

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DESARROLLO DE UN MORTERO DE CEMENTO HIDRÁULICO DOPADO
CON TiO_2 QUE PERMITA ELIMINAR FOTOCATALÍTICAMENTE
MOLÉCULAS QUE SE UTILIZAN COMO MODELO PARA LA ELIMINACIÓN
DE HUMO AMBIENTAL.**

INFORME DE PROYECTO DE GRADUCIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE
LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR
POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

Joshua Rodríguez Guadamuz

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2022

DESARROLLO DE UN MORTERO DE CEMENTO HIDRÁULICO DOPADO CON
TIO₂ QUE PERMITA ELIMINAR FOTOCATALÍTICAMENTE MOLÉCULAS QUE SE
UTILIZAN COMO MODELO PARA LA ELIMINACIÓN DE HUMO AMBIENTAL.

Informe de proyecto de graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Química de la
Universidad de Costa Rica, como requisito final para optar por el grado de Licenciado en
Ingeniería Química.

Sustentante: Joshua Rodríguez Guadamuz

TRIBUNAL EXAMINADOR:



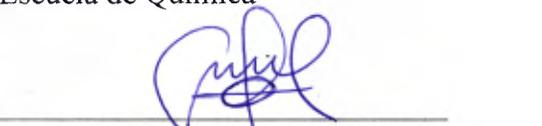
Ing. Adolfo Ulate Brenes, M.Sc.
Escuela de Ingeniería Química

Presidente del Tribunal



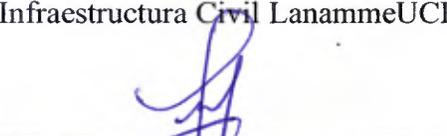
Lic. Roberto Urcuyo Solórzano, Dr.
Escuela de Química

Director del Proyecto



Ing. Luis Carlos Mesequer Quesada, Mag.
Coordinador de Laboratorios de
Infraestructura Civil LanammeUCR

Miembro Lector



Ing. Cindy Torres Quirós, M.Sc.
Escuela de Ingeniería Química

Miembro Invitado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

2022

DEDICATORIA

A mis padres María Roxana y Rafael,
por su amor y apoyo incondicional.

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo principal lograr desarrollar un mortero dopado con TiO_2 que permita eliminar fotocatalíticamente moléculas que se utilizan como modelo para la eliminación de humo ambiental. Inicialmente se trabajó en los laboratorios de LanammeUCR para determinar si las mezclas cumplen con los requisitos mecánicos y físicos según las normas técnicas INTECO para cemento hidráulico; a partir de los resultados se eligió una mezcla candidato para verificar que ocurra una interacción fotocatalítica en la superficie del mortero y cuantificar esta capacidad en términos de la norma UNI-11259: “determinación de la actividad fotocatalítica de aglutinantes hidráulicos método de ensayo Rodamina B”; finalmente, se buscó analizar al menos una oportunidad de negocio que posee este producto en el mercado nacional por medio de la metodología “puesta en marcha ajustada” (Lean Startup).

Para determinar las mezclas de mortero fotocatalítico que tienen una adecuada resistencia a la compresión se utilizó una serie de experimentos a 3 y 7 días de curado de los morteros preparados según un mezclado simple o utilizando un pretratamiento de molido según la norma INTE C57:2015 para la resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico y se comprobó que a mayor porcentaje de TiO_2 en las mezclas molidas, menor es la resistencia a la compresión, sin embargo ninguna mezcla presentó una resistencia menor a 13 MPa en edades de 3 días ni menor a 20 MPa en edades de 7 días según estipula la norma. Se concluyó continuar con la mezcla molida con 5 % TiO_2 utilizando una matriz de priorización ya que el procedimiento es recomendado para evitar la aglomeración de TiO_2 .

Se probó que el prototipo de cemento molido con 5 % TiO_2 cumple con los requisitos mecánicos y físicos al cumplir con los ensayos de resistencia a la compresión a 3, 7 y 28 días, contenido de aire, endurecimiento temprano, expansión por almacenamiento en agua durante 14 días, ensayo de expansión por autoclave y tiempo de fragua.

Por otro lado, se comprobó que el tratamiento del catalizador posee una influencia importante (~25 %) sobre la cantidad de rodamina B que se degradó en una 1 hora al sumergir las piezas

de cemento en disoluciones de rodamina y exponerlas a luz UV-A. Para estimar el orden de reacción se obtuvo la curva de calibración para la Rodamina B por métodos espectrofotométricos y luego se realizó un experimento para estimar el efecto de la adsorción de la Rodamina B sobre la superficie de la pieza de cemento a oscuras durante 24. Al considerar que tras 24 horas a oscuras la concentración de Rodamina D disuelta se mantiene constante y se puede despreciar el efecto de la adsorción, se concluye que el orden de reacción de este experimento es 0 y se comporta como un sistema altamente concentrado al considerar las bajas cantidades de catalizador expuesto, por lo que concuerda con el comportamiento de Langmuir-Hinshelwood.

Al cuantificar la actividad fotocatalítica de acuerdo con la norma UNI-11259 se observó que: de 6 cubos tratados con TiO_2 , 5 lograron pasar la condición inicial y, al exponerlos a luz UV-A, lograron superar por mucho el 20% de degradación en 4 h y el 50 % de degradación en 26 h, logrando en promedio un valor de R4 de 68.7 % y R26 de 98.0 %. En contraste, el tratamiento sin dióxido de titanio no mostró una degradación suficiente para cumplir con los requisitos de la norma.

Se realiza un análisis de la competitividad de distintas ideas de negocio utilizando este producto. Se utiliza el tablero de validación para evaluar suposiciones que podrían derrumbar el proyecto y el modelo Lean Canvas para validar ideas y conceptos, centrándose más en lograr un resumen viable del plan de negocio; específicamente planteando los problemas, soluciones, métricas clave y ventajas competitivas, culminando en un paquete de piezas clave llamado “Kit de Cemento Autolimpiante” con el cual los consumidores lograrán construir sus propias piezas de cemento utilitario en casa, invirtiendo poco tiempo en el proceso y con la posibilidad de compartir los resultados en redes social si lo desean.

Se recomienda completar diversos estudios entorno a la norma INTE C147:2018: “Requisitos de cemento hidráulico”, impacto sobre la degradación de contaminantes presentes en distintas corrientes de aire de fuentes cotidianas y el riesgo sobre la viabilidad de la propuesta de negocio debido a los inventarios de materias primas.

ÍNDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA	iii
RESUMEN.....	v
1 Aspectos generales.....	1
1.1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
2 Marco teórico	11
2.1 Oxidación avanzada	11
2.1.1 Fotocatálisis.....	11
(2.1).....	13
2.2 Cemento fotocatalítico	14
2.2.1 Concretos, morteros y pastas.....	14
2.2.2 Dióxido de titanio.....	16
2.2.3 Aplicaciones fotocatalíticas del dióxido de titanio	18
2.2.4 Síntesis y propiedades mecánica del cemento fotocatalítico.....	22
2.3 Modelos de negocios.....	26
3 Métodos de ensayo.....	29
3.1 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico	29
3.2 Práctica para el mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento.....	30
3.3 Método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico	30
3.4 Contenido de aire en el mortero de cemento hidráulico.....	31
3.5 Determinación de la densidad del cemento hidráulico.....	32
3.6 Determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico	32
3.7 Determinación del endurecimiento temprano del cemento hidráulico.....	33
3.8 Determinación del tiempo de fragua de un mortero por medio de la aguja de Vicat	34
3.9 Expansión por autoclave del cemento hidráulico.....	35
3.10 Expansión del cemento en barras de mortero almacenadas en agua.....	35
3.11 Determinación de la actividad fotocatalítica de aglutinantes hidráulicos método de ensayo Rodamina	36

4	Metodología.....	39
4.1	Materiales.....	39
4.1.1	Contaminante modelo.....	39
4.2	Equipo experimental.....	40
4.3	Metodología experimental.....	45
4.3.1	Diseño experimental para evaluar la resistencia a la compresión	47
4.3.2	Ensayos y requisitos mecánicos y físicos	48
4.3.3	Diseño de experimentos químicos.....	51
4.3.4	Evaluación de la estrategia de modelo de negocios	55
5	Resultados experimentales y discusión	59
5.1	Ensayos mecánicos y físicos	59
5.1.1	Consideraciones generales.....	59
5.1.2	Evaluación estadística para valorar la calidad del mortero con respecto a la resistencia a la compresión a los 3 y 7 días	60
5.1.3	Verificación de los supuestos del análisis de varianza	67
5.1.4	Ensayo de resistencia a la compresión de morteros para la mezcla molida de cemento con 5.0 % dióxido de titanio.....	69
5.1.5	Determinación del contenido de aire presente en el cemento para la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio	71
5.1.6	Determinación de la densidad del cemento para la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio	72
5.1.7	Expansión causada por el almacenamiento en agua de barras de mortero de la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio	73
5.1.8	Determinación del grado en que una pasta de la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio desarrolla un endurecimiento temprano	74
5.1.9	Determinación del tiempo de fragua para la mezcla molida de cemento con 5.0 % TiO ₂	75
5.1.10	Expansión causada por autoclave en barras de pasta de la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio.....	76
5.2	Pruebas de capacidad catalítica	78
5.2.1	Longitud de onda de máxima absorción.....	78
5.2.2	Curva de calibración.....	79
5.2.3	Diseño experimental para evaluar la ocurrencia de reacción química	80
5.2.4	Verificación de los supuestos del análisis de varianza para el diseño de experimentos de reacción química.....	82
5.2.5	Estudio de adsorción de la rodamina B hacia la superficie del mortero.....	83
5.2.6	Determinación del orden de reacción	84

5.2.7	Capacidad catalítica según la metodología de la norma UNI-11259	87
5.3	Innovación por la metodología de puesta en marcha ajustada	89
5.3.1	Problema de investigación	90
5.3.2	Tablero de Validación: inicio.....	91
5.3.3	Tablero de Validación: primer pivote	92
5.3.4	Tablero de Validación: segundo y tercer pivote.....	99
5.3.5	Análisis FODA y Lean Canvas	104
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
6.1	Conclusiones	111
6.2	Recomendaciones.....	112
7	REFERENCIAS.....	115
8	NOMECLATURA	129
	APENDICES.....	131
	A. Datos experimentales	131
	B. Resultados intermedios	142
	C. Muestra de cálculos.....	145
	ANEXOS	148

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Descripción de las áreas de aplicación ambiental comercial del dióxido de titanio.....	6
Cuadro 4.1. Reactivos utilizados durante el desarrollo de la etapa experimental.....	39
Cuadro 4.2 Equipos utilizados durante el desarrollo de la etapa experimental.....	40
Cuadro 5.1 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple y fallados tras 3 días de curado, reportados como el promedio de los esfuerzos lo más cercano a 0.1 MPa.....	61
Cuadro 5.2 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple y fallados tras 7 días de curado.	61
Cuadro 5.3 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio mezclado por molido como pretratamiento y fallados tras 3 días de curado.	62
Cuadro 5.4 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio mezclado por molido como pretratamiento y fallados tras 7 días de curado.	62
Cuadro 5.5 Análisis de varianza edad de 3 días y mezclado simple.....	64
Cuadro 5.7 Análisis de varianza edad de 7 días y mezclado simple.....	64
Cuadro 5.6 Análisis de varianza edad de 3 días y mezclado por molido.....	64
Cuadro 5.8 Análisis de varianza edad de 7 días y mezclado por molido.....	64
Cuadro 5.9 Resultados del análisis LSD para los ensayos con una edad de 3 días y mezclado por molido, donde μ_A , μ_B , μ_C , μ_D son las medias para 0 %, 0.1 %, 2.5 % y 5 % respectivamente.	64
Cuadro 5.10 Resultados del análisis LSD para los ensayos con una edad de 7 días y mezclado por molido, donde μ_A , μ_B , μ_C , μ_D son las medias para 0 %, 0.1 %, 2.5 % y 5 % respectivamente.	65
Cuadro 5.11 Matriz de priorización para el método de mezclado y la concentración de TiO_2 de la mezcla candidato.....	66
Cuadro 5.12 Resultados de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico y cemento con 5 % TiO_2 usando especímenes cúbicos de 50mm.	70
Cuadro 5.13 Resultados de la resistencia a la compresión promedio reportada por norma y de los morteros de cemento con 5 % TiO_2 según la relación A/C y el flujo.....	71

