

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSTGRADO



PROGRAMA DE MAESTRÍA

MENCIÓN INGENIERÍA Y GERENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN

TESIS

Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiable del concreto $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$

Para optar el Grado Académico de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presentado por:

Maestría: Manuel Alexander André Vásquez Espinoza

Asesor: Mg. Ing. Héctor Albarino Pérez Loayza

CAJAMARCA – PERÚ

2016

COPYRIGHT © 2016 by
MANUEL ALEXANDER ANDRÉ VÁSQUEZ ESPINOZA
Todos los derechos reservados

Dedico este trabajo con mucho agradecimiento y cariño a Dios por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. A mis abuelos Manuel (Q.D.D.G), Austragilda (Q.D.D.G), Zenobio (Q.D.D.G) y Josefina, que son para mí ejemplos de sencillez y perseverancia. A mis padres Elena y Luis por formarme en valores, alentarme siempre a la superación y guiarme por el camino del bien. A mis hermanos Luis, y Xiomara por el apoyo que siempre me han brindado. A mi esposa Carol por su amor y apoyo incondicional; gracias por existir. A mi hijo Luka por convertirse en el motor de mi vida., te adoro

Manuel Vásquez E.

AGRADECIMIENTO

A Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mis padres Luis y Elena que con su ejemplo me han enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada. Los amo infinitamente papitos.

A mi esposa Carol por el apoyo, comprensión y por sacrificar su tiempo para poder cumplir con el mío. Siempre serás el amor de mi vida.

A mi hijo Luka por cambiarme la vida y convertirse en mi razón de ser. Inundaste de luz mi vida con sólo mirarme a los ojos.

A mi hermana Xiomara por demostrarme día a día su inmenso amor y por ser como una madre para mí; bendito el día en que Dios decidió que tú fuera mi hermanita. A mi hermano Luis por demostrarme la gran fe que tiene en mí y por ser siempre tan firme en tus convicciones, eres un gran ejemplo.

A mis cuñados César y Juliana por estimular la unión familiar y por su apoyo constante. A mis sobrinas Stephany, Mishelle, Elena y Heidy por ser parte fundamental de mi vida. A mis primos por demostrarme todo su cariño en estos años de vida.

A la Universidad Nacional de Cajamarca y a sus docentes que formaron mi carrera profesional. De manera especial al M. en Ing. Héctor Pérez Loayza, asesor de esta tesis, quien con su experiencia profesional guió la elaboración de este trabajo.

Al Comité del Jurado del presente trabajo por las sugerencias y revisiones realizadas.

A mis amigos de toda la vida con quienes compartí muchos inolvidables momentos, nunca cambien Matías, Emilio, Houston, Jonathan, Juan de Dios, Wilson y Guillermo; gracias por su amistad. A todas las personas quienes colaboraron de diferentes maneras para la elaboración de este trabajo.

Manuel Vásquez E.

Tu tiempo es limitado, de modo que no lo malgastes viviendo la vida de alguien distinto. No quedes atrapado en el dogma que es vivir como otros piensan que deberías vivir. No dejes que los ruidos de las opiniones de los demás acallen tu propia voz interior. Y lo que es más importante, ten el coraje para hacer lo que te dicen tu corazón y tu intuición. Ellos ya saben de algún modo en que quieres convertirte realmente. Todo lo demás es secundario.

Steve Jobs

ÍNDICE

Título:

“Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiable del concreto $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$ ”

	Página
ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	iv
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	v
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	vi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	vi
SUMMARY.....	vii
RESUMEN.....	viii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problema de investigación.....	1
1.1.1. Contextualización.....	1
1.1.2. Descripción del problema.....	1
1.1.3. Formulación del problema.....	3
1.2. Justificación e Importancia.....	3
1.2.1. Justificación Científica.....	3
1.2.2. Justificación Técnica - Práctica.....	3
1.2.3. Justificación Institucional y Personal.....	4
1.3. Delimitación de la investigación.....	4
1.4. Limitaciones de la investigación.....	4
1.5. Objetivos de la investigación.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Marco Referencial.....	6
2.2. Marco Doctrinal.....	7
2.2.1. Fotocatálisis.....	7
2.2.2. Fotocatálisis Heterogénea.....	8
2.2.3. Fotocatálisis y su Aplicación en el Concreto.....	9
2.2.4. Dióxido de Titanio TiO_2	10
2.2.5. El sistema cemento - TiO_2	11
2.2.6. Efecto Autolimpiable.....	11
2.2.7. Efecto de Descontaminación.....	13
2.2.8. Contaminación del Aire.....	14
2.2.9. Durabilidad de Materiales Fotocatalíticos.....	15
2.2.10. Luz.....	17
2.2.11. Materiales con Capacidad Autolimpiable.....	19
2.2.12. Normas sobre Evaluación de Actividad Fotocatalítico.....	20
2.2.13. Ensayos de Control de Eficiencia Fotocatalítica.....	21
2.2.14. Prueba de Autolimpieza.....	23
2.2.15. Prueba de Contaminación.....	23
2.2.16. Limitaciones del Concreto Fotocatalítico.....	24
2.2.17. Rodamina.....	25

2.2.18. Rodamina B.....	25
2.2.19. Concreto.....	26
2.2.20. Cemento Portland.....	27
2.2.21. Agua de mezcla y agua de curado.....	28
2.2.22. Agregados para el concreto.....	29
2.2.23. Clasificación de los agregados.....	29
2.2.24. Funciones del agregado.....	30
2.2.25. Diseño de mezclas de concreto.....	30
2.2.26. Resistencia a la compresión.....	31
2.2.27. Módulo de Elasticidad.....	32
2.3. Marco Conceptual.....	32
2.3.1. Estudio de las Características Físicas de los agregados para el Concreto.....	32
2.3.2. Reducción de Muestras de agregados a tamaños de ensayo.....	33
2.3.3. Granulometría.....	33
2.3.4. Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso.....	35
2.3.5. Módulo de Fineza.....	35
2.3.6. Peso Específico y Absorción.....	35
2.3.7. Contenido de Humedad.....	37
2.3.8. Peso Unitario Volumétrico.....	38
2.3.9. Ensayo para determinar la cantidad de material que pasa la malla N° 200.....	40
2.3.10. Desgaste o Abrasión.....	40
2.3.11. Cemento Utilizado.....	41
2.3.12. Agua Utilizada.....	41
2.3.13. Procedimiento de Diseño de Mezclas.....	41
2.3.14. Elaboración de los Especímenes Cilíndricos de Concreto para Pruebas de Compresión	42
2.3.15. Curado de los Especímenes de Concreto.....	43
2.3.16. Resistencia a la Compresión en Especímenes Cilíndricos de Concreto.....	43
2.3.17. UNI 11259.....	43
2.3.18. Colorímetro.....	45
2.4. Definición de Términos Básicos.....	46
CAPITULO III: PLANTEAMIENTO DE LA (S) HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	47
3.1. Hipótesis.....	47
3.2. Variables/Categorías.....	47
3.2.1. Operacionalización/Categorización de los componentes de las hipótesis.....	48
CAPITULO IV: MARCO METODOLÓGICO.....	49
4.1. Ubicación de la cantera.....	49
4.2. Diseño de la Investigación.....	51
4.3. Método y tipo de Investigación.....	51
4.4. Diseño del Experimento.....	52
4.5. Población, Muestra y Unidad de Análisis.....	53
4.6. Técnicas e Instrumentos de Recopilación de Información.....	53
4.7. Técnicas para el Procesamiento y Análisis de Información.....	53
4.8. Equipos, materiales e insumos.....	54
CAPITULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
5.1. Análisis de los resultados de pruebas de resistencia a compresión.....	55
5.1.1. Ensayo de resistencia a compresión a la edad de 7 días.....	55
5.1.2. Ensayo de resistencia a compresión a la edad de 14 días.....	57
5.1.3. Ensayo de resistencia a compresión a la edad de 28 días.....	59

5.1.4. Análisis de la Resistencia Promedio y Edad para los distintos tratamientos.....	61
5.1.5. Análisis Estadístico de resistencia a la Compresión.....	63
5.1.5.1. Análisis Estadístico de resistencia a la Compresión a la edad de 7 días.....	63
5.1.5.2. Análisis Estadístico de resistencia a la Compresión a la edad de 14 días.....	66
5.1.5.3. Análisis Estadístico de resistencia a la Compresión a la edad de 28 días.....	69
5.2. Análisis de los resultados de la prueba de Rodamina (UNI 11259).....	73
5.2.1. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 0 horas.....	74
5.2.2. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a la 1 hora.....	75
5.2.3. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 2 horas.....	76
5.2.4. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 4 horas.....	78
5.2.5. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 5 horas.....	79
5.2.6. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 10 horas.....	81
5.2.7. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 20 horas.....	82
5.2.8. Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 26 horas.....	84
5.2.9. Análisis Estadístico de la Prueba de Rodamina.....	85
5.2.9.1. Análisis Estadístico de Decoloración al tiempo de 4 horas.....	85
5.2.9.2. Análisis Estadístico de Decoloración al tiempo de 26 horas.....	88
5.2.10. Análisis de la Coloración Promedio y Tiempo en horas para los distintos tratamientos..	91
5.2.11. Análisis de Concreto Fotocatalítico con la Prueba de Rodamina.....	94
5.2.11.1. Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento sin TiO ₂	94
5.2.11.2. Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 3% TiO ₂	95
5.2.11.3. Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 6% TiO ₂	97
5.2.11.4. Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 9% TiO ₂	98
5.2.11.5. Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 12% TiO ₂	99
5.2.11.6. Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 15% TiO ₂	100
5.2.11.7. Resumen - Análisis Concreto Fotocatalítico.....	101

CAPITULO VI: LECCIONES Y RECOMENDACIONES	103
5.1. Lecciones	103
5.2. Recomendaciones	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÉNDICES	109
ANEXOS	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01: Límites Granulométricos para el Agregado Fino.....	33
Tabla 02: Límites Granulométricos para el Agregado Grueso.....	34
Tabla 03: Pesos de muestras según gradaciones.....	40
Tabla 03-A: Relación entre el planteamiento y la solución del problema de investigación... .	48
Tabla 03-B: Criterio y Tipo de Investigación.....	52
Tabla 04: Ensayo de Resistencia a la compresión a la edad de 7 días.....	55
Tabla 05: Resumen de los promedios de las resistencias a la compresión a los 7 días.....	55
Tabla 06: Ensayo de Resistencia a la compresión a la edad de 14 días.....	57
Tabla 07: Resumen de los promedios de las resistencias a la compresión a los 14 días.....	57
Tabla 08: Ensayo de Resistencia a la compresión a la edad de 28 días.....	59
Tabla 09: Resumen de los promedios de las resistencias a la compresión a los 28 días.....	59
Tabla 10: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 0 horas....	74
Tabla 11: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=0h).....	74
Tabla 12: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a la 1 hora.....	75
Tabla 13: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=1h).....	75
Tabla 14: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 2 horas....	76
Tabla 15: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=2h).....	77
Tabla 16: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 4 horas....	78
Tabla 17: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=4h).....	78

Tabla 18: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 5 horas....	79
Tabla 19: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=5h).....	79
Tabla 20: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 10 horas..	81
Tabla 21: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=10h).....	81
Tabla 22: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 20 horas...	82
Tabla 23: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=20h).....	82
Tabla 24: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 26 horas..	84
Tabla 25: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO ₂ (t=26h).....	84
Tabla 26: Coloración promedio y tiempo en horas para los distintos tratamientos.....	91
Tabla 27: Medidas de decoloración (0 horas – 26 horas) para el tratamiento con 0% TiO ₂	94
Tabla 28: Medidas de decoloración (0 horas – 26 horas) para el tratamiento con 3% TiO ₂	96
Tabla 29: Medidas de decoloración (0 horas – 26 horas) para el tratamiento con 6% TiO ₂	97
Tabla 30: Medidas de decoloración (0 horas – 26 horas) para el tratamiento con 9% TiO ₂	98
Tabla 31: Medidas de decoloración (0 horas – 26 horas) para el tratamiento con 12% TiO ₂	99
Tabla 32: Medidas de decoloración (0 horas – 26 horas) para el tratamiento con 15% TiO ₂	100
Tabla 33: Resumen de Medidas de decoloración para todos los tratamientos.....	101
Tabla 34: Matriz de Consistencia Metodológica.....	110
Tabla 35: Análisis Granulométrico del agregado grueso.....	111
Tabla 36: Análisis Granulométrico del agregado fino.....	112
Tabla 37: Determinación del peso específico y absorción del agregado fino.....	114
Tabla 38: Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso.....	115
Tabla 39: Determinación del contenido de humedad del agregado fino.....	116
Tabla 40: Determinación del contenido de humedad del agregado grueso.....	116
Tabla 41: Determinación del peso unitario seco compactado del agregado fino.....	117
Tabla 42: Determinación del peso unitario seco compactado del agregado grueso.....	118
Tabla 43: Determinación del peso unitario seco suelto del agregado fino.....	118
Tabla 44: Determinación del peso unitario seco suelto del agregado grueso.....	118
Tabla 45: Determinación cantidad de material que pasa la malla N° 200 del agregado fino.....	119
Tabla 46: Determinación cantidad de material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso..	119
Tabla 47: Gradación de la muestra de ensayo.....	121
Tabla 48: Resumen de propiedades del agregado fino.....	122
Tabla 49: Resumen de propiedades del agregado grueso.....	122
Tabla 50: Resumen de propiedades del cemento.....	123
Tabla 51: Resumen de propiedades del dióxido de titanio.....	123
Tabla 52: Volumen Unitario de Agua.....	124
Tabla 53: Contenido de Aire Atrapado.....	124
Tabla 54: Relación agua/cemento por Resistencia.....	125
Tabla 55: Peso del Agregado Grueso por unidad de volumen de concreto.....	126

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 01: Posición relativa de los bordes de las bandas de conducción y de valencia de algunos compuestos que pueden actuar como fotocatalizadores con la radiación UV.....	18
Gráfico 02: Fotografías tomadas durante medida del ángulo de contacto del agua en film de TiO ₂ antes y después de irradiación UV.....	19
Gráfico 03: PICADA – Países Conformantes.....	22
Gráfico 04: Resultados Prueba de Autolimpieza.....	23
Gráfico 05: Resultados Prueba de Contaminación.....	24
Gráfico 06: Aplicación de la solución de rodamina en la superficie de la muestra.....	44
Gráfico 07: Tendencia de una prueba de decoloración.....	45
Gráfico 08: Ubicación de la Cantera Victoria - Huayrapongo.....	49
Gráfico 08-A: Croquis de Distribución de la Extracción de Agregados.....	51
Gráfico 09: Resistencia a la compresión promedio a los 7 días vs % TiO ₂	56
Gráfico 10: Resistencia a la compresión promedio a los 14 días vs % TiO ₂	58
Gráfico 11: Resistencia a la compresión promedio a los 28 días vs % TiO ₂	60

Gráfico 12: Resistencia promedio vs. Edad, por tratamiento de concreto con diferentes % TiO ₂	61
Gráfico 13: Valores individuales de Resistencia vs. Tratamiento de C° - 7 días.....	64
Gráfico 14: Gráfica de Intervalos – 7 días.....	64
Gráfico 15: Gráfica de residuos para los diferentes tratamientos de concreto – 7 días.....	65
Gráfico 16: Gráfica de caja de resistencia a la compresión a los 7 días.....	66
Gráfico 17: Valores individuales de Resistencia vs. Tratamiento de C° - 14 días.....	67
Gráfico 18: Gráfica de Intervalos – 14 días.....	68
Gráfico 19: Gráfica de residuos para los diferentes tratamientos de concreto – 14 días.....	68
Gráfico 20: Gráfica de caja de resistencia a la compresión a los 14 días.....	69
Gráfico 21: Valores individuales de Resistencia vs. Tratamiento de C° - 28 días.....	71
Gráfico 22: Gráfica de Intervalos – 28 días.....	71
Gráfico 23: Gráfica de residuos para los diferentes tratamientos de concreto – 28 días.....	72
Gráfico 24: Gráfica de caja de resistencia a la compresión a los 28 días.....	73
Gráfico 25: Prueba de Rodamina – 0 Horas. Coloración vs % TiO ₂	74
Gráfico 26: Prueba de Rodamina – 1 Hora. Coloración vs % TiO ₂	76
Gráfico 27: Prueba de Rodamina – 2 Horas. Coloración vs % TiO ₂	77
Gráfico 28: Prueba de Rodamina – 4 Horas. Coloración vs % TiO ₂	78
Gráfico 29: Prueba de Rodamina – 5 Horas. Coloración vs % TiO ₂	80
Gráfico 30: Prueba de Rodamina – 10 Horas. Coloración vs % TiO ₂	81
Gráfico 31: Prueba de Rodamina – 20 Horas. Coloración vs % TiO ₂	83
Gráfico 32: Prueba de Rodamina – 26 Horas. Coloración vs % TiO ₂	84
Gráfico 33: Valores individuales de Coloración vs. Tratamiento de C° - t=4h.....	87
Gráfico 34: Gráfica de Intervalos – t=4h.....	87
Gráfico 35: Gráfica de caja de coloración, tiempo = 4 horas.....	88
Gráfico 36: Valores individuales de Coloración vs. Tratamiento de C° - t=26h.....	90
Gráfico 37: Gráfica de Intervalos – t=26h.....	90
Gráfico 38: Gráfica de caja de coloración, tiempo = 26 horas.....	91
Gráfico 39: Coloración promedio vs. Edad, por tratamiento de concreto con diferentes % TiO ₂	92
Gráfico 40: Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento sin TiO ₂	95
Gráfico 41: Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 3% TiO ₂	96
Gráfico 42: Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 6% TiO ₂	97
Gráfico 43: Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 9% TiO ₂	98
Gráfico 44: Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 12% TiO ₂	99
Gráfico 45: Análisis de Concreto Fotocatalítico – Tratamiento con 15% TiO ₂	100
Gráfico 46: Resumen - Análisis de Concreto Fotocatalítico.....	102
Gráfico 47: Granulometría de Agregado Grueso HUSO N° 56 ASTM.....	111
Gráfico 48: Granulometría de Agregado Fino HUSO NTP 400.037.....	112
Gráfico 49: Esfuerzo vs. Deformación Unitaria – 07 días.....	135
Gráfico 50: Esfuerzo vs. Deformación Unitaria – 14 días.....	136
Gráfico 51: Esfuerzo vs. Deformación Unitaria – 28 días.....	137

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Foto 01: Visita a la chancadora Bazán, los cuales obtienen agregados de la cantera La Victoria	138
Foto 02: Lavado de agregados para un mejor trabajo de los mismos.....	138
Foto 03: Tamizado de la arena por el tamiz 5/16 para que cumpla con el huso granulométrico	139
Foto 04: Muestreo de los agregados.....	139
Foto 05: Laboratorio OSMA.....	140
Foto 06: Tamices utilizados en la prueba de granulometría.....	140
Foto 07: Hornos para el secado de material.....	141
Foto 08: Olla de Washington para la prueba de contenido de aire.....	141
Foto 09: Jefe de laboratorio mapeando los testigos de concreto.....	142
Foto 10: Identificación de probetas típicas de los tratamientos en estudio.....	142
Foto 11: Medición de los diámetros de las probetas (3 medidas por cada probeta).....	143

Foto 12: Probeta típica – probeta N° 09 – 3% TiO ₂ antes de ser ensayada.....	143
Foto 13: Jefe de laboratorio ensayando las probetas en estudio.....	144
Foto 14: Probeta típica – probeta N° 09 – 3% TiO ₂ ensayada.....	144
Foto 15: Probeta típica – probeta N° 24 – 12% TiO ₂ antes de ser ensayada.....	145
Foto 16: Probeta típica – probeta N° 24 – 12% TiO ₂ ensayada.....	145
Foto 17: Monitoreo constante de las probetas en estudio.....	146
Foto 18: Molde estándar terminado de madera y superboard para 8 probetas.....	146
Foto 19: Llenado de probetas con el tratamiento base.....	147
Foto 20: Probetas estándar para el tratamiento base.....	147
Foto 21: Probetas estándar para el tratamiento con 3% de TiO ₂	148
Foto 22: Luz Ultravioleta con la potencia requerida para el ensayo de decoloración.....	148
Foto 23: Resultado típico del tratamiento base luego del ensayo de rodamina.....	149
Foto 24: Resultado típico del tratamiento con 3% de TiO ₂ luego del ensayo de rodamina.....	149
Foto 25: Fotocatalizador dióxido de titanio en la izquierda y rodamina en la derecha.....	150
Foto 26: Prueba de decoloración típica.....	150
Foto 27: Ficha Técnica del Cemento Portland Tipo I.....	152
Foto 28: Certificado OSMA Engineering.....	153

INDICE DE APÉNDICES

Apéndice I: Matriz de Consistencia Metodológica.....	110
Apéndice II: Cálculos y Resultados de los Análisis Granulométricos de los Agregados (ASTM C 136 – NTP 400.012).....	111
Apéndice III: Cálculos y Resultados de los Ensayos de Peso Específico y Absorción de los Agregados.....	114
Apéndice IV: Cálculos de los Ensayos de Humedad de los Agregados (ASTM C 566).....	116
Apéndice V: Cálculos de los Ensayos de Peso Unitario Compactado y Suelto de los Agregados (ASTM C 29 – NTP 400.017).....	117
Apéndice VI: Cálculos de los Ensayos de Cantidad de Material que pasa la malla N° 200 de los Agregados (ASTM C 117 – NTP 400.018).....	119
Apéndice VII: Cálculos Superficie Específica de los Agregados.....	120
Apéndice VIII: Cálculos del Ensayo de Abrasión (ASTM C 131 – NTP 400.019).....	121
Apéndice IX: Diseño de Mezclas y Ajuste de Proporciones del Concreto con TiO ₂	122
Apéndice X: Gráficas Típicas Ensayo Resistencia a la Compresión.....	135
Apéndice XI: Panel Fotográfico.....	138

INDICE DE ANEXOS

Anexo I: Ficha Técnica del Cemento Tipo I.....	152
Anexo II: Constancia del Laboratorio de Ensayos de Materiales.....	153

SUMMARY

This study had as objective determine the Influence of Photocatalyst Titanium Dioxide in the Property Self-cleaning Concrete $f'c = 210 \text{ Kg / cm}^2$ and its compressive strength. For this was employed aggregates of the quarry La Victoria of the district Baños Del Inca and the water of the city of Cajamarca, with which were developed six treatments of concrete with the same proportion of materials by weight 1:3.27:3:52/27.08 lts/bag, but with different percentages of photocatalyst titanium dioxide, such treatments were: Concrete without TiO_2 , Concrete with 3%, 6%, 9%, 12% and 15% TiO_2 . Of these six treatments of concrete, the following variables were studied: (a) Compressive strength at the age of 7, 14 and 28 days. (b) Photocatalytic capacity. Thus it was concluded that increased percentages of titanium dioxide on the concrete treatments under study decreased slightly its compressive strength and hence its development. Treatment with 15% TiO_2 had the lowest development of resistance gaining 65.01% at 7 days, increasing to 90.78% at 14 days and ending at 97.53% at 28 days. Treatment without TiO_2 showed the highest development of resistance gaining 67.27% at 7 days, increasing to 92.44% at 14 days and ending at 100.78% at 28 days. Moreover test Rhodamine gave the result that the only treatment that is not photocatalytic and self-cleaning is treatment without TiO_2 because the R4 value of this treatment is less than 20% (6.19% <20%) and the value R26 of this treatment is less than 50% (19.35% <50%); contrasting with the rest of treatment than if are photocatalytic and self-cleaning because if obtained values greater than 20% R4 and R26 values greater than 50% in all cases Finally using studies both compressive strength test, rhodamine - discoloration and economic analysis we conclude that the optimal treatment for the actual execution is treatment that is between the ranges of 3% TiO_2 - 6% TiO_2 as it is a concrete statistically belongs to the same group as the specific requested regarding the compressive strength is photocatalytic and self-cleaning and manufacturing price is not very high.

Keywords: Titanium Dioxide, Self-cleaning, photocatalyst, Compressive Strength.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo determinar la influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiable del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y su resistencia a la compresión. Para esto se empleó los agregados de la cantera La Victoria del distrito Baños del Inca y el agua de la ciudad de Cajamarca, con los cuales se elaboraron seis tratamientos de concreto con una misma proporción de materiales en peso 1:3.27:3:52/27.08 lts/bolsa, pero con diferentes porcentajes del fotocatalizador dióxido de titanio, dichos tratamientos fueron: Concreto sin TiO_2 , Concreto con 3%, 6%, 9%, 12% y 15% de TiO_2 . De estos seis tratamientos de concreto se estudiaron las siguientes variables (a) Resistencia a la compresión a la edad de 7, 14 y 28 días. (b) Capacidad Fotocatalítica. Así se concluyó que el aumento de porcentajes de dióxido de titanio sobre los tratamientos de concreto en estudio disminuyó levemente su resistencia a la compresión y por ende su desarrollo. El tratamiento con 15% de TiO_2 presentó el menor desarrollo de resistencia obteniendo 65.01% a los 7 días, aumentando a 90.78% a los 14 días y finalizando en 97.53% a los 28 días. El tratamiento sin TiO_2 presentó el mayor desarrollo de resistencia obteniendo 67.27% a los 7 días, aumentando a 92.44% a los 14 días y finalizando en 100.78% a los 28 días. Además la prueba de decoloración nos dio como resultado que el único tratamiento que no es fotocatalítico y autolimpiable es el tratamiento sin TiO_2 debido a que el valor R4 de este tratamiento es menor a 20% ($6.19\% < 20\%$) y el valor R26 de este tratamiento es menor a 50% ($19.35\% < 50\%$); contrastando con el resto de tratamiento que si son fotocatalíticos y autolimpiables pues obtuvieron valores en R4 mayores a 20% y valores en R26 mayores a 50% en todos los casos. Finalmente utilizando los estudios realizados tanto a la resistencia a la compresión, prueba de decoloración y análisis económico concluimos que, el tratamiento óptimo para la ejecución real es el tratamiento que está entre los rangos de 3% TiO_2 – 6% TiO_2 pues es un concreto que estadísticamente pertenece al mismo grupo que el concreto solicitado en cuanto a la resistencia a la compresión, es fotocatalítico y autolimpiable y el precio de fabricación no es muy elevado.

Palabras Clave: Dióxido de Titanio, Autolimpiable, Fotocatalizador, Resistencia a la Compresión.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1 Contextualización

En Perú los aditivos fotocatalíticos se introdujeron a fines del año 2014, en un mercado restringido. Los aditivos fotocatalíticos son productos que hoy en día son muy utilizados en todo el mundo y con constante expansión, debido a su capacidad de brindar la capacidad autolimpiable y de ayudar con el medioambiente.

Con el pasar del tiempo, los avances tecnológicos y el incremento demográfico, en nuestro país y en el mundo nos hemos visto en la necesidad de realizar obras civiles que requieran concretos de buena calidad, de alta resistencia usando nueva tecnología y brindando nuevas propiedades, para lo cual se ha hecho muy difundido el uso de aditivos, los cuales modifican y mejoran ciertas propiedades del concreto, como en este caso la propiedades autolimpiable.

Es por esto que desarrollamos el efecto del fotocatalizador dióxido de titanio sobre la resistencia a la compresión del concreto y la adherencia de la propiedad autolimpiable, con el fin de encontrar estructuras que ayuden a conservar el medio ambiente y disminuir los costos de conservación de las mismas.

1.1.2 Descripción del problema

El aire y el agua son vitales para la existencia de vida en la Tierra. Con su alto tráfico debido a los sistemas de transporte, las ciudades producen una alta cantidad de contaminación del aire debido a las emisiones de los vehículos. Estos problemas no son naturales, y mientras más grande sea la expansión de las ciudades, más se va a disminuir la calidad de vida en la Tierra, contribuyendo más a estos problemas. Es importante

mantener el aire limpio y el agua cargada con los niveles naturales aceptables para que la Tierra pueda permanecer sostenida para futuras generaciones sin empobrecerse.

Dentro de los procesos productivos importantes a nivel de país, la construcción es una de las actividades que más se le atribuye al impacto ambiental en su producción, ya sea por la fabricación de los materiales o como la puesta en obra de éstos. (De la Hoz, 2009). Actualmente, la construcción sustentable está tomando una importancia relevante, ya que es atractivo un proyecto en la cual existe un ahorro en consumo de energía, o instalaciones de energías renovables, o un sistema de manejo de residuos, es decir todo como un producto terminado. Pero hasta el momento nadie se preocupa de la etapa de construcción en donde se genera una gran cantidad de desechos, ni tampoco en la fabricación y obtención de los materiales, la que en algunos casos pueden generar una gran cantidad de contaminación y daño ecológico. (Casanovas, 2009).

El Cemento y sus derivados, son materiales importantes en el área de la construcción, en el proceso de fabricación, contamina y consume mucha energía, emitiendo una cantidad significativa de Dióxido de Carbono en la atmósfera (Casanovas, 2009).

Para aminorar el impacto ambiental y que den una cierta garantía de sustentabilidad, se está trabajando en diversas soluciones a nivel de micro partículas (Nanotecnología), las que permiten mejorar sus propiedades y aportar al medio ambiente. Con esto la introducción del Dióxido de Titanio (TiO₂) convierte al mortero u concreto en un material fotocatalítico, con propiedades autolimpiantes, que reducen los contaminantes de aire y bacterias que han penetrado en sus poros. (Morbi et al. 2010).

En las últimas décadas, en la ciudad de Cajamarca se ha producido un incremento poblacional y un crecimiento económico que han llevado a una notable expansión de la zona urbana. En este crecimiento urbano se observa en las construcciones de edificaciones y pavimentos el uso masivo de materiales como el cemento, concreto, ladrillo y acero; reduciendo el uso de materiales tradicionales como el adobe, tapial y madera para la construcción. De tal manera que en la actualidad casi la totalidad de edificaciones de diversas formas estructurales en la ciudad de Cajamarca utilizan para su construcción el concreto.

El concreto es utilizado mayormente como material componente de elementos estructurales, tiene que cumplir con un desempeño óptimo de sus propiedades, como en la resistencia a compresión, así como propiedades adheridas como la innovadora propiedad autolimpiable.

Usualmente, en la elaboración de concreto para la construcción civil no se utiliza aditivos fotocatalizadores como el Dióxido de Titanio debido a tres causas principales: (a) al desconocimiento de su influencia en las propiedades del concreto, entre ellas, su autolimpieza y el retraso del envejecimiento de la superficie del mismo, (b) que se desconoce los porcentajes de este aditivo a utilizar para obtener variaciones en sus propiedades como las vistas anteriormente y (c) no se tiene confianza en la utilización de este aditivo por ser tecnología nueva y no tener la información necesaria sobre sus funciones.

1.1.3 Formulación del problema

¿Cuál es la influencia de la utilización del fotocatalizador Dióxido de Titanio sobre la propiedad autolimpiable del concreto y su resistencia a la compresión?

1.2. Justificación e importancia

1.2.1. Justificación científica

Con el presente trabajo de investigación se obtendrán nuevos conocimientos sobre la influencia del fotocatalizador dióxido de titanio y sus efectos sobre la capacidad autolimpiable del concreto, y si es que existe variación en la resistencia a la compresión, propiedad fundamental y parámetro de calidad para el diseño de concreto.

1.2.2. Justificación técnica-práctica

En Cajamarca, se prepara diariamente una promedio de 231 m³ de concreto para la construcción civil (Fondo Mi Vivienda, 2013: 23), existiendo la necesidad que este concreto preste buen desempeño en obra y con ayuda del fotocatalizador Dióxido de Titanio los costos de mantenimiento serían mucho menores, además el concreto obtendría una función nueva, ser sostenible para el medio ambiente; así utilizamos en forma eficiente los recursos de la construcción, lo cual, no estaría ocurriendo debido al desconocimiento de la influencia del fotocatalizador Dióxido de Titanio.

1.2.3. Justificación institucional y personal

Esta investigación se realizó con el fin de buscar innovaciones en el campo de la construcción. La Universidad Nacional de Cajamarca es la institución llamada a realizar investigaciones que permitan el desarrollo, no solo de nuestra ciudad, sino del Perú y el mundo.

1.3. Delimitación de la Investigación

La investigación se ha realizado usando los agregados provenientes de la cantera “Huayrapongo – La Victoria”, una cantera representativa de las canteras de río existentes en la zona del valle de Cajamarca. Por lo que los resultados son aplicables para dichas canteras. El agua utilizada ha sido el agua potable de la ciudad de Cajamarca y el curado utilizado ha sido el curado bajo agua o curado húmedo formado por una solución de agua de cal de 3 g/litro.

La investigación se ha realizado durante el año 2015-2016, por lo que la información obtenida de las Normas Técnicas Peruanas, ASTM o recomendaciones ACI, pueden variar respecto a los próximos años, ya que están sujetas a actualizaciones constantes. Asimismo las características de los agregados de río pueden cambiar a través del tiempo.

La presente investigación se limitó a determinar la resistencia a la compresión y la propiedad autolimpiable de los concretos con adición del fotocatalizador dióxido de titanio.

1.4. Limitaciones

No existió limitación alguna.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar la influencia del fotocatalizador Dióxido de Titanio en la propiedad autolimpiable del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y su resistencia a la compresión.

1.5.2 Objetivos específicos

Determinar la influencia del fotocatalizador Dióxido de Titanio en porcentajes de 3, 6, 9, 12 y 15% del peso del cemento en la resistencia a la compresión del concreto.

Determinar la influencia del fotocatalizador Dióxido de Titanio en porcentajes de 3, 6, 9, 12 y 15% del peso del cemento en la prueba de Rodamina – coloración del concreto.

Determinar la influencia del fotocatalizador Dióxido de Titanio en porcentajes de 3, 6, 9, 12 y 15% del peso del cemento en la propiedad autolimpiable del concreto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación o marco referencial

La primera adición de dióxido de titanio como aditivo fotocatalizador a los concretos fue registrada en 1997, obteniéndose su patente en el año 2000; al mismo tiempo a principios del siglo se ensayó la incorporación de diversos fotocatalizadores para adherir una nueva propiedad, la autolimpiable. En ese entonces, se comenzaron a añadir pequeñas cantidades de dióxido de titanio para obtener un efecto similar al de las gafas fotocatalíticas que proporcionan efectos autolimpiables y anti nieblas (propiedades humectantes)

En Perú los aditivos fotocatalíticos se introdujeron a fines de la década de 2010, en un mercado restringido. Los aditivos fotocatalíticos, son productos que hoy en día son muy utilizados en todo el mundo y están en constante expansión; esto debido a su capacidad para brindar la capacidad autolimpiable y de ser favorables con el medioambiente, además de obtener concretos resistentes, durables y con sostenibilidad (Jaramillo Porto, 2015; 23).

Andrea Folli, en su tesis doctoral titulada: “Fotocatálisis TIO_2 en sistemas de cemento Portland: Fundamentos de los efectos autolimpiable y mitigación de la polución del aire” concluyó: “El concreto autolimpiable proporciona una estrategia eficiente para obtener de manera simultánea: la auto-limpieza de las fachadas de los edificios, el retraso de la superficie natural de envejecimiento, así como la mitigación de la contaminación del aire. Las mediciones en el laboratorio dieron buenos resultados para la purificación del aire, como la reducción de NO_x ” (Folli, 2010: 169)

María Christina Burton en su tesis magistral titulada: “El concreto permeable con dióxido de titanio como fotocatalizador compuesto en carreteras sostenibles con el medio ambiente” concluyo: “Debido a que el pavimento tiene un área de gran

superficie que está en contacto con el aire contaminado, el tratamiento de pavimentos con TiO_2 redujeron las emisiones nocivas a nivel de calle y beneficiaron a una vida más limpia medio ambiental para el público” (Burton, 2011: 125).

A nivel nacional y local no se conocen investigaciones sobre el uso del fotocatalizador dióxido de titanio o afines.

2.2 Marco doctrinal de las teorías particulares en el campo de la ciencia en la que se ubica el objeto de estudio (Bases teóricas)

2.2.1 Fotocatálisis

La fotocatálisis con semiconductores ha sido ampliamente usada en el tratamiento de contaminación de agua y aire, este concepto data desde la década del noventa con los autores Hoffmann et al. (1995) y Fujishima et al. (1999) (A. Costa, et al. 2011). La fotocatálisis es un proceso catalítico promovido por energía, capaz de excitar a un semiconductor (catalizador) al grado de hacer que se comporte como un material conductor. En la superficie del catalizador, se desarrollan reacciones de óxido-reducción, las cuales generan radicales libres muy reactivos, que reaccionan con las especies a su alrededor, rompiendo algunos enlaces moleculares y reduciendo u oxidando hasta convertirlas en especies menos complejas (De La Hoz, 2009). Otro autor hace una definición más simplificada, el que lo trata como un proceso químico que aprovecha la parte de UV-A de la luz del sol para descomponer los contaminantes orgánicos e inorgánicos del ambiente. (G. Hüsken, et al, 2009)

El investigador Akira Fujishima et al. Publica un libro (denominado “ TiO_2 photocatalysis”) el año 1999, donde realiza un estudio de las propiedades fotocatalíticas del Dióxido de Titanio. Desde ahí en adelante existe una serie de estudios en donde posiciona al Dióxido de Titanio (TiO_2) como material semiconductor que reacciona, para degradar contaminantes que están presentes en el medio ambiente. (A. Costa et. al. 2011)

Cuando el TiO_2 , es expuesto a la luz que contiene rayos UV, las propiedades autolimpiantes se pueden generar espontáneamente en la superficie del material que lo contiene (A. Maury, et. al 2010). Esto se debe a que el TiO_2 , en forma química, está

compuesto por dos bandas, una llena de electrones llamada “banda de Valencia” y la otra sin electrones llamada banda de “Conducción”. La diferencia de ambas bandas crea la banda prohibida, y cuando un fotón con una energía superior a ésta, entra en contacto con un material fotocatalítico (en este caso el TiO_2), el electrón de la banda de valencia se mueve hacia la banda de conducción, dejando un hueco electrónico. Una porción del par “foto excitado” hueco electrón (h^+), se difunde hacia la superficie del material fotocatalítico, lugar donde es retenido para participar en reacciones químicas con moléculas de oxígeno y agua presente en el medio ambiente. (A. Maury, et al 2010)

Con lo anterior, el TiO_2 es usado por su estabilidad como material fotocatalítico. Los agujeros de banda de valencia producidos bajo la irradiación tienen un alto potencial de oxidación (A. Costa et. al 2011).

2.2.2 Fotocatálisis heterogénea

Una variedad de contaminadores de aire ha causado efectos dañinos en la salud humana y en el ambiente. Estos contaminadores son principalmente los productos de la combustión de calefacción del espacio, generación de energía y del tráfico de los automóviles. Los contaminadores de estas fuentes no sólo pueden demostrar un problema en las cercanías inmediatas de estas fuentes, pues pueden viajar distancias largas, que por medios químicos reaccionan en la atmósfera para producir contaminadores secundarios como la lluvia ácida. (Katzman, L. 2006: 36)

Una solución para la contaminación del aire se puede encontrar en el tratamiento de los contaminadores más cercanos de la fuente posible. Por lo tanto, los materiales fotocatalíticos se pueden añadir a la superficie de pavimento y materiales de construcción y en combinación con la luz, los contaminadores se oxidan, debido a la presencia del fotocatalizador precipitándose en la superficie del material. Por consiguiente, son quitados de la superficie por la lluvia. (Chen, J. 2011)

La fotocatalisis heterogénea con TiO_2 como el catalizador es un campo en vías de creciente desarrollo en la ingeniería. Tiene un gran potencial para enfrentarse con la contaminación creciente. El impulso del uso de TiO_2 como fotocatalizador lo dieron Fujishima y Honda en 1972. Ellos descubrieron la hidrólisis del agua en oxígeno e hidrógeno en la presencia de luz, por medios de un TiO_2 - ánodo en una célula fotoquímica. (A. Costa et. al. 2011)

La fotocatalisis heterogénea con el catalizador TiO_2 causa una total mineralización de una amplia gama de compuestos orgánicos (alcanos, alquenos, alcohol, pesticidas). Es decir, es posible reducir NO_x , bacterias, virus y demás. La velocidad con la cual estas reacciones ocurren depende de la intensidad de la luz, las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa), la cantidad presente de TiO_2 en la superficie y la adherencia de los contaminadores a la superficie. (Chen, J. 2011)

2.2.3 Fotocatálisis y su aplicación en el concreto

La aplicación de la fotocatalisis a materiales de construcción comenzó hacia el final de los años 1990. Dos efectos importantes relacionados con la naturaleza de capas TiO_2 fotoactivas se habían descubierto para estas fechas:

- a) El efecto autolimpiable debido a reacciones redox (molécula reducida y la otra oxidada) promovidas por la luz del sol (o en general, luz U.V. débil) en el fotocatalizador.
- b) Hidrofilicidad (afinidad por el agua) de la superficie de catalizador, que realza el efecto autolimpiable (inorgánicos causantes de suciedad y manchas presentes en superficies se puede quitar fácilmente debido al remojo de agua de lluvia entre la sustancia absorbida y la superficie de TiO_2). Las gafas fotocatalíticas proporcionan un ejemplo de capacidad autolimpiable y anti nieblas (propiedades humectantes). (Puzenat, E. 2009: 15,16)

Las causas principales porque el TiO_2 es, hasta ahora, el fotocatalizador más usado son:

- a. Su color blanco brillante, de allí es muy conveniente para concreto de cemento blanco.
- b. TiO_2 es muy barato comparado con otros fotocatalizadores de semiconductor.
- c. TiO_2 es muy estable; no se somete a la corrosión (como otros semiconductores usados en la fotocatalisis) y no reacciona con las fases cementantes.

