98.08 + 98.08 + 98.08 + 98.08 + 98.08 + 98.08}{100}$$

$$M.F._{AG} = \frac{653.6}{100}$$

$$M.F._{AG} = 6.536$$

➤ Tamaño Máximo Nominal

Uno de los datos más importante que se debe tomar en cuenta para el diseño de concreto es el tamaño máximo nominal, ya que este dato influye directamente en la dosificación de los componentes del material. Esta variable tiene un impacto significativo en las propiedades y características finales del concreto resultante.

Según la norma ASTM C33 y la NTP 400.037.2018 se define lo siguiente:

Tamaño Máximo: Es el que corresponde al menor tamiz por el que pasa toda la muestra de agregado grueso.

Tamaño Máximo Nominal: Es el que corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido entre 5% y 10%

Usando la información reportada en tabla N°13; la muestra representativa evaluada se obtiene que el siguiente TMN:

$$\begin{aligned} \text{Tamaño Máximo (TM)} &= 3/4'' \\ \text{Tamaño Máximo Nominal (TMN)} &= 1/2'' \end{aligned}$$

➤ **Peso Específico del Agregado Grueso**

Como en el caso del agregado fino el agregado grueso tiene procedimientos para hallar el peso específico seco, saturado superficialmente seco, aparente y absorción las cuales están normadas en las siguientes normas:

- NTP 400.021.2013 “Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado grueso”
- ASTM C-127 “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate”

Al evaluar la calidad del agregado grueso, una referencia clave es el peso específico. Un valor elevado indica un buen comportamiento, mientras que un valor bajo sugiere que el agregado puede ser deficiente, absorbente o poseer características débiles.

Equipos

- Balanza
- Tamiz normalizado N°4
- Depósito de agua
- Una canasta de alambre de 3,35 mm (N°6) o de malla fina o un cubo de aproximadamente el mismo ancho y altura, con una capacidad de 4 a 7 litros, agregado de tamaño máximo nominal o menor de 37,5 mm (1 ½ in.) y un recipiente más grande, según sea necesario, para ensayos de agregado de mayor tamaño máximo. El recipiente deberá estar construido, de modo que, evite la retención de aire cuando se sumerge en agua.

Procedimiento

- En la figura N°11; Se observa una muestra representativa de 4 kg obtenida después del cuarteo del agregado grueso. se debe asegurar que la muestra no contenga partículas menores al tamiz N°4, por ello se tamizo por el tamiz N°4, descartándose todo el material pasante.



Figura N°11: Muestra representativa del agregado grueso

- La muestra debe estar libre de impurezas como polvo u otras impurezas superficiales por lo cual esta debe ser lavada, luego se coloca en un horno a 110 ± 5 °C debe estar en el horno hasta que su peso sea constante, después de sacar del horno la muestra debe ser secada a temperatura ambiente por 1 a 3 horas hasta que se pueda se pueda manipular con las manos.
- Luego de ello se sumerge en agua por un lapso de 24 horas, pasado el tiempo se seca la muestra y se coloca en una superficie plana, la muestra debe tener la condición de saturada superficialmente seca; para asegurar esta condición se seca la superficie con un trapo absorbente, obteniéndose una muestra en condición de saturado con superficie seca como se precia en la figura N°12.



Figura N°12: Muestra saturada superficialmente seca

- Se agrega la muestra saturada superficialmente seco en una canastilla previamente pesado, se debe mover lo sumergido para eliminar el aire atrapada, se pesa esta muestra saturada.



Figura N°13: Pesado de la muestra superficialmente seca en canastilla.

- Luego de ello la muestra se coloca en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ esto hasta conseguir una masa constante, esto se debe enfriar a temperatura ambiente por 3 horas para pesarlo en condiciones seca.

Del ensayo interior tenemos lo siguientes datos para los cálculos:

Tabla N°13: Prueba de peso específico de agregado grueso

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la Muestra Secada al Horno (gr)	2251.7
Peso de la Muestra Saturada Superficialmente Seca (gr)	2290.3
Peso de la Muestra Saturada en Agua (gr)	1461.8

➤ Cálculos

Peso Específico de Masa

$$P_{em} = \frac{W_o}{(W_{ss} - W_{sa})} * 100 \quad (10)$$

Donde:

W_o (gr) = Peso de la muestra seca

W_{ss} (gr) = Peso de la muestra saturado superficialmente seca

W_{sa} (gr) = Peso de la muestra sumergido en agua

$$P_{em} = \frac{2251.7}{2290.3 - 1461.8} * 100$$

$$P_{em} = 2.718 \text{ gr/cm}^3$$

Peso Específico Saturado Superficialmente Seco

$$SSS = \frac{W_{ss}}{W_{ss} - W_{sa}} * 100 \quad (11)$$

$$SSS = \frac{2290.3}{2293.3 - 1461.8} * 100$$

$$SSS = 2.764 \text{ gr/cm}^3$$

Peso Específico Aparente

$$Pea = \frac{W_o}{W_o - W_{sa}} * 100 \quad (12)$$

$$Pea = \frac{2251.7}{2251.7 - 1461.8} * 100$$

$$Pea = 2.851 \text{ gr/cm}^3$$

Porcentaje de Absorción

$$\% \text{ Absorción} = \frac{W_{ss} - W_o}{W_o} * 100 \quad (13)$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{2290.3 - 2251.7}{2251.7} * 100$$

$$\% \text{ Absorción} = 1.714 \%$$

3.2.2 Peso Unitario Suelto y Compactado

El procedimiento para realizar los ensayos del peso unitario suelto y compactado del agregado grueso y fino, se encuentran en las siguientes normas:

- NTP 400.017.2011 AGREGADOS. Método de Ensayo para determinar el peso Unitario del agregado
- ASTM C-29 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate

3.2.2.1 Peso Unitario Suelto

La medición del peso unitario es esencial para determinar la cantidad de material seco que puede llenar suavemente un recipiente. Este dato es crucial ya que nos permite conocer el consumo de agregados por metro cúbico. Además, el peso unitario representa el estado suelto de los agregados durante su transporte y almacenamiento, proporcionando información valiosa sobre cómo se comportan en estas condiciones.

Procedimiento

- El procedimiento del ensayo requiere una muestra representativa que sea aproximadamente del 125% al 200% de la cantidad necesaria para llenar el molde. La elección del molde se realizará siguiendo las recomendaciones especificadas en la norma NTP 400.017. Para los componentes utilizados, se empleará el envase de medida de $1/3 p^3$ para el agregado grueso (TMN = 1") y de $1/10 p^3$ para el agregado fino.
- Las muestras de agregado grueso y fino se ingresan a un horno a temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ como se muestra en la figura N°14 esto debe estar hasta que esté en un estado seco con masa constante.



Figura N°14: Colocación de muestras en horno UNI-LEM

- Cuando muestras están secas se vierten cuidadosamente con una cuchara en los moldes cilíndricos como se muestra en la figura N°15, tal que tenga una altura que no sobrepase los 50 mm por encima de la parte superior del molde.



Figura N°15: Llenando de agregado grueso en molde UNI-LEM

- Lo sobrante que queda en el molde se elimina con una barra quedando también nivelada la parte superior.
- Por último, se lleva a una balanza para poder tener el peso del agregado en el molde.

Cálculos

$$P. U. Suelto = \frac{G - T}{V} \quad (14)$$

Donde:

G (kg/m³) = Peso del agregado más el molde

T (kg/m³) = Peso del molde

V (m³) = Volumen del molde

De los ensayos realizados, se obtienen los siguientes datos para las muestras respectivas, de las cuales se presentan los resultados en la tabla N°14 y tabla N°15:

Tabla N°14: Peso unitario suelto del agregado fino

AGREGADO FINO	
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la muestra + recipiente (kg) (A)	21.06
Peso del recipiente (kg) (B)	4.34
Peso de la muestra (kg) (A - B)	16.73
Volumen del recipiente (m ³) (V)	0.00944
Peso Unitario Suelto (kg/m ³) (A-B) / V	1,772.25

Tabla N°15: Peso unitario suelto del agregado grueso

AGREGADO GRUESO	
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la muestra + recipiente (kg) (A)	17.48
Peso del recipiente (kg) (B)	4.34
Peso de la muestra (kg) (A - B)	13.14
Volumen del recipiente (m ³) (V)	0.00944
Peso Unitario Suelto (kg/m ³) (A-B) / V	1,392.10

3.2.2.2 Peso Unitario Compactado

El peso unitario compactado se obtiene después de colocar el agregado de manera compacta en un recipiente o molde. Estas fuerzas externas facilitan el acomodo de las partículas, y, por lo tanto, el peso unitario compactado determina la cantidad de partículas que pueden entrar en el molde. Este dato resulta crucial para determinar los volúmenes absolutos de los agregados en el concreto, ya que, en las obras, estos son compactados durante su colocación. Por lo que, adquiere

una importancia significativa en el proceso de diseño de mezcla.

Procedimiento

- Se debe tomar una muestra representativa de los agregados que es aproximadamente un 125% a 200% de la cantidad que puede llenar el molde, la selección del molde se da de la misma manera que del peso unitario suelto según la norma, en este caso se seleccionó el molde 1/3 ft³.
- Los la muestra representativa de los agregados se colocan al horno a temperatura de 110 ± 5 °C hasta que esté en un estado seco y que su masa sea constante.
- Cuando se tenga la muestra seca esta se coloca en el molde en 3 capas cada 1/3 del recipiente y será compactada con una barra de acero con punta semiesférica de 5/8" de diámetro y 60 cm de longitud, estas capas deben ser compactadas con 25 golpes sin que choque la base del molde y en la segunda capa la barra no debe penetrar hasta la capa anterior tal como se muestra en la figura N°16.



Figura N°16: Llenado por capas en molde UNI-LEM

- Para la última capa esta debe ser llenada hasta que rebalse del molde y para luego ser compactada, se nivela con la barra para eliminar lo sobrante.
- Este molde compactado se para a una balanza para poder medir el peso del agregado en el molde.

Cálculos

$$P. U. Compactado = \frac{G - T}{V} \quad (15)$$

Donde:

G (kg/m³) = Peso del agregado más el molde

T (kg/m³) = Peso del molde

V (m³) = Volumen del molde

De los ensayos realizados, se obtienen los siguientes datos para las muestras respectivas, de las cuales se presentan los resultados en la tabla N°16 y tabla N°17:

Tabla N°16: Peso unitario compactado del agregado fino

AGREGADO FINO	
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la muestra + recipiente (kg) (A)	23.11
Peso del recipiente (kg) (B)	4.34
Peso de la muestra (kg) (A - B)	17.78
Volumen del recipiente (m ³) (V)	0.00944
Peso Unitario Compactado (kg/m ³) (A-B) / V	1,989.32

Tabla N°17: Peso unitario compactado del agregado grueso

AGREGADO GRUESO	
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la muestra + recipiente (kg) (A)	19.18
Peso del recipiente (kg) (B)	4.34
Peso de la muestra (kg) (A - B)	14.84
Volumen del recipiente (m ³) (V)	0.00944
Peso Unitario Compactado (kg/m ³) (A-B) / V	1,572.21

3.2.2.3 Porcentaje de Humedad

El ensayo tiene como objetivo calcular el porcentaje total de humedad evaporable presente en los agregados fino y grueso. La definición de humedad evaporable según la norma incluye tanto la humedad presente en los poros como la superficial. Las normativas que detallan el procedimiento son las siguientes:

- NTP 339.185.2021 Agregados, Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado.
- ASTM C566. Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying

Procedimiento

- Para iniciar el ensayo se debe escoger una muestra representativa de los agregados para ello según la norma ASTM C566 (NTP 339.185.2021) nos recomienda los pesos mínimos en el siguiente cuadro.

Tabla N°18: Tamaño de la muestra de agregado (NTP 339.185.2021)

Tamaño Máximo Nominal Abertura mm (pulg)	Masa mínima de la muestra de agregado de peso normal kg
4.75 (N° 4)	0.5
9.5 (3/8)	1.5
12.5 (1/2)	2
19.0 (3/4)	3
25.0 (1)	4
37.5 (1 1/2)	6
50 (2)	8
63 (2 1/2)	10
75 (3)	13
90 (3 1/2)	16
100 (4)	25
150 (6)	50

- Para este caso se elegirá 4 kg para el agregado grueso como muestra representativa y para el agregado fino se usarán 500 gr. de muestra representativa.
- Luego de tener las muestras se deben pesar en un recipiente resistente al calor.
- Se colocarán las muestras en un horno con una temperatura de 110 °C esto hasta que se tenga una masa constante.
- Para finalizar se sacarán del horno y se dejarán enfriar para poder así pesar las muestras.

Cálculos

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_h - W_s}{W_s} * 100 \quad (16)$$

Donde:

Wh (gr) = Peso del agregado natural (muestra húmeda)

Ws (gr) = Peso del agregado en estado seco (muestra seca)

Se debe tener en cuenta que el contenido de humedad depende mucho del factor ambiental por la cual los valores calculados son representativos para los meses de julio 2023 a octubre del 2023, dichos valores se muestran en la tabla N°19 y tabla N° 20.

Tabla N°19: Contenido de humedad del agregado fino

AGREGADO FINO	
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la muestra en ambiente (g) (Wh)	500.0
Peso de la muestra seca al horno (g) (Ws)	494.6
Peso del agua perdida (g) (Wh - Ws)	5.4
Contenido de Humedad (%) (Wh - Ws)/Ws	1.09%

Tabla N°20: Contenido de humedad del agregado grueso

AGREGADO GRUESO	
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Peso de la muestra en ambiente (g) (Wh)	4,000.2
Peso de la muestra seca al horno (g) (Ws)	3,983.7
Peso del agua perdida (g) (Wh - Ws)	16.5
Contenido de Humedad (%) (Wh - Ws)/Ws	0.41%

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Para esta investigación el agua utilizada fue agua potable, perteneciente al sistema de abastecimiento en la ciudad de Lima, Perú. esta agua cumple con los parámetros de consumo humano por lo cual se usó para el concreto.

El organismo encargado del suministro de agua en Lima es SEDAPAL, que cuenta con dos plantas de tratamiento de agua situadas en La Atarjea, una batería de 331 pozos disponibles y, además, a través de una concesión privada, se trata el agua del río Chillón, ubicado en el distrito de Carabayllo. La matriz que abastece al distrito de Rímac es la matriz Atarjea Centro. SEDAPAL se encarga de la potabilización del agua para eliminar impurezas y productos químicos, garantizando que sea apta para el consumo humano.

La normativa que nos indica la calidad de agua que debe tener para las mezclas de concreto son las siguientes:

- NTP 339.088.2014 Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos
- ASTM C-1602 Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete

A partir de las normativas, se presenta la siguiente tabla N°21 que establece los límites máximos permitidos para las sustancias presentes en el agua, asegurando así que no causen ningún efecto adverso en el concreto.

Tabla N°21: Límites permisibles del agua de mezcla (NTP 339.088.2014)

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	-

3.4 ADITIVO

El aditivo empleado en este estudio es el superplastificante reductor de agua R-2020, un superplastificante en forma líquida de elevada actividad. Este producto desencadena reacciones químicas en la mezcla, permitiendo que las nanopartículas de sílice se conviertan en nanopartículas de cemento. Este aditivo está clasificado de acuerdo con las normas ASTM C494 y NTP 334.088 como un aditivo tipo F, específicamente, un aditivo reductor de agua de alto rango.

3.4.1 Características

- 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.
- 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.

3.4.2 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 óptima. El aditivo debe ser diluido en el agua efectiva y adicionarlo a la mezcla durante el proceso de mezclado.

3.4.3 Propiedades Físicas

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

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL DIÓXIDO DE MANGANESO

En esta investigación, se emplearon nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA), obtenidas como subproducto del proceso de refinación del zinc en la refinería de Cajamarquilla, operada por Nexa Resources, con una capacidad de 320,000 toneladas al año. Este material se obtiene de la fase final del proceso electroquímico, el dióxido de manganeso se adhiere a los ánodos y debe retirarse

de manera oportuna debido a su alta capacidad de conducción eléctrica, lo que podría ocasionar cortocircuitos. Durante la limpieza de los ánodos, se utilizan equipos para aplanarlos y eliminar los depósitos de manganeso con agua a alta presión, generándose aproximadamente 140 toneladas mensuales de este subproducto NDMA.

La caracterización de las nanopartículas de dióxido de manganeso anódico (NDMA) consiste en la evaluación del contenido de humedad, así como también de su pH y el porcentaje de sólidos, necesario para la dosificación del concreto. Además, se realiza un análisis de la reactividad del cemento con el NDMA para verificar posibles interacciones agresivas. También se lleva a cabo la determinación del tamaño promedio de partícula de NDMA mediante la caracterización mineralógica a través de la difracción de rayos X en polvo.

3.5.1 Contenido de Humedad

Para determinar el contenido de humedad del NDMA, se tomó una muestra representativa de 50 g que se colocó en un vidrio de reloj de laboratorio, la muestra se sometió a un análisis utilizando una balanza de humedad de la serie MX-50X el equipo cuenta con un horno interno la cual debe estar en una temperatura de 150 °C, esta debe permanecer en la balanza durante un periodo de 1 hora para garantizar la precisión del resultado, en el transcurso del tiempo la muestra de NDMA va secando mientras registra su peso y así obtiene el porcentaje de humedad.



Figura N°17: Extracción de muestra representativa de NDMA. Fuente: Propia



Figura N°18: Balanza de humedad con muestra de NDMA. Fuente: Propia

Los análisis realizados arrojaron como resultado el porcentaje de humedad del NDMA:

$$\% \text{ Humedad NDMA} = 27.91 \%$$

3.5.2 Evaluación del pH

Se llevó a cabo la evaluación de los niveles de pH en un total de 8 mezclas que consistían en cemento tipo I con diversos porcentajes de dióxido de manganeso anódico (NDMA) en peso, manteniendo un peso total constante de 50 g. Los porcentajes de NDMA utilizados fueron 0, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 y 15 % del peso del cemento. Con el objetivo de garantizar la homogeneidad de las muestras, cada una se sometió a agitación en un agitador magnético DLAB MS-H280-Pro a 600 rpm durante 5 minutos. Posteriormente, se añadieron 22.5 ml de agua destilada a cada recipiente que contenía las distintas mezclas. La medición final del pH se llevó a cabo utilizando un medidor de pH EZDO 7200.