Cuadro 5.14 Resultados de la medición de masa del contenido del embace de 400mL.....	71
Cuadro 5.15 Resultados del cálculo de contenido de aire para el cemento hidráulico patrón y el cemento candidato con 5 % TiO ₂	72
Cuadro 5.16 Datos necesarios y resultados del cálculo de la densidad del cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO ₂	73
Cuadro 5.17 Medida del cambio de longitud del cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO ₂	74
Cuadro 5.18 Resultados de la expansión de las barras de mortero de cemento hidráulico y cemento con 5 % TiO ₂ almacenadas en agua.	74
Cuadro 5.19 Resultados del ensayo sobre la determinación del endurecimiento temprano del cemento hidráulico patrón y cemento con 5.0 % TiO ₂	75
Cuadro 5.20 Resultados de la determinación de la consistencia normal para pastas del cemento hidráulico patrón y cemento con 5.0 % TiO ₂	76
Cuadro 5.21 Tiempos de fragua obtenidos del cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO ₂ por medio de la aguja de Vicat.....	76
Cuadro 5.22 Medida del cambio de longitud debido a la autoclave para el cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO ₂	77
Cuadro 5.23 Resultados de la expansión por autoclave en barras de pastas de cemento hidráulico y cemento con 5 % TiO ₂	77
Cuadro 5.24 Diferencia en la absorbancia medida tras los tratamientos propuestos para la degradación de la molécula modelo, rodamina B.	81
Cuadro 5.25 Resultados del análisis de varianza correspondiente a los ensayos degradación química.....	81
Cuadro 5.26 Resultados del análisis LSD correspondiente a los ensayos degradación química....	82
Cuadro 5.27 Resultados de los ensayos UNI 11259 Determinación de la actividad fotocatalítica de los aglutinantes hidráulicos Método de prueba de Rodamina.....	87
Cuadro 5.28 Resultados de la actividad fotocatalítica determinados según la norma UNI 11259 para los especímenes con 5 % dióxido de titanio.....	88
Cuadro 5.29 Resultados de la actividad fotocatalítica determinados según la norma UNI 11259 para los especímenes con 5 % dióxido de titanio.....	89

Cuadro A.1 Resultados de la relación másica agua cemento (A/C) que cumple con un flujo de 110 ± 5 en 25 golpes de la tabla de flujo para la totalidad de mediciones de flujo a lo largo de todas las pruebas que lo requirieron.....	131
Cuadro A.2 Resultados de la carga máxima total a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple. .	131
Cuadro A.3 Resultados de la carga máxima total a 7 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple. .	132
Cuadro A.4 Resultados de la carga máxima total a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.	132
Cuadro A.5 Resultados de la carga máxima total a 7 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.	132
Cuadro A.6 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de 110 ± 5 de acuerdo con la norma INTE C147:2018 para el ensayo de resistencia a la compresión con 6 cubos fallados a una edad de 3 días.....	132
Cuadro A.7 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de 110 ± 5 de acuerdo con la norma INTE C147:2018 para el ensayo de resistencia a la compresión con 6 cubos fallados a una edad de 7 días.....	133
Cuadro A.8 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de 110 ± 5 de acuerdo con la norma INTE C147:2018 para el ensayo de resistencia a la compresión con 6 cubos fallados a una edad de 28 días.....	133
Cuadro A.9 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de $87 \frac{1}{2} \pm 7 \frac{1}{2}$ de acuerdo con la norma INTE C136:2020 para el ensayo de contenido de aire.....	133
Cuadro A.10 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de mortero a las $24 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ a partir del momento en que se mezcló el cemento.....	134
Cuadro A.11 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de mortero dopado con dióxido de titanio tras 14 días a partir del momento en que se mezcló el cemento.	134

Cuadro A.12 Resultados de la masa de agua que se requiere para alcanzar una penetración inicial de 32 mm \pm 4 mm de acuerdo con la norma INTE C169:2019 para el ensayo de endurecimiento temprano.	134
Cuadro A.13 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de pasta dopada con dióxido de titanio tras 24 h \pm 30 min del moldeado según el método de ensayo INTE C135:2018 expansión por autoclave.	134
Cuadro A.14 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de pasta dopada con dióxido de titanio tras el ciclo de casi 6 h en la autoclave según el método de ensayo INTE C135:2018 expansión por autoclave.	135
Cuadro A.15 Resultados de la curva de calibración para 7 disoluciones patrón de Rodamina B, utilizando agua Mili-Q como disolvente, a las cuales se le mide la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software resultado se reporta por medio del software VISIONpro.	135
Cuadro A.16 Resultados del impacto de la adsorción sobre la concentración de la Rodamina B en la muestra, en un ambiente controlado a temperatura ambiente y a oscuras. Se le mide la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software VISIONpro.	136
Cuadro A.17 Resultados de la determinación del orden de reacción medido a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software VISIONpro.	138
Cuadro B.18 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple.	142
Cuadro B.19 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 7 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple.	142
Cuadro B.20 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.	142

Cuadro B.21 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 7 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.	142
Cuadro B.22 Resumen de resultados del impacto de la adsorción sobre la concentración de la Rodamina B en la muestra, en un ambiente controlado a temperatura ambiente y a oscuras. Se le mide la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software VISIONpro. Se calcula la concentración utilizando la ecuación de la recta de la curva de calibración.	143
Cuadro B.23 Resultados de la evaluación sobre la reacción de la Rodamina B en la superficie de una pieza de cemento dopado con 5 % TiO ₂ medido a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software resultado se reporta por medio del software VISIONpro. Se calcula la concentración utilizando la ecuación de la recta de la curva de calibración.	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de las capas presentes en una pared verde: (1) Plantas, (2) sustrato, (3) aislante y (4) estructura. Figura modificada de (Wood et al., 2014).	3
Figura 1.2. Exposición de The Palazzo Italia, World Fair Expo 2015, Milan por parte de Nemesi & Partners (Kowalski & Januszkiewicz, 2017).	9
Figura 2.1. Esquema de la formación de los portadores de carga generados por la absorción de luz. Figura modificada (Crow, 2010).	12
Figura 2.2. Esquema de las primeras etapas de la hidratación del cemento. Figura modificada (Esping & Löfgren, 2005).	23
Figura 4.1. Estructura química de la rodamina B (Aldrich, n.d.).	40
Figura 4.2. Equipo prototipo de molido pequeño (A) y equipo final de molido (B) (Elaboración propia)	42
Figura 4.3. Equipo para batido de cemento (A), mesa de flujo por golpeteo (B), prensa hidráulica (C), controlador automático del cuarto húmedo (D), equipo de medición de longitud (E), frasco de l'Chatelier (F), equipo aguja de Vicat (G), equipo de autoclave (H) y moldes para probetas de mortero de 50 mm (I) (Elaboración propia).	43
Figura 4.4. Equipo con lámparas de luz ultravioleta (A y B), espectrofotómetro UV-Vis (C) y cámara de exposición a luz UV para probetas cúbicas de cemento (D) (Elaboración propia).....	44
Figura 4.5. Esquemas experimentales del proyecto para determinar si cumple con los requisitos mecánicos y físicos, cuantificar la capacidad catalítica y analizar la oportunidad de negocio que posee este producto.	46
Figura 4.6. Equipo de trabajo, ensayo de exposición de las probetas a luz UV (Elaboración propia).	54
Figura 5.1. Promedio de la relación A/C utilizada en las repeticiones de la prueba de flujo para cada una de las mezclas candidato (Elaboración propia).	60
Figura 5.2. Gráficos de normalidad de los residuos para los modelos de resistencia a la compresión a los 3 días por mezclado simple (A), 3 días por mezclado con molido (B), 7 días por mezclado simple (C) y 7 días por mezclado con molido (D) (Elaboración propia).	67
Figura 5.3. Gráficos de varianza constante de los residuos según los valores fijados para los modelos de resistencia a la compresión a los 3 días por mezclado simple (A), 3 días por mezclado	

con molido (B), 7 días por mezclado simple (C) y 7 días por mezclado con molido (D) (Elaboración propia).	68
Figura 5.4. Gráficos de independencia de los residuos con el orden de observación según los valores fijados para los modelos de resistencia a la compresión a los 3 días por mezclado simple (A), 3 días por mezclado con molido (B), 7 días por mezclado simple (C) y 7 días por mezclado con molido (D) (Elaboración propia).	69
Figura 5.5. Gráfico de barrido de longitud de onda para una disolución de Rodamina B (Elaboración propia).	79
Figura 5.6. Curva de calibración de la rodamina B a una longitud de onda de 554 nm obtenido mediante el software VISIONpro (Elaboración propia).	80
Figura 5.7. Gráficos de los supuestos para el diseño experimental: supuesto de normalidad (A), supuesto de varianza constante (B) y supuesto de independencia del orden de medición (C) (Elaboración propia).	83
Figura 5.8. Gráfica de la evaluación sobre la adsorción de la Rodamina B en la superficie de una pieza de cemento dopado con 5 % TiO ₂ (Elaboración propia).	84
Figura 5.9. Gráfica de los resultados sobre la reacción de la Rodamina B en la superficie del mortero dopado con 5 % TiO ₂ (Elaboración propia).	86
Figura 5.10. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, primer supuesto arriesgado de la hipótesis inicial (Elaboración propia).	92
Figura 5.11. Malla receptora de información para nuevo primer pivote del tablero de validación (Elaboración propia).	93
Figura 5.12. Mapa de empatía generado a partir de la encuesta virtual sobre Evelyn y su emprendimiento de objetos de concreto (Elaboración propia).	95
Figura 5.13. Mapa de empatía correspondiente a Wagner, generado a partir de una encuesta virtual (Elaboración propia).	95
Figura 5.14. Mapa de empatía correspondiente a Shirley, generado a partir de una encuesta virtual (Elaboración propia).	96
Figura 5.15. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, primer supuesto arriesgado del pivote 1 (Elaboración propia).	97
Figura 5.16. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, segundo supuesto arriesgado del pivote 1 (Elaboración propia).	98

Figura 5.17. 10 moldes de polipropileno laminado para hacer macetas de concreto de dimensiones 7 cm x 10 cm x 10 cm aproximadamente (Duane Diseño Vivo, n.d.).....	99
Figura 5.18. Esquema de propuesta de valor para el segmento de cliente ideal, personas con edades entre 20 y 40 años, de la gran área metropolitana que tengan un ingreso medio y pasen la mayor parte de su tiempo en la casa (Duane Diseño Vivo, n.d.).....	100
Figura 5.19. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, primer y segundo supuesto del pivote en conjunto 2 y 3 (Elaboración propia).	102
Figura 5.20. Resultados de la séptima pregunta de la encuesta: ¿Compraría un producto como el mencionado anteriormente? (Elaboración propia).	103
Figura 5.21. Resultados de la undécima pregunta de la encuesta: ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un producto de este estilo que incluya medio kilogramo de cemento autolimpiante sellado, un kilogramo y medio de arena, 1 molde y el manual? (Elaboración propia).	104
Figura 5.22. Esquema del análisis FODA realizado para recopilar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del modelo propuesto (Elaboración propia).	105
Figura 5.23. Resultados del esquema Lean Canvas para el Kit de Cemento según la metodología puesta en marcha ajustada para el estudio de oportunidad de negocio (Maurya, 2012).	109

1 Aspectos generales

1.1.1 Introducción

El aporte en gases de efecto invernadero por el sector de construcción es preocupante y se ha vuelto un desafío poder aumentar la eficiencia energética y aprovechar al máximo la gran cantidad de material que se utiliza. La construcción crece junto a la población y al urbanizar aumenta la densidad de población y la necesidad de transporte, mientras disminuye el área verde capaz de absorber contaminantes. Las emisiones por la combustión de combustibles fósiles generan una grave contaminación del aire circundante antes de dispersarse. Con una gran carga de tráfico en zonas densamente pobladas, la calidad del aire puede verse gravemente perjudicada (Seo & Yun, 2017).