Aunque el uso de cemento fotocatalítico (designación común para el cemento de mezcla sólido – fotocatalizador) todavía se restringe y se limite comparado con el cemento ordinario, muchos edificios y caminos de las grandes urbes se han diseñado y

se han construido desde 2000 usando el concreto autolimpiable y pavimentando bloques que contienen TiO_2 . La aplicación de la fotocatalisis con TiO_2 busca conseguir dos objetivos principales, el efecto autolimpiable (en particular para la estructura basada en el concreto de cemento blanco) y el efecto descontaminador debido a la oxidación de óxidos de nitrógeno (NO_x) en la atmósfera. (CONAMA, 2012)

2.2.4 Dióxido de Titanio

El dióxido de titanio con predominio de la fase anatasa (forma mineral del TiO_2), es el material más comúnmente usado en fotocatalisis. También es el precursor usual en la preparación de catalizadores soportados (es decir que interactúa con otra superficie o se encuentra disperso en otro material). (Katzman, L. 2006)

2.2.4.1 Método de laboratorio para la obtención de Dióxido de Titanio

Estos métodos se emplean esencialmente para preparar materiales con características definidas a partir de soluciones acuosas o alcohólicas que contienen precursores de TiO_2 . Los precursores usuales son tetracloruro o alcóxidos de titanio. Mediante la hidrólisis controlada del precursor, se obtienen soles de TiO_2 de distintas características. En el primer caso suelen obtenerse soles poliméricos, en los cuales el TiO_2 aparece con estructuras de baja dimensionalidad (por ejemplo fibras). En el segundo caso se obtienen soles particulados que, dependiendo del pH de la solución, resultan cristalinos o amorfos. (Katzman, L. 2006)

2.2.4.2 Aplicación de TiO_2 como fotocatalizador en materiales de construcción

El objetivo es tener tanto TiO_2 como sea posible en la superficie del material, sin el riesgo de que sea eliminado por abrasión o intemperie. Hasta ahora, la manera más eficiente de aplicar el TiO_2 está en una capa delgada en la preparación del cemento, por lo que la aplicación en concretos es muy conveniente. (Hashimoto, K. 2005)

Otras aplicaciones se pueden encontrar en el concreto arquitectónico. El uso de cemento blanco con TiO_2 en la superficie de edificios y construcciones se atribuye a la durabilidad del aspecto visual del edificio. Debido a la acción fotocatalítica, la blancura del edificio permanecerá y la suciedad se quitará lavando más fácilmente debido a las propiedades propias del fotocatalizador o se descompondrá. (Folli, A 2010)

2.2.5 El sistema cemento – TiO_2

El fotocatalizador dióxido de titanio es por lo general mezclado con el polvo de cemento antes de añadir el agua para la hidratación. Cuando el cemento se endurece, TiO_2 está presente en todas partes de la estructura de cemento formada. TiO_2 es un óxido muy estable, muy inerte. No reacciona con ninguna fase del cemento y no se implica en ninguna reacción de la hidratación. (Li, Z. 2011)

Desde un punto de vista estructural, sirve del relleno del poro que reduce el nivel de porosidad con algunas ventajas para la fuerza de la etapa temprana. Aunque ninguna reacción química que implique TiO_2 ocurra, una vez que el agua se añade para hidratar el polvo de cemento, se espera que el ambiente químico recién formado modifique dramáticamente la química superficial y las propiedades de las partículas de titanio. Se espera que la presencia de cationes multivalentes como Ca^{2+} en actividades iónicas altas establezca el ion fuerte – fuerzas de correlación del ion entre Ti y O^- superficies negativas. Como consiguiente, la aglomeración de partículas esperada es de TiO_2 . (Hoerr, R. 2009)

2.2.6 Efecto Autolimpiable

Un fenómeno común en la estética de edificios es perderla gradualmente debido al envejecimiento y la influencia de tiempo. La construcción de superficies se podría manchar por ejemplo por depósitos pegajosos, que causan una adhesión fuerte de polvos ambientales y partículas finas atmosféricas que hacen que la suciedad aumente en la superficie. La restauración de las propiedades estéticas de los edificios por lo tanto se consigue a través del mantenimiento constante y apropiado, que a menudo implica el uso de productos químicos y métodos de consumo de energía. El uso de concreto autolimpiable proporciona una solución excelente para este problema. En un

revestimiento plano, liso y superficies no porosas como el vidrio, el TiO_2 fotoactivado proporciona propiedades de autolimpieza por:

- a) La eliminación de moléculas orgánicas oxidantes que causan la suciedad y las manchas.
- b) La eliminación de residuos de manera eficiente a base de carbono e inorgánicos debido a la hidrofiliidad foto-inducida de la superficie de TiO_2 . (Folli A. 2010)

En el caso de TiO_2 disperso en cemento, las partículas del fotocatalizador no forman una película homogénea sobre la superficie del material sólido. Además el cemento endurecido es un medio poroso y no son suaves; como resultado, en el caso de cemento que contiene TiO_2 , el carácter hidrófilo de foto-inducida de la superficie sólida se puede reducir significativamente. (Chen P., 2009)

Las propiedades de auto-limpieza dependen casi en su totalidad de la eficiencia de la oxidación de moléculas orgánicas. Las manchas visibles en la superficie de la estructura están constituidas por materiales compuestos principalmente de los contaminantes de aerosoles atmosféricos. Las partículas pequeñas y depósitos de grasa se adhieren a la superficie del edificio por aglutinantes orgánicos tales como hidrocarburos y ácidos grasos. Tomando moléculas de ácidos grasos por ejemplo, sus grupos carboxílicos ($-\text{COOH}$) permiten que se peguen en la superficie de la construcción a través de unión química con iones de calcio presentes en el concreto. (Chen K, 2011)

Por otro lado, sus largas cadenas de eslabones con otras moléculas hidrófobas perpendicularmente a la superficie, resultan en manchas de grasa que retienen las muchas partículas atmosféricas y polvos. El gran poder redox de los radicales de oxígeno basados en los rayos UV formados en la superficie del fotocatalizador TiO_2 puede descomponer los aglutinantes orgánicos. El agua y el oxígeno necesario para la formación de radicales OH son proporcionados por la atmósfera, mientras que la luz UV necesaria para la activación de TiO_2 es el pequeño porcentaje de la radiación UV contenida en la luz solar que llega a la superficie de la Tierra (solar medio composición radiación es luz visible $\approx 48\%$, ≈ 44 la luz infrarroja y $\approx 7-8\%$ de luz UV filtrada por más de 90% en la capa de ozono en la parte inferior de la estratosfera). (Chen K, 2011)

Cuando se hace referencia a las propiedades de auto-limpieza, nos estamos refiriendo exclusivamente a la superficie del concreto. Por otra parte, los productos químicos responsables de la suciedad y las manchas son generalmente moléculas

orgánicas muy grandes presentes en la atmósfera que se absorben en la superficie de cemento expuesto. Por estas razones, se necesitan partículas de TiO_2 en el aglutinante cementoso a ser altamente disperso en pequeños aglomerados de partículas y no ocluidos por posibles fases cementantes de cristalización en la superficie del material sólido que forma (reducción de la superficie de TiO_2 disponible). El primer requisito se puede lograr con la selección de una muestra de óxido de titanio apropiada con tamaño de partícula adecuado y con propiedades de la superficie que permita la formación de aglomerados pequeños. El segundo se puede optimizar con la adopción de estrategias específicas de ingeniería como incorporar aditivos que reducen la relación agua cemento (W / C) en la superficie del material sólido que se forman durante la hidratación del cemento. (Dye, 2001)

En condiciones al aire libre la durabilidad estética de los edificios construidos con concreto que contiene TiO_2 se controla midiendo la variación con el tiempo del color de la fachada. Esta es una medida directa de la auto actividad de limpieza proporcionado por TiO_2 en el ligante cementoso. (Tx Active, 2012)

2.2.7 Efecto de Descontaminación

Refiriéndonos al efecto de descontaminación proporcionado por concretos que contienen TiO_2 , principalmente nos referimos a la capacidad de medir la contaminación del aire a través de la oxidación fotocatalítica de NO_x (presente en la atmósfera) en nitratos. Debido al área de superficie expuesta muy grande de edificios, la acera, los caminos, etc., estrategias fotocatalíticas como la introducción de TiO_2 en concretos y varios materiales de construcción pueden ofrecer muy bien una posibilidad de mejorar considerablemente la calidad del aire de ciudades y áreas industrializadas. (Hoer R, 2009)

El ex – óxido de nitrógeno (NO_x) es un término usado en la química atmosférica para indicar la suma de NO y NO_2 . El NO se introduce directamente en la atmósfera de una fuente (p.ej. combustión de alta temperatura en el transporte e industria). NO_2 es formado en la atmósfera por la reacción entre NO y el ozono O_3 u oxígeno molecular (aunque la reacción con éste sea cinéticamente lenta) asistido por la luz del sol. (Wiesner, M. 2009)

Las reacciones adicionales en la atmósfera pueden transformar NO_2 en el ácido nítrico, HNO_3 , HNO_4 , etc. La suma de todas estas especies y NO_x se conoce como NO_y , compuestos del nitrógeno reactivos. NO_x son principalmente responsables de la niebla tóxica fotoquímica (una mezcla de productos químicos arriesgados sacados de la interacción de la luz del sol con contaminadores atmosféricos), y juntos con óxidos de azufre (SO_x) generan las lluvias de ácido. Por la exposición directa, o de vapores ácidos que provienen de su interacción con la humedad atmosférica, se pueden causar enfisemas y bronquitis. (Plassais, A 2007)

El control y la nueva mediación de NO_x atmosférico han sido en gran parte conducidos por la legislación medioambiental. La prevención y tecnologías de nueva mediación para NO_x , incluyen modificaciones de la combustión, procesos secos y mojados. La oxidación fotocatalítica de NO_x utilizando el dióxido de titanio como el fotocatalizador de semiconductor se han realizado en los diez últimos años, convirtiéndose así en una alternativa competitiva. El mecanismo fotocatalítico es dependiente de las propiedades de semiconductor de TiO_2 . Bajo la iluminación con la luz UV y en la presencia de oxígeno y agua, se generan los radicales OH. (Hoer R, 2009)

2.2.8 Contaminación del Aire

Los contaminantes del aire principalmente incluyen óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y partículas. La mejora de la calidad del aire se logra mediante la reducción de los productos químicos orgánicos (en su mayoría altamente volátiles) presente en la atmósfera en espacios cerrados debido a las actividades humanas ordinarias. (Olabarrieta, J 2012)

Estos productos químicos (alcoholes, aldehídos, solventes de hidrocarburos, compuestos aromáticos, etc.) son ingredientes comunes en una amplia serie de productos para el hogar tales como: detergentes, desinfectantes, pinturas, perfumes, desodorantes y cosméticos, y liberados a la atmósfera interior durante uso normal y almacenamiento. Las superficies fotocatalíticas activas pueden ayudar en la reducción de la proliferación de colonias de moho inducido por la humedad, bacterias y hongos debido a la potencia oxidativa del fotocatalizador una vez que se irradia la luz de energía suficiente. (Li, Z 2011)

2.2.9 Durabilidad de materiales fotocatalíticos

2.2.9.1 Formación de Nitratos

La aplicación de concretos o materiales fotocatalíticos con dióxido de titanio en zonas urbanas, es una tecnología que mejora la calidad del aire en áreas muy contaminadas. El uso de esta tecnología permite degradar un amplio rango de contaminantes atmosféricos, como NO y NO₂ emitidos por los automóviles. La formación de nitratos originados en la reducción de la contaminación de óxidos de nitrógeno en aire tanto en materiales con recubrimientos fotocatalíticos como en concretos fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, dan lugar a concentraciones muy poco significativas. Estos valores representan concentraciones de nitratos en aguas prácticamente despreciables o apenas cuantificables a la hora de tratar los residuos acuáticos de zonas urbanas en estaciones depuradoras de aguas residuales. (Conama, 2012)

A modo de ejemplo, si tenemos en cuenta una ciudad con una población de 3.265.038 de personas, con un consumo de agua diario de 979.511,4 m³/día (usando 300 L/ha/día), y considerando una superficie fotocatalítica de 1.000.000 m², donde se aplicaría el proceso fotocatalítico estudiado de la reducción de la concentración de óxidos de nitrógeno en aire, se podrían llegar a formar en torno a 0,06 g de nitrato/m² de superficie (valor que depende obviamente del material fotocatalítico utilizado). Este dato de nitratos superficiales podría dar lugar a una concentración de nitratos en agua de 1,47 mg/l al lavar con agua de la superficie fotocatalítica considerada. La cual es despreciable si tenemos en cuenta que el límite para consumo humano de nitratos es de 50 mg/L (Conama, 2012).

No obstante, los materiales fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, basados en dióxido de titanio como catalizador, pueden llegar a absorber superficialmente nitratos formados en la eliminación de los NO_x, lo cual podría provocar, en el caso de exposiciones muy prolongadas, un cierto grado de nitrificación en su superficie con la consiguiente pérdida parcial o total de su actividad fotocatalítica a lo largo del tiempo. A la pérdida de la actividad de un catalizador heterogéneo se le denomina comúnmente desactivación del catalizador, y su posible regeneración, para recuperar de nuevo sus propiedades catalíticas, depende en gran medida del tipo de mecanismo que originó esta

pérdida de actividad. En primer lugar, si la desactivación del catalizador ha tenido lugar por “fouling” o ensuciamiento de la superficie del fotocatalizador, éste podría ser regenerado “in situ” mediante lavados periódicos con agua, recuperando de nuevo sus propiedades fotocatalíticas. Sin embargo, cuando el material fotocatalítico es sometido a altas concentraciones de óxidos de nitrógeno durante periodos muy prolongados de tiempo en ausencia de lluvias, podría llegar a tener lugar un fenómeno químico que diese lugar a una pérdida permanente de sus propiedades fotocatalíticas (Richardson, 2004).

En estas condiciones, se absorberían concentraciones tan altas de nitratos que podrían provocar una serie de reacciones químicas con la consiguiente formación de nitratos de titanio muy estables, originando un fenómeno de desactivación química permanente del material fotocatalítico que difícilmente podría ser regenerado para recuperar de nuevo sus propiedades fotocatalíticas. Para evitar este fenómeno de desactivación química permanente, muy perjudicial en los materiales fotocatalíticos de infraestructuras urbanas, sería necesario establecer un protocolo de lavados periódicos y controlados, que evitasen la absorción prolongada de elevadas concentraciones de nitratos, eliminando de este modo parte o todos los nitratos absorbidos en su superficie con las aguas de lavado. (Olabarrieta, J. 2012)

No obstante, y de acuerdo con la bibliografía científica y distintos análisis realizados en laboratorios de control de calidad, se obtienen diferencias significativas en el rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO_x según se trate un recubrimiento fotocatalítico o de un concreto fotocatalítico para infraestructuras urbanas. Además con la mezcla de concreto que no presentó finos en su composición se obtuvieron los mejores resultados del rendimiento fotocatalítico de eliminación de óxidos de nitrógeno. También cabe mencionar que al aumentar el porcentaje de humedad relativa se observó una disminución del rendimiento fotocatalítico de la eliminación de NO_x. Este efecto puede tener lugar porque el agua inhibe la absorción de los óxidos de nitrógeno sobre el concreto fotocatalítico, afectando negativamente a la velocidad de reducción de NO_x. (Rejinders, 2009)

Los concretos fotocatalíticos “autolimpiables” son una tecnología emergente que puede llegar a ser fabricada utilizando un fotocatalizador como es el TiO₂. Aunque esta nueva tecnología de concretos fotocatalíticos representa un potencial importante desde el punto de vista medioambiental, para el control de la contaminación atmosférica, una serie de parámetros de operación y de diseño en su preparación pueden llegar a afectar

su fotoeficiencia final. Por lo que se recomienda realizar nuevos estudios para considerar parámetros y factores tales como por ejemplo el estudio de nuevos métodos de preparación de cementos fotocatalíticos, o la influencia de la presencia de distintos contaminantes.

Además, estudios de investigación a escala real son absolutamente necesarios para validar la eficiencia de esta tecnología, incluyendo desde el análisis de su durabilidad como de su estabilidad a tiempos muy largos de exposición donde estén presentes todos los contaminantes atmosféricos. (Snare M. 2010)

2.2.10 Luz

La longitud de onda de la radiación luminosa utilizada para activar el proceso fotocatalítico desempeña un papel imprescindible para que se inicie la reacción de oxidación fotocatalítica. El dióxido de titanio se activa con longitudes de onda correspondiente a radiación UV-A (320-400 nm), pero existen otros compuestos que presentan actividad fotocatalítica a otras longitudes de onda. Aunque se ha estudiado la actividad fotocatalítica de otros óxidos (óxido de zinc, de estaño, de tungsteno, etc.) y sales (seleniuro de cadmio, sulfuro de cadmio, etc.), en general, los mejores resultados se obtienen con óxidos de titanio dopados con algún metal (plata, oro, etc.), no metal (carbón, nitrógeno, etc.) o mezclado con otros óxidos (óxido de zirconio, óxido de zinc, etc.). (Ostiguy, C. 2008)

Cuando estos materiales van a utilizarse en exteriores, lo más interesante es desarrollar fotocatalizadores que se puedan activar con la longitud de onda del espectro solar, de forma que pueda aprovecharse al máximo la radiación del sol. Actualmente no existe un catalizador que presente con la radiación visible una actividad fotocatalítica equivalente al dióxido de titanio en el UV-A. Cuando estos materiales se utilizan en interiores la radiación puede seleccionarse con las limitaciones debidas al uso de radiaciones nocivas para la salud (UV-B (320-280 nm), UV-C (280-200 nm), UV lejano (200-10 nm)). En estos casos se puede controlar tanto la intensidad como la longitud de onda de la radiación seleccionando las fuentes de luz más adecuadas. (Pichat P. 2012)

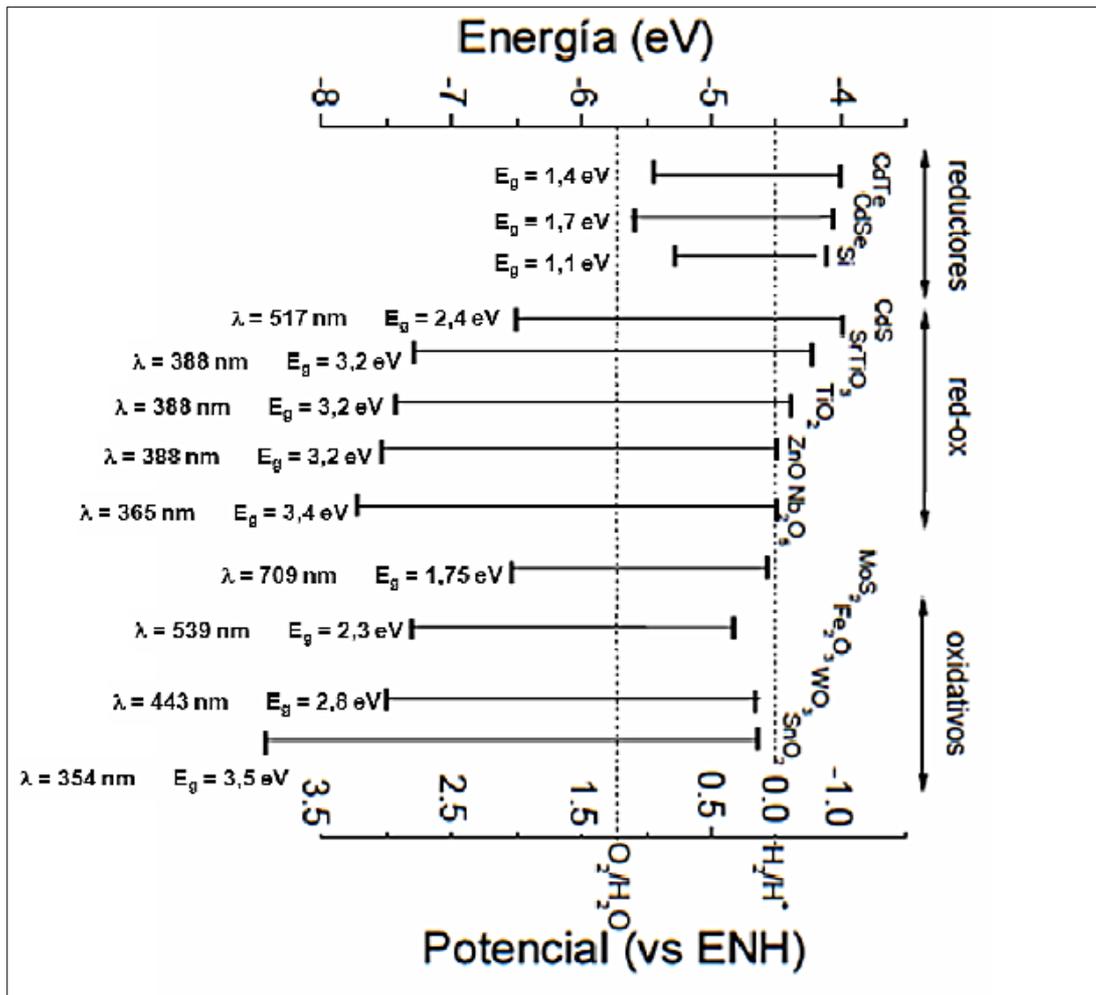


Gráfico 01: Posición relativa de los bordes de las bandas de conducción y de valencia de algunos compuestos semiconductores que pueden actuar como fotocatalizadores con la radiación UV.

Fuente: Conama, 2012.

Por otro lado, se han realizado múltiples estudios intentando aumentar la eficiencia de los catalizadores bajo la radiación visible. En algunos casos se han usado óxidos semiconductores alternativos (óxidos de estaño, de zinc, de tungsteno etc.), dopaje del óxido de titanio con metales (tungsteno, hierro, etc.), dopaje con no metales (carbón, nitrógeno, azufre,...) o mezclas de estas soluciones. A pesar de ello, hasta ahora la mayoría de estos esfuerzos no han dado lugar a materiales que mejoren significativamente los resultados de los catalizadores basados en dióxido de titanio. (Conama, 2012)

2.2.11 Materiales con capacidad “auto-limpiable”

El empleo de TiO_2 en materiales de construcción (“Self-Cleaning materials”) permite mantener limpias las infraestructuras (Othani, 2011). Estas aplicaciones requieren una activación del TiO_2 por efecto de la luz UV del sol que, con ayuda de la lluvia y la humedad del ambiente, permite oxidar los compuestos orgánicos, eliminando en parte depósitos que son visualmente indeseables. Además, la presencia de especies inorgánicas totalmente oxidadas -nitratos, sulfatos, carbonatos- en los materiales puede disminuir gracias a la eliminación de la materia orgánica dado que ésta puede actuar como un “adherente” para estas especies inorgánicas. (Rejinders 2009)

Por otro lado, el TiO_2 permite un aumento del carácter hidrófilo del material (mayor afinidad al agua) (Sakai., 2003: 42), de modo que las gotas de agua se extienden en la superficie del material en forma de película, evitando la deposición de partículas o sustancias en la superficie, y facilitando el lavado. (Pichat, P. 2012)

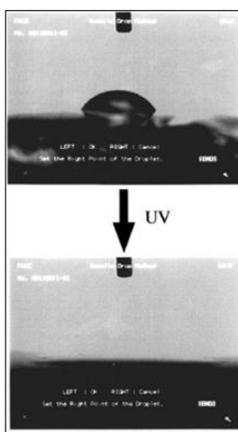


Gráfico 02: Fotografías tomadas durante mediad del ángulo de contacto del agua en film de TiO_2 antes y después de irradiación UV.

Fuente: Conama, 2012.

Una ilustración muy clara del aumento de la hidrofiliidad del material en presencia de TiO_2 se puede ver en la imagen superior, en estas fotografías se presenta un film de TiO_2 sobre vidrio en el que el ángulo de contacto de una gota de agua pasa de 54° a 0° al exponer el material a la luz UV.

En este sentido, durante la irradiación se producen cambios superficiales en el TiO₂, donde las moléculas de agua tienden a formar enlaces de hidrógeno con los grupos OH (Sun, 2001), lo que explica que las gotas de agua aisladas formen una película favoreciendo el lavado del material.

2.2.12 Normas sobre evaluación de actividad fotocatalítica

Se han publicado varias normas ISO (International Organization for Standardization) tratando de unificar y regular los ensayos que determinan la actividad fotocatalítica de los materiales y su cuantificación (Mills, 2012: 54):

- a) ISO 22197-1:2007. “Fine Ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials. Part 1: Removal of nitric oxide”, ISO, Ginebra, 2007.
- b) ISO 22197-2:2011. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials – part 2: Removal of acetaldehyde”, ISO, Ginebra, 2011
- c) ISO 22197-3:2011. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials – part 3: Removal of toluene”, ISO, Ginebra, 2011.
- d) ISO 27447:2009. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for antibacterial activity of semiconducting photocatalytic materials”, ISO, Ginebra, 2009.
- e) ISO 27448:2009. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for self-cleaning performance of semiconducting photocatalytic materials – Measurement of water contact angle”, ISO, Ginebra, 2009.
- f) ISO 10678:2010. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Determination of photocatalytic activity of surfaces in an aqueous medium by degradation of methylene blue”, ISO, Ginebra, 2010.
- g) ISO 10677:2011. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Ultraviolet light source for testing semiconducting photocatalytic materials”, ISO, Ginebra, 2011.
- h) ISO 10676:2010. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for water purification of semiconducting photocatalytic materials by measurement of forming ability of active oxygen”, ISO, Ginebra, 2010.

2.2.13 Ensayos de Control de Eficiencia Fotocatalítica

En la actualidad, en Europa existen tres Normas de ensayos de laboratorio para el análisis de la capacidad fotocatalítica de los materiales, a saber: (Conama 2012)

- a. Norma Francesa: XP B44-011:2009-12-01: Photocatalyse – Méthode d’essai pour l’évaluation des matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des NOx – Méthode à un seul passage en mode tangentiel.
- b. Norma Italiana: UNI 11247/2010: Determinazione dell’indice di abbattimento fotocatalitico degli ossidi di azoto in aria da parte di materiali inorganici: metodo di prova in flusso continuo.
- c. Norma Internacional: ISO 22197-1/2007: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials —Part 1: Removal of nitric oxide.

Se han realizado varios estudios comparativos para ver la sensibilidad de los resultados en función de la normativa utilizada, a través de los cuales, se ha observado que los resultados de eficiencia fotocatalítica, es decir, las capacidades de reducción de concentraciones de NOx, pueden llegar a ser muy distintas, dependiendo de la adaptación de la Norma de ensayo empleada. (Tx Active, 2012)

Por esta razón, en la actualidad, existen varios grupos de trabajo a nivel nacional e internacional (AENOR, CEN, European Federation of Photocatalysis) que están trabajando en este sentido, con objeto de unificar y normalizar este tipo de pruebas. A principios de 2001, se formó PICADA en Europa. Las invocaciones fotocatalíticas para la evaluación de descontaminación (PICADA) a lo largo de 4 años y medio consistió en un consorcio de gobiernos europeos, laboratorios independientes de investigación, universidades, contratistas y fabricantes para evaluar y validar el efecto de la contaminación de concretos o cementos fotocatalíticos. (Tx Active, 2012)



Gráfico 03: PICADA – Países Conformantes.

Fuente: TxActive, 2012.

A través de las pruebas de laboratorio, modelos de reducción de la contaminación, y las evaluaciones de campo in situ, PICADA mostró que el concreto producido con cemento fotocatalítico es eficiente en la destrucción de contaminantes atmosféricos.

Una recopilación de los estudios y proyectos relacionados con el proyecto PICADA puede ser encontrado contactando ESSROC o en línea en www.picada-project.com. Además, PICADA ha desarrollado procedimientos de prueba utilizados para medir el rendimiento de los concretos fotocatalíticos. (Morbi A. 2010)

2.2.14. Prueba de Autolimpieza

Después de que el color de referencia inicial es determinado por apreciación, un colorante de nombre rodamina es pintado sobre la superficie de un panel / pieza de concreto que se produce con cemento fotocatalítico. El panel de concreto es sometido a 24 - 48 horas de luz ultravioleta. Las lecturas de esta prueba se toman periódicamente. A continuación se muestra un gráfico que representa un resultado común. (Tx Active 2012)

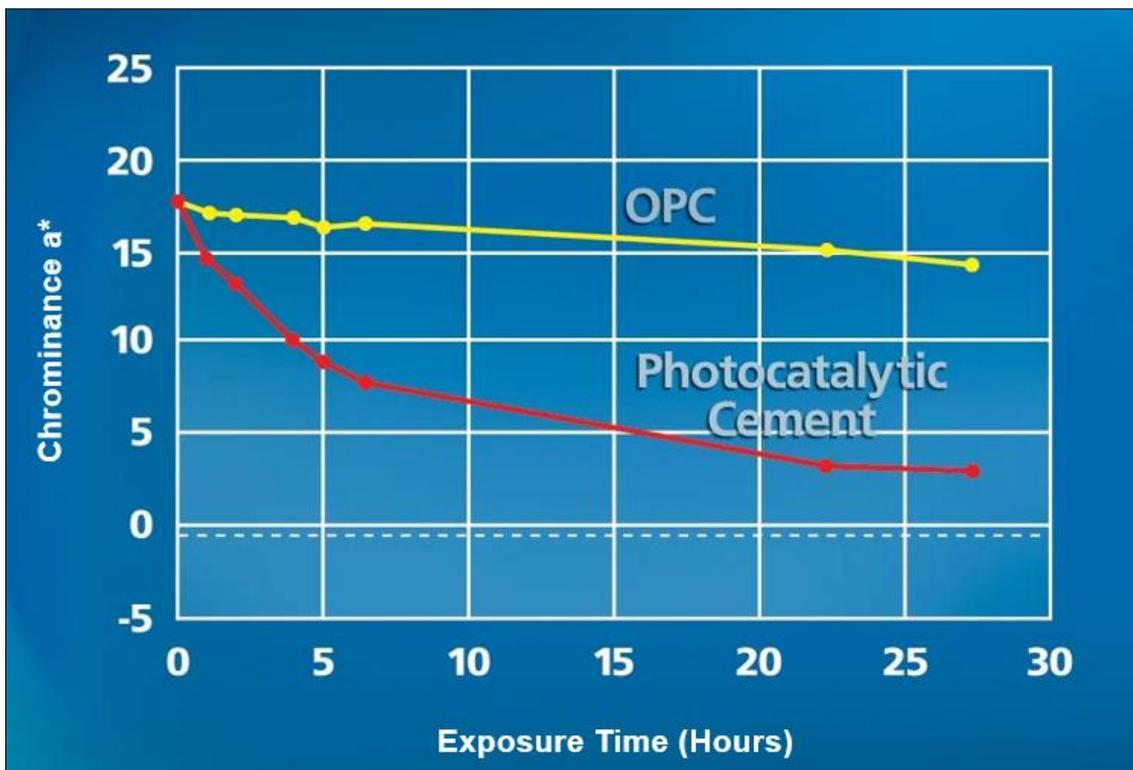


Gráfico 04: Resultados Prueba de Autolimpieza.

Fuente: TxActive, 2012.

2.2.15. Prueba de Contaminación

La eficacia contra los óxidos de nitrógeno (NOx) se evalúa en un cámara de volumen conocida en el que se NOx es primera soplado y luego se diluye con aire para lograr una concentración preestablecida de contaminantes, por lo general 200 partículas por billón. La cámara contiene una lámpara de UV, la fuente de luz, y una muestra de ensayo de superficie conocida producida con dióxido de titanio. En una cantidad de

tiempo se debería eliminar todo del contaminante. A continuación se muestra un gráfico que representa un resultado común. (Wiesner, 2009)

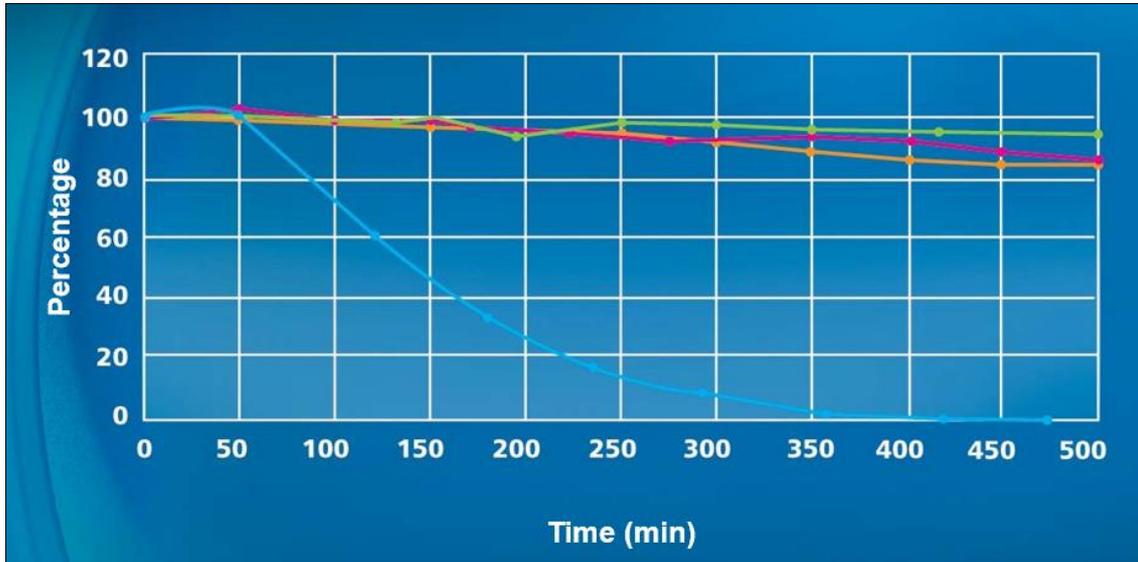


Gráfico 05: Resultados Prueba de Contaminación.

Fuente: TxActive, 2012.

2.2.16. Limitaciones del Concreto Fotocatalítico

No hay barreras regulatorias para la aceptación. Los concretos fotocatalíticos se comportan y cumplen con todas las normas para el cemento Portland. Debido a que todo el proceso fotocatalítico depende de la luz ultravioleta del sol, el concreto fotocatalítico no se recomienda para aplicaciones en interiores a menos que se administre la luz suficiente con la longitud de onda apropiada. El concreto elaborado con dióxido de titanio activo no debe ser pintado. Muchas pinturas están hechas para resistir los rayos UV bloqueando la luz del sol, necesaria para iniciar la reacción fotocatalítica. Por la misma razón, no se deben usar selladores u otros recubrimientos que puedan bloquear la luz ultravioleta del sol. (TX Active 2012)

La observación de las pautas de higiene y seguridad del trabajo normal con que se trata y maneja el Cemento Portland y productos a base de cemento, se cree que son suficientes para proteger a los trabajadores contra la exposición. La mayoría de los componentes químicos formados por el proceso fotocatalítico son benignos. Sin embargo, los subproductos de ciertas reacciones químicas pueden incluir los nitratos de

calcio, carbonatos y sulfatos, que son en su mayoría sales simples lavadas por la lluvia. Estos productos resultantes son una cantidad mucho más pequeña y representan una amenaza menor al ambiente causados por los compuestos originales. (Li, Z. 2011)

2.2.17. Rodamina

Rodamina es el nombre de una familia de compuestos orgánicos heterocíclicos fluorescentes, basados en el xanteno. Algunos componentes de esta familia son la rodamina 6G, la rodamina B y la rodamina 123. Se utilizan como colorantes y como medio amplificador en los láseres de colorante. También se utilizan a menudo como un tinte indicador en el agua para determinar el volumen, la velocidad y las direcciones de flujo y transporte. Su detección es fácil y poco costosa empleando instrumentos llamados fluorómetros. (Snare M. 2012)

Los colorantes de la familia de la rodamina se utilizan en aplicaciones de biotecnología, tales como la microscopia de fluorescencia, citometría de flujo, la espectroscopia de correlación de fluorescencia. Las rodaminas son solubles en agua, metanol y etanol. En general, presentan cierta toxicidad. Existen muchos derivados de la rodamina utilizados con fines múltiples entre los que se incluyen, por ejemplo, la tetrametilrodamina (TAMRA) y su isotiocianato (TRITC), la sulforodamina 101 y su cloruro de sulfonilo (Texas Red), y el rojo de rodamina. (Casey, K. 2008)

2.2.18. Rodamina B

Rodamina B es un compuesto químico empleado como colorante violeta y perteneciente a la familia de las rodaminas. A menudo se utiliza como colorante de seguimiento en un líquido para rastrear la tasa y dirección de su flujo y transporte. La rodamina posee fluorescencia y puede detectarse fácilmente y a un coste bajo mediante instrumentos llamados fluorómetros. La rodamina B se utiliza en biología como un medio de tinción fluorescente, a veces en combinación con la auramina O, pues el colorante auramina-rodamina permite demostrar la presencia de organismos ácido-alcohol resistentes, en particular del género *Mycobacterium*. (Casey, K. 2008)

La rodamina B se puede ajustar a una longitud de onda en torno a 610 nm cuando se utiliza como láser de colorante. Su rendimiento cuántico de luminiscencia es de 0'65 en el etanol básico, 0'49 en etanol, y 0'68 en etanol al 94%. El rendimiento depende de la temperatura de fluorescencia. La solubilidad en agua es aproximadamente de unos 50 g/L. Sin embargo, la solubilidad en solución de ácido acético (con una concentración del 30% en volumen) es de unos 400 g/L. El agua del grifo tratada con cloro descompone la rodamina B. Las disoluciones de rodamina B se adsorben en los plásticos y deben mantenerse en recipientes de vidrio. En California, la rodamina B es sospechosa de poseer propiedades como carcinógeno y por ello, los productos que la contienen deben llevar una etiqueta de advertencia. (Snare M. 2012)

2.2.19. El concreto

El concreto es el material constituido por la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, que inicialmente denota una estructura plástica y moldeable y que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes, lo que hace un material ideal para la construcción. (Rivva, E. 2010)

La pasta es el resultado de la combinación química del cemento y el agua. Se le considera la fase continua del concreto, ya que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto. La pasta es el resultado de la combinación química del material cementante con el agua. Es la fase continua del concreto dado que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto de éste. Es decir, viene a ser el aglomerante, estructura básica o matriz, que aglutina a los agregados, grueso y fino, aire, y vacíos, y es considerado como la fase continua, debido a que se encuentra unida con algo de ella misma. (Rivera, G. 2012)

Aquella parte del concreto endurecido conocida como pasta comprende a cuatro elementos fundamentales: El gel, nombre con el que se le denomina al producto resultante de la reacción química e hidratación del cemento, los poros, incluidos en ella, el cemento hidratado, si lo hay y los cristales de hidróxido de calcio, o cal libre, que puedan haberse formado durante la hidratación del cemento. (Harmsen, T 2002)

El agregado se define como el conjunto de partículas inorgánicas, de origen natural o artificial. Los agregados es la fase discontinua del concreto. Ellos son

materiales que están embebidos en la pasta y ocupa entre el 62% y 78% de la unidad cubil del concreto. Las propiedades del concreto están determinadas fundamentalmente por las características físicas y químicas de sus materiales componentes; que en mayor cantidad son la pasta y el agregado. (Rivera, G. 2012)

2.2.20. El cemento Portland

Producto que se obtiene por la pulverización del clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el Clinker. (Harmsen, T 2002)

El cemento Portland está compuesto principalmente por materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice que se encuentran como arcilla o pizarra; también se utiliza marga, que es un material calcáreo-arcilloso, por yeso y en los últimos años la adición de material puzolánico, que puede ser en estado natural como tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, o material calcinado, o de material artificial (óxido de silicio precipitado y cenizas volantes). (Rivera, G. 2012)

$$\text{Cemento Portland} = \text{Clinker Portland} + \text{Yeso.}$$

La norma ASTM C 150 establece cinco diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción:

1. Tipo I: Normal. Para uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento.
2. Tipo II: Moderado. Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.
3. Tipo III: Altas resistencias. Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.
4. Tipo IV: Bajo calor de hidratación. Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.
5. Tipo V: Resistente a la acción de los sulfatos. Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

De estos cinco tipos en el Perú sólo se fabrican los Tipos I, II, y V. El peso específico del cemento corresponde al material al estado compacto. Su valor suele variar,

para los cementos portland normales, entre 3.0 y 3.2. Las Normas Norteamericanas consideran un valor promedio de 3.15 y las Normas Alemanas e inglesas un valor promedio de 3.12. (Rivva, E. 2010)

2.2.21. Agua de mezcla y agua de curado

El agua empleada en la preparación y curado del concreto deberá cumplir con los requisitos de las normas establecidas y de preferencia ser potable.