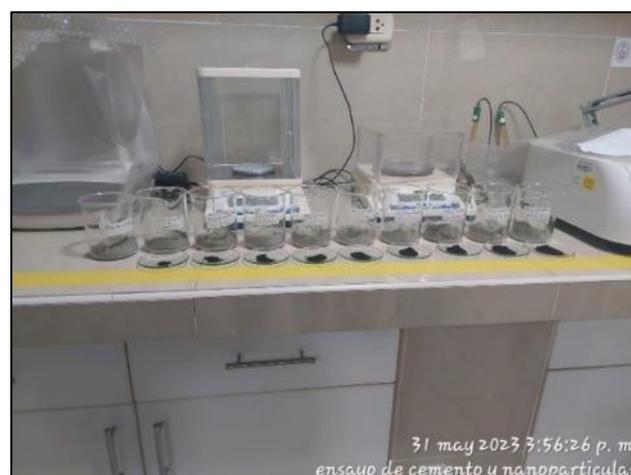


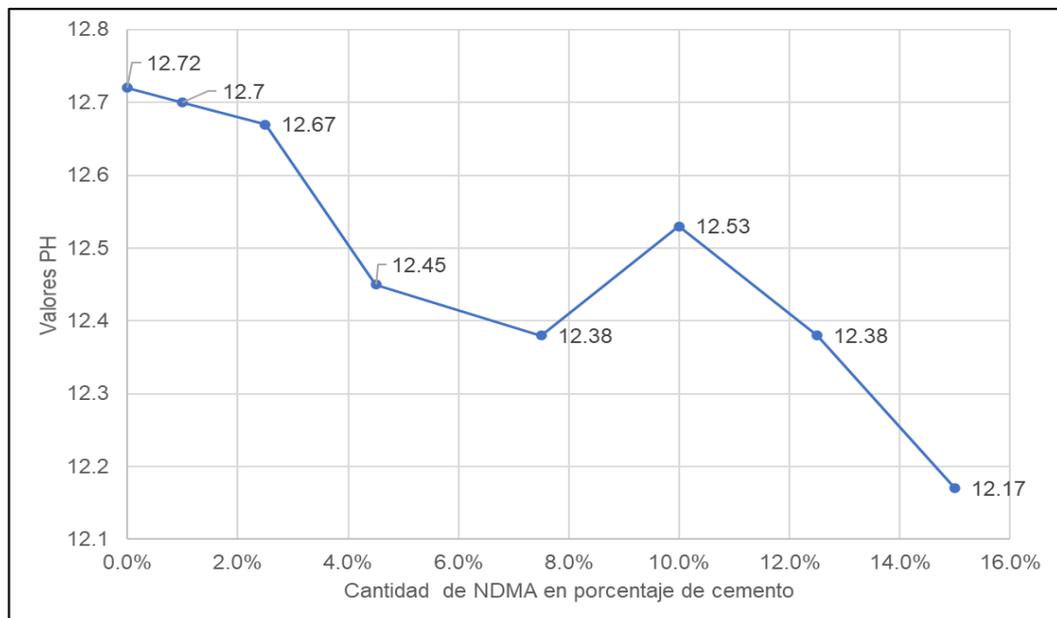
Figura N°19: Muestras de cemento tipo I con el NDMA. Fuente: Propia



Figura N°20: Medición de pH. Fuente: Propia

Los valores del PH, realizado a las ocho muestras entre ellas al cemento sin NDMA y al cemento con adiciones de NDMA se muestran en la Figura N°19

Gráfico N°3: Valores de PH para diferentes combinaciones del cemento con nanopartículas de dióxido de manganeso



Se observa una disminución en los valores de pH en las mezclas que contienen NDMA en comparación con la mezcla de referencia que solo contiene cemento Portland tipo I. Esta tendencia a la disminución de los valores de pH es más evidente a medida que aumenta el contenido de NDMA, con la excepción de la muestra con 10% de NDMA, que presenta un aumento hasta 12.53, generando un punto de inflexión. Este cambio de pH se da debido a que el NDMA al combinarse con el agua, libera iones de manganeso en el medio acuoso, generando y

liberando iones de hidrógeno, lo que reduce el pH. En esta investigación, se buscaron dosificaciones de mezcla entre el cemento y el NDMA que se mantengan dentro del rango alcalino característico del concreto, debido a ello podemos obtener los porcentajes de NDMA que se usaran en esta investigación las cuales son de 5% y 10%.

3.5.3 Reactividad Térmica del cemento con NDMA

Se realizó 5 mezclas de cemento, NDMA y agua destilada, con los siguientes porcentajes: 0, 5, 8, 12.5 y 16% de NDMA, como se muestra en figura N°21, cada mezcla se coloca en un agitador magnético a 1000 RPM tal como se muestra en la figura N°22, observándose el desarrollo de temperatura en cada una de ellas, transcurrido el tiempo se observa que la temperatura de la mezcla se hace constante e igual a de 31°C, esto sucedió aproximadamente a los 11 minutos.



Figura N°21: Muestras de cemento con NDMA. Fuente: Propia



Figura N°22: Agitador magnético con medidor de temperatura. Fuente: Propia

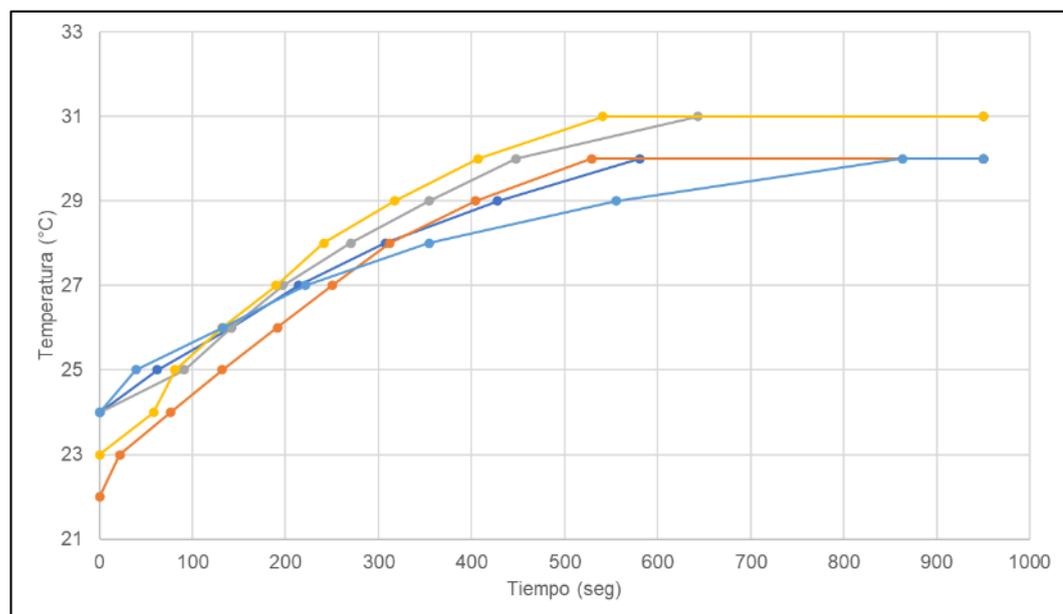
Las mezclas con diferentes porcentajes de reemplazo del cemento por NDMA;

fueron colocadas en agitadores magnéticos con calentamiento; a 1000 rpm, generando incrementos de temperaturas de las mezclas; se observaron las muestras hasta obtener un valor constante de temperatura; lo que dio en aproximadamente 11 minutos.

Tabla N°22: Evaluación de reactividad térmica de mortero con NDMA

Identificación	% NDMA	Cemento (g)	NDMA (g)	Temperatura Final (°C)
M1	0	100	0	30
M2	5	95	5	30
M3	8	92	8	31
M4	12.5	87.5	12.5	31
M5	16	84	16	30

Gráfico N°4: Tiempo de reactividad del cemento con NDMA



En todos los casos se observó incrementos de temperatura a través del tiempo, se puede decir que el contenido y tipo de cemento; así como la cantidad de NDMA influye en la reactividad térmica y que en esta investigación la temperatura de reacción térmica se estabilizó aproximadamente a los once minutos; también se observa que las mezclas se estabilizaron a temperaturas entre 30 y 31°C; para concentraciones de NDMA menores a 8% la reactividad llega a una temperatura máxima de 30 °C mientras que para concentraciones mayores alcanza una temperatura de 31 °C a excepción de la concentración de 16% donde se observa una disminución de la temperatura en 1°C; esto puede depender de la distribución de las partículas NDM, asimismo de la propiedad catalítica del NDM la cual puede acelerar los procesos exotérmicos para ciertas cantidades de concentración.

3.5.4 Determinación del Tamaño de Partículas y Composición Química

Se obtuvo el difractograma del NDMA, a partir del cual se determinará su

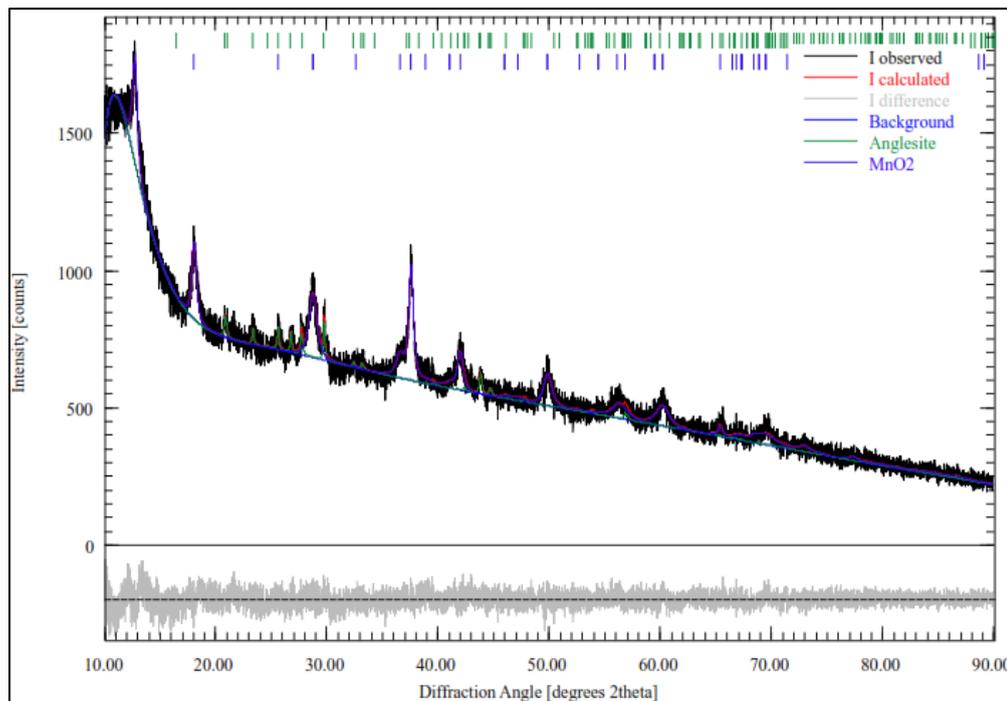
composición química y el tamaño del NDMA, utilizando el difractómetro de rayos X de alta resolución Bruker D8 Advance la cual se encuentra en la facultad de ciencias de la universidad nacional de ingeniería como se ve en la figura N°23. La muestra fue enviada en forma de polvillo para su respectivo análisis, los resultados confirmaron que se trataba de partículas de tamaño nanométrico.



Figura N°23: Difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance

Luego de pasar por el equipo de rayos X, se analizó los resultados utilizando el programa Profex 5.2.2 donde se obtiene la gráfica N°5 del XRD en base a la superposición de fases.

Gráfico N°5: Gráfica del XRD



De la gráfica N°5 se realiza un análisis cualitativo, que consta en un ajuste por fases, posteriormente se da el análisis cuantitativo, dando como resultado el tamaño de la partícula, de la gráfica N°5 se puede observar que existen picos en el difractograma lo cual significa que la estructura del material es cristalina, también se puede notar del difractograma que los picos son anchos en la parte superior por la cual el NDMA es de un tamaño nanométrico, lo cual se verifica en los datos obtenidos del programa.

Tabla N°23: Tamaño de partículas de NDMA

Parámetros Refinados	
Parámetro	Valor (nm)
MnO ₂	
Tamaño de Partículas	
GrainSize(2,2,0)	42.4
GrainSize(1,1,0)	42.4
GrainSize(3,1,0)	42.4
GrainSize(1,0,1)	51.0
GrainSize(3,-1,0)	42.4
GrainSize(2,0,0)	42.4

La dimensión de las partículas del NDMA se muestra en la tabla N°23 dando un tamaño de 42.4 nm, lo que confirma su naturaleza nanométrica. Este dato nos permite calcular el área de superficie específica de las NDMA, cuyo valor es de 43 m²/g, ya que se conoce el diámetro de las partículas.

Existen 7 sistemas cristalinos y 200 grupos espaciales, lo cual es muy importante al momento de realizar la caracterización, por lo que se debe determinar el sistema cristalino, ya que estas estructuras son las que definen las propiedades del material. Las fuerzas predominantes a escala nanométrico son las fuerzas de atracción, por lo que, estos materiales son usados como nano absorbentes, en la figura N°24 se muestra la estructura cristalina del MnO₂ donde el magnesio esta de color morado y Oxígeno de color rojo.

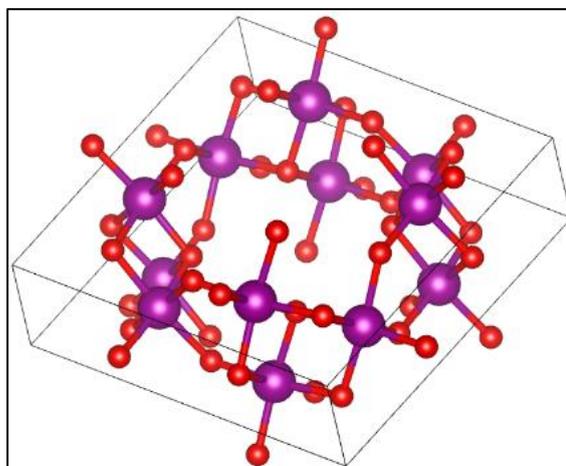


Figura N°24: Estructura cristalina MnO₂-α. Fuente: Propia

Los porcentajes de compuestos que existen en la muestra se extraen del programa Profex 5.2.2 las cuales se indican en la siguiente tabla N°24:

Tabla N°24: Porcentaje de compuestos del material

Compuesto	Cantidad de Fase (wt - %)	O (wt - %)	S (wt - %)	M _n (wt - %)	P _b (wt - %)
Anglesita	5.60	21.10	10.57	0.00	68.32
M _n O ₂	94.40	36.81	0.00	63.19	0.00
Total	100.00	35.93	0.59	59.65	3.83

En la tabla N°24 se visualiza que la mezcla tiene una concentración de MnO₂ del 94.40% y una concentración de anglesita de 5.60%. Así mismo el elemento con mayor concentración es el manganeso con 59.65% en peso, y el elemento con menor concentración es el azufre con 0.59% en peso.

3.5.5 Determinación de la densidad

la densidad del NDMA, se calculó mediante el ensayo del picnómetro según ASTM D854.

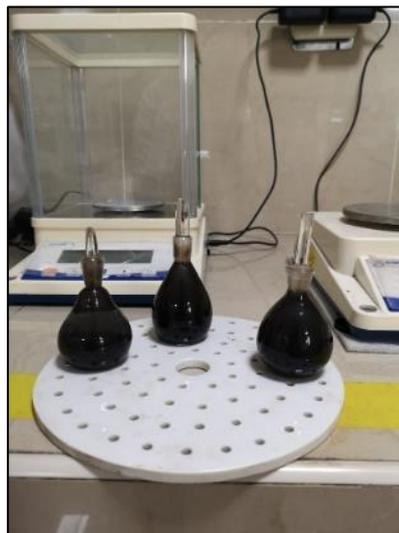


Figura N°25: Muestra de NDMA en fiola. Fuente: Propia

Cálculos

$$D_m = \frac{(W_{p+m} - W_p)(D_a)}{(W_{p+a} - W_p) - (W_{p+m+a} - W_{p+m})} \quad (17)$$

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+a+m} = Peso del picnómetro más agua y mineral

Da = Densidad del agua

Los datos obtenidos del ensayo del picnómetro se muestran en la tabla N°25:

Tabla N°25: Densidad del NDMA

Peso (gr)	P1 (gr)	P2 (gr)	P3 (gr)
Wp	22.32	33.26	24.77
Wp+m	36.02	52.68	43.77
Wp+a+m	77.98	96.45	89.85
Wp+a	68.32	83.01	76.78
Dm (g/cm ³)	3.39	3.25	3.20
Dm prom (g/cm ³)	3.28		

3.5.6 Acondicionamiento de la muestra

La humedad inicial en la muestra fue significativamente elevada, lo que llevó a la necesidad de filtrar el agua. Posteriormente, se procedió a medir el pH del agua filtrada. Acto seguido, el lodo de NDMA fue sometido a un proceso en una mufla, manteniendo una temperatura constante de 60°C durante 2 horas y luego a 80°C durante las siguientes 10 horas, hasta alcanzar un peso constante. La muestra seca resultante de NDMA fue pulverizada utilizando un molinillo eléctrico, para ser utilizada en la dosificación de la mezcla de concreto.



Figura N°26: Muestra de NDMA en mufla. Fuente: Propia



Figura N°27: Muestra de NDMA en polvillo. Fuente: Propia

3.6 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES DEL CONCRETO

Tabla N°26: Resumen de propiedades de los materiales componentes del concreto

Propiedades	NDM	Cemento Tipo I	Arena	Piedra	Agua	R-2020
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	--	--	1772.24	1392.10	--	--
Peso Unitario Compactado (kg/m ³)	--	--	1989.32	1572.21	--	--
Peso Específico (kg/m ³)	3280	3130	2639.17	2717.80	1000	1100
% Absorción	--	--	0.82	1.71	--	--
% Humedad	--	--	1.09	0.83	--	--

CAPÍTULO IV: DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE MANGANESO

4.1 MÉTODO DE BOLOMEY

4.1.1 Selección de la Resistencia Promedio Requerida

Considerando las relaciones agua–cemento, definidas para esta investigación por condiciones de durabilidad hallamos f'_{cr} resistencia promedio, utilizando la tabla N°27.

Tabla N°27: Relación a/c por resistencia (ACI-211)

f'_{cr} kg/cm ² (28 días)	Relación a/c en peso	
	Concreto sin Aire Incorporado	Concreto con Aire Incorporado
140	0.82	0.74
210	0.68	0.59
280	0.57	0.48
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
420	0.41	0.33
450	0.38	0.31

Interpolamos:

Para a/c=0.40

$$f'_{cr} = 450 - \frac{(450 - 420)(0.38 - 0.40)}{(0.38 - 0.41)}$$

$$f'_{cr} = 430.00 \text{ kg/cm}^2$$

Para a/c=0.45

$$f'_{cr} = 420 - \frac{(420 - 350)(0.41 - 0.45)}{(0.41 - 0.48)}$$

$$f'_{cr} = 380.00 \text{ kg/cm}^2$$

Para a/c=0.50

$$f'_{cr} = 350 - \frac{(350 - 300)(0.48 - 0.50)}{(0.48 - 0.55)}$$

$$f'_{cr} = 335.71 \text{ kg/cm}^2$$

Debido a que no tenemos registro de resistencia de probetas correspondientes a obras anteriores entonces utilizamos la tabla N°28 para determinar el factor de seguridad del método ACI.