Los principales componentes dañinos en el aire se relacionan con partículas finas de tamaño menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), aerosoles y con contaminantes como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) o el ozono troposférico (O_3). De los componentes orgánicos, en la categoría de aerosoles y de $PM_{2.5}$, el principal es el hollín emitido por fuentes de combustión. Los vehículos con motores de combustión pueden ser una fuente significativa de aerosoles finos y ultrafinos (Kennedy, 2007).

En Estados Unidos, bajo la Normativa Nacional de Calidad del Aire y el Ambiente (NAAQS, por sus siglas en inglés), se controlan las emisiones de contaminantes de los vehículos con motor en carretera. El NO_2 es uno de los seis contaminantes regulados por el NAAQS debido a que la exposición puede causar infecciones, bronquitis y enfisema (USEPA, 2008). Los NO_x también representan un paso para la formación de ozono troposférico que es perjudicial para los ecosistemas naturales y el sistema respiratorio (Sikkema, 2013a).

A nivel nacional, para el 2010, el Área Metropolitana (GAM) albergaba al 70 % de la flota vehicular de Costa Rica, hasta un 60 % de la población y 85 % de la industria (León et al., 2012). Sin embargo, corresponde al 3.8 % del territorio por lo que esta es una zona vulnerable

a la contaminación del aire. Respecto a la GAM, el Sexto Informe de la Calidad del Aire 2013-2015 concluye que los niveles de partículas PM10 cumplen con la normativa nacional (Decreto N° 30221-S) pero no con los niveles de referencia internacionales puestos por la Organización Mundial de la Salud. Los niveles de dióxido de nitrógeno también superan los niveles puestos por la OMS en muchos sitios de muestreo, principalmente en lugares conocidos por el colapso del tránsito (E. Gutiérrez et al., 2015).

En vista de los problemas anteriormente mencionados y debido a la importancia del aire para todo ser vivo, se deben buscar procesos que apoyen a la degradación de contaminantes. El dióxido de titanio en su forma de anatasa es un compuesto capaz de reaccionar fotocatalíticamente con compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes bajo iluminación solar. Es una opción que puede reducir las concentraciones ambientales de óxidos de nitrógeno (NOx) y otros contaminantes del sector de transporte que, con frecuencia, exceden niveles de exposición recomendados (Yang et al., 2019). En hormigón, el dióxido de titanio permite que se den reacciones en la superficie del propio material y tiene el potencial de degradar material orgánico particulado PM10, compuestos orgánicos volátiles (COV), óxido de azufre (SOx) y óxido de nitrógeno (NOx) (Dolatabadi, 2013).

La adición de TiO₂ en materiales de construcción le otorga una capacidad de auto limpieza, dándole un mayor valor agregado comúnmente utilizado en cemento blanco debido al característico color blanco del TiO₂. El efecto se da debido a que la reducción de Ti⁴⁺ en Ti³⁺ por la oxidación de O₂⁻ a O₂ en presencia de luz, genera hidrofilia del TiO₂ en la superficie facilitando que la suciedad, mugre y sales sean lavadas al formarse una fina capa de agua que recorre la superficie del material (Cedillo-González et al., 2020; Li et al., 2018).

Esta segunda propiedad le ha abierto cierto mercado internacional al uso de dióxido de titanio en materiales de construcción auto limpiantes, comúnmente como una capa transparente de TiO₂ cerámico sobre vidrio, lozas para piso, azulejos y cerámica (Grespania, n.d.; Kowalski & Januszkiewicz, 2017; Pilkington, n.d.).

1.2 Antecedentes

Es posible que la solución a los problemas causados por la contaminación del aire se encuentre tratando directamente las fuentes de emisión, pero en este momento el impacto es tan grande que se deben aprovechar todas las oportunidades de mitigar los daños sobre la salud humana y efectos sobre la biodiversidad (Ashby et al., 2009; Bartos, 2017; E. Gutiérrez et al., 2015; León et al., 2012; Vallero, 2014).

En investigaciones innovadoras se plantea aprovechar la superficie de concreto que hay en las ciudades y destinarla a la reducción del “smog”. A pesar de que la noción de esta idea es extraña, la base científica y tecnológica ya está disponible (Ashby et al., 2009). Una propuesta son las paredes verdes (Green Walls) mostrados en la Figura 1.1 y la idea data de al menos un milenio atrás, consiste en un sistema de siembra vertical que les permite a las plantas crecer en las fachadas de estructuras de una forma estética y con mantenimiento regular para lograr la reducción de la contaminación y mejorar el ecosistema natural (Wood et al., 2014).

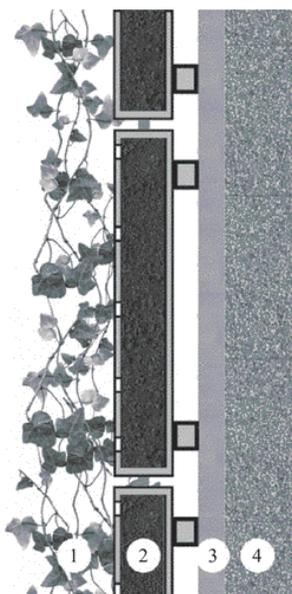


Figura 1.1. Esquema de las capas presentes en una pared verde: (1) Plantas, (2) sustrato, (3) aislante y (4) estructura. Figura modificada de (Wood et al., 2014).

Otra propuesta es el concreto preparado con residuos industriales difíciles de tratar con resultados favorables para fijar escombros, cenizas de cáscara de arroz, residuos de plástico electrónico y humo de sílice, caucho de neumáticos y muchos otros materiales que llegan a sustituir parte de la cantidad de cemento o grava necesaria y además fijando dichos contaminantes durante la vida útil del cemento, reduciendo la contaminación inmediata (Aureliano et al., 2019; Catherine, 2017; Hwang & Chandra, 1996; Khawar et al., 2021).

Similar a estas dos ideas se encuentra el cemento fotocatalítico utilizando dióxido de titanio. Desde 1980, cada década se ha encontrado una nueva forma de utilizar el TiO_2 . Primero se desarrolló en cristales de tipo n-rutilo TiO_2 como un semiconductor para lograr la electrolisis del agua produciendo hidrógeno gas de forma limpia, luego, para 1990 se comenzó a investigar la capacidad bactericida e hidrofílica al fijar el dióxido de titanio en laminas a nivel de laboratorio y finalmente en la década de los 2000, se comenzaron a realizar los estudios necesarios para aplicar las capacidades fotocatalíticas en la descontaminación atmosférica urbana (Hanson, 2014).

A pesar del crecimiento en cuanto a investigación eco amigable, la producción de dióxido de titanio posee un procedimiento industrial de tipo beneficio. Con los años, la técnica no ha cambiado y continúa siendo un proceso contaminante con gran capacidad de mejora (Middlemas, 2014). El término de industria de beneficio, en minería, hace referencia al aumento del valor económico de un mineral al eliminar minerales menos valiosos, posiblemente difíciles de tratar y que a menudo tienen un efecto severo sobre el medio ambiente (Poscher et al., 2016).

Para la extracción, el titanio es de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, con cientos de tipos de minerales compuestos de titanio. El titanio se sigue considerando un metal raro debido a que solo unos 10 tipos poseen valor de producción industrial y todos ellos requieren tecnología de fundición compleja, provocando una baja escala de producción (Sun et al., 2012). El rutilo es el mineral más rico en titanio seguido de la anatasa, este rutilo es aproximadamente 95 % TiO_2 y se encuentra principalmente en zonas costeras y en la arena de playa, sin embargo, con apenas entre 40 % a 65 % de $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$, el mineral ilmenita

abastecía alrededor del 90 % de la demanda mundial de minerales de titanio para el 2010 (Kahn, 1984; U.S. Geological Survey, 2011).

La razón de la dependencia del mineral ilmenita es su abundancia en regiones accesibles por el hombre, mientras que el rutilo natural es escaso. Entre los esfuerzos por evitar la ilmenita como recurso directo, se ha desarrollado un método de transformación que logra crear rutilo sintético a partir de la ilmenita y un último recurso alternativo que es fundir ilmenita, magnetitas, arenas con titanio y escorias de los procesos de aleación entre hierro y titanio, junto con agentes reductores y fundentes, para lograr un producto llamado escoria de titanio, el cual es rico en titanio (Kim et al., 2020; Middlemas, 2014; Sun et al., 2012). El uso de escoria de titanio genera una cantidad significativamente menor de residuos en los dos procesos comerciales actuales, tanto la ruta de cloruros como de sulfato. Además, mientras que la ilmenita consume 3.75 toneladas de ácido sulfúrico por tonelada de TiO_2 producido, la escoria consume generalmente 2.51 toneladas de ácido en el proceso de sulfato (Middlemas, 2014).

Tras el proceso de beneficio, se estima que tan solo el 5 % del titanio extraído es utilizado para fabricar titanio metálico, mientras que el resto se destina a producir dióxido de titanio, especialmente en las regiones de Australia y África (Imam et al., 2010). Para el 2014, alrededor del 90 % del dióxido de titanio producido se destinó a pigmentos y revestimientos arquitectónicos o pinturas debido a la resistencia solar que brinda (Karlsson, 2014). Existe un fuerte aumento en la demanda y precio del TiO_2 , el precio del rutilo natural con calidad alta pasó de 500 USD por tonelada en el 2010 a 2500 USD por tonelada a comienzos del 2012 y el precio del pigmento aumento alrededor del 35 % en precio en el mismo periodo (IHS Markit, 2018; Sun et al., 2012). En el área de pigmentos, se utiliza principalmente como aditivo para proporcionar tonos blancos y opacidad en plásticos, pinturas, papel y tintas (TZMI, 2021).

El TiO_2 restante se ha canalizado principalmente hacia aplicaciones ambientales, específicamente aprovechando la fototoxicidad bactericida que presenta el nano TiO_2 en ambientes acuáticos (Chihiro, 2019; Ochiai & Fujishima, 2012; Tong, 2015; Yaqoob et al.,

2018) y el potencial de limpieza pasiva del aire mediante la oxidación de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV) (Berdahl & Akbari, 2008; Cassar, 2004; Fujishima et al., 2008; Seo & Yun, 2017; Zouzelka & Rathousky, 2017). En el Cuadro 1.1 se enuncian otras aplicaciones comerciales medioambientales que resumen la totalidad del alcance del TiO₂ en el mercado.