El agua de mezcla cumple dos funciones muy importantes, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. De toda el agua que se emplea en la preparación de un mortero o un concreto, parte hidrata el cemento, el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora; como ocupaba un espacio dentro de la mezcla, al evaporarse deja vacíos los cuales disminuyen la resistencia y la durabilidad del mortero o del hormigón. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación se encuentra alrededor del 25% al 30% de la masa del cemento, pero con esta cantidad la mezcla no es manejable, para que la mezcla empiece a dejarse trabajar, se requiere como mínimo una cantidad de agua del orden del 40% de la masa del cemento, por lo tanto, de acuerdo con lo anterior como una regla práctica, se debe colocar la menor cantidad de agua en la mezcla, pero teniendo en cuenta que el mortero o el hormigón queden trabajables. (Rivva, E. 2010)

El agua de curado es la cantidad de agua adicional que requiere el concreto una vez endurecido a fin de que alcance los niveles de resistencia para los cuales fue diseñado. Este proceso adicional es muy importante en vista de que, una vez colocado, el concreto pierde agua por diversas situaciones como: altas temperaturas por estar expuesto al sol o por el calor reinante en los alrededores, alta absorción donde se encuentra colocado el concreto, fuertes vientos que incrementan la velocidad de evaporación. Aunque en la actualidad existen productos que minimizan la pérdida superficial del agua, en el caso de que no sean utilizados se requiere adicionársela periódicamente a los elementos construidos para que alcancen el desempeño deseado. (Harmsen, T 2002)

2.2.22. Los agregados para el concreto

Los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua forman un todo compacto (piedra artificial), conocido como concreto. Como agregados de las mezclas de concreto se pueden considerar, todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia de la partícula), no perturben ni afecten desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas y garanticen una adherencia suficiente con la pasta endurecida del cemento Portland. (Rivera, G. 2012)

En general, la mayoría son materiales inertes, es decir, que no desarrollan ningún tipo de reacciones con los demás componentes de las mezclas, especialmente con el cemento; sin embargo, existen algunos agregados cuya fracción más fina presenta actividad en virtud de sus propiedades hidráulicas colaborando con el desarrollo de la resistencia mecánica, tales como: las escorias de alto horno de las siderúrgicas, los materiales de origen volcánico en donde hay sílice activo, entre otros. (Díaz, C. 2005)

Los agregados son la fase discontinua del concreto. Ellos son materiales que están embebidos en la pasta y ocupan entre el 62% y el 78% de la unidad cúbica del concreto. (Harmsen, T 2002)

2.2.23. Clasificación de los agregados

La forma más generalizada de clasificar los agregados es según su tamaño, el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros de sección; ésta distribución del tamaño de las partículas, es lo que se conoce con el nombre de GRANULOMETRÍA. (Rivera, G. 2012)

De acuerdo con la clasificación unificada, los suelos se dividen en suelos finos (material de tamaño inferior a 0,074 mm o 74 μ m-tamiz No. 200) y suelos gruesos (material de tamaño superior o igual a 0,074 mm o 74 μ m-tamiz No. 200); para la elaboración de mezclas de mortero o de concreto se emplean los suelos gruesos y se limita el contenido de suelo fino. (Harmsen, T 2002)

La fracción fina de los suelos gruesos, cuyas partículas tienen un tamaño inferior a 4,76 mm (tamiz No. 4) y no menor de 0,074 mm o 74 μ m (tamiz No. 200), es lo que comúnmente se denomina AGREGADO FINO; y la fracción gruesa, o sea aquellas

partículas que tienen un tamaño superior a 4,76 mm (tamiz No. 4), es lo que normalmente se llama AGREGADO GRUESO. (Rivera, G. 2012)

2.2.24. Funciones del agregado

Las tres principales funciones del agregado en el concreto son:

- a. Proporcionar un relleno adecuado a la pasta, reduciendo el contenido de ésta por unidad de volumen y, por lo tanto, reduciendo el costo de la unidad cúbica de concreto.
- b. Proporcionar una masa de partículas capaz de resistir las acciones mecánicas, de desgaste, o de intemperismo, que puedan actuar sobre el concreto.
- c. Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento; de humedecimiento y secado; o de calentamiento de la pasta. (Rivera, G. 2012)

2.2.25. Diseño de mezclas de concreto

El agua en el concreto es fundamental porque al relacionarla con la cantidad de cemento contenido en la mezcla (relación agua/cemento), es la que determina la resistencia del mismo y en condiciones normales su durabilidad. Concretos con altos contenidos de agua (relaciones agua/cemento por encima de 0,5) pueden proporcionar resistencias bajas y ser susceptibles de ser atacados fácilmente por los agentes externos. Por el contrario, relaciones agua/cemento bajas (menores de 0,45) contribuyen de forma significativa a la resistencia de los elementos, tanto a la compresión y mejor desempeño de la estructura, como al ataque de agentes que se encuentran en el medio ambiente, y en consecuencia a la durabilidad. (Rivera, G. 2012)

Por ello, es fundamental el control de adición de agua a la mezcla durante su preparación o colocación ya que al alterar la condición inicial de esta (aumentar la relación agua/cemento para conseguir mayor facilidad en la acomodación y el acabado, puede afectar de forma apreciable el desempeño del mismo consiguiéndose menores resistencias a la compresión o desgastes prematuros de los elementos construidos. (Coronel, C. 2005)

Es importante saber que se han realizado una gran cantidad de trabajos relacionados con los aspectos teóricos del diseño de mezclas de concreto, en buena parte se entiende que el diseño de mezcla es un procedimiento empírico, y aunque hay muchas propiedades importantes del concreto, la mayor parte de procedimientos de diseño están basados principalmente en lograr una resistencia a compresión para una edad determinada así como la manejabilidad apropiada para un tiempo determinado, además se debe diseñar para unas propiedades que el concreto debe cumplir cuando una estructura se coloca en servicio. (Harmsen, T 2002)

Una mezcla se debe diseñar tanto para estado fresco como para estado endurecido. Las principales exigencias que se deben cumplir para lograr una dosificación apropiada en estado fresco son las de manejabilidad, resistencia, durabilidad y economía. (Arthur, N. 1999)

La certificación del cumplimiento de los requisitos para la resistencia de diseño especificada se basará en los resultados de ensayo de probetas cilíndricas estándar de 15 x 30 cm; preparadas y ensayadas de acuerdo a las Normas ASTM C 31 y C 39 o NTP 339.033 o 339.034. (Rivva, E. 2010)

2.2.26. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm^2), Megapascuales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg^2 o psi) a una edad de 28 días. Dado que el concreto está destinado principalmente a tomar esfuerzos de compresión, es la medida de su resistencia a dichos esfuerzos la que se utiliza como índice de su calidad. (Rivera, G. 2012)

Notaciones:

f'_c : Resistencia en compresión especificada del concreto, se expresa comúnmente en Kg/cm^2 .

f'_{cr} : Resistencia en compresión promedio requerida, utilizada para la selección de las proporciones de los materiales que intervienen en la unidad cubica de concreto, se expresa comúnmente en Kg/cm^2 .

2.2.27. Módulo de elasticidad del concreto

El módulo de elasticidad es un parámetro muy importante en el análisis de estructuras de concreto ya que se emplea en el cálculo de la rigidez de los elementos estructurales. Para definir el módulo de elasticidad del concreto, el ACI emplea el concepto de módulo secante y propone en el reglamento ACI 318 y en la Norma Técnica E.060 del Reglamento Nacional de Edificaciones la siguiente fórmula: (Rivva, E. 2010)

$$E_c = 0.14 \times w^{1.5} \sqrt{f'c} \dots \dots \dots (3.1)$$

Dónde:

E_c : Módulo de Elasticidad del concreto.

w: Peso Unitario del concreto en kg/m³, sólo para valores dentro de 1440 y 2480 kg/m³ o su equivalente 90 a 155 lb/pie³.

$f'c$: Resistencia a la compresión del concreto en Kg/m³.

2.3 Marco conceptual

2.3.1. Estudio de las características Físicas de los agregados para el concreto

Conocer las propiedades físico mecánicas de los agregados es de vital importancia en el diseño del concreto, ya que estos influyen de manera directa en el comportamiento del mismo, así como de su resistencia, trabajabilidad y durabilidad; llegando a producirse fallas estructurales por el manejo apresurado (sin análisis) de estos o de un mal análisis. (Harmsen, T 2002)

Las características físicas y mecánicas de los agregados es de vital importancia para poder realizar el diseño de mezclas puesto que de estas características obtendremos varios datos; además cabe resaltar que estas características sirven para comprobar que dichos agregados se encuentran dentro de los límites aceptados por las normas ASTM o NTP, referentes a la clasificación de agregados para el concreto. (Arthur, N. 1999)

2.3.2. Reducción de muestras de agregados a tamaño de ensayo

Existen tres métodos para la reducción de muestras de agregado al tamaño apropiado para las pruebas, empleando técnicas que están encaminadas a minimizar las variaciones en características mensurables entre las muestras seleccionadas para ensayo y la muestra total. En nuestro caso utilizaremos el método B – Cuarteo Manual descrito en la norma ASTM C 702, con el que resultó los tamaños de muestra para cada ensayo y se redujeron las variaciones en las características entre muestras. (Rivera, G. 2012)

2.3.3. Granulometría

2.3.3.1. Granulometría del agregado fino

Los requisitos de las normas ASTM C 33 o NTP 400.037 permiten un rango relativamente amplio en la granulometría del agregado fino, pero las especificaciones de otras organizaciones, a veces, son más restrictivas. La granulometría más deseable para el agregado fino depende del tipo de obra, si la mezcla es rica y del tamaño máximo del agregado grueso. (Harmsen, T 2002)

La granulometría de los agregados finos de acuerdo con las normas ASTM C 33 o NTP 400.037, es generalmente satisfactoria para la mayoría de los concretos. La granulometría seleccionada será preferentemente uniforme y continua, con valores retenidos en las mallas N°4 a N°100 de la Serie Tyler, que es la serie de tamices normalizada más usada en la determinación de partículas. Se recomienda para el agregado los siguientes límites. (Gonzales, O. 2005)

Malla	Porcentaje que pasa
3/8" (9.50 mm)	100
N°4 (4.75 mm)	95 a 100
N°8 (2.36 mm)	80 a 100
N°16 (1.18 mm)	50 a 85
N°30 (600 micrones)	25 a 60
N°50 (300 micrones)	10 a 30
N°100 (150 micrones)	2 a 10

Tabla 01: Límites granulométricos para el agregado fino

Fuente: Norma Técnica Peruana.

2.3.3.2. Granulometría del agregado grueso

Los requisitos de granulometría del agregado grueso de las normas ASTM C 33 o NTP 400.037 permiten límites amplios en la granulometría y una gran variedad de tamaños granulométricos. (Gonzales, O. 2005)

La granulometría del agregado grueso con un determinado tamaño máximo puede variar moderadamente dentro de un rango, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla, si las proporciones del agregado fino, con relación a la cantidad total de agregados, producen un concreto con buena trabajabilidad. Las proporciones de la mezcla se deben cambiar para producir un concreto trabajable si ocurrieran grandes variaciones en la granulometría del agregado grueso. (Rivva, E. 2010)

Se optó por tomar el huso N° 56 de la A.S.T.M. como me muestra en la siguiente tabla.

N° A.S.T. M	Tamaño Nominal	% Que pasa por los tamices normalizados												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm
		4"	3.5"	3"	2.5"	2"	1.5"	1"	¾"	½"	3/8"	N°4	N°8	N°16
5	1" a ½"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
56	1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
57	1" a N°4	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-

Tabla 02: Límites granulométricos para el agregado grueso.

Fuente: Norma Técnica Peruana.

2.3.3.3 Análisis Granulométrico de los agregados

El análisis granulométrico de los agregados es un método utilizado para determinar la distribución por tamaño de las partículas de agregado fino y grueso mediante tamizado. Este análisis por tamices para la determinación de la granulometría de los agregados fino y grueso, se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 136 ó NTP 400.012. (Rivva, E. 2010)

2.3.4 Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso

El tamaño máximo del agregado grueso se determina a partir de un análisis por tamices y, generalmente, se acepta que es el que corresponde al tamiz inmediatamente superior a aquel en el cual queda 15% ó más de material acumulado retenido.

De acuerdo a la Norma NTP 400.037 el tamaño máximo nominal es el que corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido. El tamaño máximo nominal del agregado grueso fue de 1". (Coronel, C. 2005)

2.3.5. Módulo de fineza

El módulo de fineza o de finura, también llamado modulo granulométrico, no es un índice de granulometría, ya que un número infinito de tamizados da el mismo valor para el módulo de finura. Sin embargo, da una idea del grosor o finura del agregado, por este motivo se prefiere manejar el termino de Módulo de Fineza. Cambios significativos en la granulometría tienen una repercusión importante en la demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del concreto, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría deben hacerse ajustes en el contenido de cemento y agua para conservar la resistencia del concreto. (Rivera, G. 2012)

El módulo de fineza usualmente se determina para el agregado fino, pero el conocimiento del módulo de fineza del agregado grueso puede ser necesario para la aplicación de algunos métodos de proporcionamiento de mezclas. El módulo de fineza es un índice del mayor o menor grosor del conjunto de partículas de un agregado. Se define como la suma de los porcentajes acumulados retenidos en las mallas de 3"; 1 1/2"; 3/4"; 3/8"; N° 4; N° 8; N° 16; N° 30; N° 50; y N° 100, divididas entre 100. (Arthur, N. 1999)

2.3.6. Peso específico y absorción

El peso específico es la relación entre el peso y el volumen del material sólido. Para determinar el peso específico o densidad se debe tomar el agregado en estado

saturado y superficie seca. El peso específico de los agregados es un indicador de calidad, en cuanto que los valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento, mientras que para bajos valores generalmente corresponde a agregados absorbentes y débiles. (Díaz, C. 2005)

La absorción se define como el incremento de peso de un árido poroso seco, hasta lograr su condición de saturación con la superficie seca, debido a la penetración de agua a sus poros permeables. La absorción es el valor de la humedad del agregado cuando tiene todos sus poros llenos de agua, pero su superficie se encuentra seca. En esta condición se hacen los cálculos de dosificación para elaborar el concreto. (Harmsen, T. 2002)

Si la humedad del agregado es inferior a la absorción, se deberá agregar más agua al concreto para compensar la que absorberán los agregados. Por el contrario, si la humedad supera a la absorción, habrá que disminuir la cantidad de agua que se pondrá a la mezcla ya que los agregados estarán aportando agua. No se suelen fijar límites de aceptación para la absorción debido a que ésta no solo depende de la porosidad de la roca, sino también de otros aspectos tales como la distribución granulométrica, contenido de finos, tamaño máximo de los agregados, forma de las partículas. Sin embargo se puede considerar como rocas de buena calidad aquellas que presentan una absorción menor 3% para agregado grueso, y menores a 5% para el caso de agregado fino. (Arthur, N. 1999)

El método de ensayo para determinar el peso específico (densidad); peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y porcentaje de absorción se encuentra en la norma NTP 400.022. Las fórmulas empleadas para hallar el peso específico de masa, peso específico de masa saturada superficialmente seca, peso específico aparente y porcentaje de absorción del agregado fino se presentan a continuación: (Rivva, E. 2010)

Peso específico de masa:

$$Pe = \frac{W_0}{V - V_a} \dots \dots \dots (1)$$

Peso específico de masa saturada SS:

$$P_{sss} = \frac{500}{(V - V_a)} \dots \dots \dots (2)$$

Peso específico aparente:

$$Pe_a = \frac{W_0}{(V - V_a) - (500 - W_0)} \dots \dots \dots (3)$$

Porcentaje de absorción:

$$Ab = \left(\frac{500 - W_0}{W_0} \right) * 100 \dots \dots \dots (4)$$

Dónde:

W_0 : Peso en el aire de la muestra seca en la mufla (gr).

V_a : Peso en (gr) o volumen en (cm³) del agua añadida al frasco.

V: Volumen del frasco en cm³

Las fórmulas empleadas para hallar el peso específico de masa, peso específico de masa saturada superficialmente seca, peso específico aparente y porcentaje de absorción del agregado grueso se presentan a continuación: (Rivva, E. 2010)

Peso específico de masa:

$$Pe = \frac{A}{B - C} \dots \dots \dots (5)$$

Peso específico de masa saturada superficialmente seca:

$$Pea = \frac{B}{B - C} \dots \dots \dots (6)$$

Peso específico aparente:

$$Pea = \frac{A}{A - C} \dots \dots \dots (7)$$

Porcentaje de absorción:

$$Ab = \left(\frac{B - A}{A} \right) * 100 \dots \dots \dots (8)$$

Dónde:

A: Peso en el aire de la muestra seca en el horno.

B: Peso en el aire de la muestra saturada superficialmente seca.

C: Peso en el agua de la muestra saturada.

2.3.7. Contenido de Humedad

Se puede definir el contenido de humedad, como el exceso de agua en un estado saturado y con una superficie seca, expresado en porcentaje (%). En la norma NTP

400.010 se establece el método de ensayo para determinar el contenido de humedad del agregado fino y grueso. (Harmsen T. 2005)

Si el agregado tiene una humedad inferior a la absorción, se debe agregar más agua al concreto para compensar lo que absorben los agregados. Por el contrario, si la humedad está por encima de la absorción, el agua a agregar al concreto será menor, ya que los agregados aportarán agua. Debemos ajustar la cantidad de agua a agregar al concreto teniendo en cuenta la humedad de los agregados en el momento de elaborar el concreto, ya que, si la humedad es alta, aumentará la relación agua/cemento y disminuirá la resistencia, y si es baja, no se logrará la trabajabilidad deseada. (González C. 2005). La fórmula a utilizar es la siguiente:

$$W\% = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s} \right) * 100 \dots \dots \dots (9)$$

Dónde:

P_h : Peso húmedo de la muestra.

P_s : Peso seco de la muestra

2.3.8. Peso unitario volumétrico

Según la NTP 400.017 es el cociente de dividir, el peso de las partículas secas del agregado entre el volumen de las mismas, considerando los vacíos entre ellas (volumen aparente). Generalmente se expresa en kilos por metro cúbico. El peso unitario varía según las condiciones intrínsecas del agregado como: su forma, su granulometría y tamaño máximo con el volumen del recipiente, la forma de colocación; por lo que su determinación en el laboratorio no siempre corresponde al que se obtiene en condiciones de obra. (Rivera, G. 2012)

2.3.8.1. Ensayo para la determinación del peso unitario volumétrico compactado

Según la NTP 400.017 este ensayo consiste en llenar el cilindro (recipiente) en tres etapas, se apisona cada tercio del volumen 25 veces con una varilla compactadora de punta redondeada de 5/8” de diámetro, y se remueve lo que sobresalga. Se obtiene el peso unitario compactado multiplicando el peso neto por el factor (f) de calibración del

recipiente calculado. El factor (f) se obtiene dividiendo 1000 entre el peso del agua del recipiente (Rivera, G. 2012). Las fórmulas a utilizar son:

Determinación del factor de calibración:

$$f = \frac{1000}{W_a} \dots \dots \dots (10)$$

Determinación del P.U. compactado y suelto:

$$P.U. \text{ compactado} = f \times W_c \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

- f : Factor de Calibración.
- W_a : Peso del agua del recipiente.
- W_c : Peso del material compactado.

2.3.8.2. Ensayo para la determinación del peso unitario volumétrico suelto

Según la NTP 400.017 este ensayo consiste en colocar el agregado seco con cuidado en un recipiente de diámetro y profundidad prescrita, que depende del tamaño máximo del agregado hasta que desborde y después es nivelado haciendo rodar una varilla por encima. Se obtiene el peso unitario suelto multiplicando el peso neto por el factor (f) de calibración del recipiente calculado. (Díaz C. 2005)

Determinación del factor de calibración:

$$f = 1000 / W_a \dots \dots \dots (12)$$

Determinación del P.U. compactado y suelto:

$$P.U. \text{ compactado} = f \times W_s \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

- f : Factor de Calibración.
- W_a : Peso del agua del recipiente.
- W_c : Peso del material suelto.

2.3.9. Ensayo para determinar la cantidad de material que pasa la malla N° 200

Este ensayo, consiste en determinar la cantidad de finos que se presenta en el agregado grueso, material que puede ser perjudicial para el concreto. Se calcula dividiendo el peso del material que pasa la malla No 200 y el peso de la muestra. En la norma NTP 400.018, se establecen los procedimientos para realizar este ensayo. (González C. 2005)

2.3.10 Desgaste o Abrasión

La resistencia al desgaste en los agregados gruesos es importante porque con ella conoceremos la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto para la fabricación de losas, estructuras simples o estructuras que requieran que la resistencia del concreto sea la adecuada para ellas. La norma NTP 400.019 establece un método de ensayo para determinar en agregados gruesos de tamaños menores de 38,1 mm. (1 ½”) su resistencia al desgaste (abrasión) usando la máquina de ensayo de los Ángeles. (Harmsen T. 2002). En el ensayo para determinar la resistencia al desgaste en agregados gruesos de tamaño pequeño, por medio de la Máquina de los Ángeles, la muestra debe cumplir una de las siguientes gradaciones: (Rivera, G. 2012)

Tamices		Peso de los tamaños indicados (gr.)			
Pasa	Retiene en	A	B	C	D
1 ½”	1”	1250 ± 25	-	-	-
1”	¾”	1250 ± 25	-	-	-
¾”	½”	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
½”	3/8”	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
3/8”	¼”	-	-	2500 ± 10	-
¼”	N°4	-	-	2500 ± 10	-
N°4	N°8	-	-	-	5000 ± 10
Total:		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Tabla 03: Pesos de muestra según gradaciones.

Fuente: Normas Técnicas Peruanas 400.019.

La fórmula utilizada para hallar el % de desgaste es la siguiente:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{(Peso_{Original} - Peso_{final}) \times 100}{Peso_{Original}} \dots \dots \dots (14)$$

2.3.11. El cemento utilizado.

El cemento empleado para elaborar los tratamientos de concreto de estudio fue Cemento Portland tipo I destinado para uso general en la construcción, para emplearse en obras que no requieran propiedades especiales y que cumple con los requisitos de las normas técnicas NTP 334.009 y ASTM C 150.

2.3.12. El Agua utilizada.

El agua empleada en la preparación y curado de los especímenes cilíndricos de concreto, fue el agua potable de la ciudad de Cajamarca, por lo cual cumplió con los límites máximos y mínimos permisibles para la elaboración y curado del concreto indicado en la Norma NTP 339.088.

2.3.13 Procedimiento de diseño de mezclas

Requerimientos del concreto considerados para el diseño de mezclas

Para la elaboración del diseño de mezclas para los especímenes cilíndricos de concreto se consideró tener los siguientes requerimientos:

- La trabajabilidad requerida.
- La consistencia requerida.
- La resistencia requerida.

Procedimiento realizado para la selección de las proporciones del concreto por el método ACI del comité 211

El comité 211 del ACI ha desarrollado un procedimiento de diseño de mezclas bastante simple el cual, basándose en tablas que se presentarán en los siguientes pasos de

este método, permiten obtener valores de los diferentes materiales que integran la unidad cúbica de concreto. (Rivva, E. 2010).

El procedimiento para la selección de las proporciones que se presentó es aplicable a concretos de peso normal, aunque los mismos datos básicos y procedimientos pueden ser empleados en el diseño de concretos pesados y ciclópeos, al tratar estos se dé la información complementaria. Independientemente que las características finales del concreto sean indicadas en las especificaciones, las cantidades de materiales por metro cúbico de concreto pueden ser determinadas, cuando se emplea el Método del Comité 211 del ACI siguiendo la secuencia que se indica a continuación: (Harmsen T. 2002)

1. Selección de la resistencia promedio a partir de la resistencia a compresión especificada.
2. Selección del tamaño máximo nominal del agregado.
3. Selección del asentamiento.
4. Selección de volumen unitario del agua de diseño.
5. Selección del contenido de aire.
6. Selección de la relación agua/cemento por resistencia.
7. Determinación del Factor cemento.
8. Determinación del contenido de agregado grueso.
9. Determinación de la suma de los volúmenes absolutos de cemento, agua de diseño, aire y agregado grueso.
10. Determinación del volumen absoluto de agregado fino.
11. Determinación del peso seco del agregado fino.
12. Determinación de los valores de diseño del cemento, agua, aire, agregado fino y agregado grueso.
13. Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.

2.3.14. Elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto para pruebas de compresión (unidades de estudio)

La elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto para pruebas de compresión (12" x 6"), se realizó siguiendo los procedimientos indicados en la Norma ASTM C 31.

2.3.15. Curado de los especímenes de concreto.

El curado es el proceso por el cual se busca mantener saturado el concreto hasta que los espacios de cemento fresco, originalmente llenos de agua sean reemplazados por los productos de la hidratación del cemento. El curado pretende controlar el movimiento de temperatura y humedad hacia dentro y hacia afuera del concreto. Busca también, evitar la contracción de fragua hasta que el concreto alcance una resistencia mínima que le permita soportar los esfuerzos inducidos por ésta. La falta de curado del concreto reduce drásticamente su resistencia. (Harmsen T. 2002)

El curado de los 144 especímenes cilíndricos se realizó siguiendo los procedimientos indicados en la Norma ASTM C 31.

2.3.16. La resistencia a compresión en especímenes cilíndricos de concreto.

La resistencia a compresión del espécimen se calculó dividiendo la máxima carga obtenida durante el ensayo entre el área de la cara axial del espécimen. Los resultados a la compresión obtenidos pueden depender de la forma y tamaño del espécimen, la pasta de cemento, los procedimientos de mezcla, la elaboración, la edad y las condiciones de humedad durante el curado.

La determinación de la resistencia a compresión de los 144 especímenes de concreto elaborados, se obtuvo mediante las consideraciones para este ensayo de resistencia a compresión que se describen en La Norma ASTM C 39.

2.3.17. UNI 11259

La UNI o Ente Nacional de Unificación Italiano es una asociación entre entes privados y la Administración Pública dotado de reconocimiento jurídico. Brinda normas técnicas en todos los sectores (excepto el eléctrico y electrónico). Es el miembro italiano de ISO (Organización Internacional de Estandarización y de CEN (Comité Europeo de

Normalización). La norma UNI 11259-2008 es acerca del empleo del método colorimétrico de la rodamina para determinar la actividad fotocatalítica.

Esta norma es conocida también como la prueba de Rodamina, publicada en febrero de 2008 en Italia, Europa. Este método permite controlar las variaciones colorimétricos en el tiempo (hasta un máximo de 26 horas), la igualdad a la decoloración de las muestras a base de cemento tratada superficialmente previamente con un pigmento orgánico, y bajo una exposición continua a las radiaciones UV-A (por ejemplo, una lámpara UV) a una distancia de la muestra igual a 1 metro.

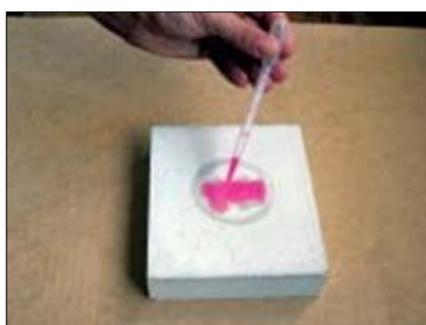


Gráfico 06: Aplicación de la solución de rodamina en la superficie de la muestra.

Fuente: Norma UNI 11259.

La rodamina B se utiliza como pigmento, que es un colorante orgánico rojo aplicado en solución en la superficie de los especímenes. Se observa la actividad fotocatalítica y se mide con referencia a la decoloración de rodamina. Para la medición colorimétrica, se utiliza la experiencia del investigador y un colorímetro, mediante el monitoreo de un "a*" que es un parámetro de referencia para el color rojo.

La muestra es una pasta estándar (que contiene cemento, agregado fino, agregado grueso y agua) y es una probeta prismática.

En primer lugar, justo antes de la exposición a la UV- A de la lámpara, a* se mide en el instante t0, es decir, a* (0h). Luego, una vez que la lámpara se enciende y se inicia la UV -A de irradiación, se realizan dos medidas más, una después de 4 horas, que es un a* (4h), y después de 26 horas, a* (26h). A continuación, R4 y R26 se calculan como sigue:

$$R_4 = \frac{a^*(0h) - a^*(4h)}{a^*(0h)} \times 100 \quad R_{26} = \frac{a^*(0h) - a^*(26h)}{a^*(0h)} \times 100$$

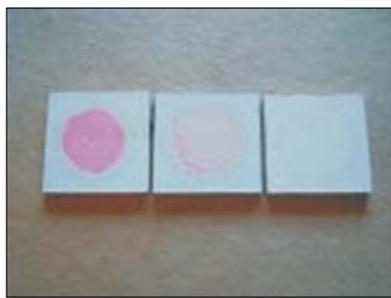


Gráfico 07: Tendencia de una prueba de decoloración.

Fuente: Norma UNI 11259.

El aglutinante hidráulico se considera como fotocatalítico, si se cumplen las siguientes condiciones: $R_4 > 20\%$ y $R_{26} > 50\%$.

2.3.18. Colorímetro

Es un instrumento usado en Química para determinar la concentración de sustancias disueltas en líquidos o sólidos mientras sean transparentes a la luz visible, ultravioleta o infrarroja, midiendo y comparando sus colores. La ciencia o arte de su uso se denomina colorimetría y está regida por leyes físicas muy estudiadas. Para ello se introduce en el aparato un testigo o patrón con una concentración de sustancia conocida y la muestra a determinar. Se mide la cantidad de color de cada uno y según su relación, se determina la concentración de la muestra (concentración es la cantidad de sustancia disuelta en un volumen determinado de disolvente). (Howard, M. 2010)

El aparato consta de un sistema lumínico para iluminar las muestras y se mide con un sistema electrónico la cantidad de luz que pasa. Esa luz debe ser lo más monocromática posible, por lo que se usan diversos medios para hacerlo: filtros ópticos, redes de difracción y últimamente leds específicos. Los líquidos se colocan en cubetas especiales y los sólidos, como el vidrio, deben estar cortados a la medida del receptáculo (que se llama portacubas), que es por donde pasa la luz, teniendo como premisa que el espesor en milímetros de la muestra y el testigo deben ser rigurosamente iguales. Es el equivalente del espectrofotómetro pero este varía las longitudes de onda (los diversos colores) de forma continua y el colorímetro lo hace variando por pasos concretos. (Galem, E. 2011)

2.4 Definición de términos básicos

2.4.1. Resistencia

La resistencia mecánica de un elemento es la capacidad que tiene este de reaccionar frente a diferentes acciones externas como pueden ser la tensión, la compresión y el corte. (Leonards, 1990: 35).

2.4.2. Resistencia a la Compresión

Capacidad máxima de carga que soporta un material antes de llegar a su límite de ruptura, se expresa en kg/cm^2 . (Rivva, 2010: 6).

2.4.3. Fotocatalizador

Catalizador que necesita de energía lumínica para que este trabaje y con ello interfiera en la reacción química en la que está presente. Puede decirse que la energía que le aporta la “luz” es su combustible. (Folli, 2010: 12).

2.4.4. Dióxido de Titanio

Compuesto químico cuya fórmula es TiO_2 . Naturalmente presente en ciertos minerales, se encuentra en forma esférica y es seguro, barato y abundante en la Tierra. Entre otras cosas, es utilizado en procesos de oxidación avanzada fotocatalizada. (Folli, 2010: 17).

2.4.5. Propiedad Autolimpiable

Propiedad que integra una capa fotocatalítica e hidrófila. Gracias a la radiación UV de la luz del día, la capa se activa descomponiendo la suciedad depositada en la cara exterior (Chai, 2003: 11).

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO DE LA (S) HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Al adicionar el fotocatalizador Dióxido de Titanio de 3% a 15% del peso del cemento dosificado el concreto adicionará la propiedad autolimpiable y mantendrá invariable la resistencia a la compresión diseñada respecto a un concreto sin adición de Dióxido de Titanio.

3.2. Variables

Resistencia a la compresión: Dependiente.

Propiedad Autolimpiable: Dependiente.

Porcentaje del fotocatalizador TiO_2 : Independiente.

3.2.1. Operacionalización / categorización de los componentes de las hipótesis

Título: “Influencia de Fotocatalizador Dióxido de Titanio en la Propiedad Autolimpiable del Concreto f’c=210 kg/cm²”				
Hipótesis	Definición conceptual de las variables	Definición Operacional Variables		
		Variables	Dimensiones	Indicadores
Al adicionar el fotocatalizador dióxido de titanio de 3% a 15% del peso del cemento dosificado el concreto adicionará la propiedad autolimpiable y mantendrá invariable la resistencia a la compresión diseñada respecto a un concreto sin adición de Dióxido de Titanio.	La resistencia a la compresión es la capacidad máxima de carga que soporta un material antes de llegar a su límite de ruptura.	Resistencia a la compresión	Ensayo de Resistencia a la Compresión	Kg/cm ²
	La capacidad fotocatalítica es la reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de catalizador.	Capacidad Fotocatalítica	Ensayo Rodamina (Coloración)	Porcentaje (%)

Tabla 03-A: Relación entre el planteamiento y la solución del problema de investigación.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1. Ubicación

Los agregados de estudio se obtuvieron de la cantera “La Victoria” ubicado en el valle de Cajamarca, a orillas de río Cajamarquino, específicamente dentro del Fundo La Victoria, ubicado en el distrito de Llacanora, provincia y departamento de Cajamarca, en un área de 2.6 ha. La cantera se ubica a 2530 msnm, en las coordenadas 7°11'LS y 78°28'LO.

El área limita por el norte con la propiedad de los hermanos Pajares, por el sur con la carretera al Caserío la Victoria y otros propietarios, por el este con el río Cajamarquino y por el oeste con la propiedad de los hermanos Pajares.

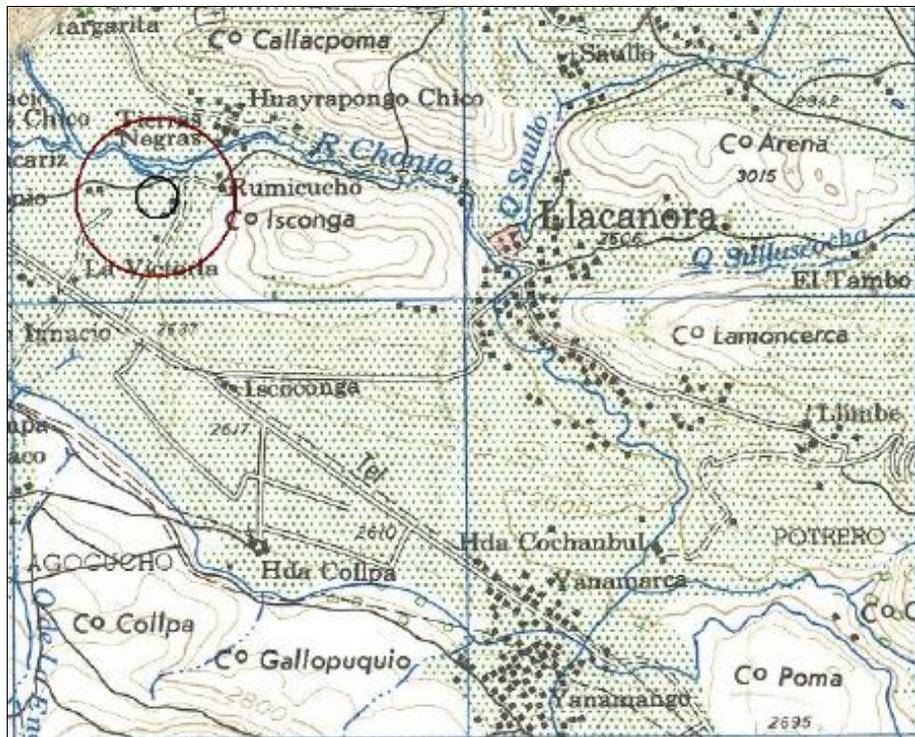


Gráfico 08: Ubicación de la Cantera Victoria - Huayrapongo

Fuente: INDECI, 2005

4.1.1. Geología de la Cantera

La cantera ubicada en el distrito de Llacanora es de depósitos fluviales (Q-fl) los cuales se encuentran a orillas del río Cajamarquino. Los depósitos fluviales están constituidos por materiales que se encuentran dentro, cerca y bordeando los cauces de los ríos y las terrazas que se han formado durante el desarrollo geológico reciente de los mismos. Están compuestos por cantos rodados, gradando desde planares a casi esféricos; en los planares, y en los semiangulosos se encuentran erosionados sus bordes. Las geoformas de los cantos nos indican la distancia y origen de los materiales que fueron erosionados y transportados por los ríos.

Los depósitos constituidos por mezclas de materiales fluviales y depósitos aluviales, constituyen secuencias estratigráficas indefinidas, se encuentran frecuentemente en la periferia de la ciudad; también es muy común encontrar secuencias interdigitadas de éstos depósitos con materiales gravo-areno-limosos y secuencias consistentes de arcillas de hasta 2 a 3 metros de potencia, con características geotécnicas muy complejas. Principalmente en los lechos de los ríos se presentan cantos volcánicos traquíticos y andesíticos, calcáreos, margosos, graníticos, dioríticos, cuarzosos, lutíticos, así como cantos indiferenciados. (INDECI, 2005)

Así mismo el distrito de Llacanora donde se ubica nuestra cantera es de depósitos Cuaternarios. Este tipo de depósitos es la base de cimentación de la ciudad de Cajamarca y es la litología (rocas) de mayor presencia y presenta depósitos semiconsolidados o no consolidados, los que se encuentran en una secuencia estratigráfica infrayaciendo los depósitos morrenicos y fluvio-glaciáricos, hasta encontrar en las partes superficiales los depósitos fluviales modernos. (INDECI, 2005)

4.1.2. Extracción de agregados

La extracción de materiales del lecho del río se realiza en una longitud de 500 y 15 metros de ancho, y una profundidad de 1.5 metros, sin afectar sustancialmente el cauce del mismo; Este se extrae de la orilla y del cauce del río mediante un cargador frontal de 3 metros cúbicos, para luego ser apilado en grandes volúmenes cerca del lugar de lavado y zarandeado.

Para separar el material en distintos tamaños, se utilizan mallas de tamizado de 3” para el over (piedra grande), de 3/8” para separar el agregado grueso y el agregado fino. Este zarandeado se realiza mediante gravedad con ayuda de grandes cantidades de agua, utilizando para esto una motobomba de 16 HP, que extrae el agua de unas pequeñas lagunas artificiales.

Luego, el material tamizado es apilado mediante un cargador frontal, en una zona de carga, donde puede ser tamizado nuevamente, según el tamaño máximo que se requiera.

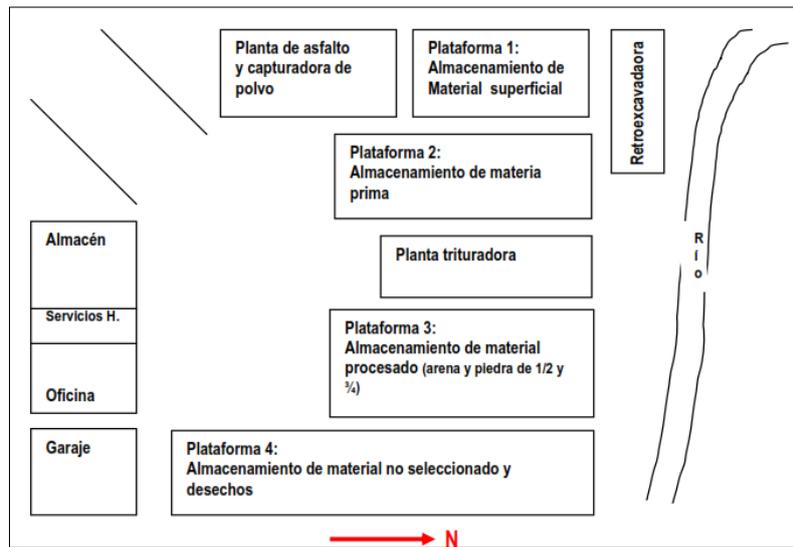


Gráfico 08-A: Croquis de Extracción de Agregados

Fuente: Rodríguez A. 2012.

4.2. Diseño de la investigación

Teniendo en cuenta el propósito de la investigación y de acuerdo a lo que se indica en esta tesis es una investigación experimental y transversal.

4.3. Método y tipo de investigación

El método de investigación utilizado fue el método hipotético deductivo.

CRITERIO	TIPO DE INVESTIGACIÓN
Finalidad	Aplicada
Objetivos	Descriptiva
Fuente	Primaria
Diseño	Experimental
Contexto	Laboratorio, campo

Tabla 03-B: Criterio y tipo de investigación.

4.4. Diseño del Experimento

1. Obtención de las propiedades generales de los materiales con los que se realizaron las probetas tanto cilíndricas como prismáticas; dichos ensayos fueron: Análisis granulométrico de los agregados, módulo de fineza, peso específico y absorción, contenido de humedad, peso unitario suelto y compactado, cantidad de material que pasa la malla N° 200 y abrasión.
2. Realización del diseño de mezclas con el método ACI para los 6 tratamientos propuestos con los datos obtenidos de los ensayos anteriores y datos obtenidos de las hojas técnicas en el caso del cemento y el dióxido de titanio.
3. Realización de probetas cilíndricas para el ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 7, 14 y 28 días para cada uno de los seis tratamientos.
4. Realización de probetas prismáticas rectangulares para el ensayo de decoloración o prueba de Rodamina (propiedad autolimpiable) para cada uno de los seis tratamientos propuestos.
5. Realización del análisis estadístico tanto para el ensayo de resistencia a la compresión como para el ensayo de decoloración.
6. Análisis de costo para cada tratamiento propuesto.
7. Comparación resistencia a la compresión vs propiedad autolimpiable vs costo entre los tratamientos propuestos.

4.5. Población, muestra y unidad de análisis

- Universo: Concretos elaborados en la ciudad de Cajamarca con agregados de la cantera La Victoria.
- Muestra: 144 probetas cilíndricas para ensayos a la compresión hechos de concreto con dióxido de titanio elaborados con agregados de la cantera La Victoria y 48 probetas prismáticas rectangulares para ensayo de coloración hechos de concreto con dióxido de titanio elaborados con agregados de la cantera La Victoria.
- Unidad de Análisis: Cada una de las probetas cilíndricas para ensayos a la compresión hechos de concreto con dióxido de titanio elaborados con agregados de la cantera La Victoria y cada una de las probetas prismáticas rectangulares para ensayo de coloración hechos de concreto con dióxido de titanio elaborados con agregados de la cantera La Victoria.