Tabla N°28: Resistencia promedio requerida (ACI)

$f'c$	$f'cr$
< 210	$f'c + 70$
210 - 350	$f'c + 84$
> 350	$f'c + 98$

$$f'cr = f'c + 84$$

$$f'c = 430 - 84 = 346.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'c = 380 - 84 = 296.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'c = 335.71 - 84 = 251.71 \text{ kg/cm}^2$$

4.1.2 Selección del Asentamiento

El asentamiento para este diseño de mezcla será fluido por lo:

$$\text{Asentamiento} = 6''$$

4.1.3 Selección de Contenido de Aire

El contenido de aire se determina utilizando la tabla N°29, considerando que el TMN es igual a 1/2''

Tabla N°29: Contenido de aire incorporado según su TMN - ACI

Contenido de Aire Atrapado	
Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	Aire Atrapado
3/8"	3.0%
1/2"	2.5%
3/4"	2.0%
1"	1.5%
1 1/2"	1.0%
2"	0.5%
3"	0.3%
4"	0.2%

$$\text{Contenido de Aire Atrapado} = 2.5\%$$

4.1.4 Selección del Volumen Unitario de Agua

El volumen de agua de diseño se determina utilizando la tabla N°30, teniendo en cuenta un asentamiento de 6'' y un tamaño máximo nominal (TMN) de 1/2'' entonces:

Tabla N°30: Volumen Unitario de Agua diseño para 1 m³ de concreto (lts)

Volumen Unitario de Agua								
Agua en l/m ³ , 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

$$\text{Volumen Unitario de Agua} = 228 \text{ L/m}^3$$

4.1.5 Determinación del Peso del Cemento

Para calcular el peso del cemento, se requieren el volumen unitario de agua y la relación agua-cemento, datos que se obtienen de los pasos previos. A continuación, se describe el cálculo:

$$\text{Peso cemento (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Volumen unitario de agua (L/m}^3\text{)}}{a/c} \quad (18)$$

Se sabe también que la bolsa de cemento tiene un peso de 42.5 kg, por la cual teniendo el peso del cemento podemos calcular el número de bolsas de cemento, utilizando la ecuación 18 y 19:

$$\text{Peso cemento (bolsas/m}^3\text{)} = \frac{FC \text{ (kg/m}^3\text{)}}{42.5 \text{ kg/bolsa}} \quad (19)$$

Para a/c=0.40

$$\begin{aligned} \text{Peso cemento (kg/m}^3\text{)} &= \frac{228 \text{ L/m}^3}{0.40} = 570 \text{ kg/m}^3 \\ \# \text{ (bolsas/m}^3\text{)} &= \frac{570 \text{ kg/m}^3}{42.5 \text{ kg/bolsa}} = 13.41 \text{ bolsas/m}^3 \end{aligned}$$

Para a/c=0.45

$$\begin{aligned} \text{Peso cemento (kg/m}^3\text{)} &= \frac{228 \text{ L/m}^3}{0.45} = 506.67 \text{ kg/m}^3 \\ \# \text{ (bolsas/m}^3\text{)} &= \frac{506.67 \text{ kg/m}^3}{42.5 \text{ kg/bolsa}} = 11.92 \text{ bolsas/m}^3 \end{aligned}$$

Para a/c=0.50

$$\begin{aligned} \text{Peso cemento (kg/m}^3\text{)} &= \frac{228 \text{ L/m}^3}{0.50} = 456 \text{ kg/m}^3 \\ \# \text{ (bolsas/m}^3\text{)} &= \frac{456 \text{ kg/m}^3}{42.5 \text{ kg/bolsa}} = 10.73 \text{ bolsas/m}^3 \end{aligned}$$

4.1.6 Determinación del Porcentaje del Cemento

Siguiendo la teoría de Bolomey, el cemento se considerará como un agregado fino, lo que implica calcular su porcentaje de participación en el agregado total. Este porcentaje se determina utilizando la ecuación 20.

$$t_0(\%) = \frac{C/d_c}{1.025 - (A + \%Aire)} \quad (20)$$

Donde:

C (kg/m³) = Peso del cemento por metro cubico de concreto

A (m³) = Volumen unitario del agua por metro cubico de concreto

%Aire (m³) = Porcentaje de aire en la mezcla

d_c (kg/m³) = Peso específico del cemento

t₀ (%) = Porcentaje de participación del cemento en el total de agregado global

1.025 = Volumen total de los componentes

Entonces para nuestro diseño de mezcla utilizando la ecuación 20:

Para a/c=0.40

$$t_0 = \frac{570/3130}{1.025 - (0.228 + 0.025)}$$

$$t_0 = 23.59\%$$

Para a/c=0.45

$$t_0 = \frac{506.67/3130}{1.025 - (0.228 + 0.025)}$$

$$t_0 = 20.97\%$$

Para a/c=0.50

$$t_0 = \frac{456/3130}{1.025 - (0.228 + 0.025)}$$

$$t_0 = 18.87\%$$

4.1.7 Determinación de la Curva de Bolomey

Usando la siguiente expresión determinamos la curva de Bolomey con la siguiente expresión:

$$Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (21)$$

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

Tabla N°31: 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

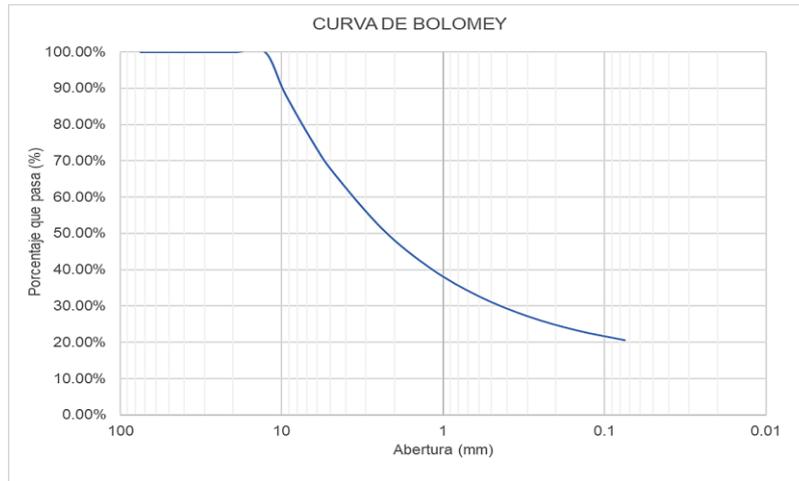
De la tabla N°31 consideraremos una consistencia fluida y agregado grueso angular por lo que A=14, con asentamiento de 6"

Tabla N°32: Distribución granulométrica de Bolomey para TMN de 1/2"

Tamiz	Tamaño del tamiza (mm)	TMN (1/2")
3"	75	100.00%
2 1/2"	63.5	100.00%
2"	50.8	100.00%
1 1/2"	38.1	100.00%
1"	25.4	100.00%
3/4"	19.05	100.00%
1/2"	12.7	100.00%
3/8"	9.525	88.48%
1/4"	6.35	74.81%
N° 4	4.75	66.59%
N°8	2.36	51.07%
N° 16	1.18	40.21%
N° 30	0.6	32.69%
N° 50	0.3	27.22%
N° 100	0.15	23.35%
N° 200	0.075	20.61%

Con los datos presentados en la tabla N°32, se realizó la siguiente grafica N°6:

Gráfico N°6: Curva de Bolomey para un TMN de 1/2”



4.1.8 Determinación del Contenido de Agregado Grueso y Fino

Para tener el porcentaje de participación tanto del agregado grueso y el agregado fino se usará el método del módulo de fineza.

4.1.8.1 Método por Módulo de Fineza

Este método considera un sistema general de ecuaciones de n formas y con n incógnitas t_n , utilizando las ecuaciones 22 y 23 se puede determinar los porcentajes ideales para el agregado fino y grueso, en esta variable también se toma en cuenta lo del cemento.

$$t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n = 100\% \quad (22)$$

$$MFB_n = \frac{MF_0 * t_0 + MF_1 * t_1 + MF_2 * t_2 + \dots + MF_n * t_n}{t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (23)$$

Dónde:

MF_0 = Modulo de fineza del cemento, considerado en este método como cero.

MF_1, MF_2, \dots, MF_n = Modulo de fineza de los agregados 1, 2, ... n.

$t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ = Porcentaje del volumen absoluto del cemento (t_0) y de los agregados 1, 2, ... n. dentro de agregado global

$MFB_1, MFB_2, \dots, MFB_n$ = Modulo de fineza de la curva de Bolomey con los tamaños máximos de cada agregado 1, 2, ... n

La expresión anterior es una ecuación general, pero en el caso de esta investigación solo se usará dos agregados, así como el cemento por lo que la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$t_1 = \frac{100(MF_2 + MFB_2) - (t_0 * MF_2)}{MF_2 - MF_1} \quad (24)$$

$$t_2 = 100\% - (t_0 + t_1) \quad (25)$$

$$t_0 + t_1 + t_2 = 100\% \quad (26)$$

Dónde:

MF₁ y MF₂ = Modulo de fineza de los agregados fino y grueso respectivamente
t₀, t₁ y t₂ = Porcentaje del volumen absoluto del cemento, el agregado fino y grueso respectivamente dentro de agregado global
MFB₂ = Modulo de fineza de la curva de Bolomey con el TMN del agregado grueso.

De lo anterior utilizando la ecuación 24, 25 y 26 nos da los siguientes resultados:

4.1.8.2 Diseño de mezcla a/c=0.40, a/c=0.45 y a/c=0.5

El método de fineza utiliza el módulo de fineza de la curva de Bolomey con un TMN de 1/2", por lo cual se tiene:

Tabla N°33: Módulo de fineza de la curva de Bolomey MFB2 para un TMN de 1/2"

CURVA DE BOLOMEY		
Tamiz	% Pasante	MFB2
3"	100.00%	0.00%
2 1/2"	100.00%	
2"	100.00%	
1 1/2"	100.00%	0.00%
1"	100.00%	
3/4"	100.00%	0.00%
1/2"	100.00%	
3/8"	88.48%	11.52%
1/4"	74.81%	25.19%
N° 4	66.59%	33.41%
N°8	51.07%	48.93%
N° 16	40.21%	59.79%
N° 30	32.69%	67.31%
N° 50	27.22%	72.78%
N° 100	23.35%	76.65%
N° 200	20.61%	79.39%
MODULO FINEZA BOLOMEY		474.96%

➤ Diseño de Mezcla a/c=0.40

Se aplican las fórmulas obtenidas anteriormente por lo cual se tienen las siguientes variables t₁ agregado fino y t₂ agregado grueso.

$$MFB_2 = 474.96\%$$

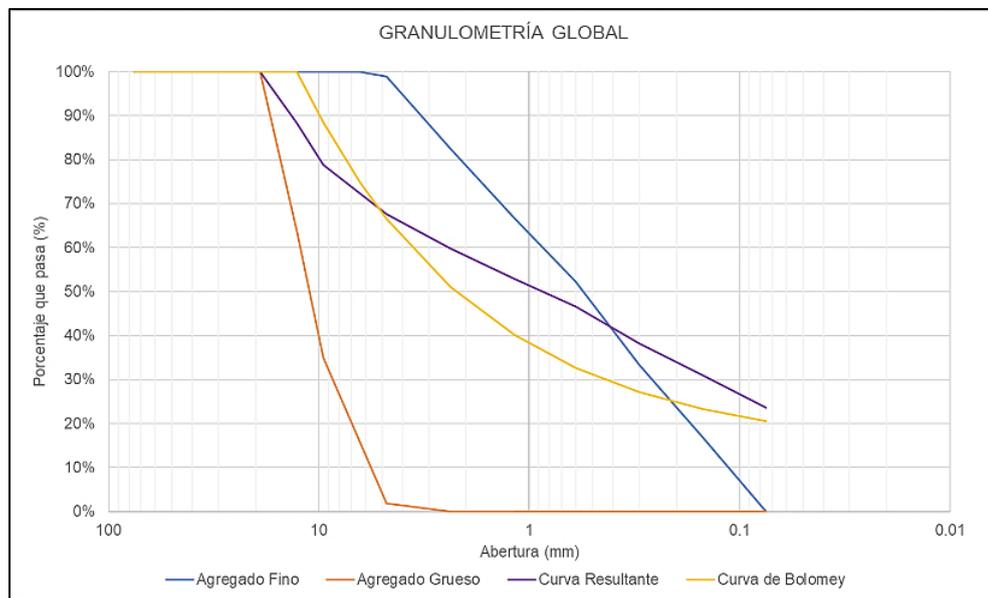
$$t_1 = \frac{100 * (6.536 - 4.7496) - (23.59\% * 6.536)}{6.536 - 2.5} = 43.88\%$$

$$t_2 = 100\% - (23.59\% + 43.88\%) = 32.53\%$$

Tabla N°34: Porcentaje de participación de los agregados por el método de finiza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.40

TAMIZ		% PASANTE PROMEDIO		% Proporcionamiento			Curva Resultante	Bolomey
pulg.	mm	A.F.	A.G.	Cemento	A.F. (t1)	A.G. (t2)		
		%	%	23.59%	43.88%	32.53%	100.00%	%
3"	75	100.0%	100.0%	23.6%	43.9%	32.5%	100.0%	100.0%
2 1/2"	63.5	100.0%	100.0%	23.6%	43.9%	32.5%	100.0%	100.0%
2"	50.8	100.0%	100.0%	23.6%	43.9%	32.5%	100.0%	100.0%
1 1/2"	38.1	100.0%	100.0%	23.6%	43.9%	32.5%	100.0%	100.0%
1"	25.4	100.0%	100.0%	23.6%	43.9%	32.5%	100.0%	100.0%
3/4"	19.05	100.0%	100.0%	23.6%	43.9%	32.5%	100.0%	100.0%
1/2"	12.7	100.0%	63.8%	23.6%	43.9%	20.8%	88.2%	100.0%
3/8"	9.525	100.0%	35.0%	23.6%	43.9%	11.4%	78.8%	88.5%
1/4"	6.35	100.0%	35.0%	23.6%	43.9%	11.4%	78.8%	74.8%
N° 4	4.75	98.9%	1.9%	23.6%	43.4%	0.6%	67.6%	66.6%
N°8	2.36	82.4%	0.0%	23.6%	36.2%	0.0%	59.7%	51.1%
N° 16	1.18	66.7%	0.0%	23.6%	29.3%	0.0%	52.9%	40.2%
N° 30	0.6	52.3%	0.0%	23.6%	23.0%	0.0%	46.6%	32.7%
N° 50	0.3	33.3%	0.0%	23.6%	14.6%	0.0%	38.2%	27.2%
N° 100	0.15	16.8%	0.0%	23.6%	7.4%	0.0%	31.0%	23.4%
N° 200	0.075	0.0%	0.0%	23.6%	0.0%	0.0%	23.6%	20.6%

Gráfico N°7: Porcentaje de participación de los agregados por el método de finiza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.40



➤ **Diseño de Mezcla a/c=0.45**

Se aplican las fórmulas obtenidas anteriormente por lo cual se tienen las siguientes variables t_1 agregado fino y t_2 agregado grueso.

$$MFB_2 = 474.96\%$$

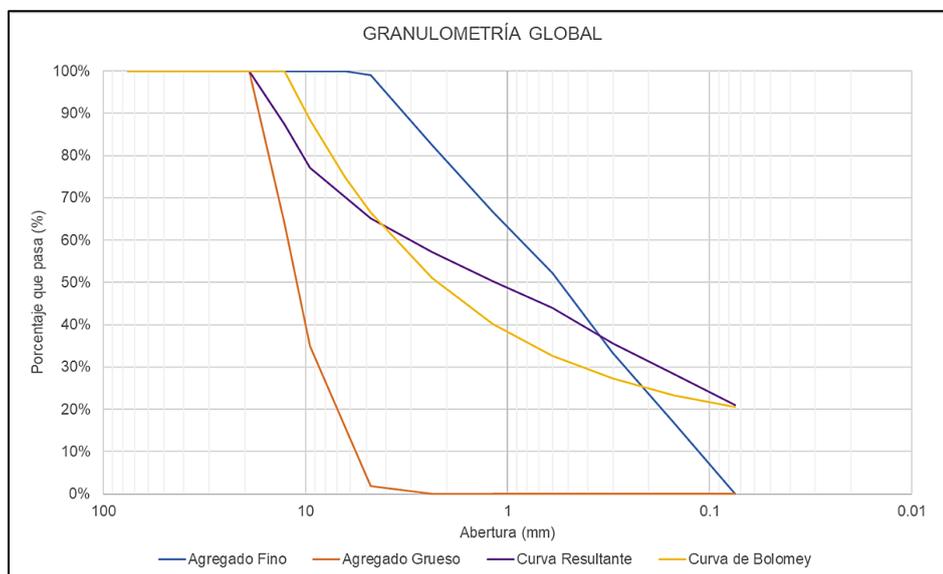
$$t_1 = \frac{100 * (6.536 - 4.7496) - (20.97\% * 6.536)}{6.536 - 2.5} = 43.92\%$$

$$t_2 = 100\% - (20.97\% + 43.92\%) = 35.11\%$$

Tabla N°35: Porcentaje de participación de los agregados por el método de finza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.45

TAMIZ		% PASANTE PROMEDIO		% Proporcionamiento			Curva Resultante	Bolomey
pulg.	mm	A.F.	A.G.	Cemento	A.F. (t1)	A.G. (t2)		
		%	%	20.97%	43.92%	35.11%	100.00%	%
3"	75	100.0%	100.0%	21.0%	43.9%	35.1%	100.0%	100.0%
2 1/2"	63.5	100.0%	100.0%	21.0%	43.9%	35.1%	100.0%	100.0%
2"	50.8	100.0%	100.0%	21.0%	43.9%	35.1%	100.0%	100.0%
1 1/2"	38.1	100.0%	100.0%	21.0%	43.9%	35.1%	100.0%	100.0%
1"	25.4	100.0%	100.0%	21.0%	43.9%	35.1%	100.0%	100.0%
3/4"	19.05	100.0%	100.0%	21.0%	43.9%	35.1%	100.0%	100.0%
1/2"	12.7	100.0%	63.8%	21.0%	43.9%	22.4%	87.3%	100.0%
3/8"	9.525	100.0%	35.0%	21.0%	43.9%	12.3%	77.2%	88.5%
1/4"	6.35	100.0%	35.0%	21.0%	43.9%	12.3%	77.2%	74.8%
N° 4	4.75	98.9%	1.9%	21.0%	43.5%	0.7%	65.1%	66.6%
N°8	2.36	82.4%	0.0%	21.0%	36.2%	0.0%	57.2%	51.1%
N° 16	1.18	66.7%	0.0%	21.0%	29.3%	0.0%	50.3%	40.2%
N° 30	0.6	52.3%	0.0%	21.0%	23.0%	0.0%	44.0%	32.7%
N° 50	0.3	33.3%	0.0%	21.0%	14.6%	0.0%	35.6%	27.2%
N° 100	0.15	16.8%	0.0%	21.0%	7.4%	0.0%	28.4%	23.4%
N° 200	0.075	0.0%	0.0%	21.0%	0.0%	0.0%	21.0%	20.6%

Gráfico N°8: Porcentaje de participación de los agregados por el método de finza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.45



➤ **Diseño de Mezcla a/c=0.50**

Se aplican las fórmulas obtenidas anteriormente por lo cual se tienen las siguientes variables t_1 agregado fino y t_2 agregado grueso.

$$MFB_2 = 474.96\%$$

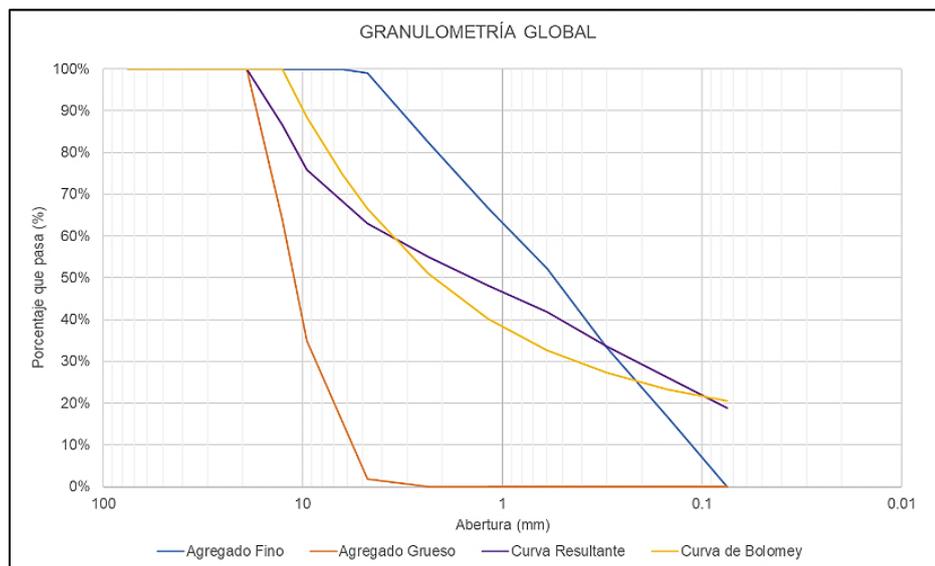
$$t_1 = \frac{100 * (6.536 - 4.7496) - (18.87\% * 6.536)}{6.536 - 2.5} = 43.95\%$$

$$t_2 = 100\% - (18.87\% + 43.95\%) = 37.18\%$$

Tabla N°36: Porcentaje de participación de los agregados por el método de finza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.50