Cuadro 1.1 Descripción de las áreas de aplicación ambiental comercial del dióxido de titanio.

Área de aplicación	Objetivos de aplicación
Purificación del aire	Tratamiento de contaminantes en el aire Desodorante
Purificación del agua	Tratamiento de contaminantes en el agua Desinfección
Agricultura	Desodorante Sistemas hidropónicos Remoción de pesticidas residuales
Energía	Celdas solares Electrolisis del agua
Residencial	Papel tapiz, cortinas y ventanas en interiores Vidrios, pinturas, carpas y azulejos en exteriores
Arquitectónico y esculturas en exteriores	Superficies auto limpiantes
Médico	Purificación de catéteres y quirófanos Purificación de salas de tratamiento de cáncer
Vehículos	Vidrio anti-empañamiento en espejos y ventanas
Rutas de tránsito vehicular y peatonal	Eliminación de NO _x de forma fotocatalítica Reflectividad de irradiación para mantener el pavimento frío
Iluminación y electrodomésticos	Lámparas fluorescentes con recubrimiento de TiO ₂ Purificación de cámaras de refrigeración

Fuente: (Sikkema et al., 2014)

En el área de purificación del aire, las investigaciones utilizando cementos y superficies fotocatalíticas han mostrado que es técnicamente factible reducir la concentración de compuestos dañinos para la salud en el aire debido a las reacciones de oxidación de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos en las superficies expuestas a luz, siempre y cuando se cumpla un rango de longitud de onda de 300 nm a 400 nm y en presencia de TiO_2 (Cassar, 2004; Gaya, 2013; Krýsa, 2012; Xu et al., 2020; Yang et al., 2019). En la aplicación, las preocupaciones son: la necesidad de estudios con simulaciones meteorológicas para determinar la mejor manera de implementar esta tecnología y reconocer si es posible lograr este objetivo de manera rentable y sostenible (Berdahl & Akbari, 2008).

Entre los proyectos notables que se han realizado, en el 2002 se aplicó una capa de mortero fotocatalítico sobre una carretera muy transitada en Segrate, Milán, en la calle Morandi, a una sección de 230 metro de largo y se comparó con secciones de control. Se registraron niveles de reducción de hasta del 60 % en óxidos de nitrógeno durante un periodo de prueba en noviembre de ese año. Otro experimento, llevado a cabo en Guerville, Francia, simula un cañón urbano o una zona con un pasadizo estrecho, como un callejón, en donde los efectos de la polución pueden ser más notorios. Una vez aplicado un recubrimiento de cemento con TiO_2 a las paredes del cañón, el resultado fue una reducción de contaminantes que varió entre un 20 % y un 70 % dependiendo principalmente de viento (Ashby et al., 2009). Estos estudios carecen de un pronóstico a largo plazo por lo que la implementación sostenible es incierta, pero genera indicios muy favorables.

En el área de auto limpieza, el experimento de Cassar et al. (2004) explica que el dióxido de titanio logra una restauración rápida en la superficie limpia de una muestra de discos de cemento blanco dopados con el catalizador luego de ser impregnados con una solución de fenantroquinona (0.1 mg/cm^2) que provoca la formación de una capa uniforme y amarilla sobre el disco.

Las pruebas se realizaron simulando un año de exposición con irradiación acelerada en un simulador solar. El estudio utiliza no solo fenantroquinona, sino también rodamina, ambos utilizados para la evaluación de las propiedades auto limpiantes; en el año 2008 se

formalizaron estos compuestos, por parte de una norma italiana UNI-11259, para probar la capacidad fotocatalítica general para remover contaminantes del medio ambiente (Moreno, 2018). Ambos dentro de la familia de moléculas modelo y pigmentos que permiten evidenciar la posibilidad de que se dé una limpieza del aire (Krýsa, 2012).

La desactivación del TiO_2 también es un factor que se considera para la aplicación urbanística y ocurre principalmente por contaminantes inorgánicos que bloquean la luz. Yu et al. (2003), mediante la experimentación con bloques de cemento fotocatalítico para calzada, determinó que la degradación se puede ver afectada entre un 38 % y 77 % en los primeros 4 meses debido al polvo, organismos y suciedad que bloquee la luz solar. Además, una evaluación de losas con capas fotocatalíticas de 15 mm, 75 mm y 150 mm de profundidad no encontró evidencia de correlación entre la penetración de luz UV-A con la oxidación de óxido de nitrógeno a un nivel de confianza superior al 90 % por lo que se descarta hasta cierto punto que ocurran reacciones fotocatalíticas dentro del material (Sikkema, et al.2012).

En el área de estudio predominan las opiniones científicas favorables, a pesar de que hasta la fecha no se han culminado las investigaciones, ni se estima que existan experimentos contundentes sobre los beneficios de utilizar cemento fotocatalítico. A pesar de la duda, la Iglesia del Jubileo, formalmente conocida como Chiesa di Dio Padre Misericordioso, es uno de los primeros edificios construidos con hormigón reforzado, blanco e implementando el cemento fotocatalítico auto limpiante; tras 16 años de su construcción la estructura no muestra desgaste estructural, pero sí una acelerada aparición de manchas resultando en un alto costo de mantenimiento. La razón de las manchas es la incrustación de arena y polvo que no se consigue lavar con la lluvia (Cardellicchio, 2020). El proveedor del material necesario para la construcción de esta iglesia fue Italcementi S.P.A. Luego, en 2015, sumando unas asombrosas 12500 horas de investigación, lograron producir un material suficientemente fuerte y flexible para dar forma a la obra *Palazzo Italia* mostrada en la Figura 1.2, un edificio con más de 2200 toneladas del nuevo cemento fotocatalítico y en donde se aplicó un formado por llenado de moldes de silicona con mortero para lograr un producto final sumamente liso y solucionar el problema que ocurrió con la Iglesia del Jubileo (Kowalski & Januszkiewicz, 2017).



Figura 1.2. Exposición de The Palazzo Italia, World Fair Expo 2015, Milan por parte de Nemesi & Partners (Kowalski & Januszkiewicz, 2017).

Enunciando algunas de las construcciones donde se utilizó cemento fotocatalítico entre el 2000 y el 2016: se tienen reportes de aproximadamente 5000 estructuras, aceras y ciertas zonas peatonales en Japón que aprovecharon el TiO_2 de uno u otro modo; en América Latina, el Hospital de Especialidades en Ciudad de México; en Italia, la Escuela Mortara, el Palazzo Italia y la iglesia del Jubileo; en Francia la Cité de la Musique; en España, el Puente de Sarajevo; y en Estados Unidos, esculturas en St. Anthony Falls Bridge, Mineapolis (Janus & Zajac, 2016).

A pesar de ser un material tan estudiado, la influencia que tienen las nanopartículas de TiO_2 en las propiedades tanto físicas como químicas del hormigón fresco y endurecido a corto y largo plazo todavía tiene muchas incertidumbres (Hegyí et al., 2018).

Como otros recursos, el cemento es de interés público y protegido por las normas, leyes y regulaciones de la República de Costa Rica. Es necesario y conveniente dirigir recursos en el estudio técnico del nuevo cemento fotocatalítico utilizando materiales y normas técnicas nacionales por lo que no se debe desestimar la investigación en áreas de conocimiento introductorio como son las propiedades físicas del material, capacidad fotocatalítica y oportunidad de negocio.

Los alcances de la investigación son: determinar una mezcla candidato de cemento con dióxido de titanio que permita fabricar morteros y pastas que cumplan con los requisitos

mecánicos y físicos según las normas técnicas INTE C147:2018 destinadas para la evaluación de cementos hidráulicos; cuantificación la capacidad fotocatalítica del mortero seleccionado por medio de la norma UNI-11259 y analizar la oportunidad de negocio que posee este producto en el mercado nacional.

2 Marco teórico

2.1 Oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada son aquellos donde se da la formación de radicales hidroxilos OH^\bullet que presentan un alto potencial de oxidación ($E^\circ = 2.8 \text{ V}$). Los radicales OH^\bullet son sumamente efectivos acelerando la degradación y oxidación de una gran cantidad de contaminantes difíciles o muy estables. En compuestos con dobles enlaces o anillos aromáticos, la oxidación avanzada permite añadir un átomo de hidrógeno, rompiendo estos enlaces, y en cadenas de hidrocarburos, permite extraer el hidrógeno del carbono alifático (Crow, 2010; Oturan & Aaron, 2014; J. L. Wang & Xu, 2012).

Mientras que en la oxidación convencional, se añade un oxidante que reacciona directamente con el contaminante objetivo, en la oxidación avanzada se produce una especie no selectiva, el radical hidroxilo que, virtualmente, permite oxidar cualquier contaminante reductor. Un contaminante reductor puede ser cualquier compuesto orgánico, ya que todos poseen el carbón en su forma reducida y pueden ser transformados por el radical hidroxilo (Howe et al., 2012).

La reacción de oxidación avanzada fotocatalítica se realiza generalmente en agua, ya que una vez el fotocatalizador absorbe un fotón que tenga una energía igual o superior a la banda prohibida, la reacción que puede ocurrir se da con el oxígeno disuelto o con el agua para formar radicales libres O_2^- , HOO^\bullet u OH^\bullet , estas especies oxidantes y especies como H_2O_2 y O_2 son las causantes de la fotooxidación. En el aire, a pesar de que se dice que ocurre una reacción con contaminantes gaseosos, estos primero se disuelven o absorben, antes de reaccionar por oxidación avanzada, la gran cantidad de humedad en el ambiente juega un papel fundamental en las reacciones de fotooxidación (Ameta & Ameta, 2018).

2.1.1 Fotocatálisis

El mecanismo básico de la fotocatalisis involucra a un cierto material tomando la energía de

una fuente de iluminación y transfiriéndolo a una forma de energía química por medio de un cambio de carga, reacción redox, o por un proceso electroquímico, entre otros. En un semiconductor fotocatalítico, un fotón entrante que posea energía igual o mayor a la banda prohibida, logra generar una relación entre un electrón y el espacio libre que el electrón deja detrás, esta relación es llamada excitón (Brame, 2014).

Como se observa en la representación de la Figura 2.1, el electrón excitado se traslada a la banda de conducción mientras el agujero se mantiene en la banda de valencia, siendo ambos puntos precursores de tres posibles procesos: una liberación de energía en forma de calor cuando simplemente se recombinen; el agujero, el electrón o ambos pueden permanecer en la superficie del semiconductor atrapados en un estado semi estable o, por último, el electrón y el agujero pueden reaccionar con moléculas adsorbidas en la superficie por reacciones de oxidación o reducción (Brame, 2014).

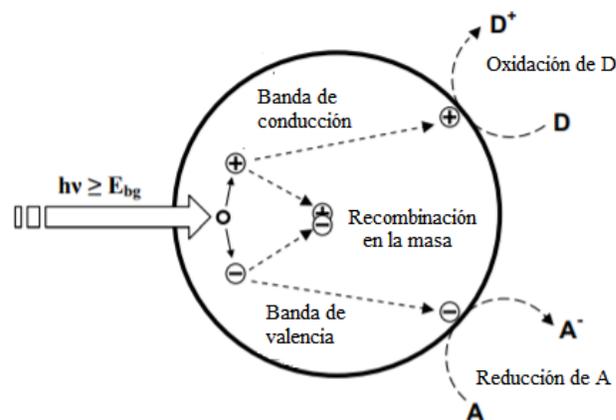


Figura 2.1. Esquema de la formación de los portadores de carga generados por la absorción de luz. Figura modificada (Crow, 2010).