4.6. Técnicas e instrumentos de recopilación de información

- Revisión del material bibliográfico.
- Análisis documental.
- Observación experimental.

Para recopilar la información se utilizó el Método Cuantitativo. El Método Cuantitativo se utilizó para medir las variables cuantitativas de estudio de los tratamientos de concreto elaborados; permitió medir los parámetros físicos y mecánicos de los materiales que se ensayaron en el laboratorio.

4.7. Técnicas para el procesamiento y análisis de información

La recolección de datos se realizó mediante los cuadros de doble entrada, gráficos formatos de ensayos de laboratorio. La información cuantitativa fue procesada mediante métodos estadísticos apropiados para cada caso, como la determinación de promedios, desviación estándar, coeficientes de varianza, varianza y agrupación de los tratamientos

usando la prueba de rango múltiple de Tukey y mediante el uso de programas como el Microsoft Excel 2016 y el Minitab 16.

4.8. Equipos, materiales, insumos, etc.

Materiales

- Agregado de la cantera La Victoria.
- Dióxido de Titanio.
- Rodamina.
- Agua.
- Cemento Portland Tipo I.

Equipos

- Balanza.
- Recipiente adecuado para colocar la muestra.
- Estufa, capaz de mantener una temperatura de 105°C a 110°C.
- Recipiente. Se utiliza para introducir la muestra en el horno.
- Barra compactadora de acero, circular, recta, de 5/8" de diámetro y 80 cm. de largo, con un extremo redondeado.
- Recipiente cilíndrico y de metal, suficientemente rígido para no sufrir deformaciones.
- Picnómetro.
- Juego de Tamices conformados por N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N°100.(Agregado Fino).
- Juego de Tamices conformados por 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N°4. (Agregado Grueso).
- Cono de Abrams.
- Máquina de los Ángeles.
- Prensa o Máquina Universal.
- Trompo.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Análisis de los resultados de pruebas de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos

5.1.1 Ensayo de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de concreto a la edad de 7 días.

Espécimen	C° sin TiO ₂	C° con 3% TiO ₂	C° con 6% TiO ₂	C° con 9% TiO ₂	C° con 12% TiO ₂	C° con 15% TiO ₂
DT-01	137.71	136.69	137.07	137.62	137.53	136.47
DT-02	134.38	134.98	136.74	137.29	135.60	130.71
DT-03	142.04	139.99	137.95	138.50	136.42	135.37
DT-04	135.57	136.50	134.47	135.56	134.50	138.13
DT-05	147.99	141.56	140.77	142.69	138.58	139.70
DT-06	145.29	133.02	143.66	127.49	132.78	142.98
DT-07	131.98	142.73	137.06	140.57	134.92	132.58
DT-08	155.11	146.58	140.86	137.55	145.53	136.29
Promedio	141.26	139.01	138.57	137.16	136.98	136.53

Tabla 04: Ensayo de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de concreto a la edad de 7 días para los diferentes tratamientos en estudio.

5.1.1.1 Resumen de los promedios de cada tratamiento realizado

0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
141.26	139.01	138.57	137.16	136.98	136.53

Tabla 05: Resumen de los promedios de las resistencias a la compresión obtenidas a los 7 días para los diferentes tratamientos en estudio.

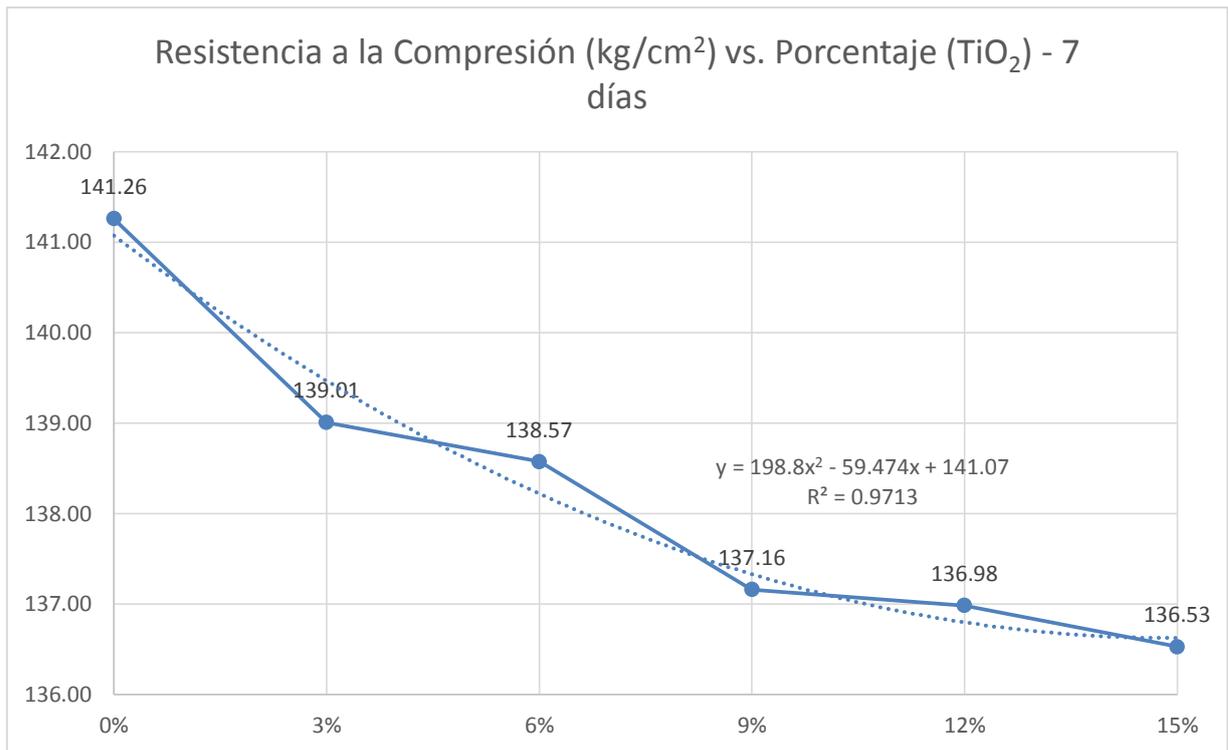


Gráfico 09: Resistencia a la compresión promedio a los 7 días vs % TiO₂

En el gráfico 09 se observó que el concreto elaborado sin dióxido de titanio presentó el mayor promedio de resistencia a la compresión a la edad de 7 días (141.26 kg/cm²), aunque la diferencia con los otros tratamientos que sí tuvieron TiO₂ fue mínima.

El tratamiento elaborado con 15% de dióxido de titanio presentó el menor promedio de resistencia a la compresión a la edad de 7 días (136.53 kg/cm²).

Además en el gráfico 09 se observó que hay una disminución paulatina y descendente de la resistencia a la compresión conforme el tratamiento tuvo mayor porcentaje de dióxido de titanio. Es decir, que al adicionar mayor cantidad del fotocatalizador dióxido de titanio a los tratamientos de concreto, éstos disminuyeron su resistencia a la compresión; cabe indicar que esta disminución no fue significativa.

5.1.2 Ensayo de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de concreto a la edad de 14 días.

Espécimen	C° sin TiO2	C° con 3% TiO2	C° con 6% TiO2	C° con 9% TiO2	C° con 12% TiO2	C° con 15% TiO2
DT-01	192.02	190.39	189.98	191.52	187.08	186.60
DT-02	189.75	185.71	185.85	186.48	184.84	185.33
DT-03	191.49	196.21	193.09	192.51	195.28	194.05
DT-04	193.47	194.64	193.72	192.43	193.25	189.65
DT-05	200.58	191.69	200.25	202.73	187.49	200.73
DT-06	195.51	199.70	192.25	200.21	201.43	187.69
DT-07	195.29	197.06	194.24	188.48	189.93	192.30
DT-08	202.30	197.59	199.12	186.55	192.52	188.76
Promedio	195.05	194.12	193.56	192.61	191.48	190.64

Tabla 06: Ensayo de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de concreto a la edad de 14 días para los diferentes tratamientos en estudio.

5.1.2.1. Resumen de los promedios de cada tratamiento realizado

0% TiO2	3% TiO2	6% TiO2	9% TiO2	12% TiO2	15% TiO2
195.05	194.12	193.56	192.61	191.48	190.64

Tabla 07: Resumen de los promedios de las resistencias a la compresión obtenidas a los 14 días para los diferentes tratamientos en estudio.

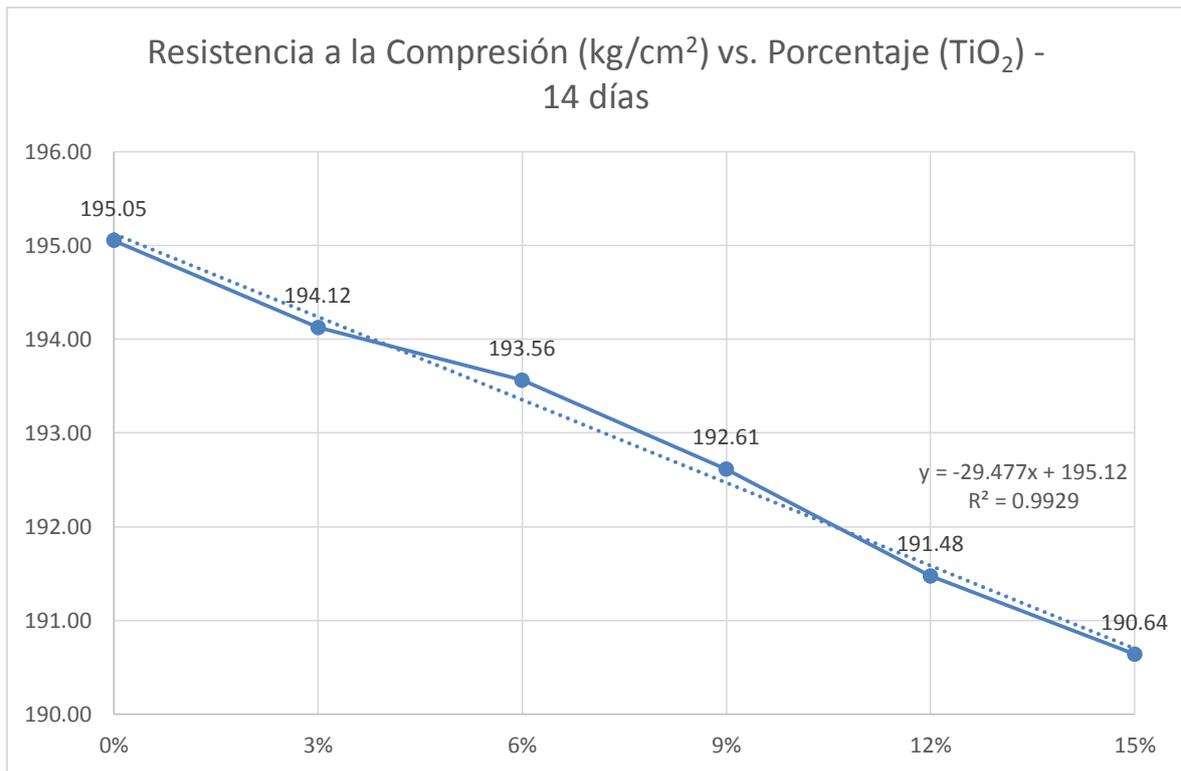


Gráfico 10: Resistencia a la compresión promedio a los 14 días vs % TiO₂

En el gráfico 10 se observó que la tendencia respecto al gráfico 09 continuó; el concreto elaborado sin dióxido de titanio presentó el mayor promedio de resistencia a la compresión (195.05 kg/cm²).

El tratamiento elaborado con 15% de dióxido de titanio fue el que presentó el menor promedio de resistencia a la compresión (190.64 kg/cm²).

De la gráfica 10 se observó que sigue existiendo una diferencia paulatina y descendente de la resistencia a la compresión conforme el tratamiento tuvo mayor porcentaje de dióxido de titanio. Es decir, que al adicionar mayor cantidad del fotocatalizador dióxido de titanio a los tratamientos de concreto, éstos disminuyeron su resistencia a la compresión; cabe indicar que esta disminución no fue significativa.

5.1.3 Ensayo de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de concreto a la edad de 28 días.

Espécimen	C° sin TiO2	C° con 3% TiO2	C° con 6% TiO2	C° con 9% TiO2	C° con 12% TiO2	C° con 15% TiO2
DT-01	208.34	207.46	208.62	207.80	205.07	205.10
DT-02	212.14	212.62	213.17	209.42	211.69	212.16
DT-03	215.94	215.41	214.40	210.56	208.87	205.51
DT-04	207.98	208.26	207.71	208.32	210.03	209.45
DT-05	221.32	218.46	211.36	202.90	198.53	200.70
DT-06	212.00	211.91	201.62	208.73	201.47	201.76
DT-07	215.04	213.61	202.85	194.19	205.93	203.87
DT-08	226.00	205.43	207.68	202.70	199.33	200.02
Promedio	214.85	211.65	208.43	205.58	205.12	204.82

Tabla 08: Ensayo de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de concreto a la edad de 28 días para los diferentes tratamientos en estudio.

5.1.3.1 Resumen de los promedios de cada tratamiento realizado

0% TiO2	3% TiO2	6% TiO2	9% TiO2	12% TiO2	15% TiO2
214.85	211.65	208.43	205.58	205.12	204.82

Tabla 09: Resumen de los promedios de las resistencias a la compresión a la edad de 28 días para los diferentes tratamientos en estudio.

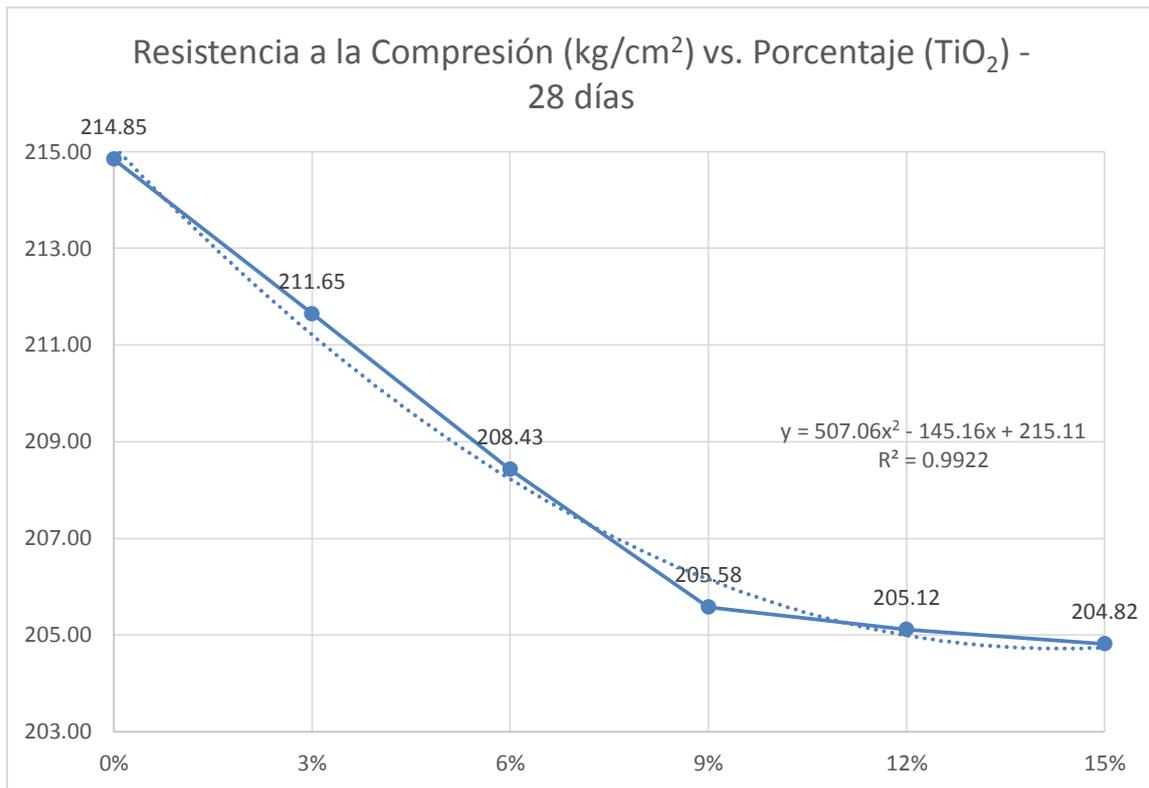


Gráfico 11: Resistencia a la compresión promedio a los 28 días vs % TiO₂

En el gráfico 11 se observó que la tendencia respecto a los gráficos 09 y 10 continuó ya que el concreto elaborado sin dióxido de titanio presentó el mayor promedio de resistencia a la compresión (214.85 kg/cm²). El tratamiento elaborado con 15% de dióxido de titanio fue el que presentó el menor promedio de resistencia a la compresión (204.82 kg/cm²).

Analizando el gráfico 11 se observó que siguió existiendo una diferencia paulatina y descendente de la resistencia a la compresión conforme el tratamiento tuvo mayor porcentaje de dióxido de titanio. Es decir, que al adicionar mayor cantidad del fotocatalizador dióxido de titanio a los tratamientos de concreto, éstos disminuyeron su resistencia a la compresión.

5.1.4 Análisis de la resistencia promedio y edad para los distintos tratamientos de concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

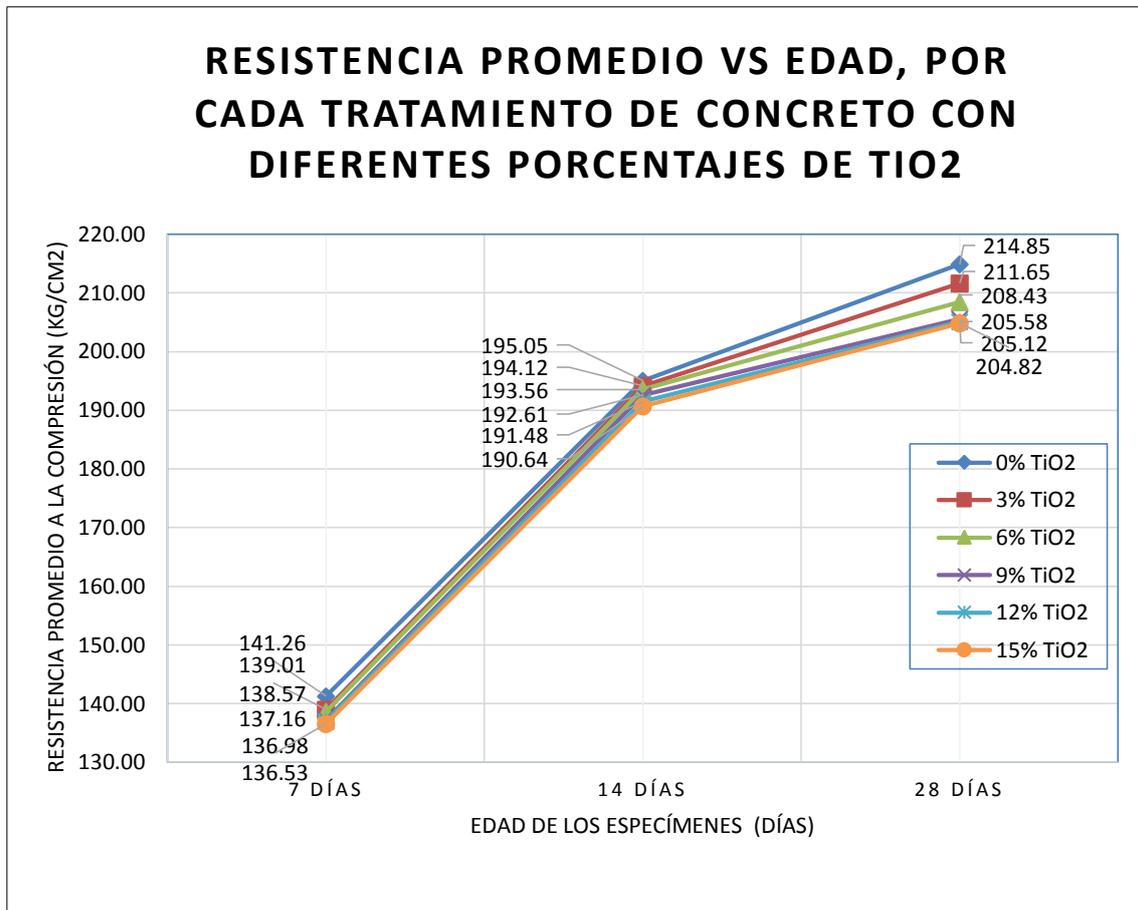


Gráfico 12: Resistencia promedio vs. edad, por tratamiento de concreto con diferentes % TiO₂.

En el gráfico 12 se observó que a la edad de 7 días, los promedios de resistencia a la compresión de los distintos tratamientos son bastantes cercanos, notando que el de mayor resistencia fue el que no contiene porcentajes de TiO₂, pero las disminuciones en la resistencia en esta primera etapa al adicionar dióxido de titanio fueron casi imperceptibles. La diferencia porcentual entre la mayor resistencia (Tratamiento base) y la de menor resistencia (Tratamiento con 15% TiO₂) fue de 4.73% descendente.

A la edad de 14 días, la tendencia siguió siendo la misma, los promedios de resistencia a la compresión de los distintos tratamientos fueron bastantes cercanos, notando que el de mayor resistencia siguió siendo el que no contiene porcentajes de TiO₂, pero las disminuciones en la resistencia en esta segunda etapa al adicionar dióxido de

titanio siguieron siendo mínimas. La diferencia porcentual entre la mayor resistencia (Tratamiento sin TiO_2) y la de menor resistencia (Tratamiento con 15% TiO_2) fue de 4.41% descendente. Esto nos mostró que la disminución aumentó pero siguió siendo mínima.

A la edad de 28 días, la tendencia continuó siendo la misma, los promedios de resistencia a la compresión de los distintos tratamientos fueron bastantes cercanos, notando que el de mayor resistencia continuó siendo el que no contiene porcentajes de TiO_2 , pero las disminuciones en la resistencia en esta tercera etapa al adicionar dióxido de titanio fueron más holgadas.

La diferencia porcentual entre la mayor resistencia (Tratamiento sin TiO_2) y la de menor resistencia (Tratamiento con 15% TiO_2) fue de 10.02% descendente. Esto nos mostró que la disminución aumentó si vemos las anteriores comparaciones (7 días y 14 días).

El desarrollo de la resistencia a compresión promedio del concreto elaborado sin adición de dióxido de titanio fue de 67.27% a los 7 días, aumentó a 92.88% a los 14 días y finalizó en 102.31% a los 28 días; el del Concreto elaborado con 3% de dióxido de titanio fue de 66.19% a los 7 días, aumentó a 92.44% a los 14 días y finalizó en 100.78% a los 28 días; el del Concreto elaborado con 6% de dióxido de titanio fue de 65.99% a los 7 días y aumentó a 92.17% a los 14 días y finalizó en 99.25% a los 28 días; el del Concreto elaborado con 9% de dióxido de titanio fue de 65.31% a los 7 días y aumentó a 91.72% a los 14 días y finalizó en 97.89% a los 28 días; el del Concreto elaborado con 12% de dióxido de titanio fue de 65.23% a los 7 días y aumentó a 91.18% a los 14 días y finalizó en 97.67% a los 28 días; y el del Concreto elaborado con 15% de dióxido de titanio fue de 65.01% a los 7 días y aumentó a 90.78% a los 14 días y finalizó en 97.53% a los 28 días.

Aunque existieron disminución de la resistencia conforme aumentó la adición de dióxido de titanio está no fue muy significativa; esto se debe a que el dióxido de titanio ocupó los poros que existan en el concreto por lo que no existen grandes disminuciones en la resistencia.

5.1.5 Análisis estadístico de resistencia a la compresión.

5.1.5.1 Análisis estadístico de resistencia a la compresión a la edad de 7 días.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA), de la variable de resistencia a la compresión a la edad de 7 días. Así mismo se realizó la prueba de rango múltiple de Tukey, para observar la diferencia estadística entre los tratamientos. Para el análisis de varianza (ANOVA) y Tukey se utilizó el programa Minitab 16.

El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula y fue 0.399. En los cálculos obtenidos para ANOVA, el valor p (0.399) proporcionó suficiente evidencia de que la resistencia a la compresión no difirió cuando α es 0.05. En los intervalos de confianza individual del 95%, se observó que todos los intervalos se superponen, lo que da crédito a la teoría de que las medias fueron estadísticamente similares.

La prueba de Tukey proporcionó cinco conjuntos de intervalos de comparación múltiple: Media del concreto sin TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 3, 6, 9, 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 3% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 6, 9, 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 6% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 9, 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 9% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 12% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 15% TiO_2 .

El primer intervalo del primer conjunto de la salida de Tukey fue -9.488 a 4.982. Es decir, la media de la resistencia a la compresión con 0% TiO_2 menos la media de la resistencia a la compresión con 3% TiO_2 fue una cifra entre -9.488 a 4.982. Debido a que el intervalo incluye a cero, la diferencia entre la resistencia a la compresión entre los dos tratamientos fue estadísticamente no significativa. Se interpretó de modo similar los demás resultados de la prueba de Tukey. Las medias para todos los tratamientos no difirieron significativamente debido a que todos los intervalos de confianza incluyeron el cero. Por este motivo, todos los tratamientos tuvieron resistencias a la compresión promedio significativamente similares.

En conclusión en el resultado de Análisis de Varianza (ANOVA) al ser el valor de $p > 0.05$ se observó que la fuente de variabilidad de los tratamientos no tuvo diferencia estadística entre los promedios de resistencia a la compresión. Y, de acuerdo a la prueba de rango múltiple de Tukey los datos de compresión pertenecen al mismo grupo

estadístico. A continuación se mostraron los gráficos generados por las comparaciones realizadas por ANOVA y TUKEY.

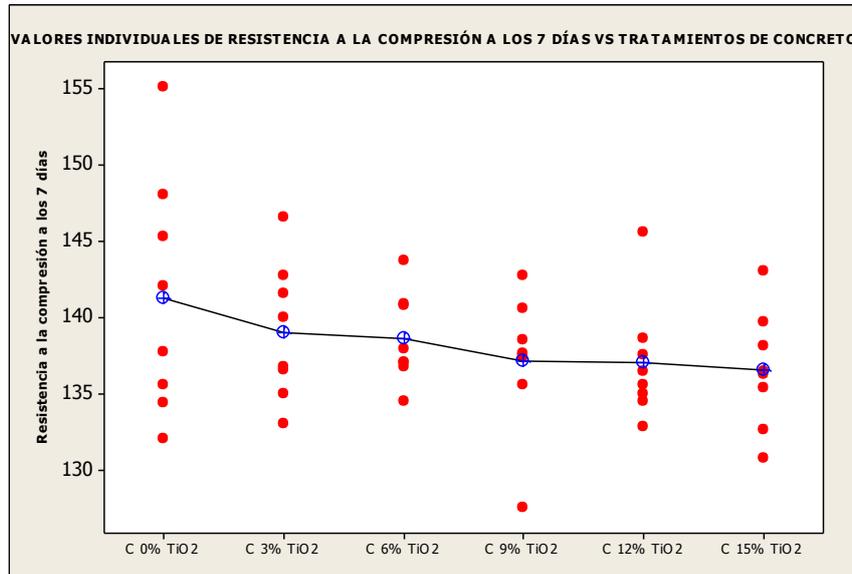


Gráfico 13: Valores individuales de resistencia vs. tratamiento de C°.

El gráfico 13 de valores individuales mostró que cada tratamiento tuvo una resistencia promedio a la compresión a la edad de 7 días diferente. El tratamiento con 0% de TiO₂ tuvo la mayor resistencia a la compresión y el tratamiento con 15% de TiO₂ tuvo la menor resistencia a la compresión. Se apreció además que conforme aumentó el porcentaje de TiO₂ la resistencia a la compresión promedio disminuyó.

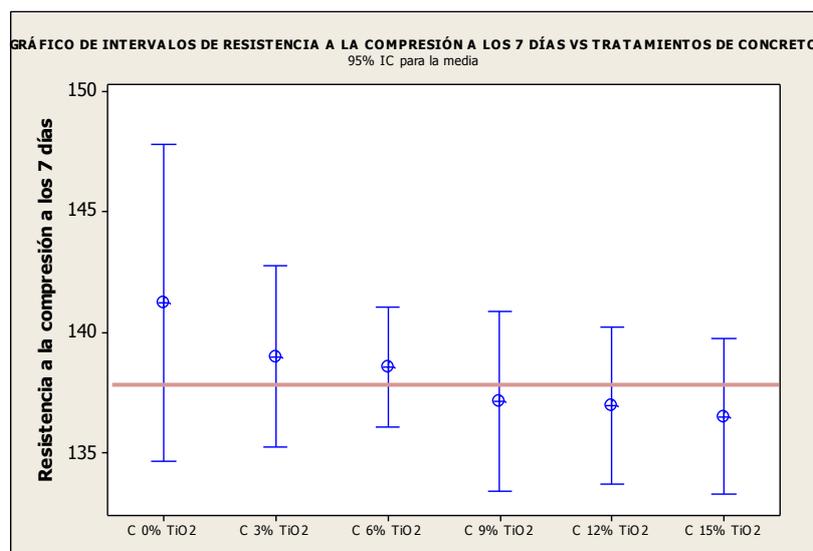


Gráfico 14: Gráfica de intervalos.

El gráfico 14 mostró los intervalos de resistencia a la compresión a la edad de 7 días de cada tratamiento. Así mismo, la línea roja nos confirmó lo obtenido en las pruebas de ANOVA y Tukey, es decir, que todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo estadístico.

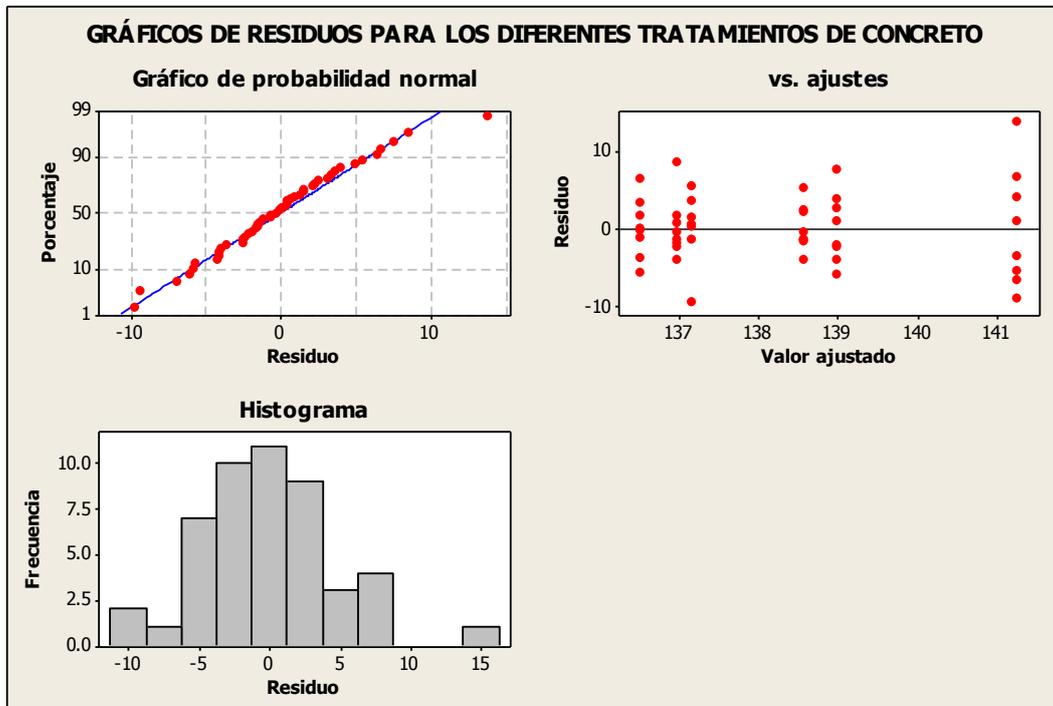


Gráfico 15: Gráficas de residuos para los diferentes tratamientos de concreto.

El gráfico de probabilidad normal sirvió para detectar no normalidades. Una línea aproximadamente recta indica que los residuos se distribuyeron normalmente y esto es lo que sucedió, aunque existió un par de datos que estuvieron fuera de esta línea por los que se consideró a estos datos como no normalidades. El gráfico de histograma de los residuos sirvió para detectar diversos valores máximos, valores atípicos y no normalidades. El histograma fue aproximadamente simétrico y con forma de campana. El gráfico de residuos contra los valores ajustados sirvió para detectar varianza no constante, términos de orden superior omitidos y valores atípicos. Los residuos se dispersaron aleatoriamente en torno a cero.

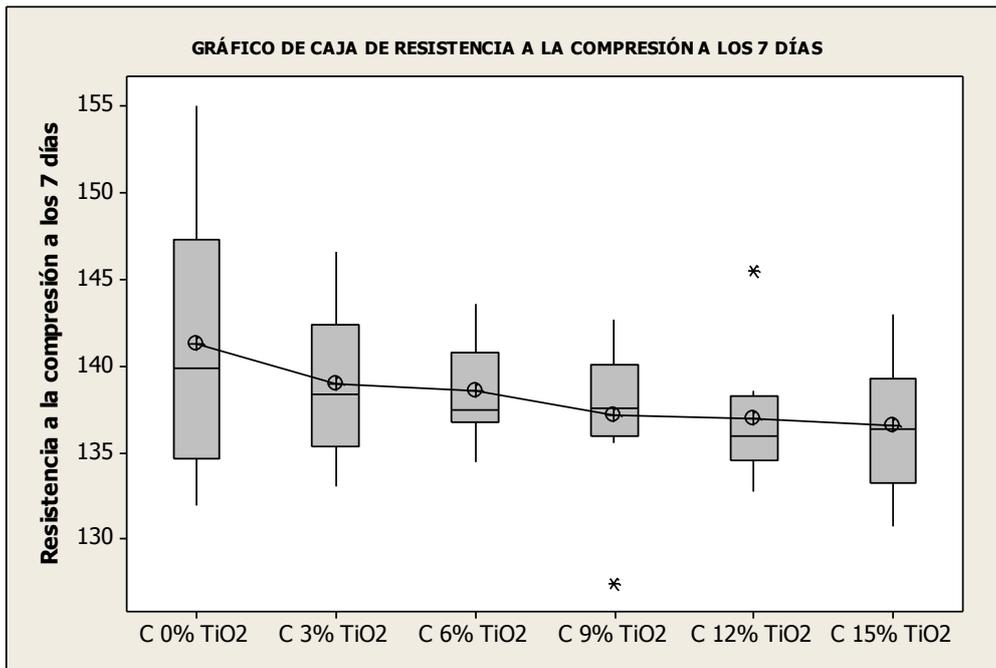


Gráfico 16: Gráfica de caja de resistencia a la compresión a los 7 días.

El gráfico 16 indicó que la resistencia a la compresión a los 7 días varió entre los distintos tratamientos, lo que resultó coherente con el gráfico 13 de valores individuales. Los gráficos de caja del tratamiento con 9% de TiO₂ y 12% de TiO₂ indicaron la presencia de valores atípicos (señalados con *) que corresponde a una resistencia con muy bajo valor en el caso del tratamiento con 9% de TiO₂ con respecto al grupo de datos al que pertenece y a una resistencia con muy alto valor de resistencia en el caso del tratamiento con 12% de TiO₂ con respecto al grupo de datos al que pertenece.

5.1.5.2 Análisis estadístico de resistencia a la compresión a la edad de 14 días.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA), de la variable de resistencia a la compresión a la edad de 14 días. Así mismo se realizó la prueba de rango múltiple de Tukey, para observar la diferencia estadística entre los tratamientos. Para el análisis de varianza (ANOVA) y Tukey se utilizó el programa Minitab 16. El valor p fue 0.507. En los cálculos obtenidos para ANOVA, el valor p (0.507) proporcionó suficiente evidencia de que la resistencia a la compresión no difirió cuando α es 0.05. En los intervalos de confianza individual del 95%, se observó que todos los intervalos se superponen, lo que da crédito a la teoría de que las medias fueron estadísticamente similares.

La prueba de Tukey proporcionó cinco conjuntos de intervalos de comparación múltiple: Media del concreto sin TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 3, 6, 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 3% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 6, 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 6% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 9% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 12% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 15% TiO₂. El primer intervalo del primer conjunto de la salida de Tukey fue -8.422 a 6.565. Es decir, la media de la resistencia a la compresión sin TiO₂ menos la media de la resistencia a la compresión con 3% TiO₂ fue una cifra entre -8.422 a 6.565. Debido a que el intervalo incluye a cero, la diferencia entre la resistencia a la compresión entre los dos tratamientos fue estadísticamente no significativa. Se interpretó de modo similar los demás resultados de la prueba de Tukey. Las medias para todos los tratamientos no difirieron significativamente debido a que todos los intervalos de confianza incluyeron el cero. Por este motivo, todos los tratamientos tuvieron resistencias a la compresión promedio significativamente similares.

En conclusión en el resultado de Análisis de Varianza (ANOVA) al ser el valor de $P > 0.05$ se observó que la fuente de variabilidad de los tratamientos no tuvo diferencia estadística entre los promedios de resistencia a la compresión. Y, de acuerdo a la prueba de rango múltiple de Tukey los datos de compresión pertenecen al mismo grupo estadístico. A continuación se mostraron los gráficos generadas por las comparaciones realizadas por ANOVA y TUKEY.

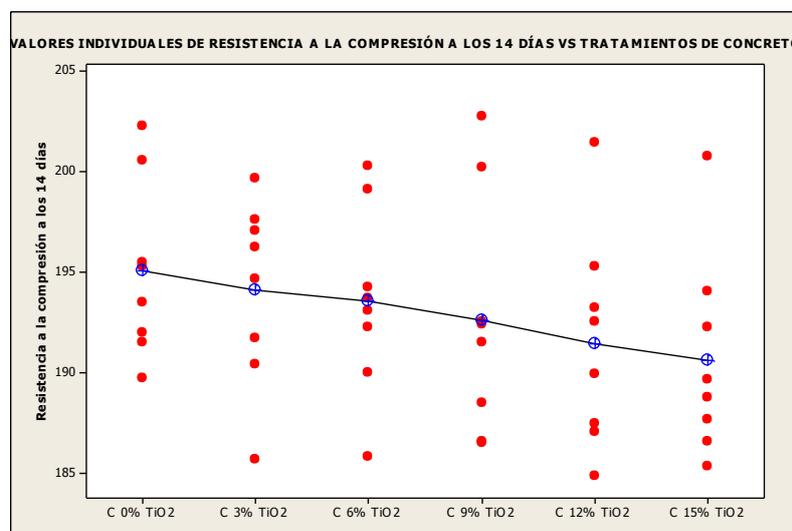


Gráfico 17: Valores individuales de resistencia vs. tratamiento de C°.

El gráfico 17 de valores individuales mostró que cada tratamiento tiene una resistencia promedio a la compresión a la edad de 14 días diferente. El tratamiento sin de TiO_2 tuvo la mayor resistencia a la compresión y el tratamiento con 15% de TiO_2 tuvo la menor resistencia a la compresión. Se apreció además que conforme aumentó el porcentaje de TiO_2 la resistencia a la compresión promedio disminuyó.

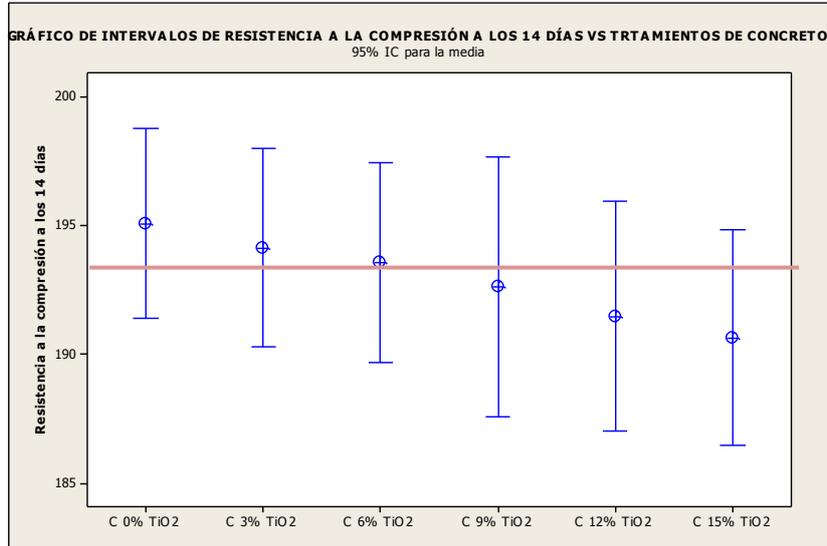


Gráfico 18: Gráfica de intervalos.

El gráfico 18 mostró los intervalos de resistencia a la compresión a la edad de 14 días de cada tratamiento. Así mismo, la línea roja nos confirmó lo obtenido en las pruebas de ANOVA y Tukey, es decir, que todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo estadístico.