TAMIZ		%PASANTE PROMEDIO		% Proporcionamiento			Curva Resultante	Bolomey
pulg.	mm	A.F.	A.G.	Cemento	A.F. (t1)	A.G. (t2)		
		%	%	18.87%	43.95%	37.18%	100.00%	%
3"	75	100.0%	100.0%	18.9%	44.0%	37.2%	100.0%	100.0%
2 1/2"	63.5	100.0%	100.0%	18.9%	44.0%	37.2%	100.0%	100.0%
2"	50.8	100.0%	100.0%	18.9%	44.0%	37.2%	100.0%	100.0%
1 1/2"	38.1	100.0%	100.0%	18.9%	44.0%	37.2%	100.0%	100.0%
1"	25.4	100.0%	100.0%	18.9%	44.0%	37.2%	100.0%	100.0%
3/4"	19.05	100.0%	100.0%	18.9%	44.0%	37.2%	100.0%	100.0%
1/2"	12.7	100.0%	63.8%	18.9%	44.0%	23.7%	86.6%	100.0%
3/8"	9.525	100.0%	35.0%	18.9%	44.0%	13.0%	75.8%	88.5%
1/4"	6.35	100.0%	35.0%	18.9%	44.0%	13.0%	75.8%	74.8%
N° 4	4.75	98.9%	1.9%	18.9%	43.5%	0.7%	63.1%	66.6%
N°8	2.36	82.4%	0.0%	18.9%	36.2%	0.0%	55.1%	51.1%
N° 16	1.18	66.7%	0.0%	18.9%	29.3%	0.0%	48.2%	40.2%
N° 30	0.6	52.3%	0.0%	18.9%	23.0%	0.0%	41.9%	32.7%
N° 50	0.3	33.3%	0.0%	18.9%	14.6%	0.0%	33.5%	27.2%
N° 100	0.15	16.8%	0.0%	18.9%	7.4%	0.0%	26.3%	23.4%
N° 200	0.075	0.0%	0.0%	18.9%	0.0%	0.0%	18.9%	20.6%

Gráfico N°9: Porcentaje de participación de los agregados por el método de finza de Bolomey – Diseño de Mezcla a/c=0.50



4.1.9 Determinación de Volúmenes Absolutos (agua y aire)

Se calcula el volumen de agua y el aire, ya que se tienen su peso y pesos específico lo cual se da de la siguiente manera:

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

$$\text{Volumen de Agua (m}^3\text{)} = \frac{\text{Peso Unitario del Agua (L/m}^3\text{)}}{\text{Peso Especifico del Agua (L/m}^3\text{)}} \quad (28)$$

Calculado lo anterior se puede tener el volumen de agua y aire:

$$\text{Vol. Abs. (agua y aire)(m}^3\text{)} = \text{Vol. Aire} + \text{Vol. Agua} \quad (29)$$

4.1.9.1 Diseño de Mezcla a/c=0.40, a/c=0.45 y a/c=0.5

Sabemos que las componentes de aire y agua son constantes porque no dependen de la resistencia por lo cual:

$$\text{Volumen de Aire} = \frac{2.5\%}{100} = 0.025 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de Agua} = \frac{228 \text{ L/m}^3}{1000 \text{ L/m}^3} = 0.228 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Abs. (agua y aire)} = 0.025 + 0.228 = 0.253 \text{ m}^3$$

4.1.10 Determinación del Volumen Absoluto de los Agregados

Ya que se tiene los volúmenes de los otros componentes podemos hallar el volumen del agregado global por la cual podemos calcular de la siguiente manera:

$$\text{Vol. Abs. (agua y aire)(m}^3\text{)} = \text{Vol. Aire} + \text{Vol. Agua} \quad (30)$$

4.1.10.1 Diseño de Mezcla a/c=0.40, a/c=0.45 y a/c=0.5

$$\text{Vol. de agregado global} = 1 - 0.253 = 0.747 \text{ m}^3$$

4.1.11 Determinación del Volumen Absoluto de los Agregados (Incluido el Cemento)

Calculamos los volúmenes absolutos de los agregados ya que se cuenta con los porcentajes de participación calculadas en los pasos anteriores.

$$\text{Volumen Cemento (m}^3\text{)} = \frac{t_0}{100} * \text{Vol. de agregado global (m}^3\text{)} \quad (31)$$

$$\text{Volumen A. F. (m}^3\text{)} = \frac{t_1}{100} * \text{Vol. de agregado global (m}^3\text{)} \quad (32)$$

$$\text{Volumen A. G. (m}^3\text{)} = \frac{t_2}{100} * \text{Vol. de agregado global (m}^3\text{)} \quad (33)$$

➤ **Para a/c=0.40**

$$\text{Volumen Cemento} = 0.2359 * 0.747 = 0.176 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen A. F.} = 0.4388 * 0.747 = 0.328 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen A. G.} = 0.3253 * 0.747 = 0.243 \text{ m}^3$$

➤ **Para a/c=0.45**

$$\text{Volumen Cemento} = 0.2097 * 0.747 = 0.157 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen A. F.} = 0.4392 * 0.747 = 0.328 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen A. G.} = 0.3511 * 0.747 = 0.262 \text{ m}^3$$

➤ **Para a/c=0.50**

$$\text{Volumen Cemento} = 0.1887 * 0.747 = 0.141 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen A. F.} = 0.4395 * 0.747 = 0.328 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen A. G.} = 0.3718 * 0.747 = 0.278 \text{ m}^3$$

4.1.12 Determinación de Pesos Secos de los Agregados

Ya que se tienen los volúmenes de cada agregado multiplicamos por los pesos específicos de cada agregado respectivamente.

$$\begin{aligned} \text{Cemento (kg/m}^3\text{)} \\ = \text{Volumen Cemento (m}^3\text{)} * \text{Peso Especif. Cemento} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{Wseco A. F. (kg/m}^3\text{)} = \text{Volumen A. F. (m}^3\text{)} * \text{Peso Especif. A. F.} \quad (35)$$

$$\text{Wseco A. G. (kg/m}^3\text{)} = \text{Volumen A. G. (m}^3\text{)} * \text{Peso Especif. A. G.} \quad (36)$$

➤ **Para a/c=0.40**

$$\text{Cemento} = 0.176 * 3130 = 551.54 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Wseco A. F.} = 0.328 * 2639.17 = 865.02 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Wseco A. G.} = 0.243 * 2717.80 = 660.50 \text{ kg/m}^3$$

➤ **Para a/c=0.45**

$$\text{Cemento} = 0.157 * 3130 = 490.26 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Wseco A. F.} = 0.328 * 2639.17 = 865.85 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{seco A.G.} = 0.262 * 2717.80 = 712.85 \text{ kg/m}^3$$

➤ **Para a/c=0.50**

$$Cemento = 0.141 * 3130 = 441.23 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{seco A.F.} = 0.328 * 2639.17 = 866.52 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{seco A.G.} = 0.278 * 2717.80 = 754.73 \text{ kg/m}^3$$

4.1.13 Ajuste por Humedad de los Agregados

Tabla N°37: Ajuste por humedad diseño a/c=0.40

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.40				
COMPONENTES	SECO (kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)	HUMEDO (kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)
Cemento	551.54	0.176	551.54	0.176
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
Total	2305.06	1.000	2311.82	0.997

Tabla N°38: Ajuste por humedad diseño a/c=0.45

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.45				
COMPONENTES	SECO (kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)	HUMEDO (kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)
Cemento	490.26	0.157	490.26	0.157
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
Total	2296.96	1.000	2303.71	0.997

Tabla N°39: Ajuste por humedad diseño a/c=0.50

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.50				
COMPONENTES	SECO (kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)	HUMEDO (kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)
Cemento	441.23	0.141	441.23	0.141
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
Total	2290.49	1.000	2297.21	0.997

4.1.14 Diseño con Aditivo Superplastificante

Tabla N°40: Dosificación con aditivo a/c=0.40

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.40				
1.2% DE ADITIVO, 10% DE REDUCCIÓN DE AGUA				
COMPONENTES	SECO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)	HUMEDO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)
Cemento	551.54	0.176	551.54	0.176
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
Total	2305.06	1.006	2311.82	1.003

Tabla N°41: Dosificación con aditivo a/c=0.45

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.45				
1.1% DE ADITIVO, 10% DE REDUCCIÓN DE AGUA				
COMPONENTES	SECO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)	HUMEDO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)
Cemento	490.26	0.157	490.26	0.157
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
Total	2296.96	1.005	2303.71	1.002

Tabla N°42: Dosificación con aditivo a/c=0.50

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA a/c = 0.50				
1.0% DE ADITIVO, 9% DE REDUCCIÓN DE AGUA				
COMPONENTES	SECO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)	HUMEDO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)
Cemento	441.23	0.141	441.23	0.141
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
Total	2290.49	1.004	2297.21	1.001

4.1.15 Diseño con Adición de Nanopartículas de Dióxido de Manganeso

Tabla N°43: 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% MnO ₂	27.58	0.008	27.58	0.008
10% MnO ₂	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 N°44: 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				
COMPONENTES	SECO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)	HUMEDO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)
Cemento	490.26	0.157	490.26	0.157
5% MnO ₂	24.51	0.007	24.51	0.007
10% MnO ₂	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 N°45: Dosificación con Adición de NDMA $a/c=0.50$

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA $a/c = 0.50$				
1.0% DE ADITIVO, 9% DE REDUCCIÓN DE AGUA				
COMPONENTES	SECO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)	HUMEDO (kg/m³)	VOLUMEN (m³)
Cemento	441.23	0.141	441.23	0.141
5% MnO ₂	22.06	0.007	22.06	0.007
10% MnO ₂	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

4.1.16 Resumen de Dosificaciones

Tabla N°46: Dosificaciones de las mezclas de concreto para 1 m³ de concreto

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA (kg/m ³)									
Descripción	NORMAL			ADITIVO			NDMA		
	0.4	0.45	0.5	0.4	0.45	0.5	0.4	0.45	0.5
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% MnO ₂							27.58	24.51	22.06
10% MnO ₂							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: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CONCRETO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE MANGANESO

5.1 EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A LOS SULFATOS

La norma; ASTM 1012 y Norma Técnica Peruana NTP 334.094:2022." Ensayo Cambio de Longitud en Morteros"; establecen procedimientos para analizar el comportamiento expansivo del concreto frente a agresiones químicas de los sulfatos. Para ello se utilizaron 3 muestras con las dosificaciones presentadas en la tabla N°47 con el cemento tipo I.

5.1.1 Procedimiento

- Se prepara mezclas de concreto utilizando los diseños de mezcla presentados en tabla N°46.
- Se tamiza el concreto por el tamiz N°4, así separando el parte fino de la mezcla.
- Con el mortero obtenido de esta forma se preparan muestras prismáticas de dimensión 25.4 mm x 25.4 mm x 285.75 mm (3 muestras para cada tipo de concreto).
- Utilizando la norma ASTM C157/NTP 334.165 y ASTM C190/NTP 334.051, se preparan 3 muestras prismáticas y tres muestras cubicas para cada uno de los diseños considerados; las barras tienen una dimensión de 25.4 mm x 25.4 mm x 285.75 mm y los cubos tienen como dimensión 50 mm x 50 mm x 50 mm como se puede ver en la figura N°28, estos moldes deben ser engrasados antes de colocar el mortero, el llenado debe realizarse en 2 capas siendo apisonadas y alisadas en la superficie con ayuda de una espátula para eliminar los excesos.



Figura N°28: Llenado de moldes con mortero UNI-LEM

- A las 24 horas de endurecido las muestras de mortero se procede a desmoldar para ser llevadas a un pozo de curado, salvo 2 cubos las cuales serán ensayadas a compresión según la norma ASTM C109/NTP 334.051, si la resistencia promedio de los cubos es de 20 MPa o mayor, se procede a realizar y registrar las lecturas con el comparador de longitud de acuerdo a la norma ASTM C490/NTP 334.076.



Figura N°29: Cubos de mortero ensayo de compresión UNI-LEM

- Luego estas se pasan a colocar en una solución de sulfato, se utilizará la solución de sulfato de magnesio, donde cada litro de solución contenía 50 gramos de $MgSO_4$ disueltos en 900 ml de agua, y debe ser diluida con agua destilada o ionizada adicional para obtener 1 litro de solución, estos deben ser tapadas para evitar la evaporación.



Figura N°30: sulfato de magnesio

- En la figura N°30 se presenta el sulfato de magnesio utilizado para preparar la solución la cual será vertida en un recipiente como se muestra en la figura N°31.



Figura N°31: Muestras sumergidas en solución de sulfato de magnesio

- Después de 3 días de sumergidas en solución de sulfato de magnesio se realizan las primeras mediciones de longitudes con el equipo comparador de longitud que se aprecia en la figura N°32, concluida las mediciones se regresaron las muestras a la solución de SO_4Mg , este proceso se repite de a los 3, 7, 14, 28, 56, 70 y 90 días en cada una de las muestras correspondientes a diferentes relaciones agua-cemento y para cada porcentaje de NDMA.



Figura N°32: Medición en comparador de longitud UNI-LEM

5.1.2 Cálculos

Para determinar el cambio de longitud se utiliza la siguiente expresión estipulada en la norma:

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad (37)$$

Donde:

ΔL = Cambio de longitud a la edad x en porcentaje %.

L_x = Lectura de comparador de longitud del espécimen a la edad x

L_i = Lectura inicial de comparado de longitud del espécimen

L_g = Longitud de base nominal, o 250 mm (10 pulg) como sea aplicable.

5.1.3 Resultados

5.1.3.1 Diseño de Mezcla $a/c=0.40$

En las tablas 47, tabla 48 y tabla 49, se presentan cambios en la longitud y el cambio unitario en la longitud promedio (%), desviación estándar, coeficiente de variación y cambio unitario acumulado en la longitud promedio para tres muestras de concreto (L_1 , L_2 y L_3) en diferentes tiempos de control para las muestras con relación a/c de 0.40, expresados en porcentaje del valor base y con una aproximación de 0.0001%. Para cada edad controlada (3,7,14,28,56,70 y 90 días); el número de barras de mortero usadas para cada edad fueron tres; se reporta también, la desviación estándar del cambio de longitud y el coeficiente de variación del cambio de longitud.

Tabla N°47: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.40$ y 0% de NDMA

EDAD (días)	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	LONGITUD UNITARIA PROMEDIO ACUMULADA
	L1=7.266	L2=7.174	L3=7.056				
	1	2	3				
0	0	0	0	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.082	0.078	0.072	0.0309%	0.0050	0.0651	0.0309%
7	0.01	0.012	0.007	0.0039%	0.0025	0.2603	0.0348%
14	0.022	0.028	0.019	0.0017%	0.0280	6.4711	0.0365%
28	0.00	0.054	0.001	0.0073%	0.0309	1.6850	0.0439%
56	0.038	0.05	0.055	0.0191%	0.0087	0.1833	0.0629%
70	0.006	0.008	0.002	0.0021%	0.0031	0.5728	0.0651%
90	0.002	0.002	0.01	0.0019%	0.0046	0.9897	0.0669%

Tabla N°48: Cambio de longitud en muestras del concreto con $a/c= 0.40$ y 5% de NDMA

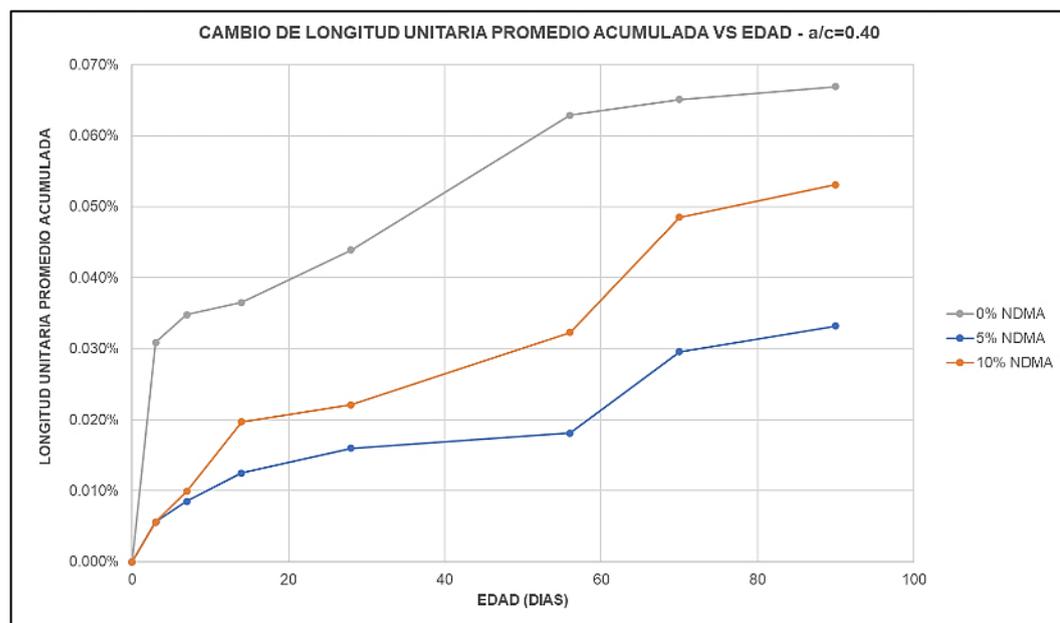
EDAD (días)	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	LONGITUD UNITARIA ACUMULADA
	L1=6.700	L2=4.118	L3=4.842				
	1	2	3				
0	0	0	0	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.02	0.004	0.018	0.0056%	0.0087	0.6227	0.0056%
7	0.008	0.008	0.006	0.0029%	0.0012	0.1575	0.0085%
14	0.012	0.006	0.012	0.0040%	0.0035	0.3464	0.0125%
28	0.008	0.01	0.008	0.0035%	0.0012	0.1332	0.0160%
56	0.002	0.016	0.002	0.0021%	0.0095	1.7722	0.0181%
70	0.034	0.02	0.032	0.0115%	0.0076	0.2641	0.0296%
90	0.005	0.006	0.016	0.0036%	0.0061	0.6759	0.0332%

Tabla N°49: Cambio de longitud en muestras del concreto con a/c= 0.40 y 5% de NDMA

EDAD	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	LONGITUD UNITARIA ACUMULADA
	L1=7.340	L2=7.634	L3=7.634				
	1	2	3				
0	0.000	0.000	0.000	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.018	0.012	0.012	0.0056%	0.0035	0.2474	0.0056%
7	0.008	0.012	0.012	0.0043%	0.0023	0.2165	0.0099%
14	0.026	0.024	0.024	0.0099%	0.0012	0.0468	0.0197%
28	0.006	0.006	0.006	0.0024%	0.0000	0.0000	0.0221%
56	0.020	0.028	0.028	0.0101%	0.0046	0.1823	0.0323%
70	0.038	0.042	0.042	0.0163%	0.0023	0.0568	0.0485%
90	0.014	0.010	0.010	0.0045%	0.0023	0.2038	0.0531%

De los datos que se muestran en las tablas N°48, N°49 y N°50 tenemos:

Gráfico N°10: Cambio de longitud unitaria acumulada a/c=0.40



En la Grafico N°10; Se puede apreciar que el concreto patrón muestra mayores expiaciones acumuladas comparadas con el concreto con adición, también se aprecia que el concreto con adición de NDMA 5% y 10%; tienen comportamientos muy similares y que la expansión volumétrica de ambos es mucho menor al del concreto de control.