Los semiconductores son reconocidos como unos de los fotocatalizadores más convenientes y el dióxido de titanio (TiO_2) es el más comúnmente utilizado (Dionysiou, Puma, Jinhua Ye & Bahnemann 2016; Gaya, 2013; Zhang et al., 2018). Entre los procesos de oxidación avanzada, la fotocatalisis heterogénea prueba funcionar tanto en la degradación de contaminantes orgánicos en el aire como el agua. Involucra una reacción en la superficie de

un semiconductor fotocatalítico y logra una parcial o total mineralización de un contaminante dado en fase líquida o gaseosa. Tanto la reducción como la oxidación se llevan a cabo en la superficie del semiconductor (Gaya & Abdullah, 2008).

El proceso de “atrapamiento” se da tanto para las especies contaminantes del aire como para las especies fotogeneradas. Se ha demostrado una presencia significativa de grupos hidroxilo adsorbidos en la superficie del TiO₂ cuando este se expone al aire húmedo y luz UV (Hoffmann et al., 1995). De igual forma, se debe presentar un aceptor de electrones y para este proceso entra en función el oxígeno molecular disuelto en el agua o presente en el ambiente que reacciona formando el anión superóxido (O₂^{•-}), subsecuentemente se da una degradación a través de la interacción con agua o grupos hidroxilo que, se cree, producen más radicales hidroxilos (Crow, 2010). La presencia de O₂ y agua son esenciales para que ocurra la fotooxidación (Ram et al., 2011).

La cinética de reacción fotocatalítica de compuestos orgánicos generalmente sigue el esquema de Langmuir-Hinshelwood que se presenta a continuación (Gaya, 2013; Giraldo, Franco & Arango, 2009; Ochiai & Fujishima, 2012):

$$r = - \frac{dC}{dt} = \frac{kK_{ads(A)}C}{1 + K_{ads(A)}C} \quad (2.1)$$

Donde r corresponde la tasa inicial de fotooxidación, C la concentración del reactivo A, t el tiempo de irradiación, k la constante de reacción y $K_{ads(A)}$ el coeficiente de adsorción del reactivo A. Para la degradación fotocatalítica de dióxido de titanio suspendido se utiliza orden pseudo cero (Gaya & Abdullah, 2008).

2.2 Cemento fotocatalítico

El hormigón o concreto ha demostrado ser un posible medio duradero en el que el TiO_2 fotocatalítico se puede distribuir a gran escala (Hanson, 2014). Sin embargo, se teme que el material podría verse afectado por la sustitución o adición del dióxido de titanio en polvo. Se reportan numerosos y diversos estudios del efecto sobre las propiedades del mortero y del hormigón fresco y endurecido. El dióxido de titanio sí tiene una influencia significativa sobre este material pero los resultados son muy diversos (Cardellicchio, 2020; Cassar, 2004; J. Chen et al., 2012; Hanson, 2014; Hegyi et al., 2018; Xu et al., 2020). La marca Italcementi Heidelberg Cement Group en Italia necesitaron 12500 horas de investigación para conseguir un material suficientemente fuerte y un negocio tan robusto como para dar forma a la obra Palazzo Italia y la Iglesia del Jubileo, entre otros. Esta empresa ha dado pruebas de la viabilidad del proyecto y liderado la carrera por atrapar una parte del mercado en construcción en pro de la purificación del aire (Kowalski & Januszkiewicz, 2017).

2.2.1 Concretos, morteros y pastas

Los cementos hidráulicos o cementos resistentes al agua consisten esencialmente en cemento Portland y sus modificaciones. A partir de este cemento se pueden producir concretos, morteros y pastas, pero los cementos Portland no necesariamente logran satisfacer completamente las necesidades de la industria.

Se han desarrollado cementos especiales a partir del cemento Portland convencional, estos son: los cementos de escoria de alto horno, de puzolanas, expansivos, de piedra caliza Portland, de fraguado rápido, blancos o coloreados, cementos para pozos de petróleo y de aluminato de calcio.

Todos los mencionados están en la categoría de cementos hidráulicos y es aquí donde entraría la nueva categoría del cemento fotocatalítico; mientras que los cementos derivados de la calcinación de yesos o carbonatos cálcicos no son hidráulicos debido a que sus productos de hidratación no son resistentes al agua (Mehta & Monteiro, 2014).

De acuerdo la ASTM International (2020), las definiciones para los morteros y para pastas respectivamente son:

- Morteros: son aquellas mezclas de cemento hidráulico finamente dividido, agregado fino y agua, el mortero puede estar en el estado endurecido o no endurecido.
- Pastas: son una mezcla endurecida o sin endurecer de material cementoso hidráulico finamente dividido y agua. Entre estos solo varía el agregado de arena que otorga una gran resistencia a la abrasión, entre otras propiedades.

El concreto, a nivel microscópico, puede considerarse como un material constituido por partículas dispersas del agregado en una matriz de pasta de cemento, y a diferencia del mortero, contiene agregados finos y agregados gruesos. El concreto simple se puede utilizar para estructuras sumergidas como cañerías, presas y canales. Para elementos estructurales como cimientos, columnas, muros, techos o hasta tuberías amplias, se requiere concreto armado. El hormigón o concreto armado es un material que contiene barras de acero y se diseña asumiendo que los dos materiales actúan juntos para resistir las fuerzas de tracción (Mehta & Monteiro, 2014).

A nivel macroscópico, inclusive a nivel microscópico, en hormigón fresco o endurecido, las propiedades que muestra pueden ser modificadas añadiendo ciertos materiales específicos a la mezcla llamados aditivos.

En los países desarrollados, del 80 al 90 por ciento de todo el hormigón producido contiene uno o más aditivos. Generalmente, se usan en concreto para mejorar aspectos como la trabajabilidad, cambiar el tiempo de fraguado, la resistencia y durabilidad, el agrietamiento térmico y la resistencia al ataque de sulfatos o a la corrosión de las varillas (Mehta & Monteiro, 2014). Estos aditivos proveen más propiedades favorables que propiedades desfavorables a la hora de utilizar el nuevo material. Es por este motivo que, si bien el dióxido de titanio puede ayudar a combatir la contaminación del aire, no se debe dejar de lado los demás efectos que pueda generar en el material.

2.2.2 Dióxido de titanio

El dióxido de titanio tiene 5 formas minerales de las cuales la anatasa es el más reactivo, sin embargo, no por eso el más eficaz. Lo novedoso del dióxido de titanio es que es capaz de degradar compuestos orgánicos volátiles del aire en presencia de luz solar por medio de reacciones de transferencia de carga redox (Macphee & Folli, 2016).

Las propiedades del dióxido de titanio incluyen una resistencia a la degradación química y resistencia a la degradación por continua reacción con la luz, es un producto relativamente seguro y posee un costo bajo. Otros semiconductores como CdS o GaP logran absorber una fracción más amplia del espectro solar y pueden formar especies reactivas radicalarias al igual que el TiO_2 , sin embargo, son catalizadores que se degradan en productos tóxicos con el uso y reacción repetitiva (Ram et al., 2011).

Pese a no ser degradado, el dióxido de titanio si se ve afectado por distintas condiciones. En soluciones acuosas, el pH afecta significativamente las bandas de conductancia y valencia, la carga de las partículas y la formación o no de agregados en caso de que el TiO_2 se encuentre suspendido en el líquido, sin embargo, entre pH de 4 a 10, la tasa de mineralización fotocatalítica generalmente no depende del pH por lo que no es un inconveniente (Ram et al., 2011).

La intensidad solar es otro factor que influye de forma directa en la reactividad del dióxido de titanio, a mayor intensidad UV, más favorecida se ve la reacción. Una radiación UV solar típica de 20-30 W/m^2 entre 300 nm y 400 nm es suficiente para producir especies fotogeneradas reactivas, pero se utilizan intensidades sostenidas de 38 W/m^2 y 40 W/m^2 para poder observar resultados en corto tiempo a nivel de laboratorio (Atalay & Ersöz, 2016; Bahnemann, 2004; Krýsa, 2012); respecto a la concentración de oxígeno molecular, sin este, la reacción no se llevaría a cabo, sin embargo, incrementar las condiciones ambientales de oxígeno, (21 % O_2) a saturación (100 % O_2), aumenta la velocidad de reacción en solo una pequeña cantidad; finalmente, a temperaturas debajo de 0 °C, se ha reportado que aumenta la energía de activación aparente mientras que por sobre 80 °C, la adsorción exotérmica de los reactivos se ve desfavorecida por lo que en agua, la temperatura optima podría

considerarse entre 20 °C y 80 °C (Ram et al., 2011).

En la naturaleza existen tres formas de dióxido de titanio: anatasa, rutilo y brookita (Macphee & Folli, 2016). El rendimiento fotocatalítico mejorado que presenta la anatasa se cree que se debe a la ubicación de vacantes de oxígeno en su estructura (Gaya, 2013).

Dos de los polimorfos de TiO₂ son de principal interés por su capacidad fotocatalítica y son el rutilo y la anatasa con brechas de bandas electromagnéticas de valores de 3.03 eV y 3.20 eV respectivamente. Estos son materiales populares para la autolimpieza y reacciones de fotocatalisis por su alta reactividad, muy baja toxicidad, estabilidad física y química y por ser accesible, así como económico (Dionysiou et al., 2016). Los índices de refracción del rutilo y de la anatasa son de 2,76 y 2,55 respectivamente lo que los hace un pigmento blanco muy utilizado para opacar la pintura debido a su alto índice de refracción y resistencia al teñido (facilidad con la que se mezcla con otros colores) (PIANC.org, 2014).

Al comparar una muestra de 100 % anatasa contra una mezcla de 70:30 anatasa y rutilo se encuentra que hay un incremento en actividad fotocatalítica al utilizar la mezcla. Las pruebas con dióxido de titanio en nanoplacas de brookita muestran mayor eficiencia que los anteriores, pero resulta mucho más costoso, así como con otras combinaciones (Gaya, 2013). La anatasa tiene un mayor valor oxidante que en el rutilo, una posible explicación es que debido a su geometría, la anatasa posee una mayor cantidad de sitios activos reductores o que la velocidad de recombinación se ve reducida por la captura de electrones y retención de los compuestos fotogenerados en la superficie de la anatasa. Sin embargo, al utilizar una mezcla de rutilo y anatasa, se da un aumento de actividad y se cree que es debido a que la presencia de rutilo sirve como sumidero de electrones previniendo la recombinación y favoreciendo la reacción con los contaminantes (Zhou et al., 2011).

El producto Degussa P25 ha logrado situarse entre los productos comerciales de referencia por las series de estudios en los que ha sido utilizado a lo largo de los años. El TiO₂ Degussa P25, ahora llamado AEROXIDE® P25, consiste en un polvo fabricado por el proceso patentado AEROSIL® y es una mezcla generalmente de 80 % de anatasa y 20 % de rutilo, con una superficie de alrededor de 50 m²/g, un tamaño de partícula promedio de 21nm y una

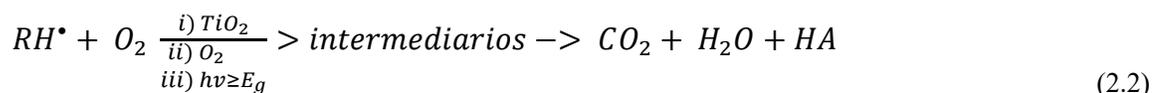
pureza del 99.5 % al 99.9 % (Kralchevska et al., 2012).