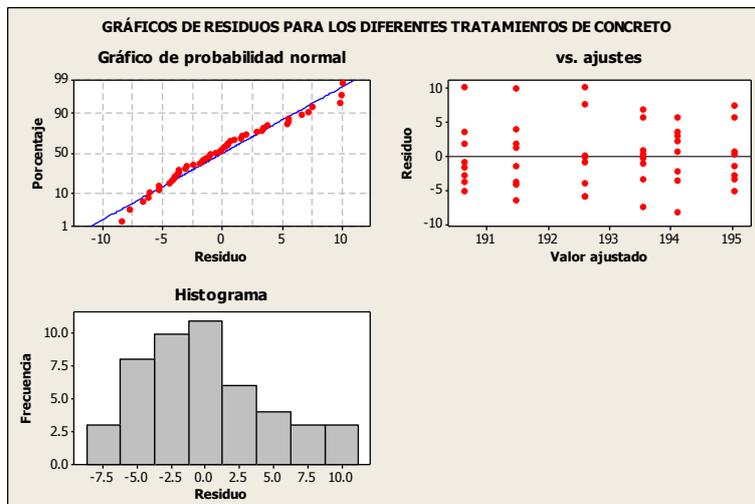


Gráfico 19: Gráfico de residuos para los diferentes tratamientos de concreto.

El gráfico de probabilidad normal no detectó no normalidades. Una línea aproximadamente recta indica que los residuos se distribuyen normalmente y esto fue lo que sucedió. El histograma fue aproximadamente simétrico y con forma de campana. La gráfica de residuos contra los valores ajustados no detectó varianzas no constantes, términos de orden superior omitidos o valores atípicos. Los residuos se dispersaron aleatoriamente en torno a cero.

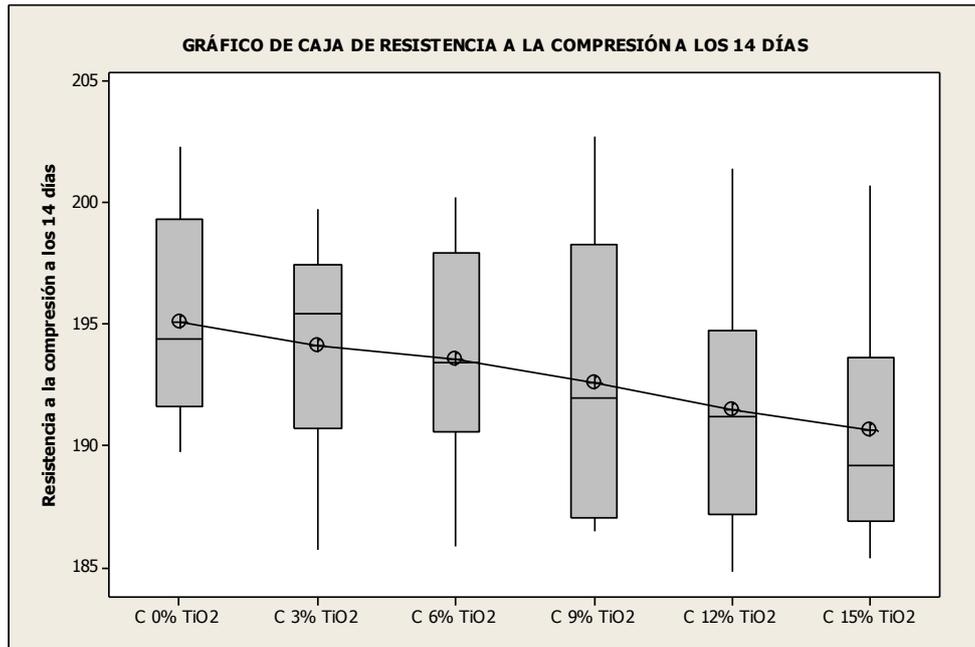


Gráfico 20: Gráfica de caja de resistencia a la compresión a los 14 días.

El gráfico 20 indicó que la resistencia a la compresión a los 14 días varió entre los distintos tratamientos, lo que resultó coherente con el gráfico 17 de valores individuales. Los gráficos de caja de todos los tratamientos no indicaron la presencia de valores atípicos (señalados con *) que corresponden a una resistencia con muy bajo valor o con muy alto valor.

5.1.5.3 Análisis Estadístico de resistencia a la compresión a la edad de 28 días.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA), de la variable de resistencia a la compresión a la edad de 28 días. Así mismo se realizó la prueba de rango múltiple de Tukey, para observar la diferencia estadística entre los tratamientos. Para el análisis de varianza (ANOVA) y Tukey se utilizó el programa Minitab 16.

El valor p fue 0.001. En los cálculos obtenidos para ANOVA, el valor p (0.001) proporcionó suficiente evidencia de que la resistencia a la compresión difirió cuando α es 0.05. En los intervalos de confianza individual del 95%, se observó que no todos los intervalos se superponen, lo que da crédito a la teoría de que las medias fueron estadísticamente distintas.

La prueba de Tukey proporcionó cinco conjuntos de intervalos de comparación múltiple: Media del concreto sin TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 3, 6, 9, 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 3% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 6, 9, 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 6% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 9, 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 9% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 12 y 15% TiO_2 . Media del concreto con 12% TiO_2 restada de las medias de los tratamientos con 15% TiO_2 .

El tercer intervalo del primer conjunto de salida de Tukey fue -16.750 a -1.786. Es decir, la media de la resistencia a la compresión sin TiO_2 menos la media de la resistencia a la compresión con 9% TiO_2 fue una cifra entre -16.750 a -1.786. Debido a que el intervalo no incluyó a cero, la diferencia entre la resistencia a la compresión entre los dos tratamientos fue estadísticamente significativa.

Se interpretó de modo similar los demás resultados de la prueba de Tukey. Las medias para todos los tratamientos difirieron significativamente debido a que no todos los intervalos de confianza incluyeron el cero. Por este motivo, algunos de los tratamientos tuvieron resistencias a la compresión promedio significativamente distintas.

En conclusión en el resultado de Análisis de Varianza (ANOVA) al ser el valor $p < 0.05$ se observó que la fuente de variabilidad de los tratamientos tuvo diferencia estadística entre los promedios de resistencia a la compresión. Y, de acuerdo a la prueba de rango múltiple de Tukey el tratamiento sin TiO_2 , el de 3% de TiO_2 y el de 6% de TiO_2 fueron significativamente similares (pertenecientes a un grupo estadístico representado por la letra A); y los tratamientos con, 9%, 12% y 15% de TiO_2 fueron significativamente similares (pertenecientes a otro grupo estadístico representado por la letra B). A continuación se mostraran los gráficos generadas por las comparaciones realizadas por ANOVA y TUKEY.

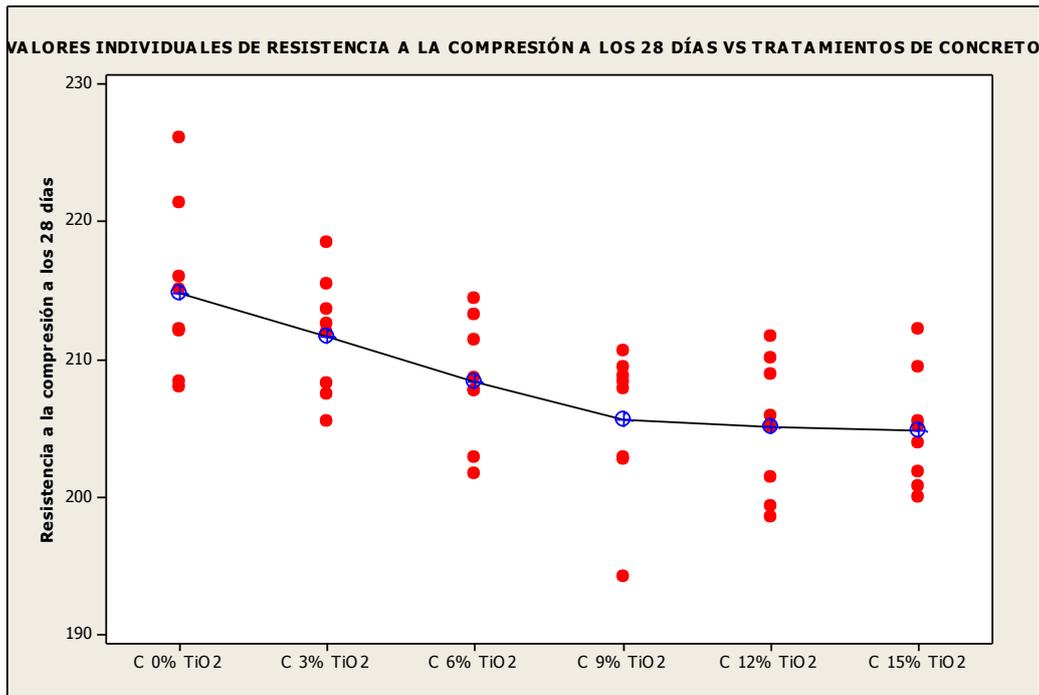


Gráfico 21: Valores individuales de resistencia vs. tratamiento de C°.

El gráfico 21 de valores individuales mostró que cada tratamiento tiene una resistencia promedio a la compresión a la edad de 28 días diferente. El tratamiento con 0% de TiO₂ tuvo la mayor resistencia a la compresión y el tratamiento con 15% de TiO₂ tuvo la menor resistencia a la compresión. Se aprecia además que conforme aumentó el porcentaje de TiO₂ la resistencia a la compresión promedio disminuyó.

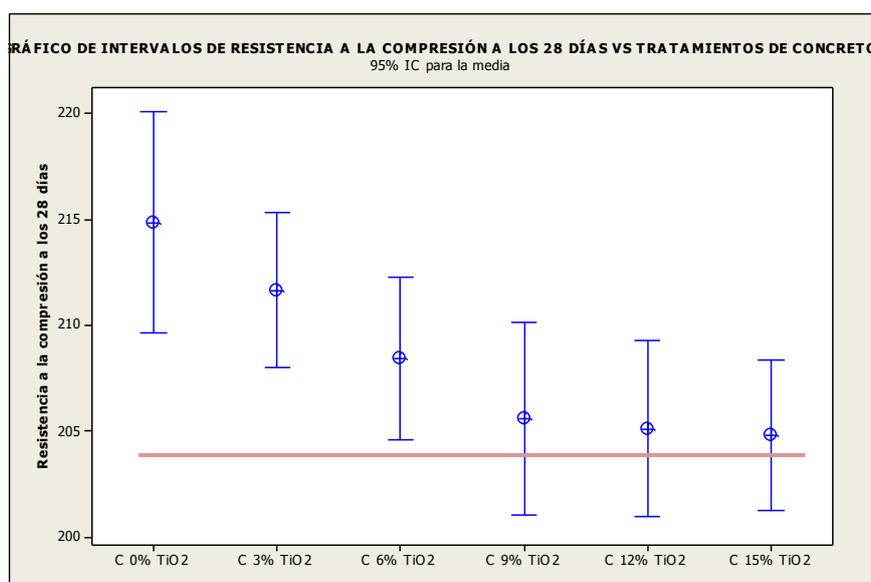


Gráfico 22: Gráfica de intervalos.

El gráfico 22 mostró los intervalos de resistencia a la compresión a la edad de 28 días de cada tratamiento. Así mismo, la línea roja nos confirmó lo obtenido en las pruebas de ANOVA y Tukey, es decir, que los tratamientos sin TiO_2 , el de 3% de TiO_2 y el de 6% de TiO_2 pertenecieron a un grupo estadístico y los tratamientos con 9, 12 y 15% de TiO_2 pertenecieron a otro grupo estadístico.

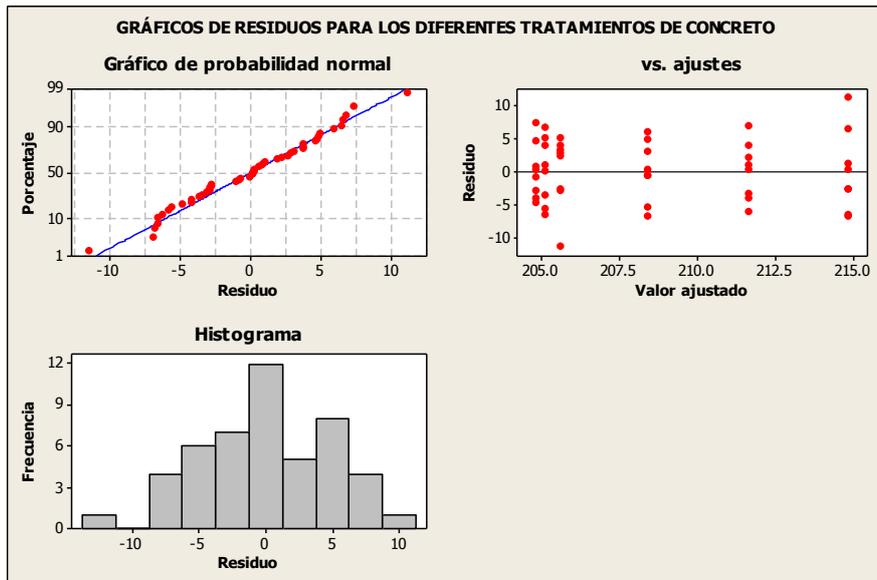


Gráfico 23: Gráfico de residuos para los diferentes tratamientos de concreto.

El gráfico de probabilidad normal no detectó no normalidades. Una línea aproximadamente recta indica que los residuos se distribuyen normalmente y esto fue lo que sucedió.

El gráfico de histograma de los residuos no detectó valores máximos, valores atípicos o no normalidades. El histograma fue aproximadamente simétrico y con forma de campana.

El gráfico de residuos contra los valores ajustados no detectó varianzas no constantes, términos de orden superior omitidos o valores atípicos. Los residuos se dispersaron aleatoriamente en torno a cero.

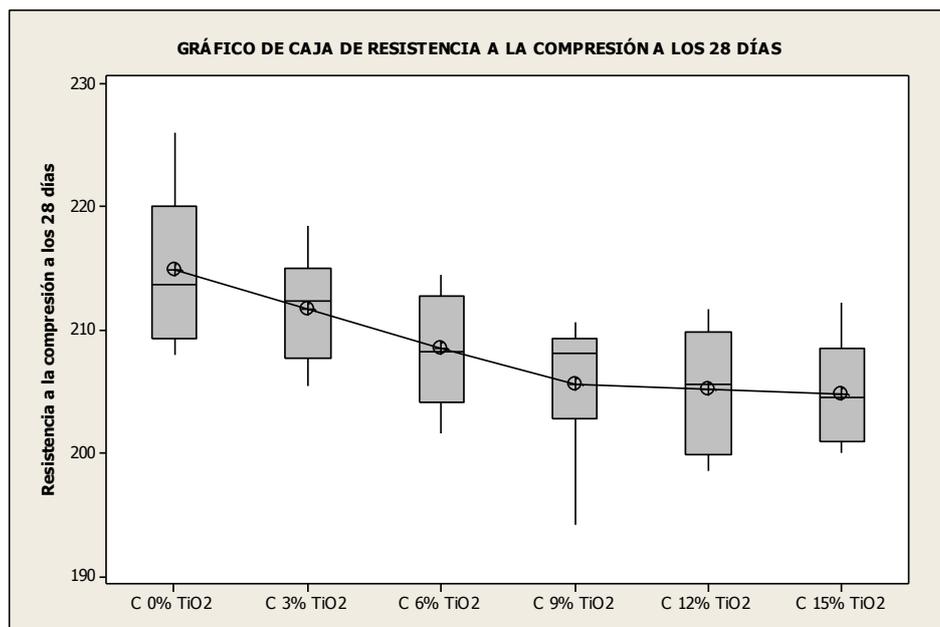


Gráfico 24: Gráfico de caja de resistencia.

El gráfico 24 indicó que la resistencia a la compresión a los 28 días varió entre los tratamientos sin TiO_2 , el de 3 y 6% de TiO_2 pertenecientes a un grupo estadístico y los tratamientos con 9, 12 y 15% de TiO_2 pertenecientes a otro grupo estadístico, lo que resultó coherente con el gráfico 21 de valores individuales. Los gráficos de caja de todos los tratamientos no indicaron la presencia de valores atípicos (señalados con *) que corresponden a una resistencia con muy bajo valor o con muy alto valor.

5.2 Análisis de los resultados de la prueba de Rodamina (UNI 11259) – materiales fotocatalíticos

Inicialmente se realizaron los especímenes estándar de concreto para este ensayo (especímenes prismáticos rectangulares de 10 cm x 10 cm x 2 cm), posteriormente aplicamos el pigmento Rodamina B, luego expusimos los especímenes a una lámpara de rayos UV.

Luego de esto, se hicieron medidas con colorímetro (medidor de pigmentación) durante 26 horas, tomando énfasis en la medida inicial ($t=0\text{h}$), a las 4 horas ($t=4\text{h}$) y a las 26 horas ($t=26\text{h}$) pues esos resultados fueron necesarios para poder aplicar las fórmulas de la prueba de Rodamina. Para esto se realizaron 8 ensayos para cada tratamiento propuesto (0%, 3%, 6%, 9%, 12% y 15% de TiO_2) los cuales fueron medidos en los siguientes tiempos en horas (0, 1, 2, 4, 5, 10, 20 y 26 horas).

5.2.1 Prueba de Rodamina en especímenes prismáticos rectangulares medido a las 0 horas.

5.2.1.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-01	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
R-02	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
R-03	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
R-04	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
R-05	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
R-06	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
R-07	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
R-08	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
Promedio	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78

Tabla 10: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a las 0 horas (t=0).

5.2.1.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=0h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78

Tabla 11: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=0h)

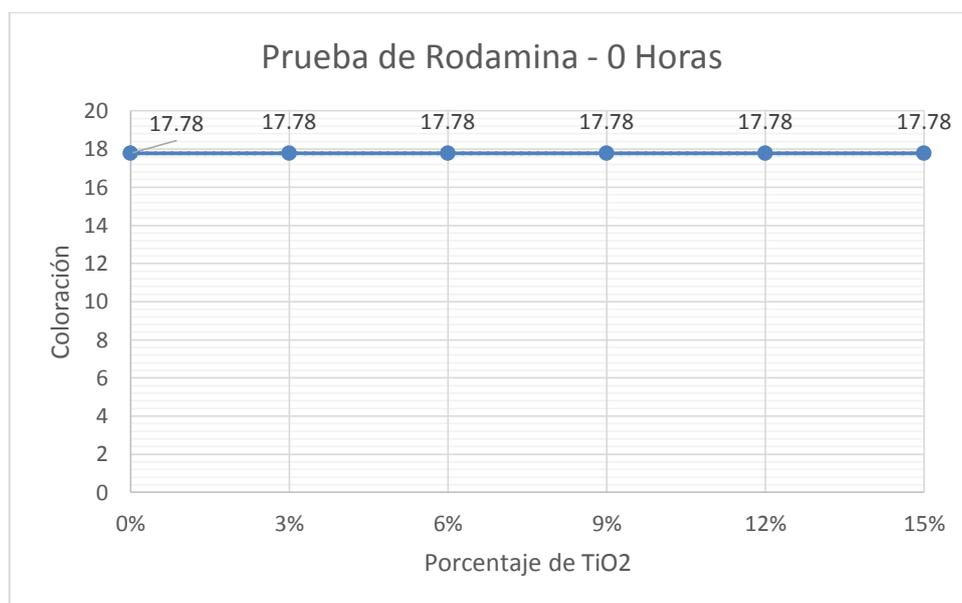


Gráfico 25: Prueba de Rodamina – 0 Horas. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 10, 11 y el gráfico 25 se observó que todos los tratamientos tienen la misma medida de coloración, esto debido a que se decidió valorar así los resultados para poder tener un inicio comparativo más exacto. Es decir, todos los tratamientos tuvieron su punto de inicio en la coloración obtenido para el tratamiento base que fue de 17.78.

5.2.2 Prueba de Rodamina en especímenes prismáticos rectangulares medido a la 1 hora.

5.2.2.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-09	17.35	16.68	15.70	14.87	14.31	13.82
R-10	17.00	16.03	15.35	14.52	13.96	13.47
R-11	17.42	16.63	15.77	14.94	14.38	13.89
R-12	17.05	15.94	15.40	14.57	14.01	13.52
R-13	16.92	15.62	15.27	14.44	13.88	13.39
R-14	16.85	15.49	15.20	14.37	13.81	13.32
R-15	17.12	16.21	15.47	14.64	14.08	13.59
R-16	17.57	17.23	15.92	15.09	14.53	14.04
Promedio	17.16	16.23	15.51	14.68	14.12	13.63

Tabla 12: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido a la 1 hora (t=1h)

5.2.2.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=1h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78

Tabla 13: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=1h).

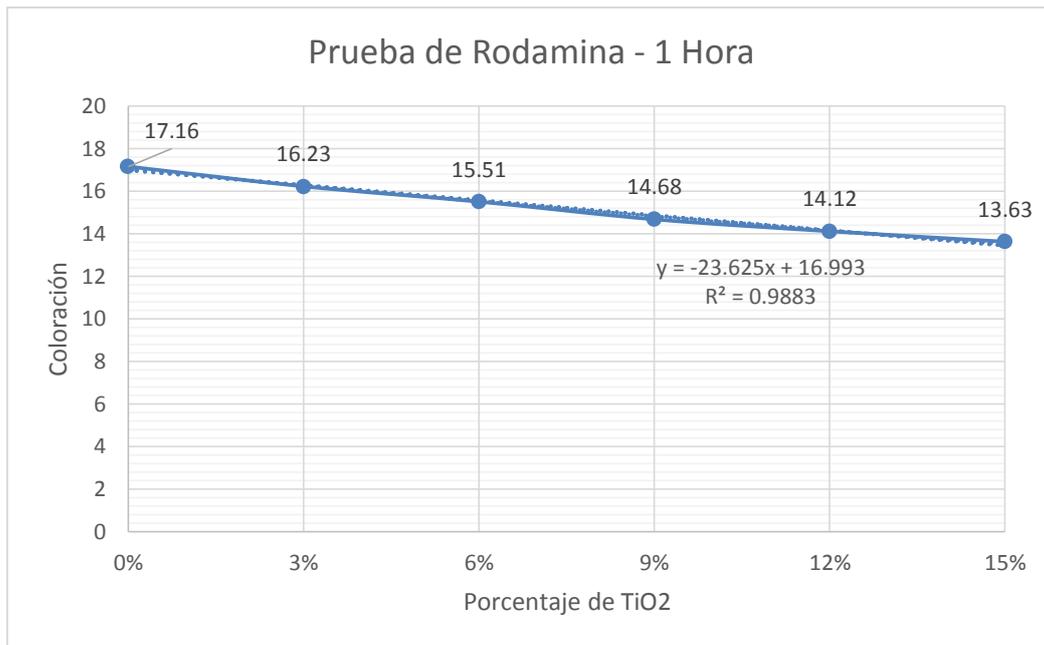


Gráfico 26: Prueba de Rodamina – 1 Hora. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 12 y 13 y el gráfico 26 se obtuvieron los promedios medidos en la primera hora de cada tratamiento, además se observó que existió un descenso de la coloración conforme se incluyó el TiO₂. El valor más alto de coloración fue del tratamiento sin TiO₂ con un valor de 17.16 y el valor más bajo de la coloración fue el tratamiento con 15% de TiO₂ con un valor de 13.63.

5.2.3 Prueba de Rodamina en especímenes prismáticos rectangulares medido a las 2 horas.

5.2.3.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-17	17.23	15.66	14.82	13.52	12.88	12.78
R-18	16.88	15.31	14.47	13.17	12.53	12.43
R-19	17.30	15.73	14.89	13.59	12.95	12.85
R-20	16.93	15.36	14.52	13.22	12.58	12.48
R-21	16.80	15.23	14.39	13.09	12.45	12.35
R-22	16.73	15.16	14.32	13.02	12.38	12.28
R-23	17.00	15.43	14.59	13.29	12.65	12.55
R-24	17.45	15.88	15.04	13.74	13.10	13.00
Promedio	17.04	15.47	14.63	13.33	12.69	12.59

Tabla 14: Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 2 horas

5.2.3.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=2h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
17.04	15.47	14.63	13.33	12.69	12.59

Tabla 15: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=2h).

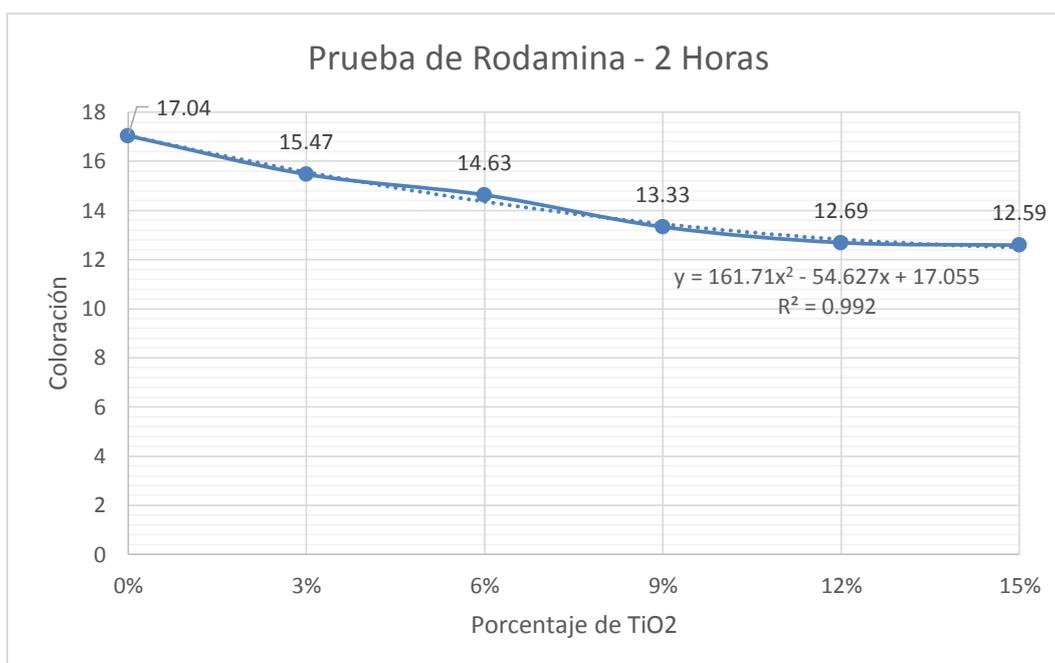


Gráfico 27: Prueba de Rodamina – 2 Horas. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 14 y 15 y el gráfico 27 se obtuvieron los promedios medidos a las 2 horas de cada tratamiento, además se observó que existió un descenso de la coloración conforme se incluyó el TiO₂ siguiendo la tendencia marcada en los resultados obtenido en el gráfico 26.

Además los valores de coloración también han descendido respecto a los obtenidos en la medición de 1 hora y obviamente de los obtenidos a las 0 horas.

El valor más alto de coloración fue del tratamiento sin TiO₂ con un valor de 17.04 y el valor más bajo de la coloración fue el tratamiento con 15% de TiO₂ con un valor de 12.59.

5.2.4 Prueba de Rodamina en especímenes prismáticos rectangulares medido a las 4 horas.

5.2.4.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-25	16.87	14.25	12.21	10.52	9.94	9.65
R-26	16.52	13.90	11.86	10.17	9.59	9.30
R-27	16.94	14.32	12.28	10.59	10.01	9.72
R-28	16.57	13.95	11.91	10.22	9.64	9.35
R-29	16.44	13.82	11.78	10.09	9.51	9.22
R-30	16.37	13.75	11.71	10.02	9.44	9.15
R-31	16.64	14.02	11.98	10.29	9.71	9.42
R-32	17.09	14.47	12.43	10.74	10.16	9.87
Promedio	16.68	14.06	12.02	10.33	9.75	9.46

Tabla 16: Prueba de Rodamina en especímenes medido a las 4 horas (t=4h)

5.2.4.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=4h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
16.68	14.06	12.02	10.33	9.75	9.46

Tabla 17: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=4h).

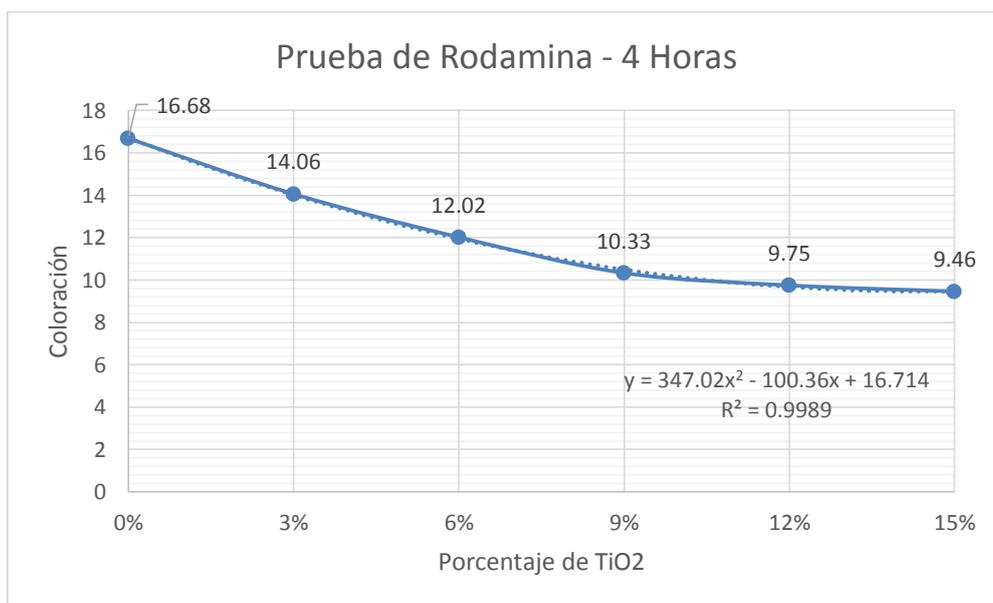


Gráfico 28: Prueba de Rodamina – 4 Horas. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 16 y 17 y el gráfico 28 donde se obtuvieron los promedios medidos a las 4 horas de cada tratamiento se observó que existe un descenso de la coloración conforme se incluyó el TiO₂ siguiendo la tendencia marcada en los resultados obtenido en 1 hora y 2 horas.

Además los valores de coloración también descendieron respecto a los obtenidos en las mediciones de 0, 1 y 2 horas.

El valor más alto de coloración fue del tratamiento sin TiO₂ con un valor de 16.68 y el valor más bajo de la coloración fue el tratamiento con 15% de TiO₂ con un valor de 9.46.

5.2.5 Prueba de Rodamina en especímenes prismáticos rectangulares medido a las 5 horas.

5.2.5.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-33	16.53	13.50	10.54	9.33	8.67	7.71
R-34	16.18	13.15	10.19	8.98	8.32	7.36
R-35	16.60	13.57	10.61	9.40	8.74	7.78
R-36	16.23	13.20	10.24	9.03	8.37	7.41
R-37	16.10	13.07	10.11	8.90	8.24	7.28
R-38	16.03	13.00	10.04	8.83	8.17	7.21
R-39	16.30	13.27	10.31	9.10	8.44	7.48
R-40	16.75	13.72	10.76	9.55	8.89	7.93
Promedio	16.34	13.31	10.35	9.14	8.48	7.52

Tabla 18: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido (t=5h)

5.2.5.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=5h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
16.34	13.31	10.35	9.14	8.48	7.52

Tabla 19: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=5h).

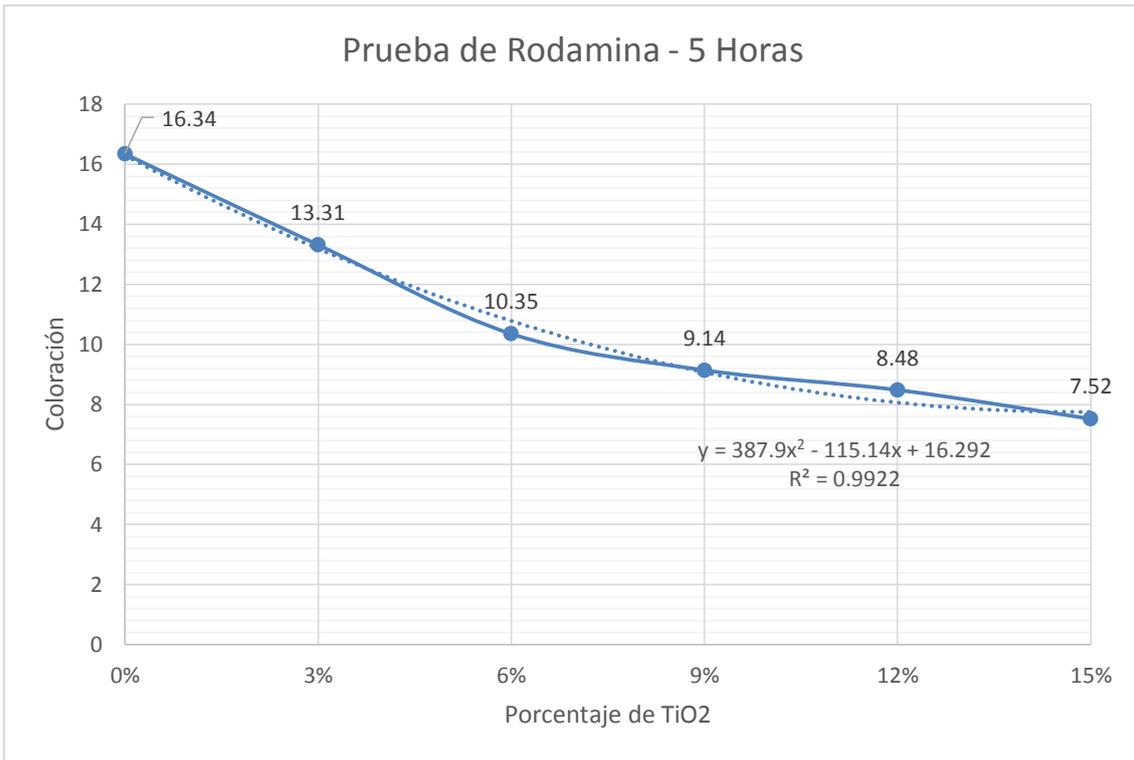


Gráfico 29: Prueba de Rodamina – 5 Horas. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 18 y 19 y el gráfico 29 donde se obtuvieron los promedios medidos a las 5 horas de cada tratamiento se observó que existe un descenso de la coloración conforme se incluyó el TiO₂ siguiendo la tendencia marcada en los resultados obtenidos en 1, 2 y 4 horas.

Además los valores de coloración también descendieron respecto a los obtenidos en las mediciones de 0, 1, 2 y 4 horas.

El valor más alto de coloración fue del tratamiento sin TiO₂ con un valor de 16.34 y el valor más bajo de la coloración fue el tratamiento con 15% de TiO₂ con un valor de 7.52.

5.2.6 Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 10 horas.

5.2.6.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-41	16.38	11.82	8.67	7.45	6.26	5.16
R-42	16.03	11.47	8.32	7.10	5.91	4.81
R-43	16.45	11.89	8.74	7.52	6.33	5.23
R-44	16.08	11.52	8.37	7.15	5.96	4.86
R-45	15.95	11.39	8.24	7.02	5.83	4.73
R-46	15.88	11.32	8.17	6.95	5.76	4.66
R-47	16.15	11.59	8.44	7.22	6.03	4.93
R-48	16.60	12.04	8.89	7.67	6.48	5.38
Promedio	16.19	11.63	8.48	7.26	6.07	4.97

Tabla 20: Prueba de Rodamina en especímenes medido a las 10 horas (t=10h)

5.2.6.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=10h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
16.19	11.63	8.48	7.26	6.07	4.97

Tabla 21: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=10h).

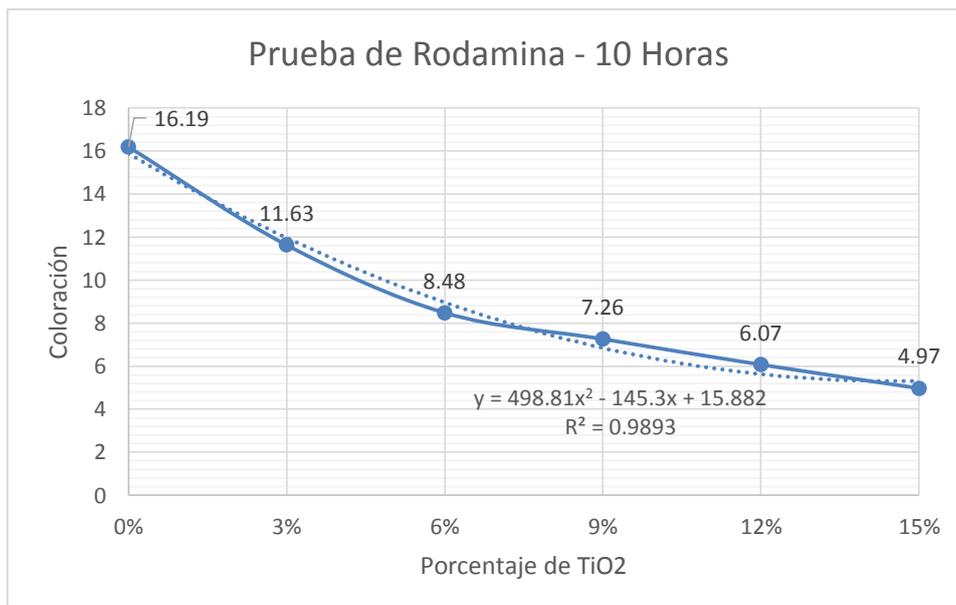


Gráfico 30: Prueba de Rodamina – 10 Horas. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 20 y 21 y el gráfico 30 donde se obtuvieron los promedios medidos a las 10 horas de cada tratamiento, se observó que existió un descenso de la coloración conforme se incluyó el TiO₂ siguiendo la tendencia marcada en los resultados obtenidos en 1, 2, 4 y 5 horas.

Además los valores de coloración también descendieron respecto a los obtenidos en las mediciones de 0, 1, 2, 4 y 5 horas.

El valor más alto de coloración fue del tratamiento sin TiO₂ con un valor de 16.19 y el valor más bajo de la coloración fue el tratamiento con 15% de TiO₂ con un valor de 4.97.

5.2.7 Prueba de Rodamina en especímenes prismáticos rectangulares medido a las 20 horas.

5.2.7.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-49	15.45	9.97	6.02	4.29	3.91	3.83
R-50	15.10	9.62	5.67	3.94	3.56	3.48
R-51	15.52	10.04	6.09	4.36	3.98	3.90
R-52	15.15	9.67	5.72	3.99	3.61	3.53
R-53	15.02	9.54	5.59	3.86	3.48	3.40
R-54	14.95	9.47	5.52	3.79	3.41	3.33
R-55	15.22	9.74	5.79	4.06	3.68	3.60
R-56	15.67	10.19	6.24	4.51	4.13	4.05
Promedio	15.26	9.78	5.83	4.1	3.72	3.64

Tabla 22: Prueba de Rodamina en espécimen prismático rectangular medido t=20h

5.2.7.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=20h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
15.26	9.78	5.83	4.1	3.72	3.64

Tabla 23: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=20h).

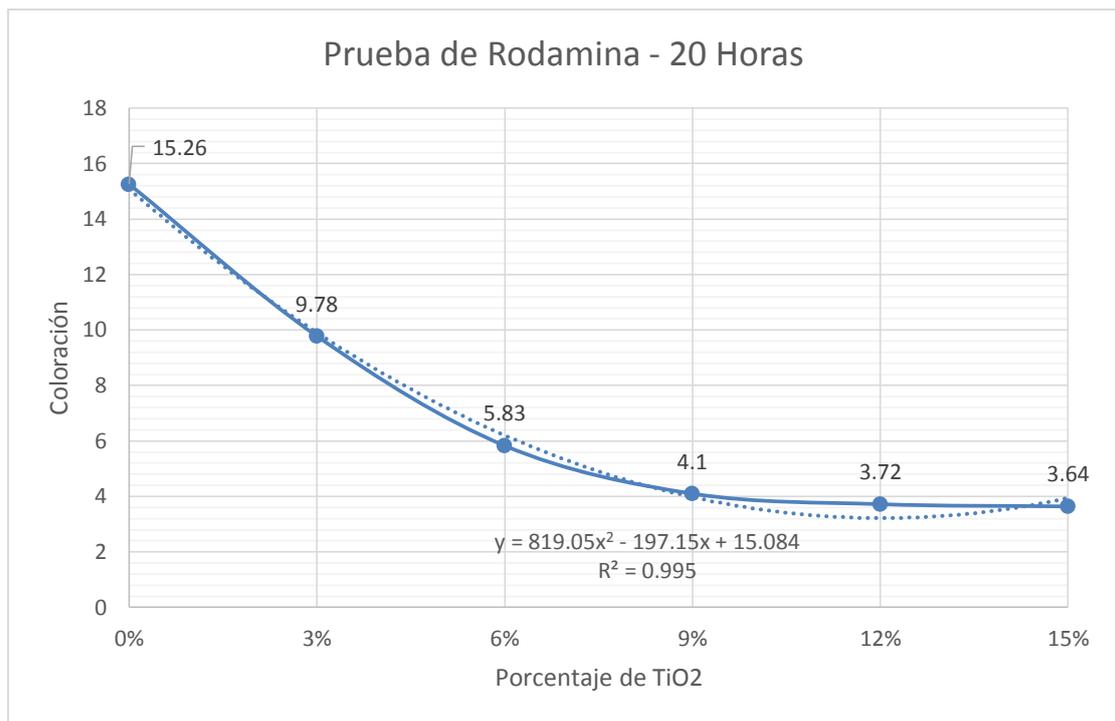


Gráfico 31: Prueba de Rodamina – 20 Horas. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 22 y 23 y el gráfico 31 donde se obtuvieron los promedios medidos a las 20 horas de cada tratamiento, se observó que existe un descenso de la coloración conforme se incluyó el TiO₂ siguiendo la tendencia marcada en los resultados obtenidos en 1, 2, 4, 5 y 10 horas.