5.1.3.2 Diseño de mezcla a/c=0.45

En las tablas 50, tabla 51 y tabla 52, se presentan cambios en la longitud y el cambio unitario en la longitud promedio (%), desviación estándar, coeficiente de variación y cambio unitario acumulado en la longitud promedio para tres muestras de concreto (L1, L2 y L3) en diferentes tiempos de control para las muestras con relación a/c de 0.40, expresados en porcentaje del valor base y con una aproximación de 0.0001%. Para cada edad controlada (3,7,14,28,56,70 y 90 días);

el número de barras de mortero usadas para cada edad fueron tres; se reporta también, la desviación estándar del cambio de longitud y el coeficiente de variación del cambio de longitud.

Tabla N°50: Cambio de longitud en muestras del concreto con a/c= 0.45 y 0% de NDMA

EDAD	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	CAMBIO LONGITUD UNITARIA
	L1=5.958	L2=5.910	L3=6.968				
	1	2	3				
0	0.000	0.000	0.000	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.078	0.064	0.059	0.0268%	0.0098	0.1470	0.0268%
7	0.024	0.022	0.024	0.0093%	0.0012	0.0495	0.0361%
14	0.008	0.012	0.005	0.0033%	0.0035	0.4214	0.0395%
28	0.020	0.016	0.034	0.0093%	0.0095	0.4051	0.0488%
56	0.070	0.050	0.042	0.0216%	0.0144	0.2671	0.0704%
70	0.050	0.028	0.030	0.0144%	0.0122	0.3379	0.0848%
90	0.028	0.032	0.104	0.0219%	0.0428	0.7824	0.1067%

Tabla N°51: Cambio de longitud en muestras del concreto con a/c= 0.45 y 5% de NDMA

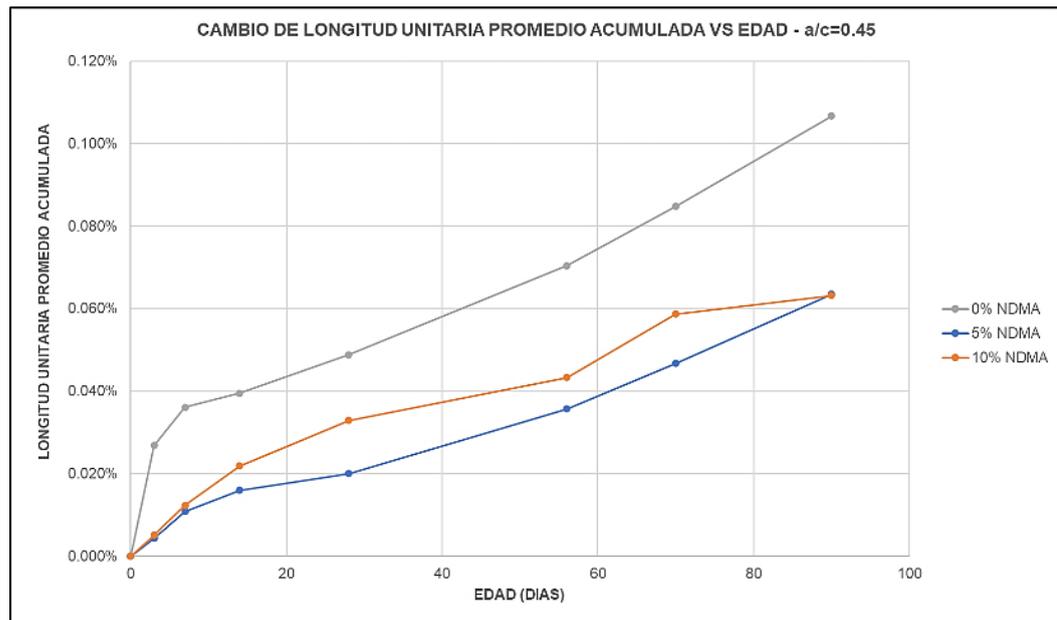
EDAD	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	CAMBIO LONGITUD UNITARIA
	L1=6.888	L2=6.666	L3=5.422				
	1	2	3				
0	0.000	0.000	0.000	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.012	0.010	0.010	0.0043%	0.0012	0.1083	0.0043%
7	0.024	0.009	0.016	0.0065%	0.0075	0.4595	0.0108%
14	0.016	0.019	0.004	0.0052%	0.0079	0.6106	0.0160%
28	0.008	0.016	0.006	0.0040%	0.0053	0.5292	0.0200%
56	0.036	0.044	0.038	0.0157%	0.0042	0.1058	0.0357%
70	0.028	0.030	0.024	0.0109%	0.0031	0.1118	0.0467%
90	0.030	0.068	0.028	0.0168%	0.0225	0.5366	0.0635%

Tabla N°52: Cambio de longitud en muestras del concreto con a/c= 0.45 y 0% de NDMA

EDAD	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	CAMBIO LONGITUD UNITARIA
	L1=7.728	L2=7.452	L3=7.786				
	1	2	3				
0	0.000	0.000	0.000	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.012	0.013	0.013	0.0051%	0.0006	0.0456	0.0051%
7	0.014	0.007	0.033	0.0072%	0.0135	0.7474	0.0123%
14	0.032	0.026	0.014	0.0096%	0.0092	0.3819	0.0219%
28	0.019	0.032	0.032	0.0111%	0.0075	0.2713	0.0329%
56	0.019	0.031	0.028	0.0104%	0.0062	0.2402	0.0433%
70	0.028	0.037	0.050	0.0153%	0.0111	0.2885	0.0587%
90	0.016	0.010	0.008	0.0045%	0.0042	0.3674	0.0632%

De los datos que se muestran en las tablas N°51, N°52 y N°53 tenemos:

Gráfico N°11: Cambio de longitud unitaria acumulada a/c=0.45



De la gráfica N°11 se puede apreciar que el concreto patrón tiene mayores expansiones acumuladas que el concreto con adición de NDMA, así mismo se observa que el concreto con 5% de NDMA mejor desempeño ya que tiene menor expansión acumulada, se aprecia que a los 90 días las muestras con NDMA 5% y 10% tienen expansiones muy similares y mucho menores que el concreto patrón, en todas las edades controladas.

5.1.3.3 Diseño de mezcla a/c=0.50

En las tablas 53, tabla 54 y tabla 55, se presentan cambios en la longitud y el cambio unitario en la longitud promedio (%), desviación estándar, coeficiente de variación y cambio unitario acumulado en la longitud promedio para tres muestras de concreto (L1, L2 y L3) en diferentes tiempos de control para las muestras con relación a/c de 0.40, expresados en porcentaje del valor base y con una aproximación de 0.0001%. Para cada edad controlada (3,7,14,28,56,70 y 90 días); el número de barras de mortero usadas para cada edad fueron tres; se reporta también, la desviación estándar del cambio de longitud y el coeficiente de variación del cambio de longitud.

Tabla N°53: Cambio de longitud en muestras del concreto con a/c= 0.50 y 0% de NDMA

EDAD	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	CAMBIO LONGITUD UNITARIA
	L1=7.452 1	L2=6.864 2	L3=6.624 3				
0	0.000	0.000	0.000	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.014	0.054	0.058	0.0168%	0.0243	0.5793	0.0168%
7	0.046	0.006	0.004	0.0059%	0.0276	1.8813	0.0227%
14	0.010	0.018	0.014	0.0056%	0.0040	0.2857	0.0283%
28	0.020	0.060	0.022	0.0136%	0.0225	0.6629	0.0419%
56	0.022	0.108	0.056	0.0248%	0.0433	0.6986	0.0667%
70	0.062	0.112	0.062	0.0315%	0.0289	0.3670	0.0981%
90	0.080	0.064	0.066	0.0280%	0.0087	0.1245	0.1261%

Tabla N°54: Cambio de longitud en muestras del concreto con a/c= 0.50 y 5% de NDMA

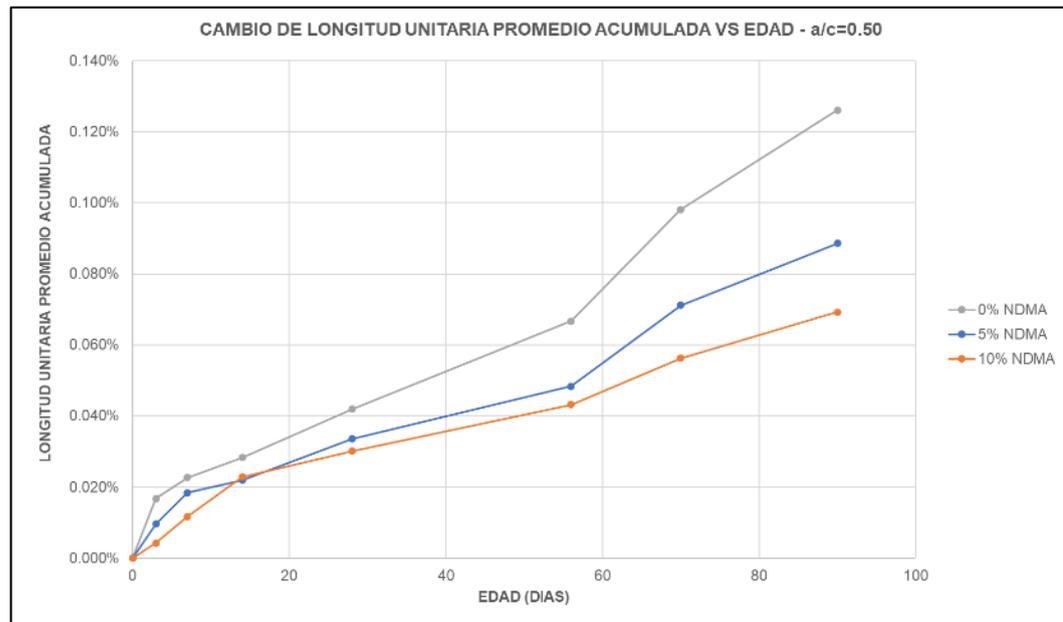
EDAD	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	CAMBIO LONGITUD UNITARIA
	L1=7.264	L2=6.568	L3=6.568				
	1	2	3				
0	0.000	0.000	0.000	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.028	0.020	0.020	0.0096%	0.0057	0.2357	0.0096%
7	0.022	0.022	0.022	0.0088%	0.0000	0.0000	0.0184%
14	0.014	0.004	0.004	0.0036%	0.0071	0.7857	0.0220%
28	0.028	0.030	0.030	0.0116%	0.0014	0.0488	0.0336%
56	0.040	0.034	0.034	0.0148%	0.0042	0.1147	0.0484%
70	0.058	0.056	0.056	0.0228%	0.0014	0.0248	0.0712%
90	0.040	0.047	0.047	0.0174%	0.0049	0.1138	0.0886%

Tabla N°55: Cambio de longitud en muestras del concreto con a/c= 0.50 y 10% de NDMA

EDAD	CAMBIO DE LONGITUD			CAMBIO LONGITUD UNITARIA PROMEDIO %	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION	CAMBIO LONGITUD UNITARIA
	L1=7.292	L2=5.932	L3=8.350				
	1	2	3				
0	0.000	0.000	0.000	0.0000%	0.0000	-	0.0000%
3	0.002	0.006	0.024	0.0043%	0.0117	1.0986	0.0043%
7	0.012	0.032	0.012	0.0075%	0.0115	0.6186	0.0117%
14	0.026	0.020	0.038	0.0112%	0.0092	0.3273	0.0229%
28	0.008	0.038	0.008	0.0072%	0.0173	0.9623	0.0301%
56	0.038	0.028	0.032	0.0131%	0.0050	0.1541	0.0432%
70	0.018	0.042	0.038	0.0131%	0.0129	0.3936	0.0563%
90	0.030	0.028	0.040	0.0131%	0.0064	0.1968	0.0693%

De los datos que se muestran en las tablas N°51, N°52 y N°53 tenemos:

Gráfico N°12: Cambio de longitud unitaria acumulada a/c=0.50



De la gráfica N°12 se puede apreciar que el concreto patrón tiene mayores expansiones acumuladas que el concreto con adición de NDMA, así mismo se observa que el concreto con 10% de NDMA mejor desempeño ya que tiene menor

expansión acumulada, se aprecia que a los 90 días las muestras con NDMA 5% y 10% tienen expansiones muy similares y mucho menores que el concreto patrón, en todas las edades controladas.

De todos los gráficos anteriores se puede ver que la adición de NDMA mejora la resistencia a los ataques de sulfatos, Al añadir el 5% de NDMA da mejores beneficios a los ataques de sulfatos en los diseños de a/c 0.40 y 0.45 ya que las expansiones se reducen en un promedio de 50%, en el concreto con a/c 0.50 y 10% de NDMA tiene mejores resultados de expansión.

Lo mencionado anteriormente, con los resultados obtenidos se pueden explicar por la densificación de la matriz cementante, ya que esto ayuda a que el concreto tenga menos poros por lo que las partículas de sulfatos tienen dificultades de ingresar retardando así el ataque de sulfatos. Las nanopartículas también tienen un efecto catalizador que hace que actúe como centros de nucleación formando un nuevo gel formando así una capa protectora hacia ataques de sulfatos, otra de las razones para la resistencia a los sulfatos se debe a la sustitución parcial del cemento, que conlleva una reducción en el contenido de C3A del cemento, componente vulnerable a los sulfatos

Las expansiones volumétricas por ataques de sulfatos obtenidos en esta investigación, también lo confirmaron otros autores como (Shi, Chang & Hsiao y Byung-Wan) los cuales realizaron análisis de microestructurales de mezclas de concreto con adición de nanosilice, donde observaron que estas tenían texturas más densas y compactas esto debido a que las nanopartículas ocupaban los poros del concreto.

También de otras investigaciones como de (George Quercia), el cual uso adición de nanopartículas de sílice amorfa los cuales vieron la resistencia mecánica y la durabilidad, indicaron que la adición de estas nanopartículas incrementa dichas propiedades, así como la permeabilidad esto debido a que el concreto contaba con una estructura más densa.

5.2 EVALUACIÓN FRENTE A LA EXPOSICIÓN A CLORUROS

La norma; ASTM C-1202, "Método de ensayo normalizado para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones cloruro"; establecen procedimientos para analizar el comportamiento del concreto frente a agresiones químicas de los cloruros. Para ello se utilizaron 3 muestras con las dosificaciones presentadas en la tabla N°46 con el cemento tipo I.

Este ensayo es conocido también como prueba rápida de permeabilidad de cloruros o prueba de coulomb, consta de inducir corriente por una muestra de concreto de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, esta prueba tiene una duración de 6 horas, donde cada 30 minutos se debe tomar lecturas del paso de la corriente en el sistema, para ello se ajusta el equipo en una diferencia de potencial de 60 V de corriente continua y se aplica en los extremos de la muestra, en un extremo de la muestra contiene una solución de cloruro de sodio (3%) y en el otro extremo una solución de hidróxido de sodio (0.3N); como se puede apreciar en la figura N°33 lo que se busca este método es analizar la conductividad eléctrica del concreto, dándonos así un indicador de su resistencia a la penetración de los iones cloruros.

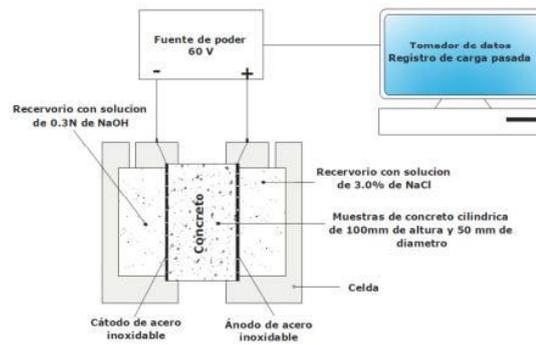


Figura N°33: Esquema del ensayo de penetración de iones cloruro.

5.2.1 Procedimiento

- Se preparan 9 probetas de 100mm x 200mm para cada relación a/c y por cada porcentaje de NDMA como se muestra en la figura N°34, luego de 24 horas dichas probetas se llevan al pozo de curado donde estarán durante 28 días en curado húmedo según la norma ASTM C-31/ NTP 339.033.



Figura N°34: Probetas de 100mm x 200 mm UNI-LEM

- Las probetas de 100mm x 200mm se cortan cada 50 mm obteniéndose 4 discos de 100 mm x 50 mm, de los cuales se eligieron las 2 discos centrales; ya que son la parte más representativa de la probeta figura N°35.



Figura N°35: Disco de 50 mm UNI-LEM

- Las probetas cortadas se llevan a una cámara de vacío para extraer el aire existente en las muestras de concreto, el objetivo es llevar la presión de la cámara a una presión de una atmosfera, esto debe estar por 3 horas luego de eliminar las burbujas de aire, las muestras deben ser sumergidas en agua destilada como se muestra en la figura N°36 así reemplazar los espacios vacíos, esto se realiza para asegurar el transporte de iones al momento de realizar el ensayo.



Figura N°36: Muestra sumergida en agua destilada UNI-LEM

- Para no perder iones al momento de la prueba están muestras deben estar impermeabilizadas tal como se muestra en la figura N°37 en la superficie externa exceptuando las caras, para ello se utilizó silicona líquida como impermeabilizante.



Figura N°37: Impermeabilización de la muestra con silicona líquida UNI-LEM

- Se preparan las soluciones que entrarán en contacto con las muestras en

sus extremos: una solución de cloruro de sodio al 3% y una solución de hidróxido de sodio al 0.3N.

- Para esta investigación se prepararon dos recipientes de vidrio mostrados en la figura N°38, en uno ira el cloruro de sodio (3%) el cual será el ánodo y en el otro hidróxido de sodio (0.3N) el cual será el cátodo, en ambos recipientes se coloca una malla metálica inoxidable.



Figura N°38: Recipientes de vidrio UNI-LEM

- Las mallas serán conectadas a una fuente de 60 V de corriente continua donde irán las muestras.
- Se debe colocar la muestra en los recipientes, para asegurarnos de que no se mueva y no exista filtraciones sellamos con silicona líquida en las uniones y dejamos que seque tal como se muestra en la figura N°39.



Figura N°39: Recipiente con las mallas y conectas a la fuente UNI-LEM

- Luego se vierte las soluciones en sus respectivos recipientes de vidrio.
- Teniendo armado el sistema tomamos datos con ayuda del multímetro el cual nos determinará la intensidad de corriente eléctrica estos se deben tomar cada 30 min por 6 horas.

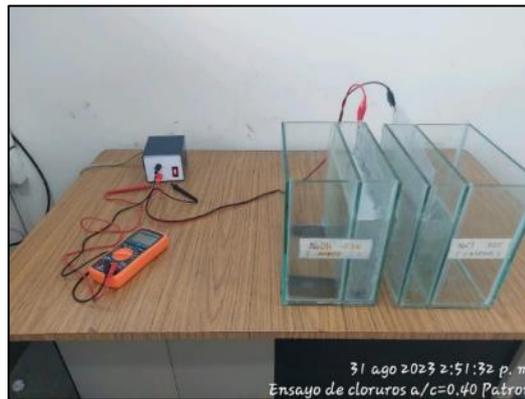


Figura N°40: Sistema completo más multitester UNI-LEM

5.2.2 Cálculos

Para determinar las cargas con los datos de corriente se usará la siguiente expresión.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + 2I_{150} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (38)$$

Donde:

Q = Carga pasada (coulomb)

Io= Corriente (amperios), inmediatamente después de aplicar la tensión

It = Corriente (amperios), t minutos después de aplicar la tensión

El valor anterior debe ser ajustado por el diámetro de la probeta con la siguiente expresión.

$$Q_s = Qx \left(\frac{95}{D_{prom}} \right)^2 \quad (39)$$

Donde:

Qs = Carga pasada (coulomb) a través de una muestra de 95 mm de diámetro

Q = Carga pasada (coulomb) a través de una muestra de Dprom de diámetro

Utilizando la Tabla N°56 se calificó la penetrabilidad del ion cloruro en el concreto en base a la carga obtenida

Tabla N°56: Penetrabilidad del ion cloruro basada en la carga pasada

PENETRABILIDAD DEL ION CLORURO BASADA EN LA CARGA PASADA	
CARGA PASADA (COULOMBS)	PENETRABILIDAD DEL ION CLORURO
>4000	ALTA
2000 - 4000	MODERADA

1000 - 2000	BAJA
100 - 1000	MUY BAJA
<100	INELEGIBLE

Una mayor carga en Coulomb indica que el concreto es menos resistente a la penetración de cloruros, lo que puede ser un indicador de una menor durabilidad del concreto. El coeficiente de difusión de cloruro de la mezcla de control se cuantificó como carga que pasa en coulombs.