Diferentes autores reportan que es difícil encontrar fotocatalizadores con una actividad superior a la del P25. Es una hipótesis no probada que haya un efecto sinérgico entre la anatasa y el rutilo, el cual logra una mayor actividad fotocatalítica que aquella mostrada por las partes puras de anatasa y rutilo. Experimentalmente, Ohtani et al., (2010) reporta que al separar los componentes de TiO₂ P25 (la anatasa, el rutilo y las fases amorfas de TiO₂), estos se comportan de forma independiente sin interacciones.

Sin embargo, al mezclar los componentes y sin ningún tratamiento adicional, se obtienen actividades fotocatalíticas mejores que las reportadas por las partículas de anatasa y rutilo aisladas, y similares a los valores del P25. Su et al., (2011) justifica el aumento en la actividad fotocatalítica con la presencia de algún efecto sinérgico entre el rutilo y la anatasa, pero no reporta el mecanismo que ocurre. Analiza que el rango y el valor del efecto sinérgico dependan de la reacción catalítica específica que se usa para probar la fotoreactividad, lo cual podría explicar el conflicto en la literatura y mostrar indicios de las dificultades que existen para cuantificar la capacidad catalítica general del material.

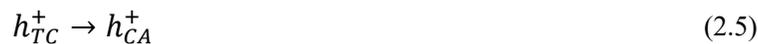
2.2.3 Aplicaciones fotocatalíticas del dióxido de titanio

Al reaccionar en presencia de luz UV, el TiO₂ forma especies con radicales libres, la degradación de compuestos orgánicos depende principalmente de la formación del radical hidroxilo (OH[•]) sobre o muy cerca de la superficie del TiO₂ (Dionysiou et al., 2016). A continuación, se presenta la reacción correspondiente a la fotocatalisis con dióxido de titanio en donde HA corresponde al ácido sustituyente metálico que se forma como subproducto y es un simple ácido inorgánico (Gaya, 2013).



Se han propuesto diversos mecanismos para la degradación anterior, generalmente en

presencia de agua, aire, un contaminante y el fotocatalizador, siendo el agua o el aire indispensables debido a que la ausencia de oxígeno evita que proceda la reacción. Los agujeros fotogenerados poseen un enorme potencial para oxidar contaminantes directamente, aunque el mecanismo no se ha demostrado de manera concluyente, o indirectamente al actuar en conjunto con OH^\bullet en una solución acuosa o con humedad y se presenta de la siguiente forma (Crow, 2010; Gaya, 2013; Giraldo et al., 2009; Macphee & Folli, 2016; Ochiai & Fujishima, 2012; J. Zhang et al., 2018):



Como se describió anteriormente, en presencia de radiación con longitud de onda menor a 400 nm ocurre una excitación de electrones en la banda de conducción y huecos positivos en la banda de valencia (reacción 3) (Giraldo et al., 2009). Seguidamente se da el transporte de carga (reacción 4 y 5), con subíndice TC, a la superficie de la partícula debido a la fisión de los enlaces en los contaminantes por la interacción de h_{CA}^+ (presumiblemente OH^\bullet a lo largo del documento) en la superficie de la partícula y no en el interior, esto porque las cargas atrapadas, con subíndice CA, no sufren una recombinación rápida (~ 1 ps) sino una más lenta (Gaya, 2013). La recombinación entre el electrón libre (e^-) y el hueco (h^+) se da a menos que haya oxígeno disponible para eliminar los electrones libres formando super óxidos ($O_2^{\bullet-}$),

que posteriormente se protona en el radical superhidroxilo (HO_2^{\bullet}) y posteriormente en peróxido (H_2O_2) en reacciones que no están incluidas (Gaya, 2013). Otra propuesta es que la reacción entre $O_2^{\bullet-}$ y h^+ produciría oxígeno singlete (O^2) que es un oxidante fuerte (Ochiai & Fujishima, 2012). En general, los portadores de cargas logran reaccionar con especies como OH^- , O_2 o bien con H_2O para formar radicales hidroxilos (OH^{\bullet}) o super óxidos y peróxido que contribuyen a la descomposición de los compuestos orgánicos (reacciones 2.7 y 2.8) (Ochiai & Fujishima, 2012).

Para que estas reacciones se lleven a cabo se debe excitar el material con luz ultravioleta de longitud de onda menor a 400 nm. En el tratamiento de aguas, el proceso fotocatalítico sensibilizado con colorantes reduce los tiempos de reacción por un fenómeno propio de los tintes que actúan como molécula fotosensibilizadora ampliando ligeramente el rango de ondas que aportan energía (Chatterjee & Dasgupta, 2005). El anclaje de la molécula sensibilizadora en la superficie del fotocatalizador le permite al conjunto captar mayor cantidad de energía ya que el rango de absorción de luz propio del tinte puede ser más amplio, el fotosensibilizador luego transfiere la energía de la luz incidente a otra molécula cercana (Jamalullail et al., 2017). Además, cuando las moléculas son adsorbidas en la superficie del material, su movilidad traslacional se reduce considerablemente permitiendo degradar una mayor cantidad de contaminantes que cumplan estas condiciones como, por ejemplo, los tintes textiles. (Chatterjee & Dasgupta, 2005).

Es debido a los problemas ambientales causados por la contaminación del aire y del agua, además del posible efecto nocivo para salud humana que se están desarrollando nuevas tecnologías para controlar o mitigar los efectos. Eliminar los óxidos nítricos provenientes principalmente de la combustión en automóviles y otros compuestos orgánicos volátiles provenientes de fuentes como el tabaco, pinturas y agentes de limpieza, son de principal importancia para una buena calidad del aire (Palau, Colomer, Penya-Roja & Martínez-Soria, 2012). La descontaminación del aire se ha trabajado con tecnologías como la condensación, la absorción y la oxidación térmica para controlar la cantidad de compuestos orgánicos volátiles que se liberan al ambiente. Llama la atención el uso de nano TiO_2 en materiales de construcción o concretos fotoactivos por su capacidad de degradar contaminantes sin generar

subproductos tóxicos y por su durabilidad en comparación con el costo, dos limitantes que poseen las otras tecnologías anteriores (Koli et al., 2019).

El uso del dióxido de titanio en materiales relacionados a la construcción se da en un inicio por su capacidad como pigmento y preservar el color en pinturas, más tarde por su capacidad foto hidrofílica que permite lavar fácilmente las superficies de materiales como el vidrio al añadir un recubrimiento una concentración relativamente baja de TiO_2 (3 % – 7 %) y alta cantidad de aglutinante especificado. La principal ventaja para el medioambiental es que el recubrimiento con TiO_2 puede aplicarse a edificios, pavimentos, paredes y túneles, pero con la desventaja de que existe una notable falta de datos sobre el rendimiento de estos recubrimientos especialmente a largo o mediano plazo (Zouzelka & Rathousky, 2017).

Liu et al. (2017) reportan que, al degradar formaldehído, un importante contaminante en espacios cerrados, hay una diferencia significativa y notoria entre la degradación que se alcanza con una pasta sin dióxido de titanio y una con un 5 % m/m de dióxido de titanio en cemento. Además, se realiza la prueba con un 15 % m/m y un 20 % m/m, sin embargo, mantienen la relación agua cemento constante lo cual puede provocar un cambio en la granulometría o aglomeración del material. Se reporta que la tasa de degradación más baja la tiene el cemento con 0 % TiO_2 , seguido por el cemento con 20 % TiO_2 , luego 5 % TiO_2 y finalmente 15 % TiO_2 con la degradación más alta en un experimento de cuatro horas utilizando formaldehído gaseoso.

En el ámbito de las moléculas modelo del humo ambiental y los estándares alrededor de los cementos fotocatalíticos, desde 1996 para la construcción de la iglesia de Jubileo Dives in Misericordia, se utilizó la fenantroquinona para la evaluación de las propiedades auto limpiantes. La fenantroquinona es un colorante amarillo que se solía utilizar antes de que se normalizara el uso de Rodamina en el año 2008 por parte de una norma italiana UNI-11259 (Moreno, 2018). La norma UNI-11259 especifica un método para la determinación de la actividad de los ligantes hidráulicos fotocatalíticos a través de un método colorimétrico. Krýsa (2012) comienza explicando que la prueba descrita por la norma UNI-11259, utilizando el colorante Rodamina B, permite probar la capacidad fotocatalítica general para

remover contaminantes del medio ambiente y concluye si una superficie es eficiente para la limpieza fotocatalítica sugiriendo como ejemplo final la limpieza del aire. La norma sugiere que la Rodamina es un modelo orgánico de fotocatalisis que puede ser luego extrapolado a contaminantes ambientales. Esta idea se plantea continuar en el presente trabajo.

El uso de azul de metileno en el estudio de la actividad fotocatalítica es popular por su aplicación muy temprana (Mills, 2012). En 1989 se demostró que el azul de metileno en una solución acuosa se mineraliza en su totalidad cuando se hace recircular a través de películas de dióxido de titanio mientras estas se iluminan con luz ultravioleta (Matthews, 1989). La Organización Internacional de Normalización generó la norma ISO 10678:2010 Determinación de la actividad fotocatalítica de superficies en medio acuoso por degradación del azul de metileno en donde se especifica un método para determinar la actividad fotocatalítica, la capacidad para degradar moléculas orgánicas y la actividad de autolimpieza fotocatalítica específica que posee un material. Cabe destacar que este método no es aplicable para caracterizar la degradación de moléculas gaseosas, pero si puede existir una correlación entre las mismas (ISO, 2010). Estudios plantean que el efecto de autolimpieza permite mejorar la calidad del aire eliminando contaminantes como NO_x, VOCs and C₇H₈ (Chen et al., 2011; Diamanti et al., 2008; Dolatabadi, 2013; Seo & Yun, 2017).

La importancia de evaluar las condiciones fotocatalíticas en la superficie del material se debe a que, aunque la luz ultravioleta puede atravesar las primeras capas de ciertos materiales, este no es el caso para el cemento fotocatalítico. Sikkema (2013) evalúa losas con capas fotocatalíticas de 15, 75 y 150 mm en donde no encontró evidencia de correlación entre la penetración de luz UV-A con la oxidación de óxido de nitrógeno a un nivel de confianza superior al 90 %.

2.2.4 Síntesis y propiedades mecánica del cemento fotocatalítico

Para la construcción de superficies fotocatalíticas con cemento existen varios acercamientos a la hora de dopar una superficie con dióxido de titanio en donde la mayoría de los métodos caen en dos categorías: colocar recubrimientos con cemento, arena y dióxido de titanio conocidos como repello o en lozas, o realizar mezclas de cemento, arena y agregados más el

dióxido de titanio como aditivo y proceder con la mezcla como si se utilizara concreto habitual.

El producto de la mezcla del cemento con el fotocatalizador y agua es un material macizo que se da por las reacciones del cemento con el agua en donde el catalizador se mantiene aparentemente inerte, sin embargo, con pruebas de resistencia a la compresión, se identifica que la adición de nano-TiO₂ al concreto o mortero influye en la resistencia del espécimen. Una posible explicación es que actúa como sitio para la nucleación de la reacción del cemento con el agua, en las primeras etapas de la hidratación del cemento como se observa en la Figura 2.2, produciendo gel de hidrato de calcio férrico (C-S-H) que es un compuesto que agrega resistencia (Daniyal, Akhtar & Azam, 2019; Joshaghani, Balapour, Mashhadian & Ozbakkaloglu, 2020; Xu, Jin, Hu, Li, Chen, Shen, Wu & Fang, 2020). Otra explicación importante es que el TiO₂ nano particulado puede absorber agua debido a su inmensa relación volumen con área superficial, sin una adecuada relación agua cemento el material podría no lograr conseguir una hidratación completa (Liu et al., 2017). En la práctica, una baja relación agua cemento, tal que no satisface los lineamientos de trabajabilidad, tiende a aumentar la resistencia a la compresión del material final (Li et al., 2018).