Además los valores de coloración también descendieron respecto a los obtenidos en las mediciones de 0, 1, 2, 4, 5 y 10 horas.

El valor más alto de coloración fue del tratamiento sin TiO₂ con un valor de 15.26 y el valor más bajo de la coloración fue el tratamiento con 15% de TiO₂ con un valor de 3.64.

5.2.8 Prueba de Rodamina en especímenes rectangulares medido a las 26 horas.

5.2.8.1 Análisis del concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Espécimen	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
R-49	14.53	7.46	5.31	3.43	3.18	2.93
R-50	14.18	7.11	4.96	3.08	2.83	2.58
R-51	14.60	7.53	5.38	3.50	3.25	3.00
R-52	14.23	7.16	5.01	3.13	2.88	2.63
R-53	14.10	7.03	4.88	3.00	2.75	2.50
R-54	14.03	6.96	4.81	2.93	2.68	2.43
R-55	14.30	7.23	5.08	3.20	2.95	2.70
R-56	14.75	7.68	5.53	3.65	3.40	3.15
Promedio	14.34	7.27	5.12	3.24	2.99	2.74

Tabla 24: Prueba de Rodamina en espécimen rectangular medido a las 26 horas (t=26h)

5.2.8.2 Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=26h)

0%	3%	6%	9%	12%	15%
14.34	7.27	5.12	3.24	2.99	2.74

Tabla 25: Resumen de los promedios para diferentes porcentajes de TiO₂ (t=26h).

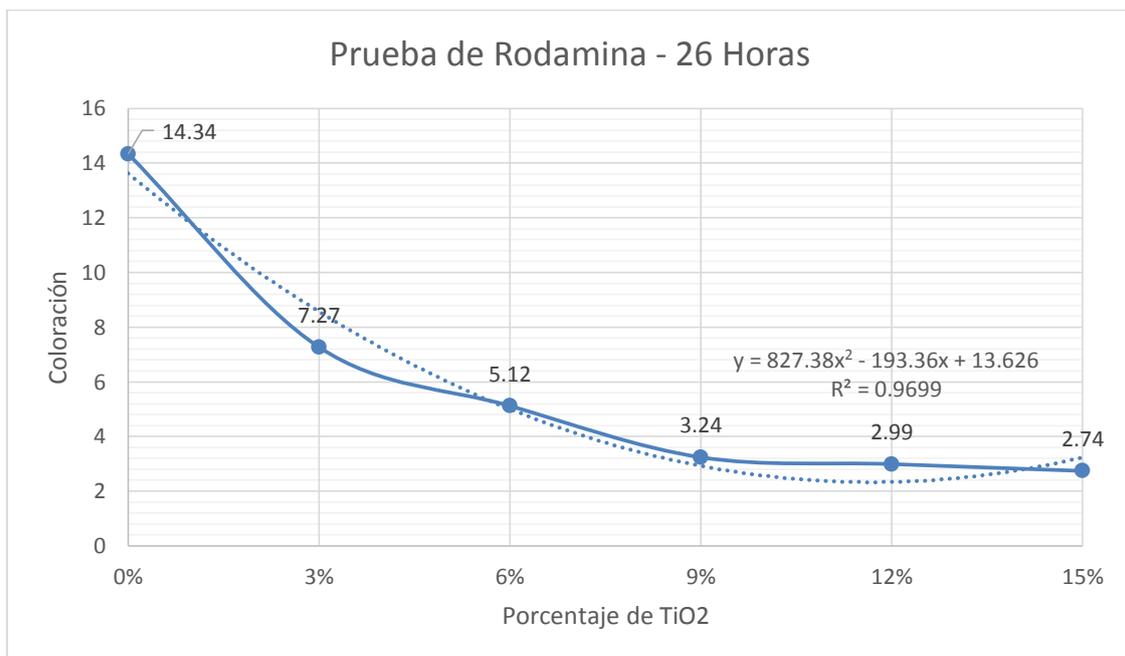


Gráfico 32: Prueba de Rodamina – 26 Horas. Coloración vs % TiO₂

En la tabla 24 y 25 y el gráfico 32 donde se obtuvieron los promedios medidos a las 26 horas de cada tratamiento, se observó que existe un descenso de la coloración conforme se incluyó el TiO₂ siguiendo la tendencia marcada en los resultados obtenidos en 1, 2, 4, 5, 10 y 20 horas.

Además los valores de coloración también descendieron respecto a los obtenidos en las mediciones de 0, 1, 2, 4, 5, 10 y 20 horas.

El valor más alto de coloración fue del tratamiento sin TiO₂ con un valor de 14.34 y el valor más bajo de la coloración fue el tratamiento con 15% de TiO₂ con un valor de 2.74.

5.2.9 Análisis estadístico de prueba de Rodamina

Al igual que en las pruebas de resistencia a la compresión donde se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de rango múltiple Tukey, en la prueba de Rodamina se hizo de igual forma siendo la variable coloración para los tiempos que se utilizaron en las fórmulas de R4 y R 26, es decir los tiempos a las 0, 4 y 26 horas.

Debimos iniciar en el tiempo 0 horas pero como se mencionó líneas arriba decidimos tomar la misma medida para todos los tratamientos en esa hora de medición, por lo que no fue necesario realizar ni pruebas de ANOVA ni de Tukey ya que obviamente pertenecieron al mismo grupo estadístico.

5.2.9.1 Análisis estadístico de coloración al tiempo de 4 horas.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA), de la variable coloración al tiempo de 4 horas. Así mismo se realizó la prueba de rango múltiple de Tukey, para observar la diferencia estadística entre los tratamientos. Para el análisis de varianza (ANOVA) y Tukey se utilizó el programa Minitab 16.

El valor p fue 0.000. En los cálculos obtenidos para ANOVA, el valor p (0.000) proporcionó suficiente evidencia de que la resistencia a la compresión difirió cuando α es 0.05. En los intervalos de confianza individual del 95%, se observó que no todos los

intervalos se superponen, lo que da crédito a la teoría de que las medias fueron estadísticamente distintas.

La prueba de Tukey proporcionó cinco conjuntos de intervalos de comparación múltiple: Media del concreto con 0% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 3, 6, 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 3% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 6, 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 6% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 9% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 12% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 15% TiO₂.

El primer intervalo del primer conjunto de salida de Tukey fue -3.0045 a -2.2355. Es decir, la media de la coloración con 0% TiO₂ menos la media de la coloración con 3% TiO₂ fue una cifra entre -3.0045 a -2.2355. Debido a que el intervalo no incluyó a cero, la diferencia entre la coloración de los dos tratamientos fue estadísticamente significativa. Se interpretó de modo similar los demás resultados de la prueba de Tukey. Las medias para todos los tratamientos difirieron significativamente debido a que casi ningún intervalo de confianza incluyó el cero. Por este motivo, casi todos los tratamientos tuvieron coloraciones promedio significativamente distintas.

En conclusión en el resultado de Análisis de Varianza (ANOVA) al ser el valor de $P < 0.05$ se observó que la fuente de variabilidad de los tratamientos tuvo diferencia estadística entre los promedios de coloración. Y, de acuerdo a la prueba de rango múltiple de Tukey el tratamiento sin TiO₂, el de 3%, 6%, 9% y 12% de TiO₂ fueron significativamente diferentes (letras diferentes); solamente el tratamiento con 15% de TiO₂ fue significativamente similar al tratamiento con 12% de TiO₂. A continuación se mostraron los gráficos generados por las comparaciones realizadas por ANOVA y TUKEY.

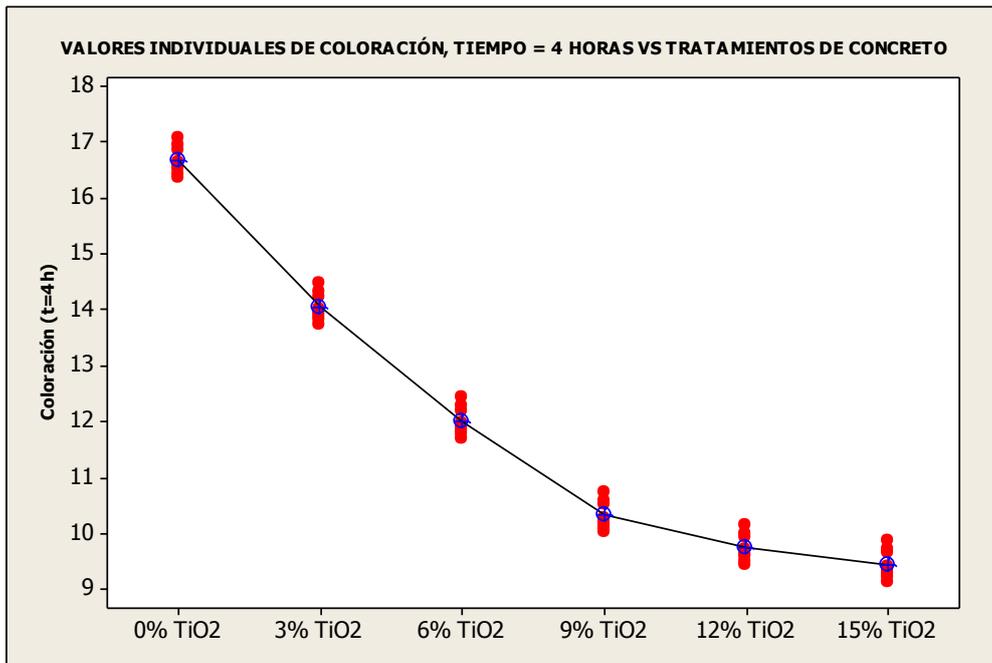


Gráfico 33: Valores individuales de coloración vs. tratamiento de C°

El gráfico 33 de valores individuales mostró que cada tratamiento tiene una coloración promedio diferente. El tratamiento sin TiO₂ tuvo la mayor coloración y el tratamiento con 15% de TiO₂ tuvo la menor coloración. Se apreció además que conforme aumentó el porcentaje de TiO₂ la coloración promedio disminuyó.

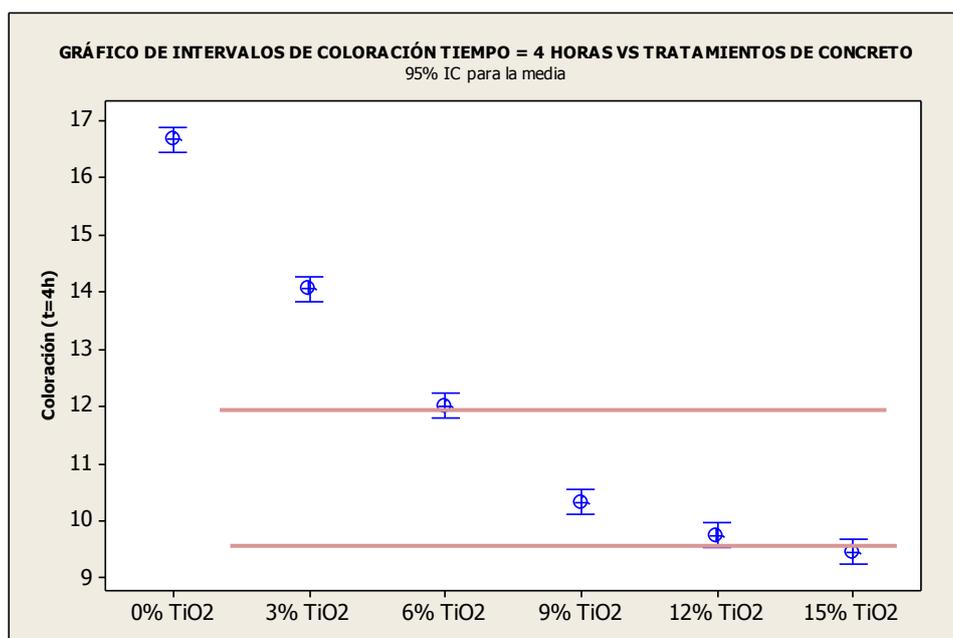


Gráfico 34: Gráfico de intervalos.

El gráfico 34 mostró los intervalos de coloración de cada tratamiento. Así mismo, la línea roja nos confirmó lo obtenido en las pruebas de ANOVA y Tukey, es decir, que los tratamientos difirieron estadísticamente pues no atraviesa a más de un tratamiento.

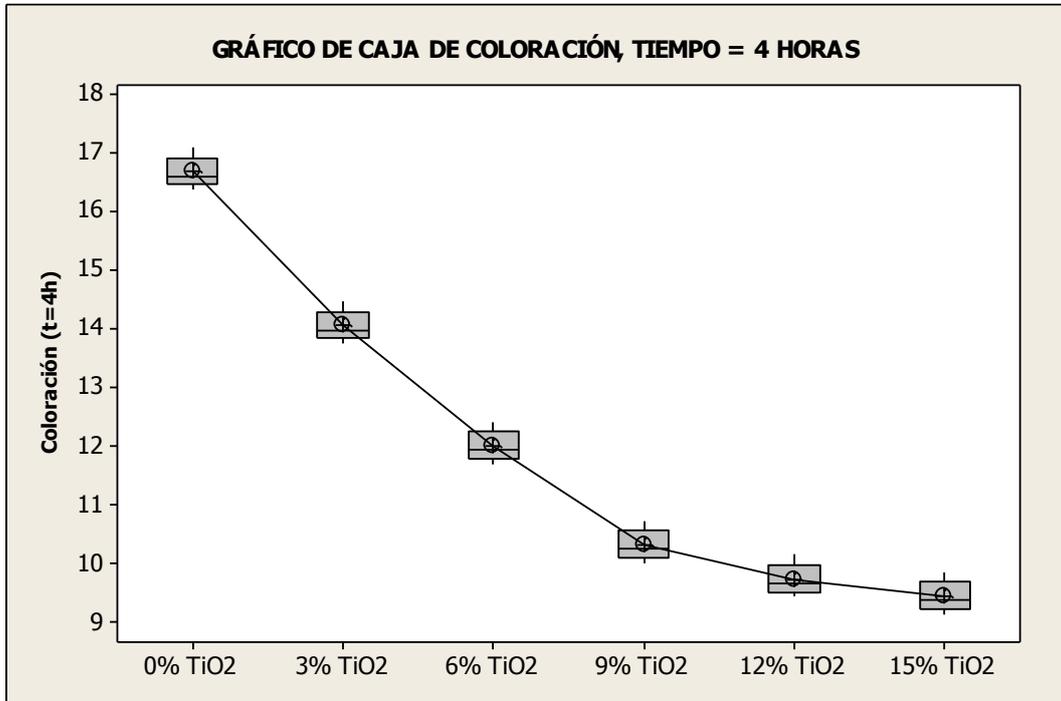


Gráfico 35: Gráfico de caja de coloración, tiempo = 4 horas.

El gráfico 35 indicó que la coloración varía entre los distintos tratamientos, lo que resultó coherente con el gráfico 33 de valores individuales. Los gráficos de caja de todos los tratamientos no indicaron la presencia de valores atípicos (señalados con *) que corresponden a una coloración con muy bajo valor o con muy alto valor.

5.2.9.2 Análisis estadístico de coloración al tiempo de 26 horas.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA), de la variable coloración al tiempo de 26 horas. Así mismo se realizó la prueba de rango múltiple de Tukey, para observar la diferencia estadística entre los tratamientos. Para el análisis de varianza (ANOVA) y Tukey se utilizó el programa Minitab 16.

El valor p fue 0.000. En los cálculos obtenidos para ANOVA, el valor p (0.000) proporcionó suficiente evidencia de que la resistencia a la compresión difirió cuando α es 0.05. En los intervalos de confianza individual del 95%, se observó que no todos los

intervalos se superponen, lo que da crédito a la teoría de que las medias fueron estadísticamente distintas.

La prueba de Tukey proporcionó cinco conjuntos de intervalos de comparación múltiple: Media del concreto con 0% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 3, 6, 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 3% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 6, 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 6% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 9, 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 9% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 12 y 15% TiO₂. Media del concreto con 12% TiO₂ restada de las medias de los tratamientos con 15% TiO₂.

El primer intervalo del primer conjunto de salida de Tukey fue -7.454 a -6.686. Es decir, la media de la coloración sin TiO₂ menos la media de la coloración con 3% TiO₂ fue una cifra entre -7.454 a -6.686. Debido a que el intervalo no incluyó a cero, la diferencia entre la coloración de los dos tratamientos fue estadísticamente significativa. Se interpretó de modo similar los demás resultados de la prueba de Tukey. Las medias para todos los tratamientos difirieron significativamente debido a que todos los intervalos de confianza excluyeron el cero. Por este motivo, todos los tratamientos tuvieron coloraciones promedio significativamente distintas.

En conclusión en el resultado de Análisis de Varianza (ANOVA) al ser el valor de $p < 0.05$ se observó que la fuente de variabilidad de los tratamientos tuvo diferencia estadística entre los promedios de coloración. Y, de acuerdo a la prueba de rango múltiple de Tukey todos los tratamientos fueron significativamente diferentes a excepción de los tratamientos con 9% y 12% de TiO₂ los cuales compartieron la letra D y por lo tanto fueron similares estadísticamente entre sí, además de los tratamientos con 12% y 15% de TiO₂ los cuales compartieron la letra E y por lo tanto fueron similares estadísticamente entre sí. A continuación se mostraran los gráficos generados por las comparaciones realizadas por ANOVA y TUKEY.

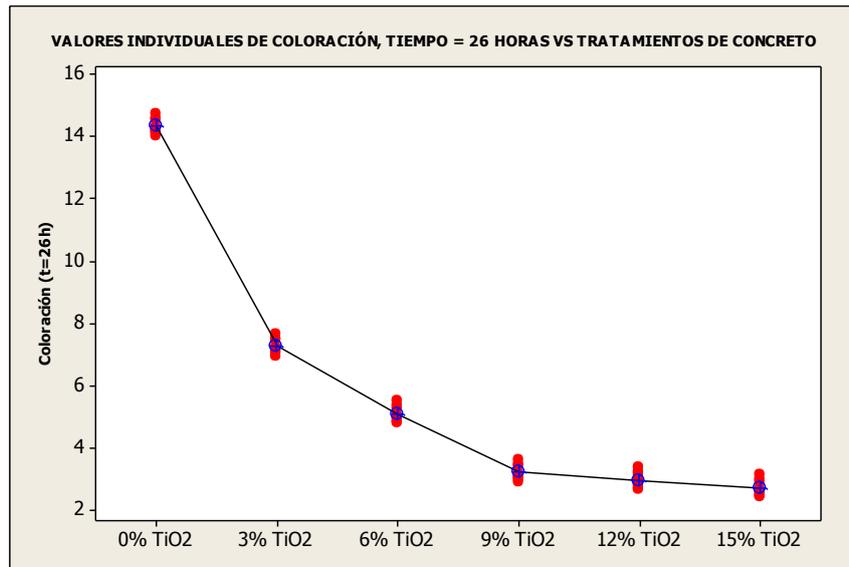


Gráfico 36: Valores individuales de coloración vs. tratamiento de C°.

El gráfico 36 de valores individuales mostró que cada tratamiento tuvo una coloración promedio diferente. El tratamiento sin TiO₂ tuvo la mayor coloración y el tratamiento con 15% de TiO₂ tuvo la menor coloración. Se apreció además que conforme aumentó el porcentaje de TiO₂ la coloración promedio disminuyó.

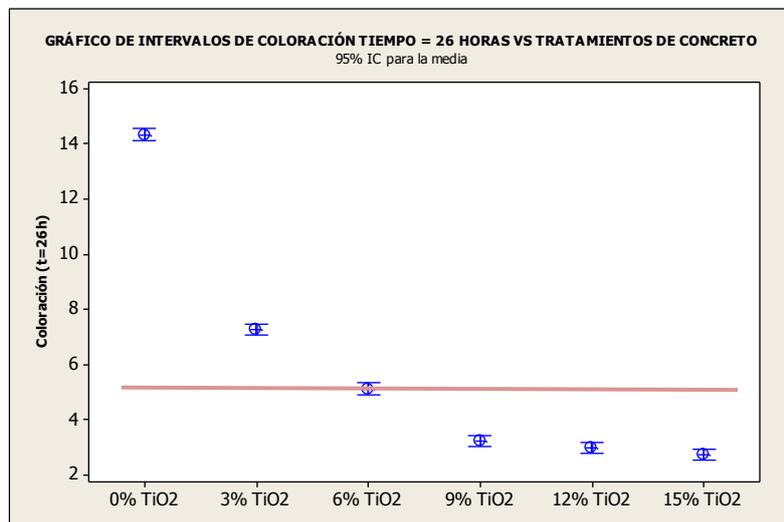


Gráfico 37: Gráfico de intervalos.

El gráfico 37 mostró los intervalos de coloración de cada tratamiento. Así mismo, la línea roja nos confirmó lo obtenido en las pruebas de ANOVA y Tukey, es decir, que los tratamientos difirieron estadísticamente pues no atraviesa a más de un tratamiento.

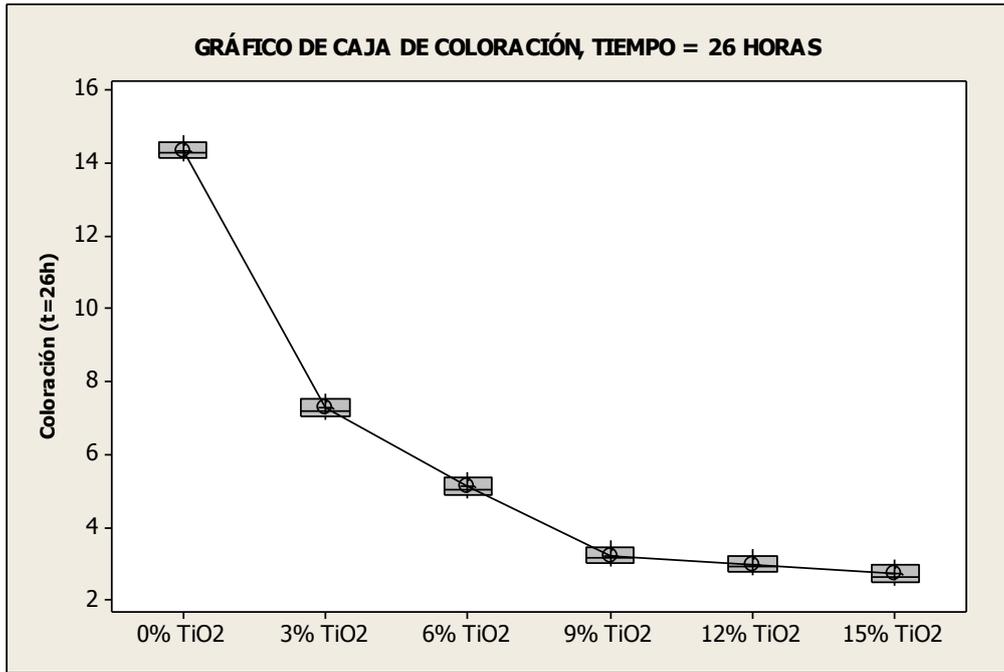


Gráfico 38: Gráfico de caja de coloración, tiempo = 26 horas.

El gráfico 38 indicó que la coloración varió entre los distintos tratamientos, lo que resultó coherente con el gráfico 36 de valores individuales. Los gráficos de caja de todos los tratamientos no indicaron la presencia de valores atípicos (señalados con *) que corresponden a una coloración con muy bajo valor o con muy alto valor.

5.2.10 Análisis de la coloración promedio y tiempo en horas para los distintos tratamientos de concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

Tiempo (h)	0% TiO2	3% TiO2	6% TiO2	9% TiO2	12% TiO2	15% TiO2
0 horas	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
1 hora	17.16	16.23	15.51	14.68	14.12	13.63
2 horas	17.04	15.47	14.63	13.33	12.69	12.59
4 horas	16.68	14.06	12.02	10.33	9.75	9.46
5 horas	16.34	13.31	10.35	9.14	8.48	7.52
10 horas	16.19	11.63	8.48	7.26	6.07	4.97
20 horas	15.26	9.78	5.83	4.1	3.72	3.64
26 horas	14.34	7.27	5.12	3.24	2.99	2.74

Tabla 26: Coloración promedio y tiempo en horas para los distintos tratamientos de concreto con diferentes porcentajes de TiO₂

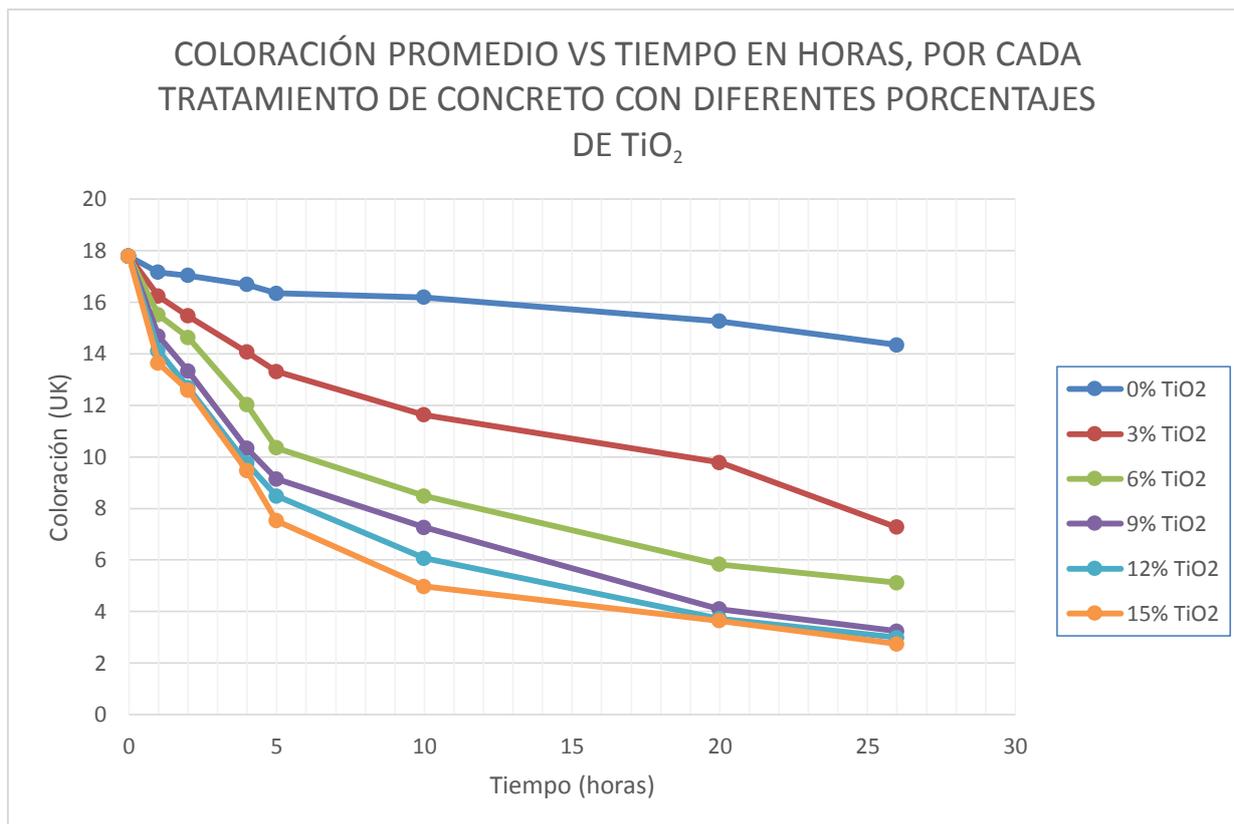


Gráfico 39: Coloración promedio vs. Edad, por tratamiento de concreto con diferentes % TiO₂

En el gráfico 39 se observó que todos los tratamientos tuvieron su inicio en el mismo punto de partida para una mejor observación y comparación. La degradación del color o decoloración se midió cuantitativamente mediante la absorción de la luz como una función de longitud de onda al reflejar la luz desde la superficie de concreto en la que la Rodamina fue depositada.

Se observó que hay también la degradación del color en muestras que no contienen fotocatalizador (tratamiento con 0% TiO₂) y esto pone de manifiesto una importante fuente de tergiversación de la eficiencia del fotocatalizador en las muestras que no utilizan controles. La pérdida de color por degradación fotocatalítica del colorante es bastante común, de hecho; este efecto se observa en telas de colores al blanquearse por la luz del sol. Sin embargo, aun teniendo en cuenta este efecto, se puede demostrar que hay una degradación mejorada de color en presencia del fotocatalizador.

El tratamiento sin TiO₂ fue el que obtuvo menos decoloración durante el tiempo de estudio (26 horas) en comparación con el resto de tratamientos, esto debido a que no

contó con el fotocatalizador dióxido de titanio. El rango de valores para el tratamiento base inició en la medida $t=0$ horas y fue 17.78 y finalizó en la medida $t=26$ horas y fue 14.34.

El tratamiento con 3% de TiO_2 sufrió un descenso considerable en la coloración a comparación del tratamiento sin TiO_2 , esto debido a la inclusión de dióxido de titanio. El rango de valores para el tratamiento con 3% de TiO_2 inició en la medida $t=0$ horas y fue 17.78 y finalizó en la medida $t=26$ horas y fue 7.27; se observó que la medida final se redujo casi a la mitad con respecto el tratamiento base, por lo que se dedujo que la sola inclusión del TiO_2 hizo que la decoloración se acelere.

El tratamiento con 6% de TiO_2 sufrió un descenso considerable en la coloración a comparación del tratamiento sin TiO_2 , esto debido a la inclusión de dióxido de titanio, pero a comparación del tratamiento con 3% de TiO_2 el descenso no fue mucho. El rango de valores para el tratamiento con 6% de TiO_2 inició en la medida $t=0$ horas y fue 17.78 y finalizó en la medida $t=26$ horas y fue 5.12.

El tratamiento con 9% de TiO_2 sufrió un descenso considerable en la coloración a comparación del tratamiento sin TiO_2 , esto debido a la inclusión de dióxido de titanio, pero a comparación del tratamiento con 3% y 6% de TiO_2 el descenso no fue mucho. El rango de valores para el tratamiento con 9% de TiO_2 inició en la medida $t=0$ horas y fue 17.78 y finalizó en la medida $t=26$ horas y fue 3.24, se observó que la medida final se redujo considerablemente con respecto el tratamiento sin TiO_2 , pero la aceleración de decoloración disminuyó respecto a lo obtenido inicialmente en los otros tratamientos.

El tratamiento con 12% de TiO_2 sufrió un descenso considerable en la coloración a comparación del tratamiento sin TiO_2 , esto debido a la inclusión de dióxido de titanio, pero a comparación del tratamiento con 9% de TiO_2 el descenso no fue mucho. El rango de valores para el tratamiento con 12% de TiO_2 inició en la medida $t=0$ horas y fue 17.78 y finalizó en la medida $t=26$ horas y fue 2.99, se observó que la medida final se redujo considerablemente con respecto el tratamiento sin TiO_2 , pero la aceleración de decoloración siguió disminuyendo.

El tratamiento con 15% de TiO_2 sufrió un descenso considerable en la coloración a comparación del tratamiento sin TiO_2 , esto debido a la inclusión de dióxido de titanio, pero a comparación del tratamiento con 12% de TiO_2 el descenso no fue mucho. El rango de valores para el tratamiento con 15% de TiO_2 inició en la medida $t=0$ horas y fue 17.78

y finalizó en la medida $t=26$ horas y fue 2.74, se observó que la medida final se redujo considerablemente con respecto el tratamiento sin TiO_2 , pero la aceleración de decoloración siguió disminuyendo a tal punto que en la parte final de la gráfica entre los tratamientos con 15% de TiO_2 y 12% de TiO_2 empezaron a unirse.

A partir del tratamiento con 6% de TiO_2 hasta el tratamiento con 15% de TiO_2 la aceleración de la decoloración disminuyó considerablemente, esto sucedió porque el dióxido de titanio no tiene otros poros que copar y por lo tanto empieza a ya no ser necesaria la mayor incorporación del mismo.

5.2.11 Análisis de concreto fotocatalítico con la prueba de Rodamina

La prueba de Rodamina se basa en saber si el elemento es fotocatalítico o no (en nuestro caso el concreto) a través de las fórmulas planteadas en el marco teórico. Dichas fórmulas necesitaron la medida en el tiempo inicial ($t=0h$), a las 4 horas y a las 26 horas para cada tratamiento propuesto.

5.2.11.1 Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento sin TiO_2

En la tabla 27 se presentó todas las medidas obtenidas (0 horas – 26 horas) y se sombreó las medidas necesarias para aplicar las fórmulas del ensayo de rodamina.

Tiempo (h)	0% TiO_2
0 horas	17.78
1 hora	17.16
2 horas	17.04
4 horas	16.68
5 horas	16.34
10 horas	16.19
20 horas	15.26
26 horas	14.34
R4	6.19
R26	19.35

Tabla 27: Medidas de decoloración (0 – 26 horas) para el tratamiento con 0% TiO_2

En la tabla 27 se obtuvieron los valores R4 y R26. Para que el concreto sea considerado fotocatalítico y por lo tanto autolimpiable, el valor R4 tiene que ser mayor a 20% y el valor R26 mayor a 50%. Vemos que el valor R4 de este tratamiento fue menor a 20% ($6.19\% < 20\%$) y el valor R26 de este tratamiento fue menor a 50% ($19.35\% < 50\%$).

Bastaría que uno de los valores no cumpla para que el concreto no sea considerado fotocatalítico y en este caso no se cumplió con ninguno de los dos valores, por lo que el concreto sin TiO_2 no fue fotocatalítico ni autolimpiable.

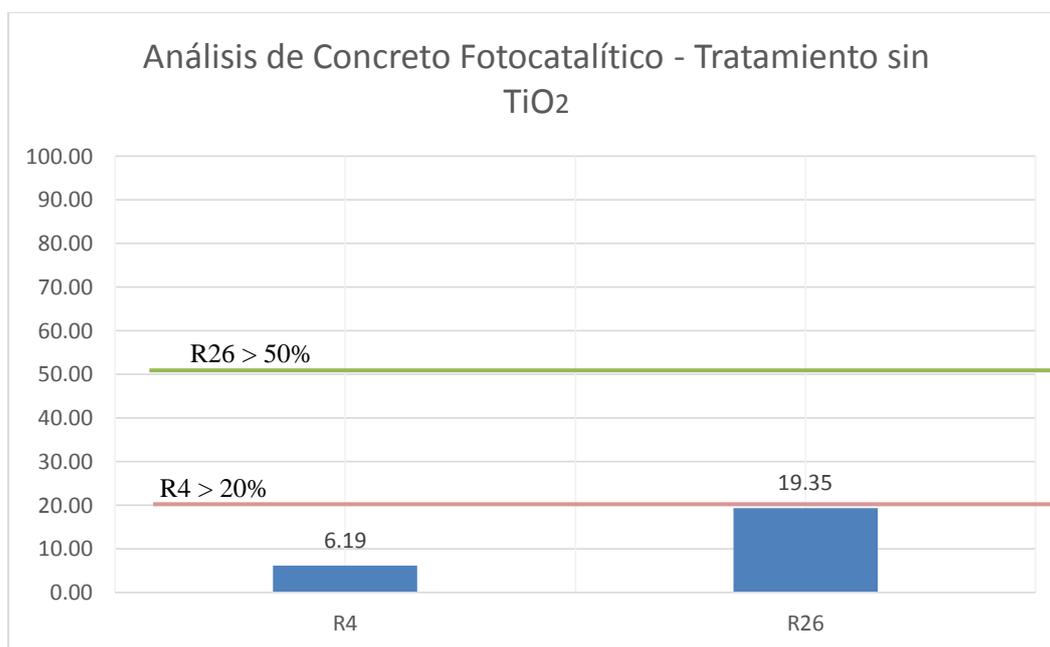


Gráfico 40: Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento sin TiO_2

En el gráfico 40 observamos una línea roja que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R4, de igual forma vemos una línea verde que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R26. En ninguno de los casos para el tratamiento en estudio se cumplió con los valores R4 y R26.

5.2.11.2 Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 3% TiO_2

En la tabla siguiente se presentó todas las medidas obtenidas (0 horas – 26 horas) y se sombreó las medidas necesarias para aplicar las fórmulas del ensayo de rodamina.

Tiempo (h)	3% TiO ₂
0 horas	17.78
1 hora	16.23
2 horas	15.47
4 horas	14.06
5 horas	13.31
10 horas	11.63
20 horas	9.78
26 horas	7.27
R4	20.92
R26	59.11

Tabla 28: Medidas de decoloración (0 – 26 horas) tratamiento con 3% TiO₂

En la tabla 28 se obtuvieron los valores R4 y R26. Vemos que el valor R4 de este tratamiento fue mayor a 20% (20.92% > 20%) y el valor R26 de este tratamiento fue mayor a 50% (59.11% > 50%). En este caso los dos valores cumplieron con lo necesario, por lo que el concreto con 3% de TiO₂ fue fotocatalítico y autolimpiable.

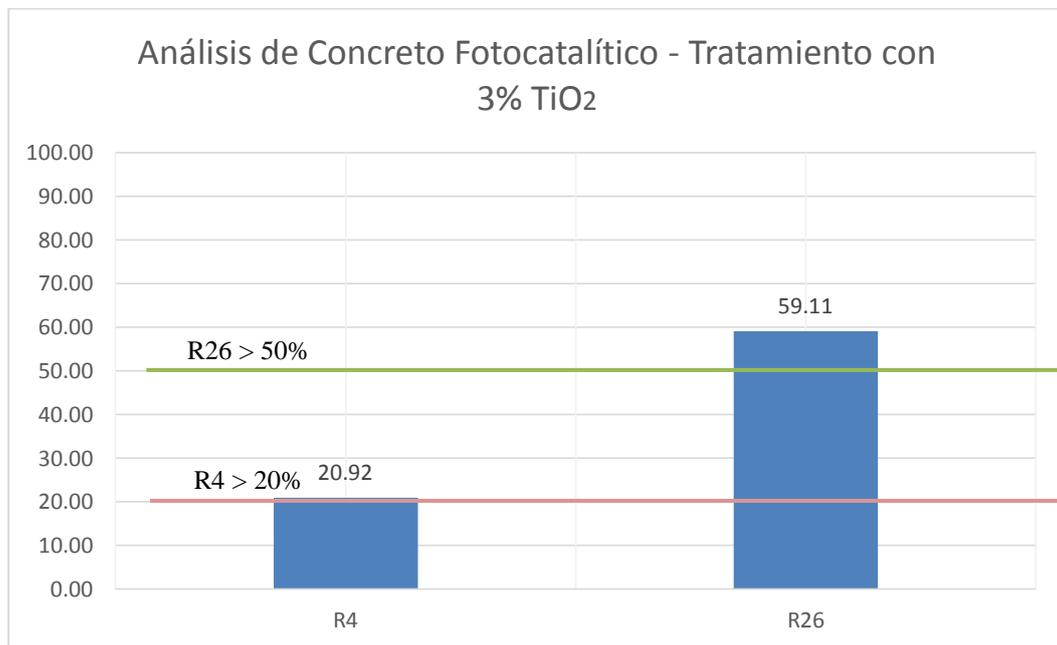


Gráfico 41: Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 3% TiO₂

En el gráfico 41 se observó una línea roja que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R4, de igual forma vemos una línea verde que nos indica el valor

mínimo que debe cumplir el resultado R26. En ambos casos para el tratamiento en estudio se cumplieron con los valores R4 y R26.

5.2.11.3 Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 6% TiO₂

Tiempo (h)	6% TiO ₂
0 horas	17.78
1 hora	15.51
2 horas	14.63
4 horas	12.02
5 horas	10.35
10 horas	8.48
20 horas	5.83
26 horas	5.12
R4	32.40
R26	71.20

Tabla 29: Medidas de decoloración (0 – 26 horas) para el tratamiento con 6% TiO₂

En la tabla 29 se obtuvieron los valores R4 y R26. Vemos que el valor R4 de este tratamiento fue mayor a 20% (32.40% > 20%) y el valor R26 de este tratamiento fue mayor a 50% (71.20% > 50%). En este caso los dos valores cumplieron con lo necesario, por lo que el concreto con 6% de TiO₂ fue fotocatalítico y autolimpiable.

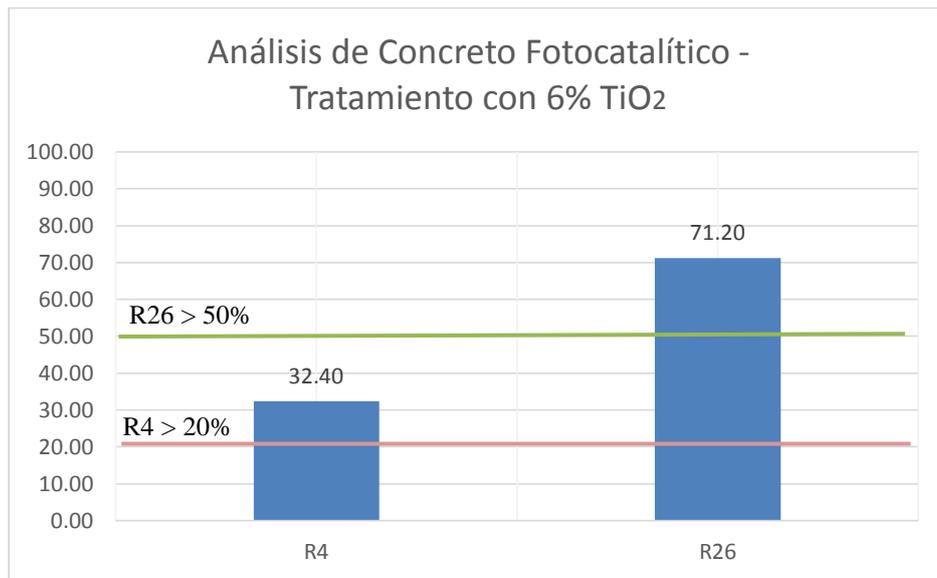


Gráfico 42: Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 6% TiO₂

En el gráfico 42 se observó una línea roja que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R4, de igual forma vemos una línea verde que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R26. En ambos casos para el tratamiento en estudio se cumplieron con los valores R4 y R26.