En la tabla N°57, N°58 y N°59, se presentan los resultados de las pruebas de penetración de iones de cloruro en muestras de concreto con porcentajes variables de aditivo NDMA. Las mediciones incluyen lecturas de intensidad de corriente (A) en diferentes intervalos de tiempo (t en 30 minutos) para muestras con 0%, 5% y 10% de contenido de NDMA.

5.2.3 Resultados

5.2.3.1 Diseño de Mezcla a/c=0.40

Tabla N°57: Intensidad de corriente y cargas en el concreto con a/c=0.40

LECTURA N°	t (30min)	0%NDMA	5%NDMA	10%NDMA
		in (A)	in (A)	in (A)
1	0	0.0304	0.0295	0.0295
2	30	0.0302	0.0297	0.0297
3	60	0.0300	0.0299	0.0299
4	90	0.0302	0.0295	0.0295
5	120	0.0302	0.0294	0.0294
6	150	0.0302	0.0294	0.0294
7	180	0.0302	0.0294	0.0294
8	210	0.0302	0.0293	0.0293
9	240	0.0300	0.0294	0.0294
10	270	0.0302	0.0295	0.0295
11	300	0.0301	0.0297	0.0297
12	330	0.0302	0.0296	0.0296
13	360	0.0302	0.0296	0.0296
Carga que pasa (Coulomb)		651.60	653.04	637.83
Carga reajustada Coulomb		563.21	584.50	553.11
Penetrabilidad del ion cloruro		MUY BAJA	MUY BAJA	MUY BAJA

En la Tabla N°57 se observa que las mezclas con adición de NDMA muestran valores de difusión de cloruro similares a la mezcla de control. Es decir, el NDMA no afectó la migración de cloruros.

Se observa además que, según el cuadro de la norma ASTM-C1202, la penetrabilidad del ion cloruro de las tres muestras a los 28 días es "Muy baja", con valores promedio de 584 coulomb. En particular, la mezcla que contiene un 10% de NDMA presenta un valor de 553.11 coulomb, ligeramente inferior al del concreto patrón. Por lo tanto, se puede concluir que esta mezcla mejora ligeramente la penetrabilidad del concreto patrón en términos de resistencia al ataque de iones de cloruro.

5.2.3.2 Diseño de Mezcla a/c=0.45

Tabla N°58: Intensidad de corriente y cargas en el concreto con a/c=0.45

LECTURA N°	t (30min)	0%NDMA	5%NDMA	10%NDMA
		in (A)	in (A)	in (A)
1	0	0.0302	0.0303	0.0301
2	30	0.0299	0.0301	0.0301
3	60	0.0297	0.0302	0.0298
4	90	0.0299	0.0302	0.0298
5	120	0.0299	0.0304	0.0297
6	150	0.0306	0.0301	0.0297
7	180	0.0297	0.0299	0.0298
8	210	0.0298	0.0300	0.0298
9	240	0.0297	0.0300	0.0299
10	270	0.0297	0.0302	0.0300
11	300	0.0297	0.0304	0.0297
12	330	0.0297	0.0299	0.0296
13	360	0.0297	0.0298	0.0296
Carga que pasa (Coulomb)		644.85	650.61	643.95
Carga reajustada Coulomb		592.80	587.96	587.22
Penetrabilidad del ion cloruro		MUY BAJA	MUY BAJA	MUY BAJA

Los resultados presentados en la Tabla N°58 muestran que en las tres mezclas de concreto evaluadas las cargas totales medidas en Coulombs, son muy similares. Es decir, el NDMA no afecto la migración de cloruros.

5.2.3.3 Diseño de Mezcla a/c=0.50

Tabla N°59: Intensidad de corriente y cargas en el concreto con a/c=0.50

LECTURA N°	t (30min)	0%NDMA	5%NDMA	10%NDMA
		in (A)	in (A)	in (A)
1	0	0.0304	0.0302	0.0302
2	30	0.0302	0.0301	0.0300
3	60	0.0301	0.0301	0.0301
4	90	0.0299	0.0301	0.0302
5	120	0.0299	0.0299	0.0297
6	150	0.0298	0.0300	0.0298
7	180	0.0298	0.0301	0.0294
8	210	0.0298	0.0299	0.0296
9	240	0.0299	0.0297	0.0297
10	270	0.0300	0.0299	0.0296
11	300	0.0300	0.0298	0.0296
12	330	0.0301	0.0297	0.0298
13	360	0.0301	0.0298	0.0297
Carga que pasa (Coulomb)		647.55	646.74	643.41
Carga reajustada Coulomb		562.09	565.63	561.98
Penetrabilidad del ion cloruro		MUY BAJA	MUY BAJA	MUY BAJA

Finalmente, según los resultados de las tres mezclas con a/c= 0.40, 0.45 y 0.50; reportados en las Tablas N°57, N°58 y N°59; se observan cargas totales medidas en Coulomb son muy similares en las nueve mezclas evaluadas. Esto indica que el NDMA no afectó la migración de cloruros, lo que puede ser un indicador de la durabilidad del concreto.

Según la norma ASTM C1202-22, y utilizando los valores reportados en la Tabla N°60 se aprecia que los valores obtenidos de carga en Coulomb corresponden a concretos de muy baja permeabilidad a los cloruros.

Tabla N°60: Resumen de Penetrabilidad del ion cloruro en concreto con NDMA.

Edad	a/c	NDMA	Carga (Coulomb)	Indicador cualitativo
28	0.4	0%	563.21	MUY BAJA
28		5%	584.65	MUY BAJA
28		10%	553.11	MUY BAJA
28	0.45	0%	592.80	MUY BAJA
28		5%	587.96	MUY BAJA
28		10%	587.22	MUY BAJA
28	0.5	0%	562.09	MUY BAJA
28		5%	565.63	MUY BAJA
28		10%	561.98	MUY BAJA

Durante la prueba de permeabilidad rápida de cloruros (PRC), debido al alto voltaje de 60 V y a la duración relativamente larga de la prueba (6h), la temperatura de las muestras aumenta, lo que aumenta las cargas totales que pasan. La temperatura también puede aumentar los daños a la microestructura y puede cambiar la composición química de las soluciones de los poros y, por lo tanto, la condición primaria del concreto cambiará, especialmente en un concreto con una proporción alta de agua/cemento.

Suponiendo una conductividad constante de las muestras de concreto durante el proceso de prueba, y basándose en los principios físicos de las pruebas PRC y resistividad eléctrica (RE), se puede concluir que la relación entre las dos pruebas debe ser lineal. Sin embargo, para una amplia gama de especímenes de hormigón y debido a que la temperatura aumenta durante la prueba RCPT, la resistencia eléctrica de las muestras disminuye y la corriente a través de la muestra aumenta. Como resultado, esta correlación no sería lineal.

5.3 EVALUACION DE CORROSIÓN DE ACERO DE REFUERZO

la norma; ASTM C-876 “Medición de potenciales de corrosión (potencial de circuito abierto o potencial de media celda “Half Cell Potential”) de las barras de refuerzo embebidas en el concreto de acuerdo a la norma ASTM C 876”; Esta norma establecen procedimientos para analizar el comportamiento del concreto frente a la corrosión. Este ensayo tiene un proceso electroquímico, ya que la corrosión metálica en la mayoría de los casos es de origen electroquímico, por ello en esta investigación se usará esta técnica de proceso electroquímico. El estudio del acero de refuerzo embebido en concreto se analiza mediante señales eléctricas el cual nos da respuesta del sistema, dicho técnica tiene una ventaja con los demás por la rapidez de la medición además de ser una prueba no destructiva Para ello se utilizaron unas 9 muestras con las dosificaciones presentadas en la tabla N°47 con

el cemento tipo I como muestra base y también muestras con adición de nanopartículas de dióxido de manganeso anódico para así proceder a la experimentación.

5.3.1 Procedimiento

- Se prepararon 9 probetas de 150mmx300mm de acuerdo a ASTM C-31/ NTP 339.033; en cada muestra se colocaron un acero corrugado de $\frac{1}{2}$ " de 25 cm como se muestra en la figura N°41, luego de 24 horas se colocaron en la poza de curado durante 28 días.



Figura N°41: Preparación de probetas de 150x300 mm UNI-LEM

- Pasado el tiempo de curado las probetas se colocaron en una solución de cloruro de sodio (30%).
- Transcurridas las 24 horas de estar sumergida las muestras en la solución de cloruro de sodio se toma las primeras medidas, utilizando el voltímetro, de MC MILLER Co. que se muestra en la figura N°42 el cual consta de un electrodo de referencia sumergido, en una solución de sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) los cuales están conectados a través del cable rojo que fue conectado al acero y un cable negro el cual va conectado al electrodo de referencia.



Figura N°42: Equipo de medición de potencial eléctrico MC MILLER Co UNI-LEM

- Luego de tener el sistema conectado se enciende el voltímetro la cual debe tener la siguiente configuración DC, 2V y 100 como se muestra en la figura N°43.



Figura N°43: Voltímetro configurado UNI-LEM

- El electrodo de referencia debe tener contacto con la varilla de acero como se muestra en la figura N°44.



Figura N°44: Electrodo de referencia en medición UNI-LEM

- Enseguida el voltímetro indicara valores, de diferencial de potencial eléctrico se esperar por 5 a 10 segundos hasta que se estabilice la lectura y se registra. Este monitoreo de la diferencia de potencial eléctrico se realizó por un periodo de 70 días.

5.3.2 Criterios de Evaluación

La norma ASTM A-876 nos proporciona una tabla con los límites, donde deben ser compradas los valores arrojados en el voltímetro, dicha tabla es la siguiente:

Tabla N° 61: Cuadro de valores de evaluación de potenciales de media celda.
Fuente: ASTM C-876-91.

Potencial de corrosión (E _{corr}) Cu/CuSO ₄	Criterio
Más positivos que -200 mV	10% de probabilidad de que no exista corrosión
Entre -200 y -350 mV	Incertidumbre
Más negativo que -350 mV	90% de probabilidad de corrosión

El método aplicado se basa en la relación entre el potencial de corrosión de la barra de refuerzo y la probabilidad de corrosión de la siguiente manera: $E > -126$ mV SCE indica pasivación del acero, con $<10\%$ de probabilidad de corrosión. Para $E < -276$ mV SCE, existe $>90\%$ de probabilidad de corrosión, mientras que los valores que caen entre estos límites se asimilan a una probabilidad incierta.

5.3.3 Resultados

5.3.3.1 Diseño de Mezcla a/c=0.40

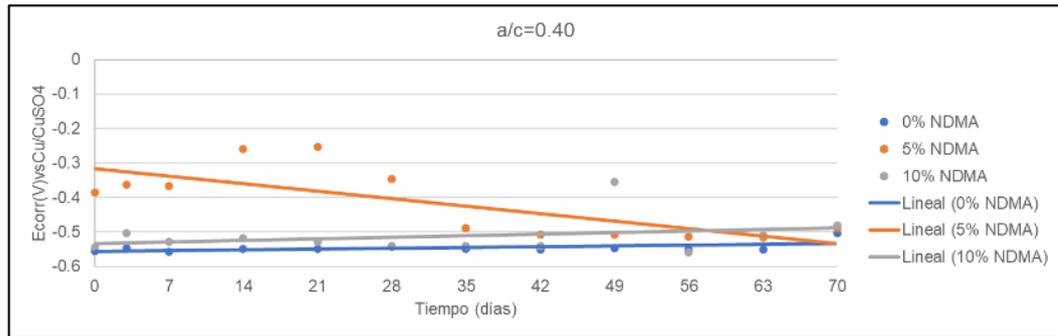
Tabla 62 se reportan todos valores de potencial eléctrico de corrosión para las muestras con relación a/c de 0.40, expresados en Voltios (V) para cada edad controlada indica en cada tabla.

Tabla N° 62: Potencial eléctrico de corrosión-E_{corr} para a/c=0.40

POTENCIAL ELECTRICO E corr (V)			
EDAD (días)	0%	5%	10%
0	-0.555	-0.386	-0.545
3	-0.546	-0.363	-0.504
7	-0.558	-0.366	-0.528
14	-0.549	-0.260	-0.518
21	-0.549	-0.254	-0.529
28	-0.542	-0.346	-0.541
35	-0.549	-0.490	-0.541
42	-0.550	-0.507	-0.540
49	-0.547	-0.508	-0.355
56	-0.551	-0.513	-0.560
63	-0.550	-0.516	-0.510
70	-0.503	-0.554	-0.481

En las Gráfico N°13, se observan que los valores de potencial van tomando valores más positivos, lo que indican un estado de pasivación del acero que está inmerso en el concreto con adición de NDMA.

Gráfico N°13: Ecorr (V) para concreto a/c=0.40



5.3.3.2 Diseño de Mezcla a/c=0.45

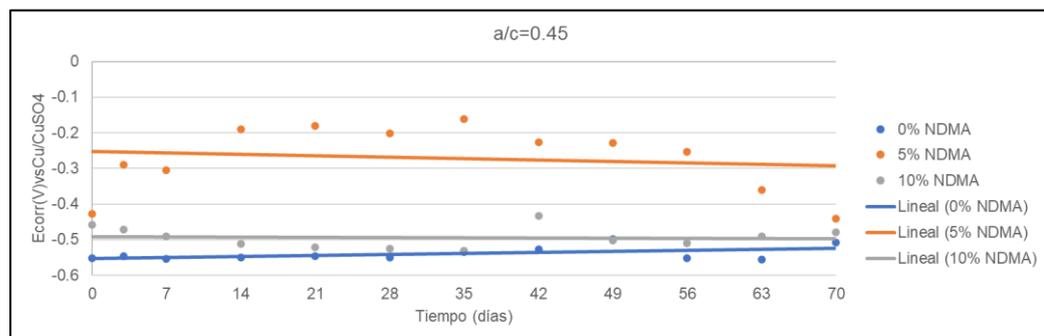
Tabla 63 se reportan todos valores de potencial eléctrico de corrosión para las muestras con relación a/c de 0.45, expresados en Voltios (V) para cada edad controlada indica en cada tabla.

Tabla N°63: Potencial eléctrico de corrosión-Ecorr para a/c=0.45

POTENCIAL ELECTRICO E corr (V)			
EDAD (días)	0%	5%	10%
0	-0.552	-0.428	-0.459
3	-0.546	-0.290	-0.471
7	-0.554	-0.305	-0.490
14	-0.551	-0.190	-0.511
21	-0.547	-0.180	-0.522
28	-0.551	-0.201	-0.525
35	-0.534	-0.161	-0.531
42	-0.528	-0.226	-0.434
49	-0.498	-0.229	-0.503
56	-0.552	-0.253	-0.510
63	-0.556	-0.361	-0.491
70	-0.508	-0.441	-0.480

En las Gráfico N°14, se observan que los valores de potencial van tomando valores más positivos, lo que indican un estado de pasivación del acero que está inmerso en el concreto con adición de NDMA.

Gráfico N°14: Ecorr (V) para concreto a/c=0.45



5.3.3.3 Diseño de Mezcla a/c=0.50

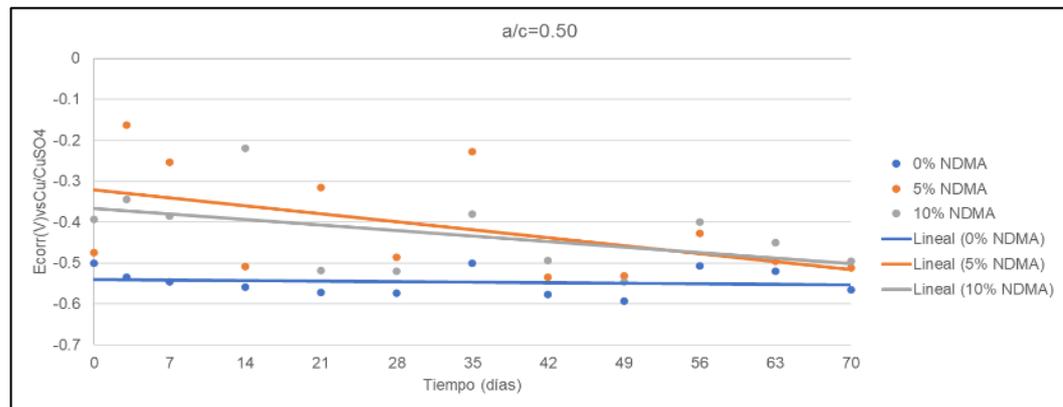
Tabla N°64 se reportan todos valores de potencial eléctrico de corrosión para las muestras con relación a/c de 0.50, expresados en Voltios (V) para cada edad controlada indica en cada tabla.

Tabla N°64: Ecorr (V) para concreto a/c=0.45

POTENCIAL ELECTRICO E corr (V)			
EDAD (días)	0%	5%	10%
0	-0.500	-0.475	-0.393
3	-0.535	-0.162	-0.344
7	-0.545	-0.254	-0.385
14	-0.559	-0.508	-0.220
21	-0.572	-0.316	-0.518
28	-0.574	-0.486	-0.520
35	-0.501	-0.227	-0.380
42	-0.577	-0.534	-0.494
49	-0.593	-0.531	-0.545
56	-0.507	-0.428	-0.399
63	-0.520	-0.495	-0.450
70	-0.565	-0.512	-0.496

En las Gráfico N°15, se observan que los valores de potencial van tomando valores más positivos, lo que indican un estado de pasivación del acero que está inmerso en el concreto con adición de NDMA.

Gráfico N°15: Ecorr (V) para concreto a/c=0.50



Para $E > -126$ mV SCE, se espera que las barras de refuerzo sean pasivas. En todos los casos las muestras están en rango de pasividad. Se observa que el concreto sin adición de NDMA mantiene constante su Ecorr, mientras que el concreto con 5% de NDMA reduce su potencial hasta en 30%, mientras que el concreto de 10% de NDMA reduce su potencial en 12%; es decir hay una mayor protección contra la corrosión en los concretos con adición de NDMA.

En el Gráfico N°13, Gráfico N°14 y Gráfico N°15 se observan que los valores de potencial van tomando valores más positivos, lo que indican un estado de pasivación del acero que está inmerso en el concreto con adición de NDMA.

Este método de ensayo es cualitativo, es decir, indica el riesgo de corrosión cualitativamente. Además, su resultado se interpreta mejor como la posibilidad de presencia de corrosión en cierta ubicación del concreto. No se puede utilizar para establecer firmemente el perfil de la corrosión en sí, como la ubicación, el tamaño y la forma de la corrosión.

Esta mejora en los resultados obtenidos es debido a que las nanopartículas ocupan los espacios vacíos densificando el concreto, dando así un concreto con menos poros además de que las nanopartículas por su nucleósido generan un nuevo gel dando una capa protectora y así no ingresan las partículas de NaCl protegiendo el acero incrustado.