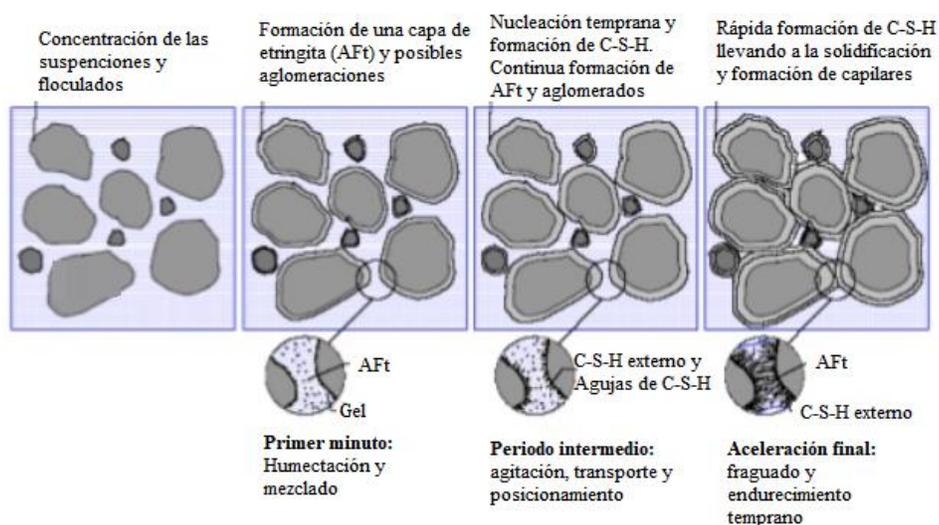


Figura 2.2. Esquema de las primeras etapas de la hidratación del cemento. Figura modificada (Esping & Löfgren, 2005).

Al ser el dióxido de titanio un nano material, se espera además un cambio en la microestructura donde ocurre la formación del C-S-H, por medio de micrografías se obtiene que el mortero dopado con nano-TiO₂ presenta una estructura más entrelazada que el mortero espectador (Daniyal et al., 2019).

En un segundo experimento, Daniyal et al. (2019), comparó la resistencia luego de exponer los morteros bajo agua del grifo, agua salina y solución ácida por 360 días. En comparación con las muestras de control, se dio que los morteros dopados con nano-TiO₂ mantenían una mayor resistencia a la compresión y era más pronunciada a mayores porcentajes de del catalizador.

Chen, Lin & Kou (2018) reportan en su estudio que comparan el efecto de usar arena de río estandarizada para construcción o material reciclado de arena de ladrillo en aspectos como la resistencia a la compresión, absorción del catalizador por el material y remoción de naranja de metilo y NO_x en un reactor de flujo continuo. El método que utilizan para sintetizar el concreto fotocatalítico consisten en preparar suspensiones con cantidades específicas de TiO₂ en un volumen específico de agua y seguidamente agregar una masa de alguna de las dos arenas bien lavadas previamente.

La mezcla se hace vibrar por ultrasonido a menos de 20 kHz durante 1 h para luego dejar reposar por 48 horas. En el estudio, se procede a secar una primera vez a 105 °C por 48 horas, seguido de un lavado en agua desionizada para eliminar el TiO₂ no absorbido y un último secado a 105 °C por 48 horas. Por último, se procede a generar los cubos de mortero según la norma ASTM C144, entre otras. El resultado es que el dióxido de titanio si es absorbido por la arena, pero en bajas cantidades, donde 80 g de arena absorben 0.016 g TiO₂ en una suspensión de 5g TiO₂ y 100 g de agua por lo que se pierde parte del material. Al degradar naranja de metileno se reporta que la arena dopada en una suspensión de 1 % TiO₂ posee la mayor capacidad de degradar el contaminante, por encima del espécimen de referencia y de muestras con mayor porcentaje de TiO₂.

Se reporta un procedimiento para sintetizar el mortero fotocatalítico en donde se procede a mezclar el cemento seleccionado con la cantidad deseada de dióxido de titanio por medio de

una molienda mecánica por 30 minutos con la mínima presencia de humedad, esto porque el dióxido de titanio tiende a formar aglomerados si no es adecuadamente mezclado. Posterior a la preparación de esta mezcla se procede a utilizar el cemento para generar las piezas de mortero o concreto como se desee (Janus et al., 2019). La ventaja de este procedimiento es que no se pierde ninguna cantidad de dióxido de titanio y es un proceso de bajo costo.

Una vez preparado el cemento fotocatalítico, el primer efecto es un aumento en la demanda de agua necesaria para que se dé un curado adecuado y para que se presente la trabajabilidad necesaria. La cantidad de agua en mezclas de cemento, dióxido de titanio y agua se determina por la prueba de consistencia normal. Mientras que en morteros, debido a que se tiene la presencia de agregados finos, la cantidad de agua se determina por pruebas de fluidez (Hegyí et al., 2018).

Debido a la mayor demanda de agua, se reporta una disminución en el tiempo de fragua inicial y final cuando se mantiene constante la relación agua cemento, pero se incrementa la relación dióxido de titanio cemento (Janus & Zajac, 2016; Sorathiya et al., 2018). Zhang (2010) indica un umbral máximo de 6 % de TiO_2 donde la resistencia mecánica no se ve afectada. Otros estiman que al 5 %, 3 % e incluso 1 % la resistencia siempre se va a ver afectada. Siempre que la cantidad de nanopartículas no sea excesiva, los resultados caen dentro de los límites de aceptabilidad normados (Janus & Zajac, 2016; Sorathiya et al., 2018). En altas cantidades, la aglomeración de nanopartículas de dióxido de titanio y el cambio en la porosidad del concreto o mortero generan “debilidades” en el material resultando en una baja resistencia mecánica (Hegyí et al., 2018).

El cemento fotocatalítico puede ser una estrategia de innovación dirigida a mejorar el desempeño de las edificaciones en materia ambiental (Kowalski & Januszkiewicz, 2017). Siguiendo la teoría económica, si se presenta un vacío en el mercado, podría significar una oportunidad de negocio y beneficio económico para el agente que presente nuevas o mejores ofertas para atender una necesidad (Gruber et al., 2015). Una forma de presentar estas ofertas es por medio de los modelos de negocio.

2.3 Modelos de negocios

Un modelo de negocio es una estrategia que logra crear, entregar y capturar el valor agregado de un nuevo proyecto o para documentar y modificar un proyecto ya existente (Osterwalder, Pigneur, Smith & The Movement, 2010). Los tres principales motivos por los que una organización lleva a cabo una investigación de modelo de negocio son para explicar, dirigir o desarrollar un negocio o una propuesta de negocio. En la actualidad, la cantidad de conferencias académicas y talleres de gestión acerca de la aplicación de diferentes modelos de negocios, ha experimentado una demanda de participación cada vez mayor (Spieth, Schneckenberg & Ricart 2014).

El modelo de negocios "Hágalo usted mismo" (Do It Yourself) es simple, conocido y ha logrado ser validado como una metodología que funciona para promover la pequeña venta de productos manuales y como una forma de incentivar el ingreso al mundo del emprendedurismo. Entre los modelos de negocios validados se encuentra el método modelo de negocios Ágil (Agile Business Model) donde se propone trabajar con herramientas dinámicas en vez de estáticas y que considera aspectos financieros, sociales, ecosistemas digitales y en lograr que cada cliente reciba una experiencia única. Los modelos más ampliamente aplicados son el Esquema de modelo de negocios (Business Model Canvas) y el Lienzo de propuesta de valor (Value Proposition Canvas). Ambos modelos motivan la investigación bibliográfica acompañada de entrevistas con posibles clientes, dos métodos de obtener información sin gastar recursos en producir el producto o prototipo (Kristensen & Ucler, 2016).

Los esquemas o canvas ayudan a facilitar la aplicación de distintos modelos. Algunos de estos esquemas consisten en machotes con espacios designados para completar con información del proyecto y expectativas, o con hipótesis propias de la persona que busca desarrollar el proyecto. El esquema de Lienzo de propuesta de valor consta de 9 partes: el segmento de clientes que busca identificar los grupos de personas que comprarían el producto; la propuesta de valor que se llena con los beneficios que se están brindando; el segmento de canales, señala los medios por los que el cliente se va a enterar del producto;

relaciones de cliente, indica como se espera contactar y mantener a los clientes; en flujos de ingresos se describe la forma en que se trabaja el precio del producto; en recurso clave, se redacta donde se espera realizar la mayor inversión; en acciones clave se colocan los trabajos necesarios que mantendrían la empresa operando adecuadamente; aliados clave, señala las relaciones ventajosas posibles y en estructura de costos, donde se prevén las rutas de inversión y costos importantes (Osterwalder et al., 2010). Similar al esquema de Lienzo de propuesta de valor existe el esquema Lean Canvas dirigido a negocios emergentes que necesitan definir y centrar los alcances del proyecto antes de optar por un lugar en el mercado.

El análisis FODA (SWOT) de fortaleza, oportunidades, debilidades y amenazas, es una herramienta que determina los medio ambientes internos y externos a los que se va a exponer la empresa. Se puede utilizar para trabajos académicos, empresas emergentes y en negocios establecidos. El análisis interno de fortalezas y debilidades permite identificar competencias básicas, ventajas competitivas y recursos propios del proyecto mientras que el análisis externo de oportunidades y amenazas refleja los nichos, los recursos de la competencia y el entorno en general (Misra, 2020).

Finalmente, la metodología puesta en marcha ajustada logra un camino corto, eficiente y dinámico donde primeramente se documentan todas las hipótesis de los modelos de negocios que utilizan esquemas, estos son parte de las hipótesis que se deben construir alrededor del producto, los clientes y los riesgos. Terminado este proceso, se construye un producto mínimo viable centrado en la hipótesis que se desea probar. El centro de la metodología puesta en marcha ajustada es el ciclo de retroalimentación de crear-medir-aprender. El producto mínimo viable debe ser para que el cliente juegue con él y permite recibir retroalimentación temprana por una baja inversión económica. Un producto mínimo viable (PMV) no es un prototipo debido que se debe descartar cualquier elemento, proceso o esfuerzo que no contribuya directamente a la hipótesis que se desea probar. El PMV es una versión parcial de un producto. El cuadro de validación o pivote, consiste en una herramienta para documentar las hipótesis y cambios que se le realizan a todo el proyecto, ya que este modelo plantea que se deben estar realizando cambios conforme se completa un ciclo de crear-medir-aprender y se comienza uno nuevo (Araya, Rodríguez, Vargas & Villalobos, 2017).

3 Métodos de ensayo

3.1 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico

La prueba compresiva o de resistencia a la compresión utilizada corresponde al método de ensayo INTE C57:2015, una norma idéntica a la norma ASTM C109/C109M. Las normas técnicas utilizadas pertenecen a INTECO y salvo por autorización expresa y escrita de INTECO, la información que poseen los documentos no puede reproducirse bajo ninguna forma o ningún procedimiento. El método de ensayo está permitido dentro de las instalaciones de LanammeUCR y proporciona los recursos y medios necesarios para determinar la resistencia a la compresión de cemento hidráulico, así como de otros morteros.