5.2.11.4 Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 9% TiO₂

Tiempo (h)	9% TiO ₂
0 horas	17.78
1 hora	14.68
2 horas	13.33
4 horas	10.33
5 horas	9.14
10 horas	7.26
20 horas	4.1
26 horas	3.24
R4	41.90
R26	81.78

Tabla 30: Medidas de decoloración (0 – 26 horas) para el tratamiento con 9% TiO₂

En la tabla 30 se obtuvieron los valores R4 y R26. Vemos que el valor R4 de este tratamiento fue mayor a 20% (41.90% > 20%) y el valor R26 de este tratamiento fue mayor a 50% (81.78% > 50%). En este caso los dos valores cumplieron con lo necesario, por lo que el concreto con 9% de TiO₂ fue fotocatalítico y autolimpiable.

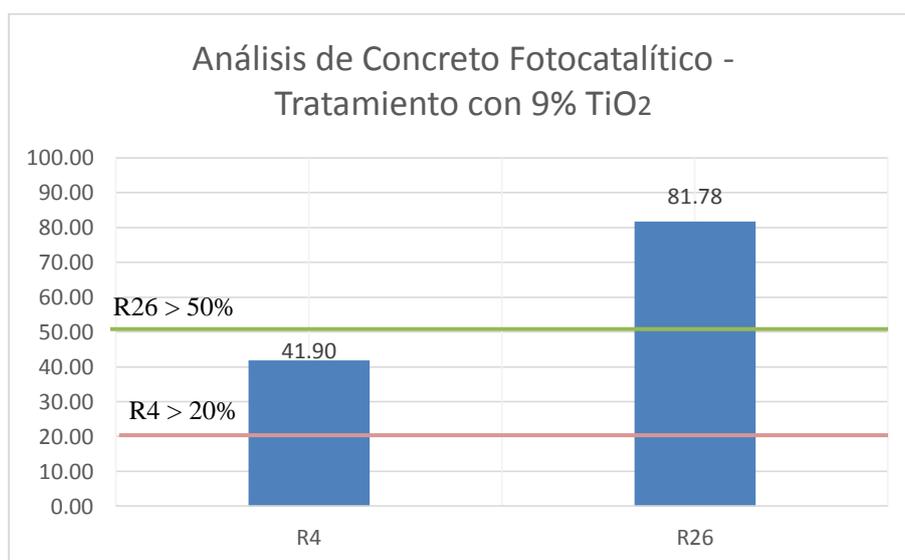


Gráfico 43: Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 9% TiO₂

En el gráfico 43 se observó una línea roja que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R4, de igual forma vemos una línea verde que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R26. En ambos casos para el tratamiento en estudio se cumplieron con los valores R4 y R26.

5.2.11.5 Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 12% TiO₂

Tiempo (h)	12% TiO ₂
0 horas	17.78
1 hora	14.12
2 horas	12.69
4 horas	9.75
5 horas	8.48
10 horas	6.07
20 horas	3.72
26 horas	2.99
R4	45.16
R26	83.18

Tabla 31: Medidas de decoloración (0 – 26 horas) tratamiento con 12% TiO₂

En la tabla 31 se obtuvieron los valores R4 y R26. Vemos que el valor R4 de este tratamiento fue mayor a 20% (45.16% > 20%) y el valor R26 de este tratamiento fue mayor a 50% (83.18% > 50%). En este caso los dos valores cumplieron con lo necesario, por lo que el concreto con 12% de TiO₂ fue fotocatalítico y autolimpiable.

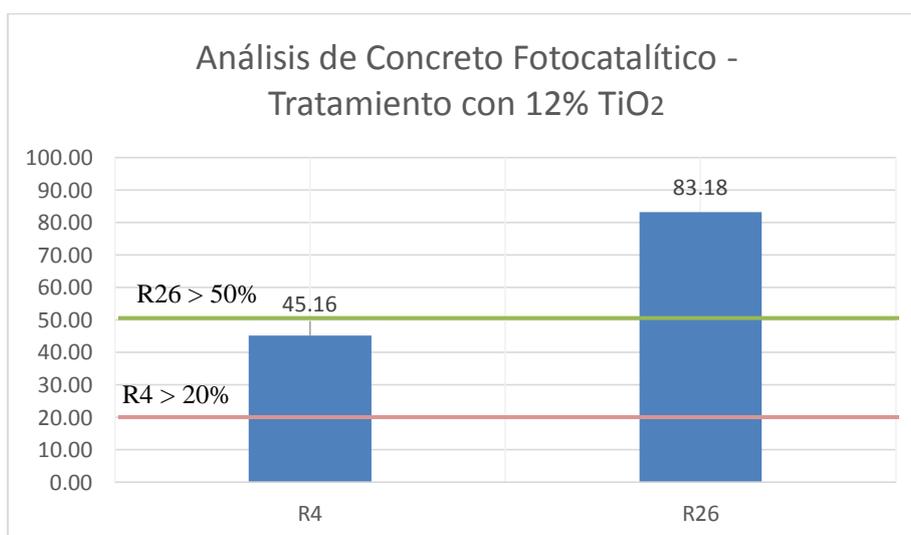


Gráfico 44: Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 12% TiO₂

En el gráfico 44 se observó una línea roja que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R4, de igual forma vemos una línea verde que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R26. En ambos casos para el tratamiento en estudio se cumplieron con los valores R4 y R26.

5.2.11.6 Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 15% TiO₂

Tiempo (h)	15% TiO ₂
0 horas	17.78
1 hora	13.63
2 horas	12.59
4 horas	9.46
5 horas	7.52
10 horas	4.97
20 horas	3.64
26 horas	2.74
R4	46.79
R26	84.59

Tabla 32: Medidas de decoloración (0 – 26 horas) para el tratamiento con 15% TiO₂

En la tabla 32 se obtuvieron los valores R4 y R26. Vemos que el valor R4 de este tratamiento fue mayor a 20% (46.79% > 20%) y el valor R26 de este tratamiento fue mayor a 50% (84.59% > 50%). En este caso los dos valores cumplieron con lo necesario, por lo que el concreto con 15% de TiO₂ fue fotocatalítico y autolimpiable.

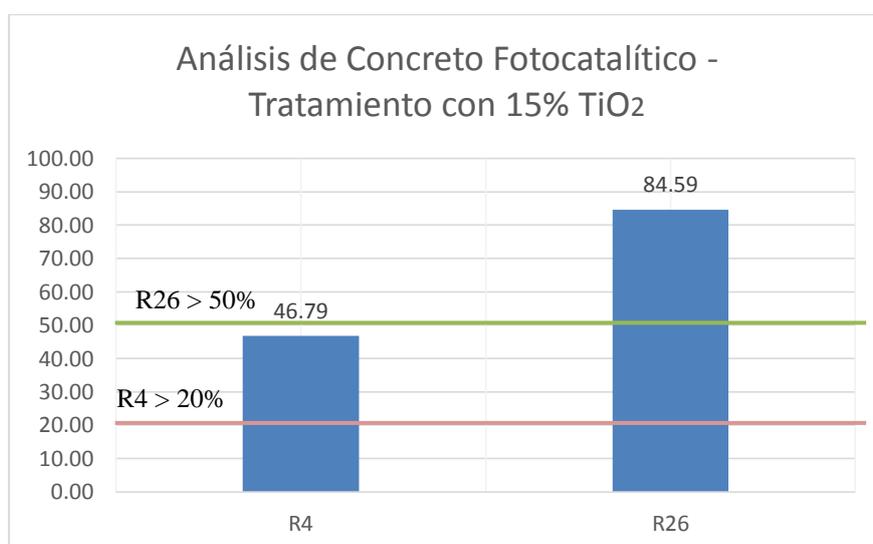


Gráfico 45: Análisis de concreto fotocatalítico – tratamiento con 15% TiO₂

En el gráfico 45 se observó una línea roja que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R4, de igual forma vemos una línea verde que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R26. En ambos casos para el tratamiento en estudio se cumplieron con los valores R4 y R26.

5.2.11.7 Resumen - análisis concreto fotocatalítico

En la tabla 33 se presentaron todas las medidas obtenidas (0 horas – 26 horas) y todos los tratamientos en estudio a fin de dar un estudio comparativo entre los resultados obtenidos de coloración.

Tiempo (h)	0% TiO ₂	3% TiO ₂	6% TiO ₂	9% TiO ₂	12% TiO ₂	15% TiO ₂
0 horas	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
1 hora	17.16	16.23	15.51	14.68	14.12	13.63
2 horas	17.04	15.47	14.63	13.33	12.69	12.59
4 horas	16.68	14.06	12.02	10.33	9.75	9.46
5 horas	16.34	13.31	10.35	9.14	8.48	7.52
10 horas	16.19	11.63	8.48	7.26	6.07	4.97
20 horas	15.26	9.78	5.83	4.1	3.72	3.64
26 horas	14.34	7.27	5.12	3.24	2.99	2.74
R4	6.19	20.92	32.40	41.90	45.16	46.79
R26	19.35	59.11	71.20	81.78	83.18	84.59

Tabla 33: Resumen de medidas de coloración (0 horas – 26 horas) para todos los tratamientos con porcentajes de TiO₂

En la tabla 33 se observó todos los valores R4 y R26 para cada tratamiento en estudio. Recordemos que para que el concreto fuera considerado fotocatalítico y por lo tanto autolimpiable, el valor R4 tiene que ser mayor a 20% y el valor R26 mayor a 50%.

Se observó que el único valor de R4 que no cumplió con lo antes mencionado fue el del tratamiento sin TiO₂ (6.19% < 20%) y el único valor de R26 que no cumplió con lo antes mencionado fue también el del tratamiento sin TiO₂ (19.35% < 50%).

Por lo tanto se dedujo que el único tratamiento que no fue fotocatalítico y autolimpiable fue el tratamiento base sin TiO₂ por no cumplir con los requerimientos solicitados.

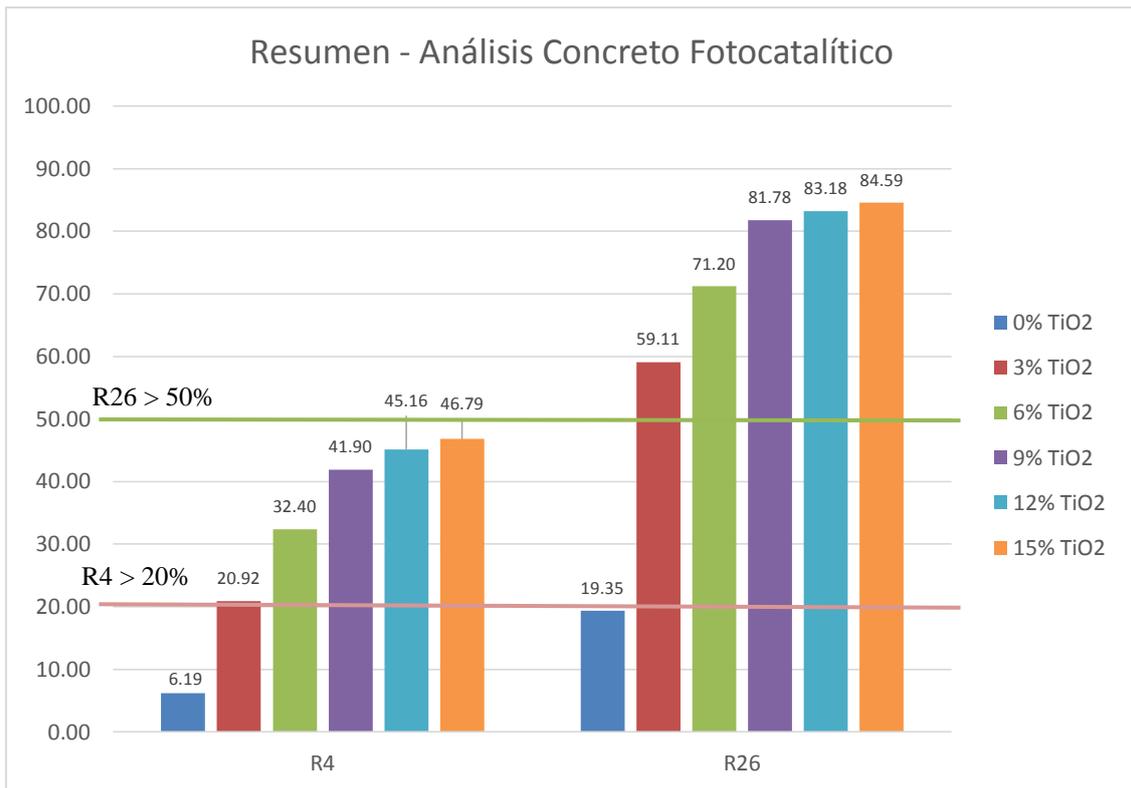


Gráfico 46: Resumen - análisis de concreto fotocatalítico

En el gráfico 46 se observó una línea roja que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R4, de igual forma se observó una línea verde que nos indica el valor mínimo que debe cumplir el resultado R26. En ambos casos el único tratamiento que no cumplió con los valores R4 y R26 fue el tratamiento con 0% TiO₂, ratificando lo visto en la tabla 33.

LECCIONES Y RECOMENDACIONES

Lecciones

La incorporación de dióxido de titanio sobre los tratamientos de concreto en estudio disminuyó su resistencia a la compresión conforme se aumentó los porcentajes de TiO_2 , pero no hubo descensos de resistencia considerables. El tratamiento sin TiO_2 presentó la mayor resistencia a la compresión a todas las edades y el tratamiento con 15% de TiO_2 presentó la menor resistencia a la compresión a todas las edades. Utilizando el análisis de varianza y la prueba de rango múltiple Tukey a la edad de 7 y 14 días, todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo estadístico; la única diferencia la encontramos a la edad de 28 días donde los tratamientos con 0, 3 y 6% de TiO_2 pertenecieron a un grupo estadístico diferente con respecto al resto de tratamientos.

La incorporación de dióxido de titanio sobre los tratamientos de concreto en estudio aumentó la decoloración en la prueba de Rodamina conforme se aumentó los porcentajes de TiO_2 . El tratamiento que presentó la mayor decoloración fue el tratamiento con 15% de TiO_2 y el tratamiento que presentó la menor decoloración fue el tratamiento sin TiO_2 . Utilizando el análisis de varianza y la prueba de rango múltiple Tukey para la prueba de Rodamina en los tratamientos en estudio y en los tiempos propuestos, se observó que todos los tratamientos pertenecieron a diferentes grupos estadísticos; por lo que fueron estadísticamente diferentes entre sí, es decir, que la incorporación y aumento del dióxido de titanio elevó la decoloración.

La prueba de Rodamina nos dio como resultado que el único tratamiento que no fue fotocatalítico y autolimpiable fue el tratamiento sin TiO_2 debido a que no cumplió con los valores mínimos estipulados para R4 y R26; contrastando con el resto de tratamiento que si fueron fotocatalíticos y autolimpiables pues obtuvieron valores mayores a los estipulados para R4 y R26. A partir del tratamiento con 6% de TiO_2 hasta el tratamiento con 15% de TiO_2 la decoloración se desaceleró considerablemente, esto porque el dióxido

de titanio no tuvo otros poros que copar y por lo tanto empieza a ya no ser necesario la mayor incorporación del mismo.

Utilizando los estudios realizados a la resistencia a la compresión y prueba de Rodamina – decoloración se concluyó que el tratamiento óptimo para la ejecución real es el tratamiento que está entre los rangos de 3% TiO_2 – 6% TiO_2 pues es un concreto que estadísticamente pertenece al mismo grupo que el concreto solicitado en cuanto a la resistencia a la compresión; es fotocatalítico y autolimpiable y el precio de fabricación no es muy elevado.

Recomendaciones

Realizar un estudio de morteros con dióxido de titanio a fin de disminuir los costos de fabricación, para así poder apreciar el trabajo superficial del dióxido de titanio y su capacidad autolimpiable.

Realizar un estudio basado en pavimentos los cuales tienen un área de exposición grande, pues a mayores área de exposición mejor desempeño del dióxido de titanio.

Realizar un estudio sobre la prueba descontaminante; dicha prueba busca demostrar que los materiales cementantes con dióxido de titanio también limpian el medio ambiente; ayudando así al cuidado del planeta tan venido a menos en estos tiempos.

Realizar un estudio de concretos hechos con cemento blanco, ya que al ser un fotocatalizador el dióxido de titanio, debe trabajar mejor con materiales que dejen pasar la luz, en este caso el cemento blanco.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. Fujishima, "Nanotechnology and Photocatalysis: Important Science and Technology for Comfortable Atmosphere," presented at the Shanghai International Nanotechnology Cooperation Symposium (SINCS 2002), Shanghai, China, July 30–Aug 1, 2002.
2. Akira Fujishima, Xintong Zhang, Donald A. Tryk, TiO₂ Photocatalysis and Related Surface Phenomena, Surface Science Reports, 15 de Diciembre 2008, Vol. 63.
3. A. Maury, N. De Belie, Estado del arte de los materiales a base de cemento que contienen TiO₂: propiedades auto-limpiantes, Materiales de Construcción, Junio 2010, Vol. 60.
4. A. Morbi, S. Cangiano, E. Borgarello, Cement Based Materials for Sustainable Development, En: International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, CTG Italcementi, Bergamo Italy, 2010.
5. Ángel Fernández, Tx Active®, Hormigones Autolimpiantes Y Descontaminantes, En: Jornada Técnica sobre Hormigones Especiales (2008-JT-02, 2008, Barcelona, España), E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España, 2008, 113 h.
6. Annamaria Costa, Ian Luca Chiarello, Elena Selli, Marcella Guarino. Effects of TiO₂ Based Photocatalytic Paint on Concentrations and Emissions of Pollutants and on Animal Performance in a Swine Weaning Unit, Journal of Environmental Management, 15 de Abril 2012, Vol. 96, issue 1.
7. ASTM Internacional. 1999. Norma ASTM C 39. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto. EU.
8. ASTM Standard C1701/C1701M (2009). "Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C1701_C1701M-09, www.astm.org.
9. ASTM Standard C672/C672M (2003). "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals," ASTM

- International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C0672_C0672M-03, www.astm.org.
10. CAPECO (2015). "Costos mano de obra año 2015", CAPECO, Lima – Perú.
 11. Casanovas Xavier, La Construcción sostenible. Una mirada estratégica, En: Convención Técnica y Tecnológica de la Arquitectura Técnica (Nº5, 2009, Albacete, España), Colegio de Arquitectos de Almería, Albacete, España, 2009.
 12. Casey K. G. and E. L. Quitevis, "Effect of solvent polarity on nonradiative processes in xanthene dyes: Rhodamine B in normal alcohols," J. Phys. Chem.
 13. Chai-Mei Yu, J. (2003). Deactivation and Regeneration of Environmentally Exposed Titanium Dioxide (TiO₂) Based Products. Testing Report Departmental Order Ref. No. E183413, Environmental Protection Department (EPD), HKSAR.
 14. Chen, D. H., Li, K., & Yuan, R. (2007). Photocatalytic Coating on Road Pavements/Structures for NO_x Abatement. (Annual Project Report, Texas Air Research Center, Lamar University, 2007). Houston Advanced Research Center and Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC.
 15. Chen, J., Kou, S., Poon, C. (2011). Photocatalytic cement-based materials: Comparison of nitrogen oxides and toluene removal potentials and evaluation of selfcleaning performance. Building and Environ.
 16. Chen, M., & Liu, Y. (2010). NO_x removal from vehicle emissions by functionality surface of asphalt road. Journal of Hazardous Materials, Vol. 174.
 17. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), España (2012).
 18. Costa Annamaria, Ian Luca Chiarello, Elena Selli, Marcella Guarino. Effects of TiO₂ Based Photocatalytic Paint on Concentrations and Emissions of Pollutants and on Animal Performance in a Swine Weaning Unit, [en línea], Journal of Environmental Management, 15 de Abril 2011, Vol. 96, issue 1.
 19. De La Hoz M. Felipe, Desinfección de aguas de uso agrícola, mediante la utilización de un fotocatalizador inmovilizado en mortero de cemento y activado por luz solar, (Doctor en Ingeniería Agrícola), Chillán, Chile, Universidad de Concepción, Depto. Recursos Hídricos, 2009, 101 h.
 20. Díaz Coronel, César Jesús. Naturaleza del concreto. Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo. 2005.
 21. Dye, J. A., Lehmann, J.R., McGee, J.K., Winsett, D.W., Ledbetter, A.D., Everitt, J.I., Ghio, A.J., Costa, D.L. (2001). Acute pulmonary toxicity of particulate

- matter filter extracts in rats: Coherence with epidemiologic studies in Utah valley residents. Environmental health perspectives.
22. Folli Andrea (2010). Fotocatálisis TiO_2 en sistemas de cemento Portland: Fundamentos de los efectos autolimpiable y mitigación de la polución del aire.
 23. Fondo Mi Vivienda (2013). Estudio de Mercado de la Vivienda Social en la Ciudad de Cajamarca.
 24. Galem, E. (2011). Instrumental Methods of Chemical Analysis.
 25. González Cuevas, Óscar. Robles Fernández-Villegas, Francisco. Aspectos fundamentales del concreto reforzado. 4ta. Edic. Limusa. 2005.
 26. Harmsen. Teodoro E. Diseño de estructuras de concreto armado, 3ra. Edic. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2002.
 27. Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). TiO_2 Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 12.
 28. Hoerr, R.A., Gupta, A., Matuszewski, M.J. (2009) Developing practices for safe handling of nanoparticles and nanomaterials in a development state enterprise: a practical guide for research and development organizations. Safety Nanopart. Nanostruct. Sci. Technol.
 29. Howard, M. (2010). Métodos Instrumentales de Análisis, pp 85.
 30. INDECI. (2005). “Programa de prevención y medidas de mitigación ante desastres de la ciudad de Cajamarca”. Cajamarca – Perú.
 31. Katzman, L. (2006). Building Toward a Cleaner Environment: A New Role for an Existing Product, TiO_2 . Sasaki Associates Inc. Retrieved January 2, 2011, from <http://ideas.sasaki.com/files/attachments/user370/cleaner%20environment.pdf>
 32. Li, Z. (2011). Development and Application of Eco-Friendly Concrete. Advanced Materials Research. Vols. 250-253.
 33. Minitab, Inc. (2016). “Meet Minitab 16”. Estados Unidos.
 34. Morbi A., S. Cangiano, E. Borgarello, Cement Based Materials for Sustainable Development, En: International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (Nº2, 2010, Wisconsin, U.S.A), CTG Italcementi, Bergamo Italy, 2010.
 35. Nilson, Arthur H. Diseño de estructuras de concreto. 20va. Edic. McGraw-Hill. 1999.
 36. Normas Técnicas Peruanas (2015 -2016).

37. Olabarrieta, J., Zorita, S., Peña, I., Rioja, N., Monzón, O., Benguria, P., Scifo, L. (2012). Aging of photocatalytic coatings under a water flow: Long run performance and TiO₂ nanoparticles release. *Applied Catal. B: Environ.* 123-124, 182-192.
38. Ostiguy, C., Soucy, B., Lapointe, G., Woods, C., Ménard, L., Trottier, M. (2008). Health effects of nanoparticles, 2nd edition. Studies and research projects, report R-58
39. Parker, Harry. Ambrose, James. Diseño simplificado de concreto reforzado. 3ra. Edic. Limusa-Wiley. 2008.
40. Pichat, P. (2012) Solar energy conversion and photoenergy systems. Vol I- Solar Irradiation and TiO₂ Render Materials Self-Cleaning. <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C08/E6-106-14.pdf>
41. Plassais, A., Rousseau, F., Eriksson, E. and Guillot L., 'Photocatalytic coverings assessment: from canyon street measurements to 3-D modeling', in: "Photocatalysis, Environment and Construction Materials –bTDP 2007", Proceedings of Int. RILEM Symposium on Photocatalysis 'Environment and Construction Materials', (Florence/Italy, 8-9 October 2007), RILEM PRO 55, P. Baglioni and L. Cassar Eds, 85-92.
42. Puzenat, E. (2009). Photocatalytic self-cleaning materials: Principles and impact on atmosphere. *The European Physical Journal Conferences*, Vol. 1.
43. Rejinders, (2009). The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles form nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 94, 873-876
44. Rivera Gerardo A. (2012) Tecnología del Concreto y Mortero.
45. Rivva Lopez, E. 2010. Concreto, Tomo II: Diseño de Mezclas, Lima, Perú. Instituto de la Construcción y Gerencia.
46. Sakai, N., Fujishima, A., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2003). *J. Phys. Chem. B* 107, 1028
47. Snare M. J, F. E. Treloar, K. P. Ghiggino, and P. J. Thistlethwaite "The photophysics of rhodamine B.," *J. Photochem.*
48. Tx Active (2012). The Photocatalytic Active Principle.
49. UNI 11259 (Italia), 2008.
50. Wiesner, M.R., Lowry (2009). Decreasing uncertainties in assessing environmental exposure, risk, and ecological implications of nanomaterials. *Environ. Sci. Technol.*

APÉNDICES

APÉNDICE I

Título: “Influencia de Fotocatalizador Dióxido de Titanio en la Propiedad Autolimpiable del Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ ”							
Formulación del Problema	Objetivo	Hipótesis	VARIABLES	Dimensiones	Indicadores	Fuentes o instrumentos de recolección de datos	Población y Muestra
¿Cuál es la influencia de la utilización del aditivo fotocatalizador dióxido de titanio sobre la propiedad autolimpiable del concreto y su resistencia a la compresión?	Determinar la influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiable del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.	Al adicionar el fotocatalizador dióxido de titanio de 3% a 15% del peso del cemento dosificado el concreto adicionará la propiedad autolimpiable y mantendrá invariable la resistencia a la compresión diseñada respecto a un concreto sin adición de dióxido de titanio.	Resistencia a la compresión	Ensayos de Resistencia a la Compresión	Kg/cm^2	Observación experimental	144 ensayos a compresión
			Capacidad Fotocatalítica	Ensayo Rodamina (Coloración)	Porcentaje (%)	Observación experimental	48 ensayos fotocatalíticos

Tabla 34: Matriz de consistencia metodológica

**APÉNDICE II:
CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS DE
LOS AGREGADOS (ASTM C 136 – NTP 400.012)**

A.II.1 Análisis granulométrico del agregado grueso:

Peso de la muestra = 10000 gr

Malla		Peso Retenido	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado. (%)	Porcentaje Que Pasa (%)
Nº	mm	(gr)			
1 1/2"	37.5	0	0	0	100.00
1"	25.4	0	0	0	100.00
3/4"	19	2607.01	26.07	26.07	73.93
1/2"	12.7	4285.67	42.86	68.93	31.07
3/8"	9.51	2445.04	24.45	93.38	6.62
Nº 4	4.76	519.15	5.19	98.57	1.43
Nº 8	2.36	119.26	1.19	99.76	0.24
Cazoleta		23.90	0.24	100.00	0.00
TOTAL		10000.00			

Tabla 35: Análisis granulométrico del agregado grueso

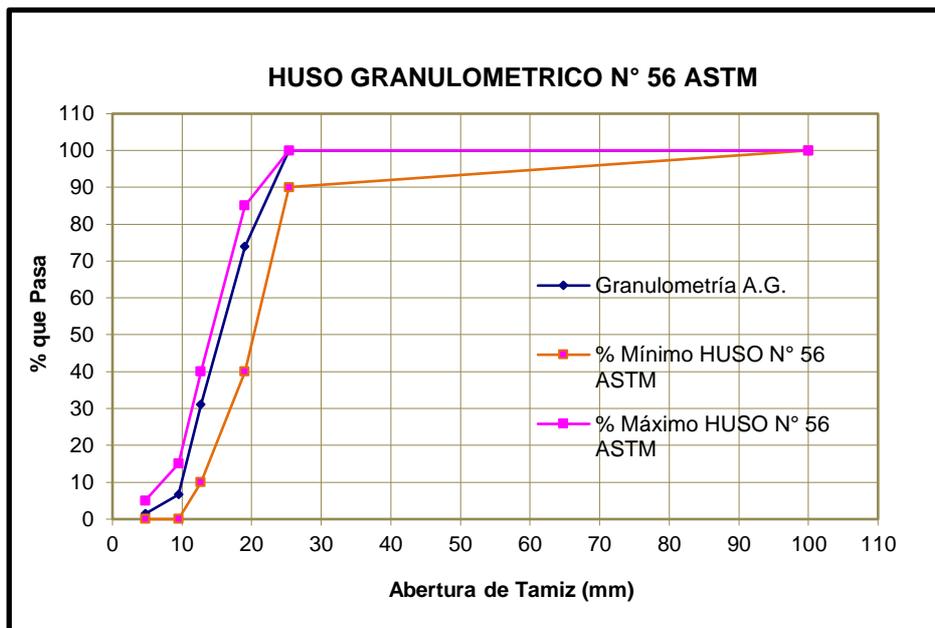


Gráfico 47: Granulometría de agregado grueso HUSO N° 56 ASTM

A.II.2 Análisis granulométrico del agregado fino:

Peso de la muestra = 302 gr

Malla		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acumulado. (%)	Porcentaje Que Pasa (%)
Nº	mm				
3/8"	9.51	0	0.00	0.00	100.00
1/4"	6.34	5.1	1.69	1.69	98.31
Nº 4	4.76	8.2	2.72	4.40	95.60
Nº 8	2.36	39.8	13.18	17.58	82.42
Nº 16	1.18	53.4	17.68	35.26	64.74
Nº 30	0.60	53.1	17.58	52.85	47.15
Nº 50	0.36	68.6	22.72	75.56	24.44
Nº 100	0.15	47.5	15.73	91.29	8.71
Nº 200	0.07	20.6	6.82	98.11	1.89
Cazoleta		5.7	1.89	100.00	0.00
TOTAL		302.00			

Tabla 36: Análisis granulométrico del agregado fino

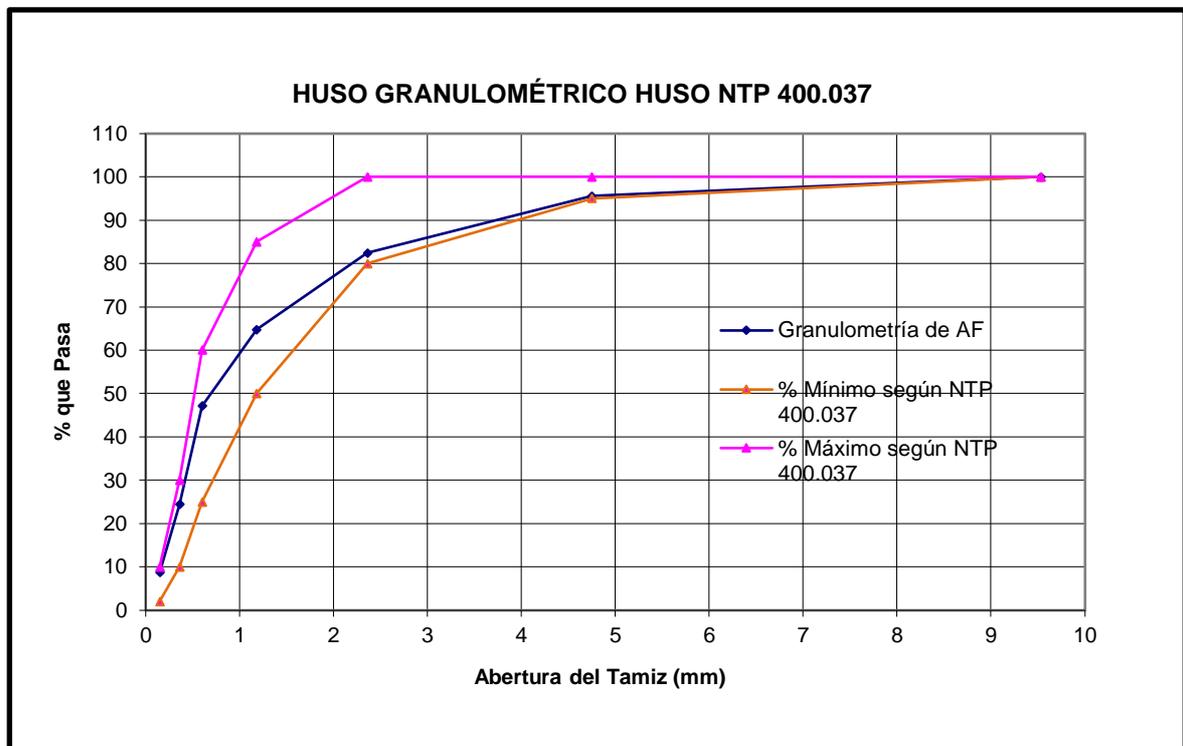


Gráfico 48: Granulometría de agregado fino HUSO NTP 400.037

A.II.3 Cálculo de módulo de fineza o de finura del agregado grueso y fino

Módulo de fineza del Agregado Grueso (AG)

Módulo fineza AG:

$$\frac{\sum \%ret. acum. en mallas N^{\circ} 1\ 1/2"; N^{\circ} 3/4"; N^{\circ} 3/8"; N^{\circ} 4; N^{\circ} 8 + 400}{100}$$

Módulo fineza AG:

$$\frac{0.00 + 26.07 + 93.38 + 98.57 + 99.76 + 400.00}{100}$$

Módulo fineza AG: 7.18

Módulo de fineza del Agregado Fino (AF)

Módulo fineza AF:

$$\frac{\sum \%ret. acum. en mallas N^{\circ} 4; N^{\circ} 8; N^{\circ} 16; N^{\circ} 30; N^{\circ} 50; y N^{\circ} 100}{100}$$

Módulo fineza AF – ML:

$$\frac{4.40 + 17.58 + 35.26 + 52.85 + 75.56 + 91.29}{100}$$

Módulo fineza AF: 2.77

**APÉNDICE III:
CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO, Y
ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS**

**A.III.1 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino
(ASTM C 128 – NTP 400.022)**

	1	2	3
Peso en el aire de la muestra seca al horno (W_o gr)	487.5	487.2	488.3
Volumen del frasco (V cm ³)	500	500	500
Peso en (gr) o volumen (cm ³) del agua añadida al frasco (V_a)	312.4	312.9	312.7
Peso específico de masa $P_{em} = W_o / (V - V_a)$ gr/cm ³	2.60	2.60	2.61
Promedio Peso específico de masa $P_{em} = W_o / (V - V_a)$ gr/cm ³	2.60		
Peso específico de masa saturada con superficie seca $P_{emss} = V / (V - V_a)$ gr/cm ³	2.67	2.67	2.67
Peso específico aparente $P_{ea} = W_o / [(V - V_a) - (500 - W_o)]$ gr/cm ³	2.78	2.80	2.78
Absorción $Abs = [(500 - W_o) * 100] / W_o$ %	2.56	2.63	2.40
Promedio Absorción $Abs = [(500 - W_o) * 100] / W_o$ %	2.53		

Tabla 37: Determinación del peso específico y absorción del agregado fino

**A.III.2 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso
(ASTM C 127 – NTP 400.021)**

Peso en el aire de la muestra seca al horno (A gr)	8510
Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca (B gr)	8600
Peso en el agua de la muestra saturada (C gr)	5450
<i>Peso específico de masa Pem = A/(B - C) gr/cm³</i>	2.70
<i>Peso específico de masa saturada con superficie seca Pemsss = B/(B - C) gr/cm³</i>	2.73
<i>Peso específico aparente Pea = A/(A - C) gr/cm³</i>	2.78
Absorción Abs = [(B-A)*100]/A %	1.06

Tabla 38: Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso

APÉNDICE IV
CÁLCULOS DE LOS ENSAYOS DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS
(ASTM C 566)

A.IV.1 Determinación del contenido de humedad del agregado fino

	1	2	3
Peso de la tara (gr)	50	50	50
Peso de la tara + material húmedo (gr)	670.6	655.8	649.2
Peso de la tara + material seco (gr)	651.2	636.5	630.3
Peso del agua (gr)	19.4	19.3	18.9
Peso de la muestra seca (gr)	601	587	580
Contenido de humedad (W %)	3.23	3.29	3.26
Promedio contenido de humedad (W %)	3.26 %		

Tabla 39: Determinación del contenido de humedad del agregado fino

A.IV.2 Determinación del contenido de humedad del agregado grueso

Peso de la tara (gr)	50
Peso de la tara + material húmedo (gr)	4550.9
Peso de la tara + material seco (gr)	4518
Peso del agua (gr)	32.9
Peso de la muestra seca (gr)	4468
Contenido de humedad (W %)	0.74

Tabla 40: Determinación del contenido de humedad del agregado grueso

APÉNDICE V
CÁLCULOS DE LOS ENSAYOS DE PESO UNITARIO COMPACTADO Y
SUELTO DE LOS AGREGADOS (ASTM C 29 – NTP 400.017)

$$PU = W_s * f$$

Donde :

W_s = Peso neto del agregado

f = Factor

Calculo del factor f :

$$F = \frac{1000 \text{ Kg} / \text{m}^3}{W_a}$$

Donde :

W_a = Peso del agua para llenar el recipiente a 16 °C

Densidad del agua (gr/cm ³)	1.00
Volumen del agua en el recipiente (cm ³)	5520
Peso del agua del recipiente (gr)	5514.6456
Factor f (1/m³):	181.34

$$f = 181.34 \quad /\text{m}^3$$

A.V.1 Determinación del peso unitario seco compactado agregado fino

Peso del recipiente (gr)	8290
Peso del recipiente + material (gr)	17336
Peso del material (gr)	9046
Factor f (/m ³)	181.34
Peso unitario seco compactado (Kg/m³)	1640

Tabla 41: Determinación del peso unitario seco compactado agregado fino

A.V.2 Determinación del peso unitario seco compactado agregado grueso.

Peso del recipiente (gr)	8290
Peso del recipiente + material (gr)	16618
Peso del material (gr)	8328
Factor f (/m ³)	181.34
Peso unitario seco compactado (Kg/m³)	1510

Tabla 42: Determinación del peso unitario seco compactado agregado grueso

A.V.3 Determinación del peso unitario suelto seco del agregado fino

Peso del recipiente (gr)	8290
Peso del recipiente + material (gr)	16740
Peso del material (gr)	8450
Factor f (/m ³)	181.34
Peso unitario suelto seco (Kg/m³)	1532

Tabla 43: Determinación del peso unitario seco suelto agregado fino

A.V.4 Determinación del peso unitario suelto seco del agregado grueso

Peso del recipiente (gr)	8290
Peso del recipiente + material (gr)	16456
Peso del material (gr)	8166
Factor f (/m ³)	181.34
Peso unitario suelto seco (Kg/m³)	1481

Tabla 44: Determinación del peso unitario seco suelto agregado grueso

APÉNDICE VI
CÁLCULOS DE LOS ENSAYOS DE CANTIDAD DE MATERIAL QUE PASA
LA MALLA N° 200 DE LOS AGREGADOS (ASTM C 117 – NTP 400.018)

A.VI.1 Cantidad de material que pasa la malla N° 200 del agregado fino

	1	2	3
Peso inicial de la muestra (gr) = W0	2090	2105	2095
Peso de la muestra seca lavada (gr) = W1	2032	2046	2037
PARTÍCULAS < TAMIZ N° 200 (%) = F	2.78%	2.80%	2.77%
PROMEDIO F	2.78%		

Tabla 45: Determinación de la cantidad de material que pasa la malla N° 200 del agregado fino

A.VI.2 Cantidad de material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso

Peso inicial de la muestra (gr) = W0	6085.5
Peso de la muestra seca lavada (gr) = W1	6040.1
PARTÍCULAS < TAMIZ N° 200 (%) = F	0.75%

Tabla 46: Determinación de la cantidad de material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso

APÉNDICE VII
CÁLCULOS SUPERFICIE ESPECÍFICA DE LOS AGREGADOS

$$\text{Superficie Específica} = \frac{\sum S * 0.06}{P.e._{masa}}$$

A.VII.1 Superficie Específica del Agregado Grueso

Peso específico de masa (P.e. masa) = 2.70 gr/cm³

MALLA		PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL (%)	DIÁMETRO MEDIO	S
Nº	cm			
1 1/2"	3.75	0.00	0.00	0.00
1"	2.54	0.00	3.145	0.000
3/4"	1.9	26.07	2.22	11.743
1/2"	1.27	42.86	1.585	27.039
3/8"	0.951	24.45	1.1105	22.017
Nº 4	0.476	5.19	0.714	7.276
Nº 8	0.236	1.19	0.356	3.350
<i>Sumatoria</i>				71.425

Superficie Específica = 1.59 cm²

A.VII.2 Superficie Específica del Agregado Fino

Peso específico de masa (P.e. masa) = 2.60 gr/cm³

MALLA		PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL (%)	DIÁMETRO MEDIO	S
Nº	cm			
1/4"	0.634	1.69	0.7925	2.131
Nº 4	0.476	2.72	0.555	4.892
Nº 8	0.236	13.18	0.356	37.019
Nº 16	0.118	17.68	0.177	99.899
Nº 30	0.06	17.58	0.089	197.559
Nº 50	0.036	22.72	0.048	473.234
Nº 100	0.015	15.73	0.0255	616.803
Nº 200	0.007	6.82	0.011	620.108
<i>Sumatoria</i>				2051.646

Superficie Específica = 47.37 cm²

APÉNDICE VIII
CÁLCULOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN (ASTM C 131 – NTP 400.019)

Gradación de la muestra de ensayo:

Tamaño de Tamices				A (gr)
Pasa		Retenido en		
pulg	mm	pulg	mm	
1 1/2 "	37.5	1 "	25.40	1250
1 "	25.4	3/4 "	19.00	1250
3/4 "	19.0	1/2 "	12.70	1250
1/2 "	12.7	3/8 "	9.51	1250
TOTAL				5000

Tabla 47: Gradación de la muestra de ensayo

$$De = \frac{W_0 - W_f}{W_0} * 100$$

Donde :

De = Porcentaje de desgaste (%)

W₀ = Peso inicial de la muestra (gr)

W_f = Peso final de la muestra (gr)

Peso inicial de la muestra (W₀ gr) 5000

Peso final de la muestra (W_f gr) 3610.6

De = 27.79 %

APÉNDICE IX
DISEÑO DE MEZCLAS Y AJUSTE DE PROPORCIONES DEL CONCRETO
CON TIO₂

A.IX.1 Selección de las proporciones del concreto por el método ACI del comité 211 y resumen de las propiedades de los agregados

Antes de realizar el diseño de mezclas por el método ACI 211, brindaremos un resumen de las propiedades obtenidas:

AGREGADO FINO	CANTERA: LA VICTORIA
Peso específico de masa:	2600 kg/m ³
Peso específico de masa sss:	2670 kg/m ³
Peso específico aparente:	2790 kg/m ³
Peso unitario suelto seco:	1532 kg/m ³
Peso unitario compactado seco:	1640 kg/m ³
Humedad natural:	3.26 %
Absorción:	2.53 %
Módulo de finura:	2.77
Partículas < #200:	2.78 %

Tabla 48: Resumen de propiedades del agregado fino

AGREGADO GRUESO	CANTERA: LA VICTORIA
Peso específico de masa:	2700 kg/m ³
Peso específico de masa sss:	2730 kg/m ³
Peso específico aparente:	2780 kg/m ³
Peso unitario suelto seco:	1481 kg/m ³
Peso unitario compactado seco:	1510 kg/m ³
Humedad natural:	0.74 %
Absorción:	1.06 %
Módulo de finura:	7.18
Partículas < #200:	0.75 %
Abrasión:	27.79 %

Tabla 49: Resumen de propiedades del agregado grueso

CEMENTO	PACASMAYO
Tipo:	Tipo I
Peso específico:	3120 kg/m ³

Tabla 50: Resumen de propiedades del cemento

ADITIVO	DIÓXIDO DE TITANIO
Tipo:	Fotocatalizador
Peso específico:	4000 kg/m ³

Tabla 51: Resumen de propiedades del dióxido de titanio

A.IX.2 Selección de la resistencia promedio a partir de la resistencia a compresión especificada.