5.4 ENSAYO DE CARBONATACIÓN EN CONDICIONES ACELERADAS

Para este ensayo en acondiciono una cámara de carbonatación el cual tiene como finalidad realizar los estudios de carbonatación del concreto, esta cámara simula un ambiente de exposición de concentraciones de CO₂, se sabe que el fenómeno de carbonatación es muy lento a ambiente, por lo cual estas cámaras ayudan a acelerar estos procesos aumentando la concentración de CO₂, las concentraciones usuales en el ambiente natural de CO₂ es de 0.03% en volumen, por lo que con esas concentraciones tomaría mucho tiempo para realizar los estudios, por ello para acelerar el proceso se utilizan concentraciones de CO₂ de 3% a 50%, algo que se tiene que tener en cuenta es también la humedad relativa ya que si esta supera los valores límites puede obstruir los poros por lo que no habría transporte de CO₂ y no se produciría la carbonatación, caso contrario si los valores son muy bajos lo cual generaría poca fase acuosa por lo cual no se desarrollaría la carbonatación, para este ensayo se debe para que se lo más idóneo se debe asegurar que el flujo de CO₂ debe ser continuo, además que la cámara debe ser hermética (Chiné Polito, Cuevas Kauffmann, 2019)

La cámara se diseñó para acelerar la carbonatación del concreto de acuerdo con la norma ASTM B117, que se aplica a cámaras de niebla salina. La cámara tiene una capacidad para albergar seis especímenes de concreto, que ocupan un volumen aproximado de 9425 cm³. Las dimensiones de la cámara fueron de 40x30x50 cm (60000cm³). Según la norma ASTM B117, el volumen ocupado por el gas no debe ser menor de 2,5 veces el volumen del sólido, por lo que la cámara no debe tener un volumen total inferior a 23562 cm³. La impermeabilidad de la cámara se garantizó mediante el uso de selladores epóxicos. El abastecimiento de aire comprimido a una presión constante de operación estuvo en el rango de valores de 1 atm. El flujo del aire para las condiciones de presión fue de 10 mL/min, con una humedad relativa del 75% ± 5% y un 6% ± 0,5% de CO₂ dentro de la cámara. En la figura 45 se muestra un esquema de los componentes de la cámara de carbonatación acelerada.

5.4.1 Procedimiento

- Se preparan 9 probetas de 100mm x 200mm para cada relación a/c y por cada porcentaje de NDMA, luego de 24 horas dichas probetas se llevan al pozo de curado donde estarán por 28 días todo ello se realizó según la norma ASTM C-31/ NTP 339.033.
- Las probetas ya curadas a los 28 días se colocaron en el horno a 115 °C

por 24 horas.

- Luego de ello se colocará las probetas a la cámara de carbonatación, dicha cámara está construida por un material acrílico totalmente sellado, cuenta con una plataforma metálica donde se coloca las probetas, también cuenta con 3 sensores que miden la concentración de CO_2 , temperatura y presión en el interior de la cámara, estos sensores están conectados a un equipo (PASCO 850 UNIVERSAL INTERFACE) el cual manda los datos a una computadora, es así que se lleva el control de los parámetros del ensayo, este sistema también cuenta con una válvula nanométrica que regula el ingreso del gas CO_2 la cual se deja en un caudal de 10 L/s así mismo también cuenta con una compuerta eléctrica incorporado con un temporizador, así se controlando el ingreso del CO_2 .

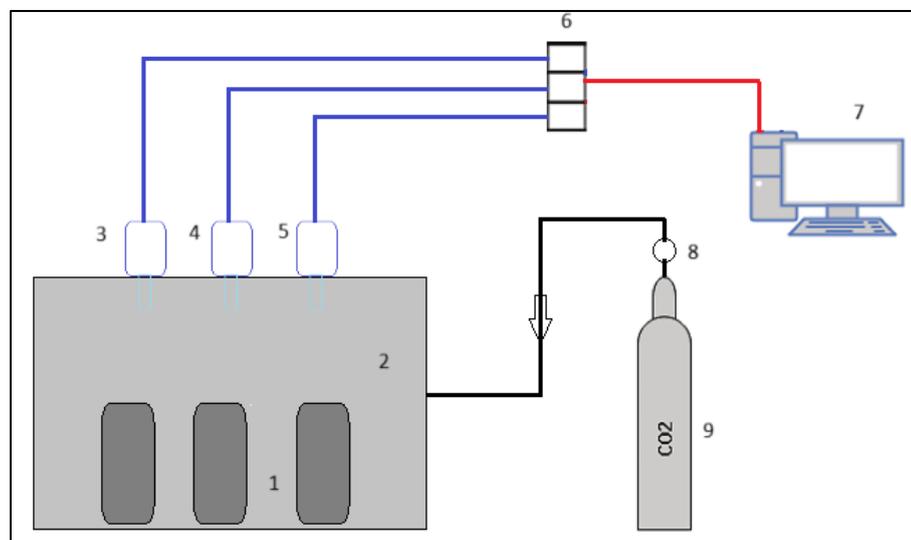


Figura N°45: Componentes de la cámara de carbonatación acelerada

1. Probetas 10x20 cm
2. Cámara de carbonatación
3. Sensor de temperatura
4. Sensor de presión
5. Sensor de CO_2
6. Equipo PASCO 850
7. Computador
8. Regulador de Presión y válvula de control de flujo
9. Balón de gas CO_2

- Antes de realizar el ensayo se debe verificar que la cámara este totalmente sellada por lo cual se usa silicona líquida.
- El ensayo se realiza con 6% de concentración de CO_2 , 24 °C de temperatura y a 1 atm de presión, conociendo ello se abre la válvula del CO_2 con un caudal de 10 L/s, las probetas estarás en la cámara por 7 días, durante el ensayo se debe verificar que la concentración de CO_2 debe ser la indicada.

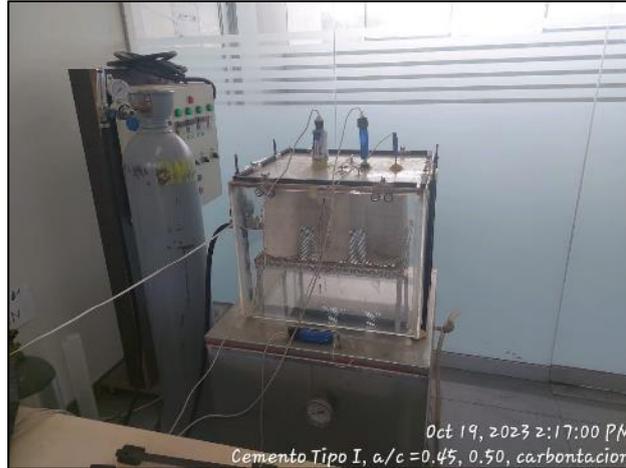


Figura N°46: Muestras en cámara de carbonatación UNI-LEM

- Pasado los 7 días se retiran las probetas, los cuales se lleva a la máquina de compresión para cortar la probeta de manera axial.



Figura N°47: Corte axial de probeta UNI-LEM

- Las probetas cortadas se aplica fenolftaleína para determinar la profundidad de carbonatación, la zona que no se torna de color rosado será la parte carbonatada, por lo cual se realiza la medición.



Figura N° 48: Medición de profundidad de carbonatación UNI-LEM

- Se tritura 10 g de concreto carbonatado, la cual se coloca en 70 ml agua destilada, esto se realiza para medir el pH del concreto carbonatado.



Figura N° 49: Medición de pH de muestra carbonatada UNI-LEM

5.4.2 Resultados

En la Tabla N°65 se presentan los valores promedio de carbonatación correspondientes a 15 mediciones realizadas en diferentes lugares de los bordes laterales de la superficie de las muestras. En general, se observa que las profundidades de carbonatación en las muestras con NDMA fueron menores que las del concreto de control; y que el PH de todas las muestras fueron alcalinos

Tabla N°65: Profundidad de carbonatación en concreto con NDMA

Concreto	Profundidad de carbonatación y PH					
	(a/c=0.40)		(a/c=0.45)		(a/c=0.50)	
	mm	PH	mm	PH	mm	PH
Patrón	8	12.00	9.00	12.07	10.00	12.01
5% NDMA	7	12.25	6.90	12.59	6.00	12.31
10% NDMA	7	12.24	6.80	12.36	6.70	12.37

Asimismo, calcularemos el coeficiente de carbonatación (K), que representa la velocidad de avance del CO₂ en el medio continuo utilizando la ecuación básica de difusión de la ley de Fick en la Ecuación (40), donde X es la profundidad (mm), T el tiempo (años).

$$X = K\sqrt{t} \quad (40)$$

Considerando una concentración del 0.03% de CO₂ en un ambiente natural y que la concentración de CO₂ usada en la cámara de carbonatación acelerada fue de 6%; es decir 200 veces mayor que la concentración en condiciones ambientales promedio se puede concluir que a 7 días en ambiente acelerado se obtiene aproximadamente el cuádruple de carbonatación que se alcanzaría en condiciones normales.

Tabla N°66: Coeficientes de carbonatación acelerada del concreto con NDMA y diferentes relaciones a/c

Concreto	Coeficiente de carbonatación (Kacel)					
	(a/c=0.40)		(a/c=0.45)		(a/c=0.50)	
	[mm]	Kacel	[mm]	kacel	[mm]	kacel
Patrón	8	57.77	9.00	64.99	10.00	72.00
5% NDMA	7	50.55	6.90	49.82	6.00	43.33
10% NDMA	7	50.55	6.80	49.10	6.70	48.40

Para convertir este coeficiente obtenido como Kacelerado a Kambiental, se usará la ecuación (35) de Fick, donde K1 y K2 son los coeficientes de carbonatación para distintas concentraciones de CO₂; C₁ y C₂ son las concentraciones de CO₂ usadas (en condiciones naturales y condición acelerada).

$$\frac{k_1}{k_2} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (41)$$

Reemplazando en la 2da ecuación de Fick; se obtienen los valores del coeficiente de carbonatación ambiental para las nueve mezclas del estudio que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N°67: Coeficientes de carbonatación ambiental del concreto con NDMA y diferentes relaciones a/c

Concreto	Coeficiente de carbonatación					
	(a/c=0.40)		(a/c=0.45)		(a/c=0.50)	
	Kacel	Ka	Kacel	ka	Kacel	ka
Patrón	57.77	4.085	64.99	4.595	72.00	5.09
5% NDMA	50.55	3.574	49.82	3.520	43.33	3.06
10% NDMA	50.55	3.574	49.10	3.472	48.40	3.42

Como se observa en la Tabla N°67 los coeficientes de carbonatación en condiciones medio ambientales en los concretos NDMA son menores en todos los casos con respecto al concreto de control. Según investigadores como Alonso y Andrade (1993) han sugerido que, en un concreto de calidad regular, el coeficiente de carbonatación KCO_2 tendría un valor entre 3 y 6 mm/año^{0.5} de tal forma que un hormigón de alta calidad presentaría un valor menor de 3 mm/año^{0.5} y un concreto de baja calidad presentaría un valor de más de 6 mm/año^{0.5}.

En la Figura N°58, se aprecia en forma gráfica como para las relaciones de a/c evaluadas las muestras con 5 y 10% de NDMA mostraron menores velocidades de carbonatación en comparación con el concreto patrón. Además, se puede observar que los valores obtenidos de los coeficientes de carbonatación con NDMA están entre 3.00 y 3.57 mm/año^{0.5} que equivale a un concreto de alta calidad.

Finalmente, utilizando modelos de durabilidad para estimar el tiempo de vida útil mediante la ecuación (42), donde t_i es el tiempo estimado de vida útil:

$$t_i = (d/K)^2 \quad (42)$$

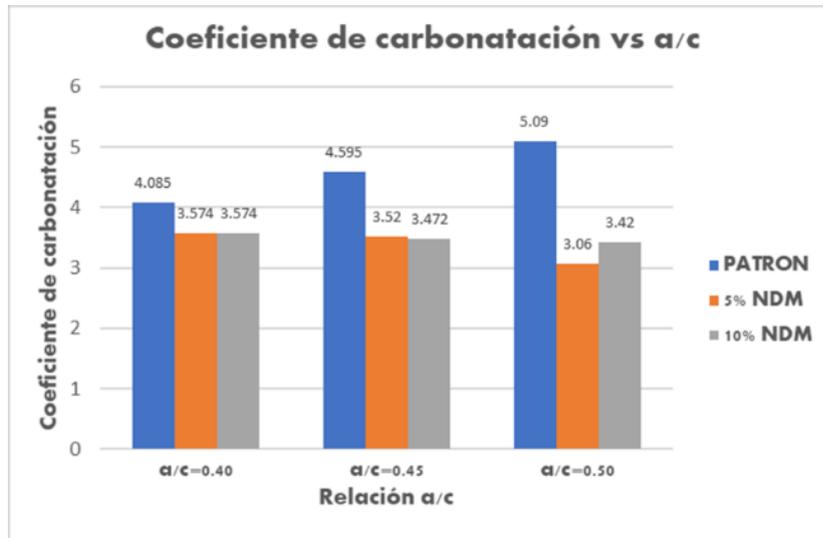
Tabla N°68: Tiempo que tarda el carbonato en llegar al refuerzo y provocar la corrosión.

a/c	0.4			0.45			0.5		
	Ka	d (mm)	t_i	Ka	d	t_i	Ka	d	t_i
patrón	4.085	50	96	4.595	50	76	5.09	50	62
5% NDMA	3.574	50	125	3.520	50	129	3.06	50	171
10% NDMA	3.574	50	125	3.472	50	133	3.42	50	137

Como se observa en todos los casos los concretos con NDMA en la Tabla 68 tardarían más tiempo en iniciar su proceso de deterioro por carbonatación; observándose los mejores resultados para concretos con 5% de NDMA.

A continuación, obsérvese en la gráfica como en todos los casos el coeficiente de carbonatación disminuye en los concretos con NDMA

Gráfico N°16: Coeficiente de carbonatación del concreto con NDMA para diversas relaciones a/c



CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos se llegaron a las siguientes conclusiones:

La adición óptima de NDMA fue de 5%; se comprobó la mejora la resistencia a los ataques químicos en todas las mezclas de estudio.

Las mezclas con adiciones de NDMA de 5 y 10%; sometidas al ataque de sulfatos han demostrado un mejor comportamiento frente al ataque de sulfatos en comparación con las muestras de control. Este resultado sugiere que la adición de NDMA puede mejorar la resistencia a la degradación química y, por lo tanto, aumentar la durabilidad de las estructuras de concreto expuestas a ambientes agresivos con sulfatos.

En los diseños de mezcla con $a/c=0.40$, $a/c=0.45$ y $a/c=0.50$ con 5 y 10% de NDMA; se puede apreciar que el mejor comportamiento ante la corrosión es con porcentaje de 5% de NDMA donde se obtuvieron resultados mayores E_{corr} (mV).

Las mezclas de concreto con adición de NDMA lograron reducir significativamente la profundidad de carbonatación. Este resultado indica que la inclusión de NDMA en las mezclas de concreto puede contribuir a mejorar la resistencia del material frente a la carbonatación, un proceso que puede afectar la durabilidad y la integridad de las estructuras de concreto. Estos hallazgos respaldan la efectividad de la adición de NDMA como una estrategia para mitigar los efectos negativos de la carbonatación en el concreto, lo que puede resultar en estructuras más duraderas y de mayor calidad

La adición de NDMA en una proporción del 5% mantuvo el PH en el rango alcalino de 12 a 13. Esto es particularmente relevante, ya que valores menores a 11 del pH puede afectar su durabilidad y resistencia. Por lo tanto, la adición de NDMA en esta proporción puede ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades químicas del concreto y su resistencia a los ataques químicos.

Las mezclas con adición de NDMA exhibieron valores de difusión de cloruro similares a la mezcla de control, por lo que podemos concluir que la adición de NDMA no afectó la migración de iones cloruros que puede ser un indicador de la durabilidad del concreto para todos los contenidos de a/c considerados.

En todas las edades de control, los morteros sin adición se expandieron mucho más en presencia del ataque de sulfato de magnesio; asimismo las muestras con adición de 5% NDMA tuvieron un mejor desempeño, observándose bajos valores de expansión

El concreto sin adición de NDMA mantiene constante su E_{corr} (potencial de corrosión), mientras que el concreto con 5% de NDMA reduce su potencial hasta en 30%, mientras que el concreto de 10% de NDMA reduce su potencial en 12%; es decir hay una mayor protección contra la corrosión del acero de refuerzo en los concretos con adición de NDMA.

Utilizando modelos de durabilidad para estimar el tiempo de vida útil se demostró que los NDMA mejoran la vida útil del concreto expuesto a carbonatación.

A partir del ensayo de carbonatación acelerada se estimaron los valores de los coeficientes de carbonatación ambiental, obteniéndose que los coeficientes de carbonatación los concretos con NDMA están entre 3.0 y 3.57 mm/año^{0.5} que equivale a un concreto de alta calidad.

Se aprecia que a los 90 días las muestras con NDMA 5 y 10% expuesta a sulfatos; tienen expansiones muy similares y mucho menores que el concreto patrón, en todas las edades controladas.

Se comprobó que los concretos con NDMA tardarían más tiempo en iniciar su proceso de deterioro por carbonatación; observándose los mejores resultados para concretos con 5% de NDMA.

RECOMENDACIONES

Con el fin de obtener una comprensión más completa del impacto del Nanóxido de Manganeso Anódico (NDMA) en las propiedades químicas del concreto, se recomienda ampliar la investigación considerando diferentes porcentajes de adición de NDMA en el cemento.

Se recomienda estudiar el comportamiento del cemento en relación con la adición de NDMA y determinar si existen proporciones óptimas que maximicen sus beneficios en términos de durabilidad y resistencia. Realizar ensayos adicionales para evaluar otras propiedades del concreto, como absorción capilar, resistividad eléctrica y permeabilidad obtener una visión más integral del potencial del NDMA.