Las mezclas de concreto para los especímenes cilíndricos se realizaron de acuerdo con lo estipulado en el método ACI 318.

$$f'_{cr} = f'_c + 85$$

$$f'_{cr} = 210 \text{ kg/cm}^2 + 85$$

$$f'_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$$

A.IX.3 Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso.

El Tamaño Máximo Nominal (TMN) se determinó mediante el análisis de granulométrico del agregado grueso, obteniendo el valor de TMN de 1”.

A.IX.4 Selección del asentamiento.

La consistencia que hemos querido para la mezcla es de una consistencia plástica, correspondiendo un asentamiento o slump de 3” a 4”.

A.IX.5 Selección del volumen unitario del agua de diseño.

Debemos entrar a la tabla siguiente correspondiente al volumen unitario de agua o agua de diseño, con los datos de nuestro asentamiento que es de 3" a 4", un TMN del agregado grueso de 1" y sin aire incorporado.

Agua, en lts/m ³ , para los tamaños máx. nominales de agregado grueso y asentamiento indicado								
Asentamiento	Tamaño Máximo de Agregado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	4"
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	---
Concreto Con Aire Incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	---

Tabla 52: Volumen unitario de agua

De la Tabla anterior obtenemos el agua de mezclado: **193 lts/m³**

A.IX.6 Selección del contenido de aire.

El grado de exposición es normal, es decir, no va a estar expuesta a condiciones de intemperismo severo. Entonces de la tabla siguiente y con las condiciones de exposiciones normales y el TMN de 1" obtendremos el aire atrapado.

Concreto sin aire incorporado								
Tamaño Máximo Nominal de AG (")	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	4"
Aire atrapado (%)	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50	0.30	0.20

Tabla 53: Contenido de aire atrapado

De la tabla anterior obtenemos que el aire atrapado es: **1.5%**

A.IX.7 Selección de la relación agua/cemento por resistencia.

No presentándose en este caso problemas de intemperismo ni de ataques por sulfatos, u otro tipo de acciones que pudieran dañar al concreto, se selecciona la relación agua – cemento únicamente por resistencia y no por durabilidad.

- **Concreto Sin Aire Incorporado**
- **f'cr: 295 Kg/cm²**

f'c a 28 días (kg/cm ²)	Relación Agua/Cemento en peso	
	Concreto Sin Aire Incorporado	Concreto Con Aire Incorporado
150	0.79	0.7
200	0.69	0.6
250	0.61	0.52
300	0.54	0.45
350	0.47	0.39
400	0.42	---
450	0.38	---

Tabla 54: Relación agua/cemento por Resistencia

- *Esta tabla es una adaptación de la confeccionada por el Comité 211 del ACI*
- *La resistencia corresponde a resultados ensayados en probetas cilíndricas estándar de 15 x 30 cm preparadas y curadas de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM C 31.*
- *Las relaciones agua/cemento se basan en tamaños máximos nominales del agregado grueso comprendidos entre ¾" y 1". La resistencia producida por una relación agua/cemento dada deberá incrementarse conforme al tamaño máximo nominal disminuye.*

De la tabla anterior obtenemos la relación A/C para nuestro f'cr:

f'c	A/C
250 Kg/cm ²	→ 0.61
295 Kg/cm²	→ 0.547
300 Kg/cm ²	→ 0.54

La relación agua/cemento (A/C) encontrada es: **0.547**

A.IX.8 Determinación del Factor cemento.

Obtenidos ya el volumen unitario de agua por unidad de volumen del concreto y la relación agua/cemento, determinamos el factor cemento por unidad cúbica de concreto mediante la división del volumen unitario de agua, entre la relación agua/cemento:

$$\text{Factor Cemento} = \frac{\text{Volumen Unitario de Agua}}{\text{Relación A/C}}$$

$$F.C. = 193/0.547$$

$$F.C. = 352.83 \text{ Kg/m}^3$$

$$F.C. = 8.30 \text{ bolsas/m}^3$$

A.IX.9 Determinación del contenido de agregado grueso.

La tabla siguiente tomada del método ACI Comité 211 tiene como requerimiento el tamaño máximo nominal del agregado grueso que es 1" y el módulo de fineza del agregado fino que es 2.77.

De aquí interpolando obtendremos un coeficiente b/b_0 resultante de la división del peso seco del agregado grueso requerido por la unidad cúbica de concreto entre el peso unitario seco y varillado del agregado grueso, expresado en kg/m^3 .

Tamaño Máximo de Nominal del Agregado Grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de fineza del Agregado Fino			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.79	0.78	0.75
4"	0.87	0.85	0.83	0.81

Tabla 55: Peso del agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

A.IX.11 Determinación del contenido de agregado fino.

El volumen absoluto de agregado fino será igual a la diferencia entre la unidad y la suma de los volúmenes absolutos conocidos. El peso del agregado fino será igual a su volumen absoluto multiplicado por su peso específico.

$$\text{Volumen Absoluto de Agregado Fino: } 1 - 0.7001 = 0.2999 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del agregado fino seco} = 0.2999 \times 2600 = 779.70 \text{ Kg/m}^3$$

A.IX.12 Determinación de los valores de diseño del cemento, agua, aire, agregado fino y agregado grueso.

Las cantidades de materiales a ser empleadas como valores de diseño serán:

$$\text{Cemento: } \dots \dots \dots 352.83 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Agua de diseño: } \dots \dots \dots 193.00 \text{ Lts/m}^3$$

$$\text{Agregado Fino Seco: } \dots \dots \dots 779.70 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Agregado Grueso Seco: } \dots \dots 1016.23 \text{ Kg/m}^3$$

A.IX.13 Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.

A.IX.13.1 Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado

Sabiendo que:

$$\text{Absorción del Agregado Fino: } \dots \dots \dots 2.53\%$$

$$\text{Absorción del Agregado Grueso: } \dots \dots \dots 1.06\%$$

$$\text{Contenido de Humedad del Agregado Fino: } \dots \dots 3.26\%$$

$$\text{Contenido de Humedad del Agregado Grueso: } \dots \dots 0.74\%$$

Calculamos los pesos húmedos de los agregados:

$$\begin{aligned} \text{Peso húmedo del Agregado Fino: } & \dots \dots \dots 779.70((100 + 3.26)/100) \\ & = 805.12 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso húmedo del Agregado Grueso: } & \dots \dots \dots 1016.23((100 + 0.74)/100) \\ & = 1023.75 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

Determinamos la humedad superficial de los agregados:

$$\begin{aligned} \text{Humedad superficial del Agregado Fino: } & \dots \dots \dots 3.26 \% - 2.53 \% \\ & = 0.73 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Humedad superficial del Agregado Grueso: } & \dots \dots \dots 0.74 \% - 1.06 \% \\ & = -0.32 \% \end{aligned}$$

Determinamos el aporte de humedad de los agregados:

$$\begin{aligned} \text{Aporte de humedad del Agregado Fino: } & \dots \dots \dots 779.70 \times 0.73 \% \\ & = 5.69 \text{ Lts/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aporte de humedad del Agregado Grueso: } & \dots \dots \dots 1016.23 \times -0.32 \% \\ & = -3.25 \text{ Lts/m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Total de Aporte de humedad de los Agregados: } \dots \dots \dots -2.44 \text{ Lts/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva: } \dots \dots \dots 193.00 - 2.44 = 190.56 \text{ Lts/m}^3$$

Por lo cual, los nuevos pesos de los materiales por metro cúbico de concreto, ya corregidos por humedad del agregado, a ser empleados en las mezclas de prueba son:

$$\text{Cemento: } \dots \dots \dots 352.83 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva: } \dots \dots \dots 190.56 \text{ Lts/m}^3$$

$$\text{Agregado Fino Húmedo: } \dots \dots \dots 805.12 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Agregado Grueso Húmedo: } \dots \dots \dots 1023.75 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Dióxido de Titanio: } \dots \dots \dots 10.59 \text{ Kg/m}^3$$

Dosificación:

$$\frac{352.83}{352.83} : \frac{805.118}{352.83} : \frac{1023.8}{352.83} = \mathbf{1 : 2.28 : 2.90 : 22.95 \text{ lts/bolsa}}$$

A.IX.14 Ajuste de la mezcla sobregravosa.

A.IX.14.1 Tanda de ensayo

Se preparó la tanda de ensayo en el laboratorio para un volumen de 0.02 m^3 (3 especímenes cilíndricos de concreto), por lo que se consideró para esta tanda la siguiente cantidad de materiales:

$$\begin{aligned} \text{Cemento:} & \dots \dots \dots 352.83 \times 0.02 = 7.06 \text{ Kg} \\ \text{Agua efectiva:} & \dots \dots \dots 190.56 \times 0.02 = 3.81 \text{ Lts} \\ \text{Agregado Fino Húmedo:} & \dots \dots \dots .805.12 \times 0.02 = 16.10 \text{ Kg} \\ \text{Agregado Grueso Húmedo:} & \dots \dots .1023.75 \times 0.02 = 20.48 \text{ Kg} \\ \text{Dióxido de Titanio:} & \dots \dots \dots .10.59 \times 0.02 = 0.21 \text{ Kg} \end{aligned}$$

A.IX.14.2 Pesos de la tanda de ensayo:

Los materiales para la tanda, para un volumen de 0.02 m^3 , con la corrección en el agua efectuada consistirían en:

$$\begin{aligned} \text{Cemento:} & \dots \dots \dots 352.83 \times 0.02 = 7.06 \text{ Kg} \\ \text{Agua efectiva:} & \dots \dots \dots 190.56 \times 0.02 = 3.81 \text{ Lts} \\ \text{Agregado Fino Húmedo:} & \dots \dots \dots .805.12 \times 0.02 = 16.10 \text{ Kg} \\ \text{Agregado Grueso Húmedo:} & \dots \dots .1023.75 \times 0.02 = 20.48 \text{ Kg} \\ \text{Dióxido de Titanio:} & \dots \dots \dots .10.59 \times 0.02 = 0.21 \text{ Kg} \\ \text{Peso de la tanda:} & \dots \dots \dots = 47.66 \text{ Kg} \end{aligned}$$

A.IX.14.3 Rendimiento de la tanda de ensayo:

El rendimiento de la tanda de ensayo será:

$$\text{Rendimiento de la tanda de ensayo:} \dots \dots \dots .47.66 / 2382.85 = 0.02000 \text{ m}^3$$

A.IX.14.4 Agua de mezclado por tanda:

Determinamos la humedad superficial de los agregados:

$$\begin{aligned} \text{Humedad superficial del Agregado Fino: } & \dots \dots \dots 3.26 \% - 2.53 \% \\ & = 0.73 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Humedad superficial del Agregado Grueso: } & \dots \dots \dots 0.74 \% - 1.06 \% \\ & = -0.32 \% \end{aligned}$$

Determinamos el aporte de humedad de los agregados:

$$\text{Aporte de humedad del Agregado Fino: } 779.70 \times 0.02 \times 0.73 \% = 0.114 \text{ Lts/tanda}$$

$$\text{Aporte de humedad del Agregado Grueso: } 1016.23 \times 0.02 \times -0.32 \% = -0.065 \text{ Lts/tanda}$$

Total de Aporte de humedad de los Agregados por tanda:

$$= -0.4 + 0.114 - 0.065 = -0.351 \text{ Lts/tanda}$$

$$\text{Agua de mezclado por tanda: } \dots \dots \dots 3.81 - 0.35 = 3.46 \text{ Lts/tanda}$$

A.IX.14.5 Agua de mezclado por m³ requerida:

La cantidad de agua de mezclado requerida por metro cúbico de concreto, con el mismo asentamiento de la tanda de ensayo, se obtendrá dividiendo el agua de mezclado por tanda entre el rendimiento de la tanda de ensayo.

$$\text{Agua de mezclado } \dots \dots \dots 3.46/0.02000 = 173.00 \text{ Lts/m}^3$$

A.IX.14.6 Nuevo contenido de cemento:

Como se determinó anteriormente la relación agua/cemento es 0.547. Con la disminución en el agua de mezclado, se requerirá menos cemento para obtener la relación agua/cemento de 0.607, por lo que el nuevo contenido de cemento será:

$$\text{Contenido de cemento: } \dots \dots \dots 173.00/0.547 = 316.27 \text{ Kg/m}^3$$

A.IX.14.7 Corrección en el agregado grueso:

En la elaboración de la mezcla de concreto, este fue encontrado sobre gravoso, por lo que la cantidad de agregado grueso por unidad de volumen deberá ser disminuida en 10 %.

Originalmente la relación b/b_0 era de 0.673, Efectuada la corrección indicada (restar 0.067) este se disminuye a 0.606, considerando un peso unitario suelto compactado de 1510 Kg/m^3 para el agregado grueso la corrección del agregado grueso será:

Nuevo Peso del Agregado grueso por metro cúbico

$$= \frac{b}{b_0} \times \text{Peso unitario compactado}$$

$$\text{Peso del Agregado grueso por metro cúbico} = 0.606 \times 1510 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Peso del Agregado grueso por metro cúbico} = 914.61 \text{ Kg/m}^3$$

A.IX.14.8 Corrección por el método de la suma de los volúmenes absolutos de cemento, agua de diseño, aire y agregado grueso.

Conocidos los pesos del cemento, agua y agregado grueso, así como el volumen de aire, se procede a calcular la suma de los volúmenes absolutos de estos materiales:

$$\text{Vol. Absoluto de Cemento: } \dots \dots \dots 316.27/3120 = 0.1014 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Absoluto de Agua: } \dots \dots \dots 173.00/1000 = 0.1730 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Absoluto de Agregado Grueso: } \dots \dots 914.61 /2700 = 0.339 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Absoluto de Aire Atrapado: } \dots \dots \dots 1.5/100 = 0.0150 \text{ m}^3$$

$$\text{Suma de volúmenes conocidos: } \dots \dots \dots = \mathbf{0.631 \text{ m}^3}$$

Determinación del contenido de agregado fino:

El volumen absoluto de agregado fino será igual a la diferencia entre la unidad y la suma de los volúmenes absolutos conocidos.

$$\text{Volumen Absoluto de Agregado Fino: } 1 - 0.631 = 0.369 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del agregado fino seco} = 0.369 \times 2600 = 960.74 \text{ Kg/m}^3$$

Determinación de los valores de diseño del cemento, agua, aire, agregado fino y agregado grueso:

Las cantidades de materiales a ser empleadas como valores de diseño serán:

$$\text{Cemento: } \dots \dots \dots 316.27 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Agua de diseño: } \dots \dots \dots 173.00 \text{ Lts/m}^3$$

$$\text{Agregado Fino Seco: } \dots \dots \dots 960.74 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Agregado Grueso Seco: } \dots \dots 914.74 \text{ Kg/m}^3$$

A.IX.14.9 Corrección de los nuevos valores de diseño por humedad.

Sabiendo que:

$$\text{Absorción del Agregado Fino: } \dots \dots \dots 2.53\%$$

$$\text{Absorción del Agregado Grueso: } \dots \dots \dots 1.06\%$$

$$\text{Contenido de Humedad del Agregado Fino: } \dots \dots 3.26\%$$

$$\text{Contenido de Humedad del Agregado Grueso: } \dots \dots 0.74\%$$

Calculamos los pesos húmedos de los agregados:

$$\begin{aligned} \text{Peso húmedo del Agregado Fino: } & \dots \dots \dots 960.74((100 + 3.26)/100) \\ & = 992.06 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso húmedo del Agregado Grueso: } & \dots \dots \dots 914.61((100 + 0.74)/100) \\ & = 921.38 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

Determinamos la humedad superficial de los agregados:

$$\text{Humedad superficial del Agregado Fino: } \dots \dots \dots 3.26 \% - 2.53 \% = 0.73 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Humedad superficial del Agregado Grueso: } & \dots \dots \dots 0.74 \% - 1.06 \% \\ & = -0.32 \% \end{aligned}$$

Determinamos el aporte de humedad de los agregados:

$$\text{Aporte de humedad del Agregado Fino: } \dots \dots \dots 960.74 \times 0.73 \% = 7.01 \text{ Lts/m}^3$$

Aporte de humedad del Agregado Grueso: 914.61 × -0.32 % = -2.93 Lts/m³

Total de Aporte de humedad de los Agregados: 4.08 Lts/m³

Como el Agregado toma agua de la mezcla para llegar a su condición de saturado superficialmente seco, será necesario disminuir 4.08 Lts/m³ al agua de diseño para obtener el agua efectiva que hay que colocar en la mezcladora.

Agua efectiva: 173.00 - 4.08 = 168.91 Lts/m³

Por lo cual, los nuevos pesos de los materiales ajustados por metro cúbico de concreto, ya corregidos por humedad del agregado, a ser empleados en las mezclas son:

Cemento: 316.27 Kg/m³

Agua efectiva: 168.91 Lts/m³

Agregado Fino Húmedo: 992.06 Kg/m³

Agregado Grueso Húmedo: 921.38 Kg/m³

Aditivo: 9.49 Kg/m³

A.IX.14.10 Proporción de materiales en peso

La proporción de materiales corregidos por humedad del agregado serian:

Dosificación final:

$$\frac{316.27}{316.27} : \frac{992.06}{316.27} : \frac{921.38}{316.27} : \frac{168.91}{316.27} \times 42.5 = 1 : 3.14 : 2.91/22.70 \text{ lts/bolsa}$$

- *De igual forma se procederá con los siguientes diseños de mezclas para los tratamientos de 6%, 9%, 12 % y 15%*

APÉNDICE X

GRÁFICAS TÍPICAS ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

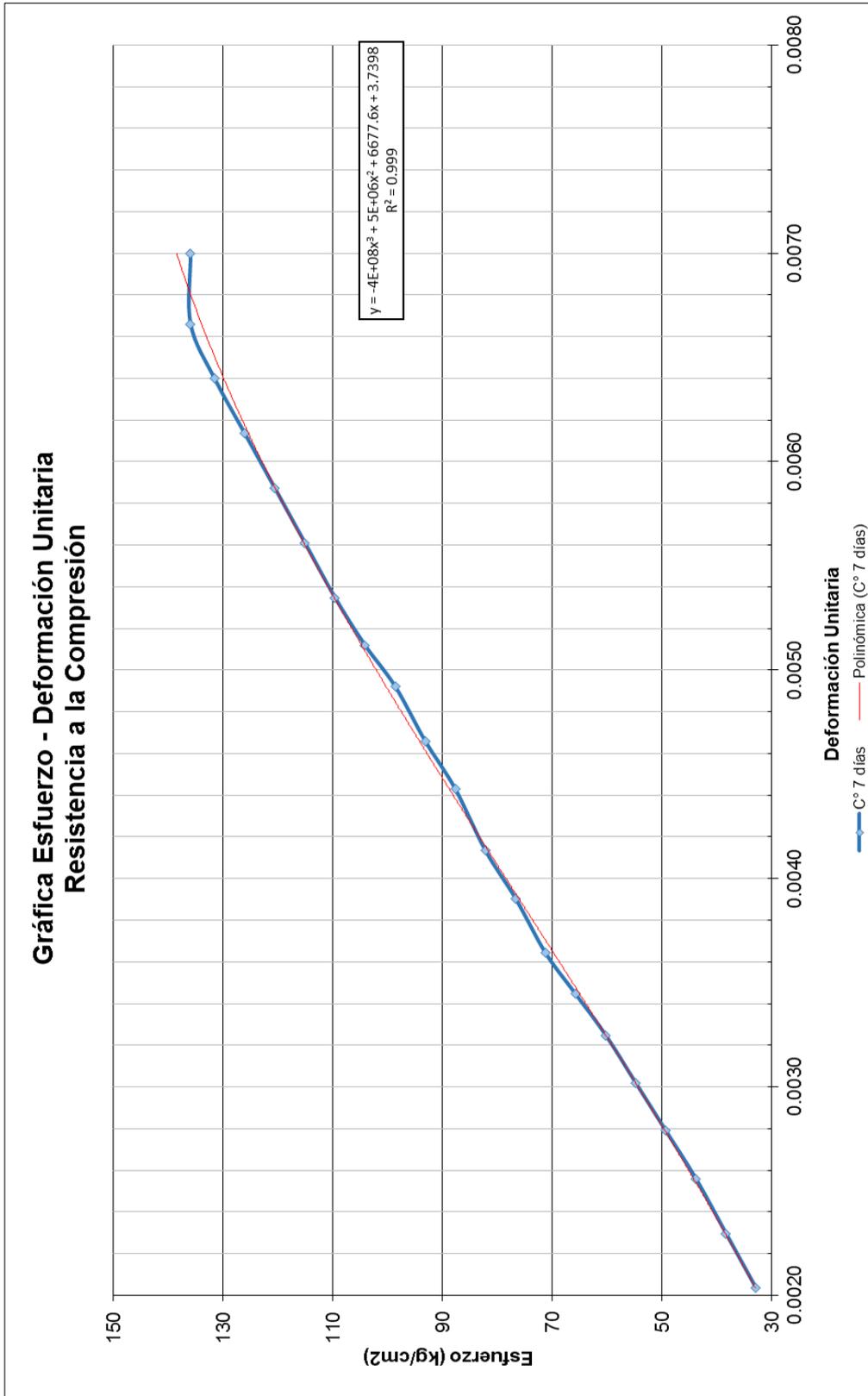


Gráfico 49: Esfuerzo vs. deformación unitaria – 07 días – 3% TiO₂

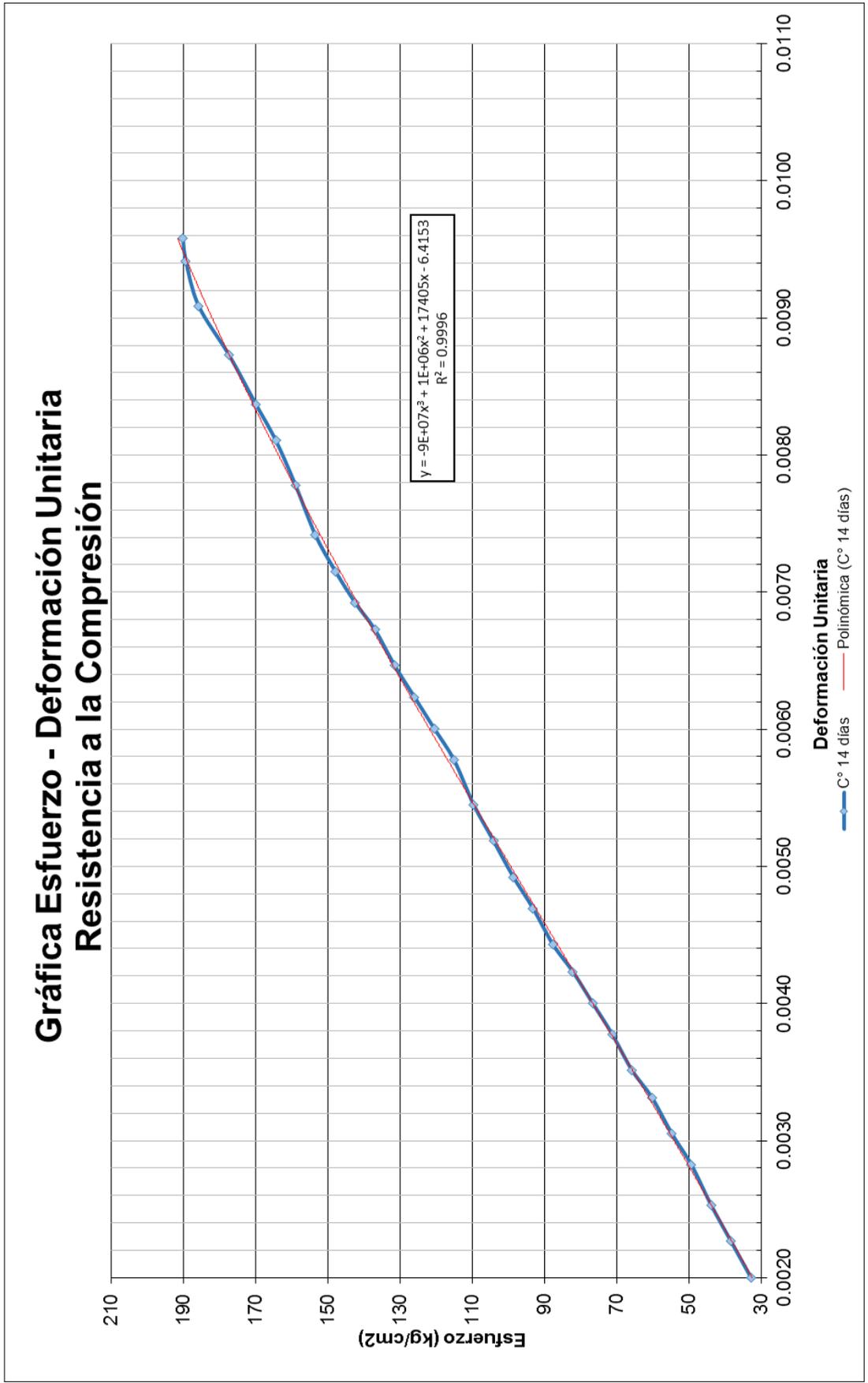


Gráfico 50: Esfuerzo vs. deformación unitaria – 14 días – 3% TiO₂

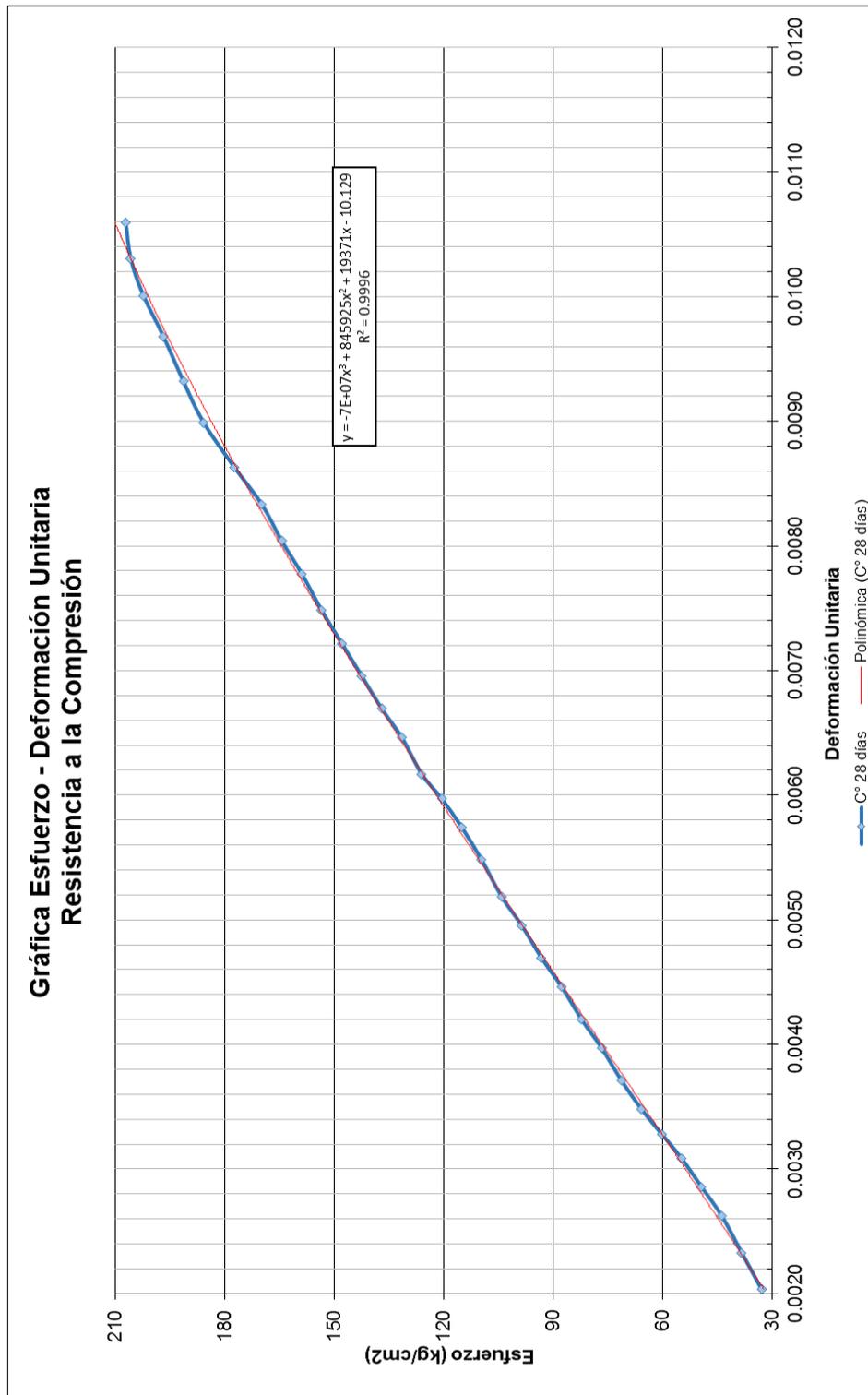


Gráfico 51: Esfuerzo vs. deformación unitaria – 28 días – 3% TiO₂

Nota: En las gráficas típicas a la edad de 7, 14 y 28 días anteriormente mostrados no se pudo tomar los puntos entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo de rotura por ser de difícil lectura por la rapidez de las agujas de la máquina de resistencia a la compresión.

APÉNDICE XI
PANEL FOTOGRÁFICO

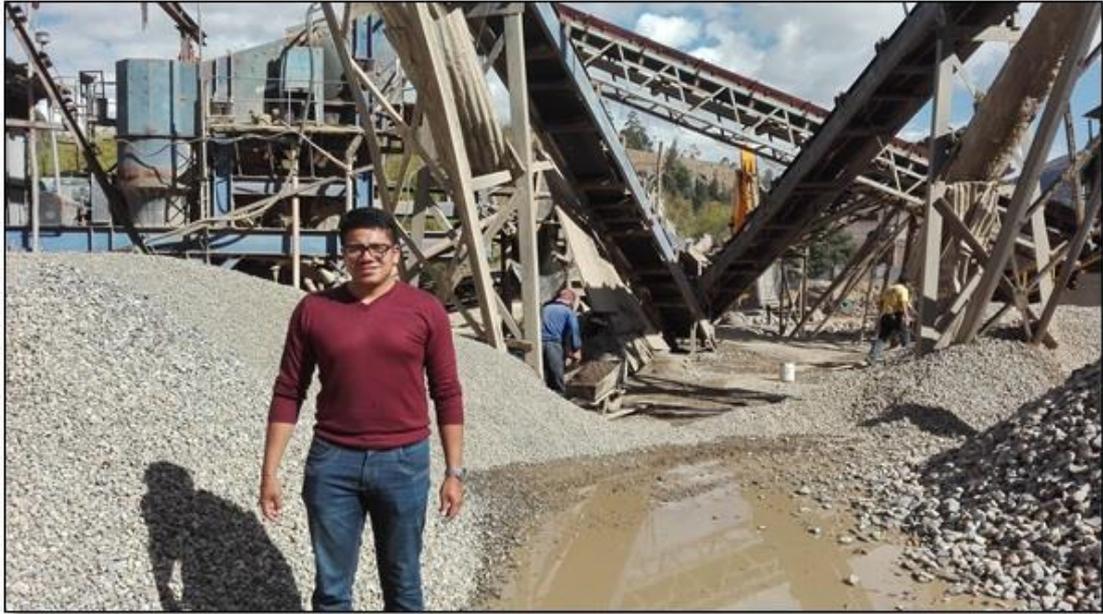


Foto 01: Visita a la chancadora Bazán, los cuales obtienen agregados de la cantera “La Victoria” y afluentes del río Mashcón.



Foto 02: Lavado de agregados para un mejor trabajo de los mismos.



Foto 03: Tamizado de la arena por el tamiz 5/16 para que cumpla con el huso granulométrico.



Foto 04: Muestreo de los agregados.



Foto 05: Laboratorio OSMA, se aprecia el lugar donde se realizan el muestreo de los materiales así como el mezclador de concreto para los especímenes cilíndricos. En la parte inferior derecha de la fotografía se aprecia los agregados para ser tamizados.



Foto 06: Tamices utilizados en la prueba de granulometría.



Foto 07: Hornos para el sacado de material.



Foto 08: Olla de Washington para la prueba de contenido de aire.



Foto 09: Jefe de laboratorio mapeando los testigos de concreto.



Foto 10: Identificación de probetas típicas de los tratamientos en estudio.



Foto 11: Medición de los diámetros de las probetas (3 medidas por cada probeta).



Foto 12: Probeta típica – probeta N°09 3% TiO₂ antes de ser ensayada.



Foto 13: Jefe de laboratorio ensayando las probetas en estudio.



Foto 14: Probeta típica – probeta N°09 3% TiO₂ ensayada y con el modo de falla en las esquinas superiores e inferiores.



Foto 15: Probeta típica – probeta N°24 12% TiO₂ antes de ser ensayada.



Foto 16: Probeta típica – probeta N°24 12% TiO₂ ensayada y con el modo de falla en las esquinas inferiores.



Foto 17: Monitoreo constante de las probetas en estudio.



Foto 18: Molde estándar terminado de madera y superboard para 8 probetas.



Foto 19: Llenado de probetas con el tratamiento base.



Foto 20: Probetas estándar para el tratamiento base.



Foto 21: Probetas estándar para el tratamiento con 3% de TiO_2 .



Foto 22: Luz ultravioleta con la potencia requerida para el ensayo de decoloración.



Foto 23: Resultado típico del tratamiento base luego del ensayo de decoloración con rodamina. La probeta de la izquierda medida en el tiempo 0 horas, la del centro medida en el tiempo 4 horas y la de la derecha medida en el tiempo 26 horas.

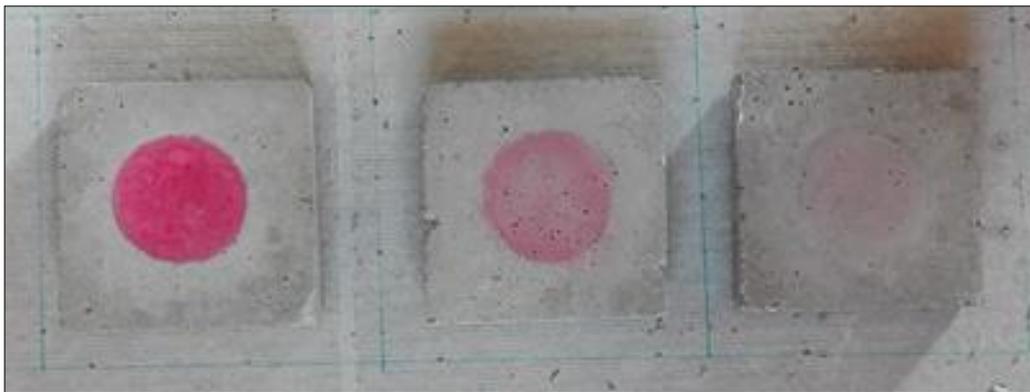


Foto 24: Resultado típico del tratamiento con 3% de TiO_2 luego del ensayo de decoloración con rodamina. La probeta de la izquierda medida en el tiempo 0 horas, la del centro medida en el tiempo 4 horas y la de la derecha medida en el tiempo 26 horas.



Foto 25: Fotocatalizador dióxido de titanio en la foto de la izquierda y rodamina en la foto de la derecha



Foto 26: Prueba de decoloración típica.

ANEXOS

ANEXO I

FICHA TÉCNICA DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I



PACASMAYO

CEMENTOS PACASMAYO S.A.A.
Calle La Colonia Nro. 150 Urb. El Vivero de Montebello Santiago de Surco - Lima
 Carretera Panamericana Norte Nro. 080 Pacasmayo - La Libertad
 Teléfono 317 - 0000



ISO 9001
SOC-REG-05-G0002
 Versión 01

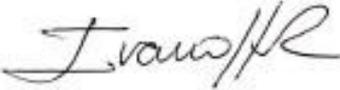
Cemento Portland Tipo I

Conforme a la NTP 334.008 / ASTM C150
 Pacasmayo, 20 de Julio del 2018

COMPOSICIÓN QUÍMICA		CP3AA	Requisito NTP 334.008 / ASTM C150
MgO	%	2.2	Máximo 5.0
SO ₃	%	2.8	Máximo 3.0
Pérdida por ignición	%	3.0	Máximo 3.5
Residuo Insoluble	%	0.73	Máximo 1.5

PROPIEDADES FÍSICAS		CP3AA	Requisito NTP 334.008 / ASTM C150
Contenido de Aire	%	8	Máximo 12
Expansión en Autoclave	%	0.10	Máximo 0.80
Superficie Específica	cm ² /g	3770	Mínimo 2800
Densidad	g/mL	3.12	NO ESPECÍFICA
Resistencia Compresión :			
Resistencia Compresión a 3 días	MPa (Kg/cm ²)	31.7 (323)	Mínimo 12.0 (Mínimo 122)
Resistencia Compresión a 7 días	MPa (Kg/cm ²)	38.5 (392)	Mínimo 19.0 (Mínimo 194)
Resistencia Compresión a 28 días (*)	MPa (Kg/cm ²)	46.5 (474)	Mínimo 28.0 (Mínimo 286)
Tiempo de Fraguado Vicat :			
Fraguado Inicial	min	132	Mínimo 45
Fraguado Final	min	289	Máximo 375

Los resultados arriba mostrados, corresponden al promedio del cemento despachado durante el periodo del 01-05-2015 al 30-06-2015
 La resistencia a la compresión a 28 días corresponde al mes de Mayo 2015
 (*) Requisito opcional.



Ing. Ivanoff V. Rojas Tello
 Superintendente de Control de Calidad

Solicitado por : Distribuidora Norte Pacasmayo S.R.L.

Este totalmente prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de Cementos Pacasmayo S.A.A.

Foto 27: Ficha técnica del cemento Portland Tipo I

Fuente: Cementos Pacasmayo.

ANEXO II
CONSTANCIA DEL LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES



CONSTANCIA

LA QUE SUSCRIBE, ING. MIRIAM MACHUCA ROMERO, GERENTE GENERAL DE OSMA ENGINEERING

HACE CONSTAR:

Que el ingeniero **Vásquez Espinoza, Manuel Alexander André** identificado con DNI: 46196996 con domicilio en Jr. Garcilazo de la Vega N° 199, ha realizado sus ensayos de concreto en nuestro laboratorio de materiales para el proyecto: "Influencia del Fotocatalizador Dióxido de Titanio en la Propiedad Autolimpiable del Concreto $f'c=210$ kg/cm²".

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que estime por conveniente.


ING. MIRIAM MACHUCA ROMERO
GERENTE GENERAL
OSMA ENGINEERING S.R.L.

Cajamarca, 12 de agosto de 2016

Foto 28: Certificado OSMA Engineering.