Se recomienda mejorar la cámara de carbonatación añadiendo más sensores para un mejor control de los parámetros ambientales de la cámara de carbonatación. Además, es importante implementar mejoras para prevenir fugas de CO₂. Considerar una cámara de carbonatación de dimensiones mayores o una cámara adicional permite ensayar mayores cantidades de muestras y variar los tiempos de exposición al CO₂

Se recomienda contar con un mejor equipo para los ensayos de cloruros, ya que actualmente estos ensayos toman aproximadamente 6 horas. Esto requiere un tiempo más prolongado para realizar cada prueba. Además, el hecho de tener solo un recipiente para el ensayo dificulta la realización de múltiples pruebas con la misma relación agua-cemento. Contar con más recipientes conectados en paralelo a un equipo de medición de corriente agilizaría los tiempos al ensayar las probetas con la misma relación a/c.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- A. Bautista, S. A. (2015). Corrugated stainless steels embedded in carbonated mortars with and without chlorides: 9-year corrosion results. *Construction and Building Materials*, 95, 186–196. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.099>.
- Abanto Castillo, F. (2009). *Tecnología del concreto*. Lima: San Marcos.
- Aguilar Mundaca, R. (2007). *Determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un factor que afecta su durabilidad*. [Tesis de título profesional]. Universidad Austral de Chile.
- Altaf, A., & Anil, K. (2013). Chloride ion migration/diffusion through concrete and test methods. *International Journal of advanced Scientific and technical research*, 6, 2249-9954. Obtenido de <http://www.rpublication.com/ijst/index.html>
- Ananthkumar, M., & Thiruvoth, D. (2022). Evaluation of cerium oxide nanoparticle coating as corrosion inhibitor for mild steel. *Materials Today: Proceedings*, 49, 2007-2012. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.157>
- Caballero, P. (2019). *Optimización del concreto mediante la adición de nanosílice, empleando agregados de la cantera de Añashuayco de Arequipa*. [tesis de título profesional]. Universidad Nacional de San Agustín.
- Cabrera, J., Claisse, P., & D.N. Hunt. (1995). A Statistical Analysis of the Factors which Contribute to the Corrosion of Steel in Portland Cement and Silica Fume Concrete. *Construction and Building Materials*, 9, 105-113. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00003-X](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00003-X).
- Camargo, V. (2022). *Efecto de la adición del nanosílice en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido empleando agregados de la ciudad de Abancay- Apurímac- 2019*. [Tesis de título profesional]. Universidad Tecnológica de los Andes.
- Castañeda Cisneros, L. A., & Salguero Sandoval, C. X. (2020). *Diseño y evaluación de concreto resistente a sulfatos mediante la adición de nanosílice para la construcción de canales en la costa norte: Caso Chavimochic Etapa I*. [tesis de título profesional]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Castorena González, J., Almeraya Calderón, F., Almaral Sánchez, J., Calderón Guillén, J., Gaona Tiburcio, C., & Martínez Villafañe, A. (2011). Análisis con elemento finito de los esfuerzos expansivos por corrosión en las estructuras de concreto reforzado. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(1), 1-7. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000100001&lng=es&tlng=es.
- Ccopa Mamani, H. (2017). *Efecto del grafeno como aditivo nanotecnológico en la resistencia del concreto*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4534>
- Chousidis, N., Ioannou, I., & G. Batis. (2018). Utilization of Electrolytic Manganese Dioxide (E.M.D.) waste in concrete exposed to salt crystallization. *Construction and Building Materials*, 158, 708-718. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.036>.
- Cruz Moreno, D. M. (2014). *Mejoramiento del efecto barrera en materiales endurecidos de cemento portland mediante una aplicación innovadora de nano-partículas de silicio*. [tesis de maestría, Universidad Autónoma de

- Nuevo León]. Repositorio Institucional UANL. Obtenido de <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080253811.PDF>
- Elsener, B. (2002). Macrocell corrosion of steel in concrete-implications for corrosion monitoring. *Cement and Concrete Composites*, 24(1), 65-72. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00027-0).
- Elsevier. (12 de abril de 2020). *Handbook of nanomaterials for manufacturing applications*. Obtenido de [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=r4rcDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Chaudhery+Mustansar,+H.+\(2020\).+Handbook+of+nanomaterials+for+manufacturing+applications.+Amsterdam.&ots=NK-fmBlwhB&sig=RnU5v1qabIXJ8pz7K_ubjEiFNng#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=r4rcDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Chaudhery+Mustansar,+H.+(2020).+Handbook+of+nanomaterials+for+manufacturing+applications.+Amsterdam.&ots=NK-fmBlwhB&sig=RnU5v1qabIXJ8pz7K_ubjEiFNng#v=onepage&q&f=false)
- Feng, L., Zhao, P., Wang, Z., Gao, J., Su, X., & Hui Li. (2018). Improvement of mechanical properties and chloride ion penetration resistance of cement pastes with the addition of pre-dispersed silica fume. *Construction and Building Materials*, 182, 483-492. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.053>.
- Galán Fiestas, M. I., & Nieto Jaimes, M. A. (2021). *Propuesta de mejora de la permeabilidad del concreto expuesto a sulfatos mediante el uso de los nanotubos de carbono para obras portuarias, en la provincia constitucional del Callao, Perú*. [Tesis de título profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio institucional UPC. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/654812>
- Gengying Li. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 34, 1043-1049. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.013>.
- Gómez Zamorano, L. Y., & Castillo Linton, C. E. (2016). Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de sílice. *ALCONPAT*, 6(2), 101-115. Obtenido de <https://doi.org/10.21041/ra.v6i2.132>
- González, J. A., Benito, M., Feliu, S., Rodríguez, P., & Andrade, C. (1995). Suitability of Assessment Methods for Identifying Active and Passive Zones in Reinforced Concrete. *Association for Materials Protection and Performance*, 51(2), 145-152. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10261/225547>
- Guzmán Gutiérrez, S. (2010). *Modelización Del Deterioro de Tableros de Puentes de Hormigón Por Difusión de Cloruros Y Corrosión de La Armadura Pasiva*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio institucional UPM. Obtenido de <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.3705>
- Heras Murcia, D. (2015). *Mortero de cemento con nano-adiciones de hierro y sílice*. [Tesis para maestría]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ho, D., & R.K. Lewis. (1987). Carbonation of Concrete and its Prediction. *Cement and Concrete Research*, 17, 489-504. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3).
- Jakobsen, U. H., Weerdt, K. D., & Mette R. Geiker. (2016). Elemental zonation in marine concrete. *Cement and Concrete Research*, 85, 12-27. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.006>.
- Jarrah, N. R., Al-Amoudi, O. S., Maslehuddin, M., Ashiru, O. A., & Abdulaziz Ibrahim Al-Mana. (1995). Electrochemical Behaviour of Steel in Plain and Blended Cement Concretes in Sulphate and/or Chloride Environments. *Construction and Building Materials*, 9, 97-103. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00002-W](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00002-W).
- Juárez Valencia, L. (2015). *Modelos y Problemas de Difusión*. Universidad

- Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 908-931. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Jussara Tanesi. (2004). *Diseño y control de mezclas*. Portland Cement Association.
- Li, G., Hu, W., Cui, H., & Jiacheng Zhou. (2019). Long-term effectiveness of carbonation resistance of concrete treated with nano-SiO₂ modified polymer coatings. *Construction and Building Materials*, 201, 623-630. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.004>.
- Linares, D., & Sánchez, M. (2003). Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 26(1), 34-44. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702003000100006&lng=es&tlng=es.
- López A., E., & Mamani C., J. (2017). *Influencia del nanosílice y superplastificante en la durabilidad del concreto sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo de la ciudad de Puno*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Del Altiplano]. Repositorio institucional UNAP. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4955>
- Marín, J. A. (2015). *Microestructura del hormigón con adición de nano sílice*. [Tesis de título profesional] Universidad Politécnica de Cartagena.
- McPolin, D., Basheer, P., Long, A., Grattan, K., & Sun, T. (2005). Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 19, 666-673. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.015>.
- Millard, S., Gowers, K., & Bungey, J. (1995). Rapid Method of Assessing Corrosion Rates of Steel in Concrete Structures. *Corrosion*, 95, 525.
- Molina V., J. D., & Rangel V., L. S. (2020). *Efecto de la adición de dióxido de titanio en las propiedades mecánicas y de durabilidad en materiales a base de cemento*. [Tesis de título profesional, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio institucional UCC. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10983/24943>
- Montaña M., C., & Carmona H., R. (2015). *Impacto de las adiciones para concreto en la reducción de la permeabilidad al ión cloruro vs la relación agua cemento*. [Tesis de título profesional, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio institucional UCC. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10983/2503>
- Moreno, E. I. (1999). *Carbonation of Blended Cement Concretes*. [Tesis de PhD]. University of South Florida.
- Pantazopoulou, S., & Papoulia, K. (2001). Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 127, 733-9399. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:4\(342\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:4(342))
- Papadakis, V., Vayenas, C., & Fardis, M. (1989). A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation. *Aiche Journal*, 35, 1639-1650. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/aic.690351008>
- Papadakis, V., Vayenas, C., & Fardis, M. (1991). Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Materials Journal*, 88, 363-373. Obtenido de <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=1863>

- Pérez, N. (2004). *Electrochemistry and corrosion science*. Boston Kluwer Academic.
- Qu, H., Feng, M., Li, M., Tian, D., Zhang, Y., Chen, X., & Guo Li. (2023). Enhancing the carbonation and chloride resistance of concrete by nano-modified eco-friendly water-based organic coatings. *Materials Today Communications*, 37, 2352-4928. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107284>.
- Raupach, M. (1996). Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences. *Construction and Building Materials*, 10, 329-338. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00018-6).
- Raupach, M., & Schiel, P. (2001). Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures. *NDT & E International*, 34, 435-442. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00011-1).
- Rivva, L. (2000). *Naturaleza y Materiales del concreto (Primera ed.)*. Capítulo Peruano ACI.
- Sathe, S., Kangda, M. Z., & GA. Amaranatha. (2022). Resistance against sulphate attack in concrete by addition of nano alumina. *Materials Today: Proceedings*, 60, 294-298. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.124>.
- Tang, L. T. (2018). A cleaner process for valuable metals recovery from hydrometallurgical zinc residue. *Journal of Cleaner Production*, 201, 764-773. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.096>.
- Teizer, J., Venugopal, M., Winfried, T., & Felkl, J. (2012). Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap Between Researchers and Industry Professionals DigiRAB-Digitalization of construction safety View project Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap between Researchers a. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138, 594-604. Obtenido de [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000467](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000467)
- V. Shah, J. R. (2022). Determination of carbonation resistance of concrete through a combination of cement content and tortuosity. *Journal of Building Engineering*, 60, 105176. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105176>.
- Zuluaga, G., & Felipe, A. (2020). *Elaboración de un montaje experimental de migración iones cloruro de sodio para evaluar la permeabilidad del concreto según la norma NT BUILD 492*. [Tesis de título profesional, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio institucional UCC. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10983/25815>

ANEXOS

Anexo 1: Fichas técnicas aditivos super plastificando.....	126
Anexo 2: Ficha técnica del cemento sol Tipo I.....	127
Anexo 3: Análisis de muestra NDMA	128
Anexo 4: Reporte del difractograma.....	129
Anexo 5: Requisitos granulométricos del agregado grueso, ASTM C33	130
Anexo 6: Panel Fotográfico.....	131

Anexo 1: Fichas técnicas aditivos super plastificando



R-2020

REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO A BASE DE NANOSILICE

Fecha de Emisión: Dic 10, 20
Revisión: 1
Fecha de Revisión: Mar 16, 21
Página: 1 de 1

Industrias Ulmen S.A. Aditivos Nanotecnológicos

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El R-2020 es un nanoaditivo en estado líquido de alta actividad por las nano materias de última generación que lo componen.
Pertenece a la línea **Gala 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 resistencia iniciales y mejora la durabilidad ante agentes químicos nocivos. Por las propiedades reológicas que brinda al concreto se puede aplicar en concretos autonivelantes y rheoplásticos en general. Su desempeño mejora cuando la cantidad de material cementante es mayor.

DOSIFICACIÓN

El R-2020 puede ser utilizado en dosis desde **0.4% a 2%** con respecto al peso del cemento. Se recomienda realizar pruebas previas para validar la dosis 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.cognoscibletechnologies.com www.ulmen.cl atencionalcliente@ulmen.cl

"Evaluación al Concreto con Adición de Nanopartículas de Dióxido de Manganeso Frente Ataques Químicos para Relaciones a/c: 0.40,0.45,0.50"
Bach. Herrera Saenz Yilmar Juan

126

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:

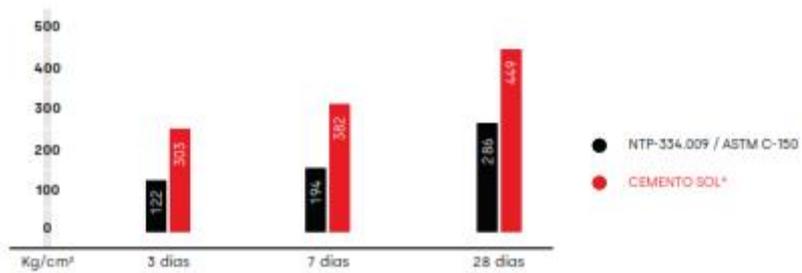
- > Construcciones en general y de gran envergadura cuando no se requieren características especiales o no especifique otro tipo de cemento.
- > Preparación de concretos para cimentas, sobrecimientos, zapatas, vigas, columnas y techado.

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

Anexo 3: Análisis de muestra NDMA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica
Laboratorio de Espectrometría

ANALISIS DE DOS SOLUCIONES

APOYO INVESTIGACIÓN: ORFELINDA AVALO CORTEZ

Recepción de muestras : Lima, 25 de Mayo del 2023

RESULTADO DEL ANALISIS DE SOLUCIONES

Muestras	Pb(mg/L)	Zn(mg/L)	Mn(mg/L)	SO ₄ ⁻² (g/L)
A1	0.11	416	59	25.5
A2	0.34	420	56	24.5

Método utilizado: Espectrometría de absorción atómica y fotometría

Lima, 29 de Mayo del 2023


MSc. Attilio Meridiano Alvarado
Jefe Lab. ESPECTROMETRÍA

Av. Túpac Amaru N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú
Teléfono: (511) 4824437. Central Telefónica (511) 4811070. Anexo 4345

Anexo 4: Reporte del difractograma

26/5/23, 20:23

Profex Refinement Report

Profex



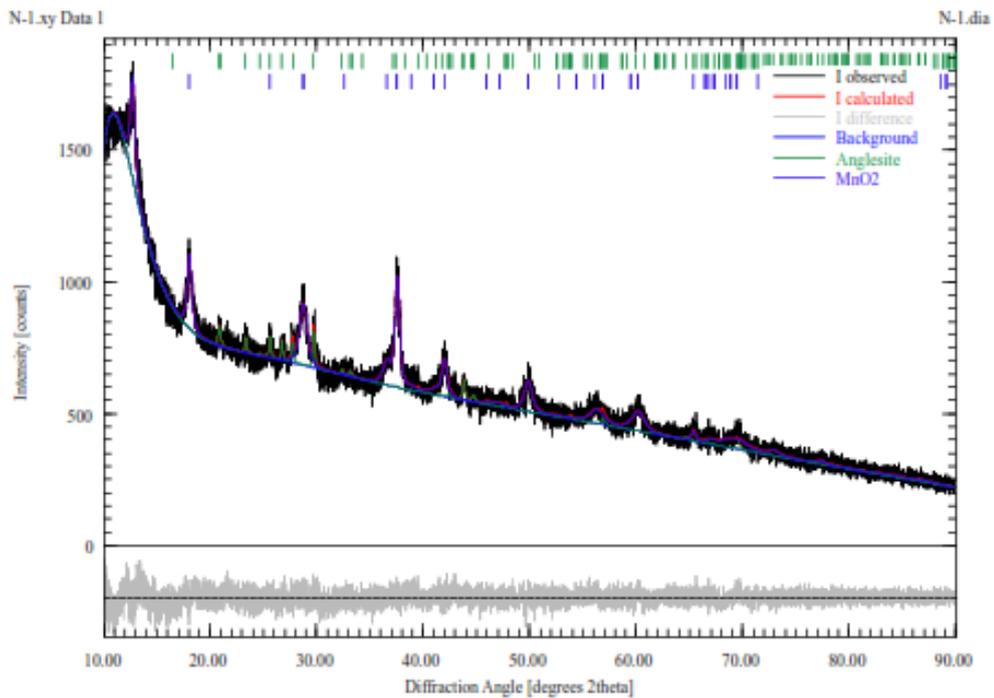
Sample Information

N-1.xy Data 1				
File Name	N-1.dia			
Instrument configuration	RMS-D6-Capillary-500um-LynxEyeXE.geq			
Wavelength	Cu (1.5406 Å)			
Directory	C:/Users/oaval/Downloads			
Date of Refinement	viernes, 26 de mayo de 2023			
Operator	oaval			
Statistics	$R_{wp} = 4.46$	$R_{exp} = 4.09$	$\chi^2 = 1.1966$	GoF = 1.0954

Global GOALS

Parameter	Value	ESD
AngleSite	0.06	0.02
GMnO2	0.94	0.02

Diffraction Pattern



file://C:/Users/oaval/Downloads/N-1.html

1/1

Anexo 5: Requisitos granulométricos del agregado grueso, ASTM C33

Huso	Tamaño máximo nominal	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados												
		100 mm (4 pulg)	90 mm (3 ½ pulg)	75 mm (3 pulg)	63 mm (2 ½ pulg)	50 mm (2 pulg)	37,5 mm (1 ½ pulg)	25,0 mm (1 pulg)	19,0 mm (¾ pulg)	12,5 mm (½ pulg)	9,5 mm (¾ pulg)	4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)	1,18 mm (No. 16)	300 µm (No. 50)
1	90 mm a 37,5 mm (¾ pulg a 1 ½ pulg)	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
2	63 mm a 37,5 mm (2 ½ pulg a 1 ½ pulg)	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
3	50 mm a 25,0 mm (2 pulg a 1 pulg)	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	0 a 5	...	...	...	...	...
357	50 mm a 4,75 mm (2 pulg a No. 4)	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	10 a 30	...	0 a 5	...	...	...
4	37,5 mm a 19,0 mm (1 ½ pulg a ¾ pulg)	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 5	...	0 a 5	...	...	...
467	37,5 mm a 4,75 mm (1 ½ pulg a No. 4)	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...
5	25,0 mm a 12,5 mm (1 pulg a ½ pulg)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...
56	25,0 mm a 9,5 mm (1 pulg a ¾ pulg)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...
57	25,0 mm a 4,75 mm (1 pulg a No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 5	...	...
6	19,0 mm a 9,5 mm (¾ pulg a ¾ pulg)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...
67	19,0 mm a 4 mm (¾ pulg a No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...
7	12,5 mm a 4,75 mm (½ pulg a No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...	...
8	9,5 mm a 2,36 mm (¾ pulg a No. 8)	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 5	0 a 5	...	...
89	12,5 mm a 9,5 mm (½ pulg a ¾ pulg)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...
9 ^A	4,75 mm a 1,18 mm (No. 4 a No. 16)	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 40	0 a 5	0 a 5	...	...

NOTA: Se permitirá el uso de agregados que no cumplan con las gradaciones especificadas, siempre y cuando existan estudios calificados a satisfacción de las partes, que aseguren que el material producirá concreto de la calidad requerida.

Anexo 6: Panel Fotográfico

- Muestras extraída de la solución de sulfato.



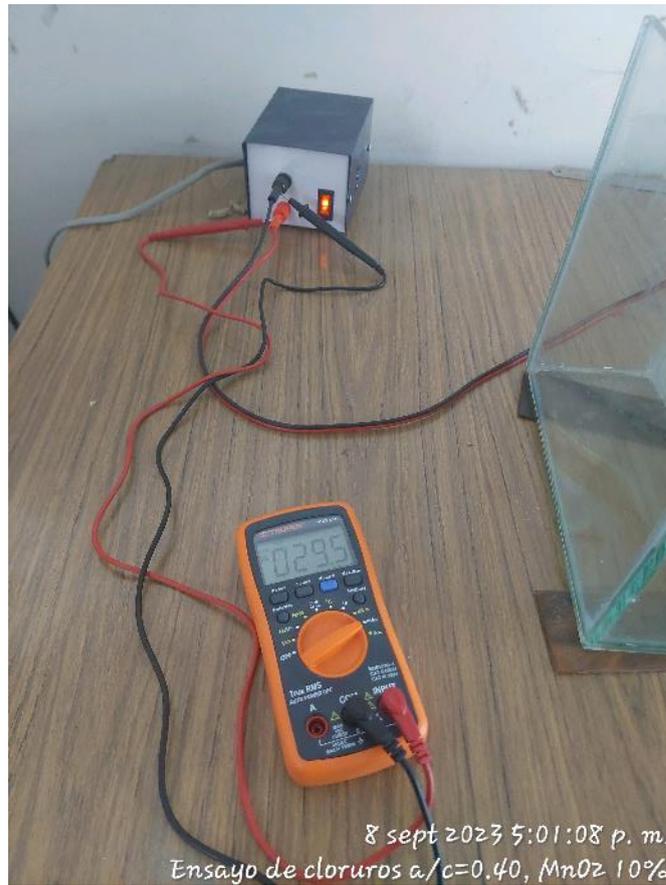
- Medición de cambio de longitud, según lo escrito en la página 90.



- Muestra en ensayo de Cloruros



- Medición de Corriente con multitester.



- Ensayo de corrosión.



- Medición de voltaje por cada muestra



- Camara de carbonatación



- Muestras con fenolftaleína