La resistencia puede compararse contra especificaciones para determinar el cumplimiento o no de estos límites (INTECO, 2015). Además, la resistencia a la compresión forma parte de las propiedades en estado endurecido de los morteros y concretos, estas características pueden ser prescritas por un proyecto de construcción y por las exigencias normativas y reglamentarias, por lo que es importante establecer la resistencia en la práctica, ya que estará presente a lo largo de la vida útil del mortero. Una función del mortero es la unión y soporte de compresión producida por otros elementos en una construcción o proyecto dado (Mejía et al., 2012).

La resistencia a la compresión, f_m , se expresa como la carga máxima total entre el área de la superficie cargada (INTECO, 2015), como se expresa en la siguiente ecuación:

$$f_m = P/A \quad (3.1)$$

Donde P es la carga máxima total en Newtons y A es el área de la superficie cargada en mm². La prueba se realiza aplicando una carga sobre cubos de 50 mm de lado formados a mano y curados en un cuarto húmedo por periodos de 3, 7 o 28 días. Cualquiera de los cubos se podrá utilizar para determinar la resistencia a la compresión. No obstante, si el área de la sección transversal de un espécimen varía en más de un 1.5 %, se debe usar el área real para ese espécimen. Para comparar contra la norma, la resistencia de todos los especímenes aceptados,

elaborados con la misma mezcla y ensayados en el mismo periodo se deben promediar y anotar lo más cercano a 0.1 MPa. Los requisitos mecánicos para cemento de resistencia clase 28 son de 13 MPa a edades de 3 días, 20 MPa a edades de 7 días y 28 MPa a edades de 28 días según la norma INTE C147:2018.

3.2 Práctica para el mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento

Este método se rige por la INTE C144:2012 y se centra en el procedimiento de mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento hidráulico con consistencia plástica. La norma indica los materiales y dimensiones que deben tener los equipos necesarios, incluyendo la paleta, el tazón de mezclado y el raspador, además se indican los tiempos y velocidades de mezclado y de reposo necesarios para un mezclado uniforme de morteros o pastas (INTECO, 2015). La norma es referenciada para los ensayos realizados.

Se debe seguir el procedimiento para todos los ensayos debido a la influencia sobre la reología del mortero o pasta recién mezclado. Durante el mezclado se presenta un periodo en el que la mezcla cambia su viscosidad debido al esfuerzo, el fenómeno se denomina tixotropía y las lechadas de cemento se pueden considerar pseudo-tixotrópicas, ya que no recuperan completamente la viscosidad una vez se encuentra en reposo, es por este motivo que el mezclado incluye un periodo de reposo luego mezclado nuevamente, entre otros detalles (Rupnow et al., 2007).

3.3 Método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico

El valor de flujo de un mortero no suele indicarse como una especificación, sin embargo, es un parámetro utilizado por las demás normas y ensayos para determinar un contenido de agua específico. El procedimiento está dado por el método de ensayo INTE C143:2018. Los equipos necesarios para la prueba son un plato de prueba de flujo por caídas, un motor programable que se encarga del mecanismo de golpeteo, un molde de flujo que se coloca en el centro del plato y se llena de mortero, un calibre de medición o regla y un hule para apisonar el mortero dentro del molde. La mesa de flujo consta de un mecanismo que le

permite realizar caídas controladas con el propósito de desparramar una muestra de mortero con una forma y altura específica ubicada en el centro del plato, con cada caída o golpe del plato, el diámetro aparente de la masa de mortero debe comenzar a agrandarse. Tras una cantidad dada de caídas en un tiempo específico, se toma el diámetro promedio en cuatro puntos del mortero y se compara contra el parámetro especificado por la norma en cuestión. En la norma INTE C57:2015 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, se requiere un flujo de $110 \% \pm 5 \%$ para una cantidad de 25 caídas, mientras que la norma INTE C136:2020 Contenido de aire en el mortero de cemento hidráulico, solicita un flujo de $87 \frac{1}{2} \% \pm 7 \frac{1}{2} \%$. Cuando se cumple este intervalo, se anota la relación agua cemento y se procede con el ensayo en cuestión (INTECO, 2015).

El concreto, en general, requiere de una relación entre 0.35 y 0.6 agua cemento para facilitar el mezclado y mantener la trabajabilidad (Junior et al., 2017). La norma sugiere utilizar una relación de 0.48 para cemento Portland durante el ensayo de resistencia a la compresión (INTECO, 2015). Las relaciones funcionan de referencia sin embargo en la práctica, diferentes sacos de cemento pueden dar distintos resultados y la presencia de agregados extras en definitiva resulta en un cambio en el flujo del material.

3.4 Contenido de aire en el mortero de cemento hidráulico

El método de ensayo de contenido de aire se rige por la norma INTE C136:2020 y tiene el propósito revisar si un dado cemento hidráulico cumple con especificaciones normadas o exigidas por un proyecto particular. El criterio para tomar será según los requisitos nacionales, para este proyecto el porcentaje de aire máximo del mortero es de 12 % según la norma INTE C147:2018. La determinación del contenido de aire en porcentaje de volumen que ocupa se realiza a partir de la masa de mortero en 400 mL y el porcentaje de agua en la mezcla, basada en la masa del cemento utilizado (INTECO, 2015). La función se expresa en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ volumen de aire} = 100 - W * \left(\frac{182.7 + A/C}{2000 + 4 * A/C} \right) \quad (3.2)$$

Donde W es la masa de 400 mL de una mezcla fresca de mortero con una relación agua cemento que cumpla un flujo de $87 \frac{1}{2} \% \pm 7 \frac{1}{2} \%$ y A/C, la relación agua cemento utilizada. El contenido de aire en concretos o morteros es una propiedad que tiende a reducir la resistencia del material. Una regla de dedo general es que con el aumento del 1 % en el contenido de aire en volumen, la resistencia del hormigón se va a ver reducida en un 5 %, en cambio, hormigón con contenidos de aire muy bajos puede verse deteriorado en procesos de congelación y descongelación (Lamond & Pielert, 2006).

3.5 Determinación de la densidad del cemento hidráulico

La determinación de la densidad es un método de ensayo que utiliza un frasco Le Chatelier estándar y keroseno o nafta como líquido que es desplazado dentro el frasco. La norma nacional es la INTE C141:2018 y el cálculo requerido está dado por la siguiente formula (INTECO, 2015):

$$\rho = \frac{M_t - M_a}{V_{final} - V_{inicial}} \quad (3.3)$$

Donde M_t es la masa del frasco con el líquido y el cemento, pesado a los 0.05 g más cercanos; M_a es la masa del frasco con el líquido antes de agregar el cemento, igualmente pesado a los 0.05 g más cercanos; V_{final} el volumen final una vez colocado el cemento en cm^3 , $V_{inicial}$ es el volumen en la primera graduación en cm^3 y ρ , la densidad del cemento en g/cm^3 .

En sí, la densidad del cemento generalmente tiene poca influencia sobre la resistencia del concreto, pero al incluir agregados livianos, si las resistencias de estos son muy bajas, los niveles de resistencia alcanzable del concreto si se van a ver limitados (Hewlett & Liska, 2019).

3.6 Determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico

El método de ensayo INTE C139:2018 para la determinación de la consistencia normal es un requisito para otros ensayos como la determinación del tiempo de fragua y la determinación de la expansión por autoclave. El ensayo permite encontrar la cantidad de agua requerida

para preparar una pasta con consistencia normal, para esto, se utiliza un aparato de Vicat y se ensaya una muestra de pasta de cemento preparada según la norma INTE C144:2012, la pasta tendrá una consistencia normal cuando la barra marque el punto exigido para esa pasta en particular con precisión de $\pm 1\text{mm}$ a los 30 segundos de haber sido liberada la barra (INTECO, 2015).

El ensayo de consistencia normal es un método confiable para determinar la cantidad de agua que requiere el material, ya que menor cantidad de agua que la necesaria para la consistencia normal se refleja en una insuficiencia de agua para la reacción con la totalidad del cemento, mientras que mayor cantidad de agua se refleja en una reducción de la resistencia del material por el exceso de agua, sin embargo, aumenta la trabajabilidad (Civilology, 2010). Un inconveniente del ensayo es que requiere gran cantidad de material por cada prueba realizada.

3.7 Determinación del endurecimiento temprano del cemento hidráulico

El ensayo de falso fraguado o determinación del endurecimiento temprano del cemento hidráulico permite identificar fenómenos de fraguado del cemento como el endurecimiento temprano, el falso fraguado y el fraguado instantáneo. El ensayo se realiza en tiempos de 30 segundos y de 5 minutos ± 10 segundo utilizando un equipo de Vicat y la cantidad de agua necesaria para alcanzar una primera penetración determinada con un error de $\pm 4\text{mm}$ y una segunda penetración aleatoria. A partir de las penetraciones obtenidas se calcula el porcentaje de penetración como sigue (INTECO, 2015):

$$PP, \% = \frac{B}{D} * 100 \quad (3.4)$$

Donde PP es el porcentaje de penetración final, B la penetración final en mm y D la penetración inicial en mm. La que rige el procedimiento a nivel nacional es la INTE C196:2019 y permite determinar una penetración de remezclado en caso de que se deban verificar los resultados. El porcentaje de penetración final debe ser mayor a 50 % según la norma INTE C147:2018 (INTECO, 2015).

El falso fraguado ocasiona un endurecimiento y pérdida de la trabajabilidad del cemento en

muy poco tiempo tras ser preparada, esta trabajabilidad se recupera en un remezclado de la pasta o mortero. El falso fragua puede ser ocasionado por la presencia de yeso parcialmente deshidratado, la presencia de aceleradores, alta temperatura del concreto y el ambiente, uso de agua de lavado para preparar el cemento o la presencia de agregados muy secos o absorbentes (Nasvik, 2000; Ramachandran, 1995).

3.8 Determinación del tiempo de fragua de un mortero por medio de la aguja de Vicat

La determinación del tiempo de fragua por medio de un equipo de Vicat corresponde al método de ensayo INTE C137:2020 y permite determinar si una pasta formada con un determinado cemento y que posea consistencia normal, cumple o no con los límites de la especificación que se dé. Según la norma INTE C147:2018 se debe cumplir con un tiempo de fragua inicial de 45 minutos o mayor y un tiempo de fragua final de 420 minutos o menor. Se debe considerar un cuidado de que el tiempo de fragua obtenido por este método no necesariamente corresponde al tiempo de fragua del mortero o concreto, ni al tiempo de fragua medido por otros métodos. Para estimar el tiempo de fragua al minuto más cercano se utiliza la formula como sigue (INTECO, 2015):

$$\frac{(H - G)}{(J - I)} * (J - 25) + G \quad (3.5)$$

Donde G corresponde al tiempo en minutos de la última penetración con un valor mayor a 25 mm, H al tiempo en minutos de la primera penetración con un valor menor a 25 mm, J corresponde a la penetración en el tiempo G en mm y I a la penetración en el tiempo H en mm.

Chen et al. (2012) estimaron que para una pasta con un 5 % de relación nano TiO₂ Cemento, el tiempo de fragua inicial se podía ver reducido en un 81 % y el tiempo de fragua final en un 67 % al compararlo con el tiempo de fragua de un cemento Portland puro. Se estima que el fenómeno es debido a la presencia de nano partículas debido a que se repite este patrón utilizando nano CaCO₃ (Kirgiz, 2019). Siempre y cuando el tiempo de fragua este dentro del intervalo requerido, no debería haber inconvenientes.

3.9 Expansión por autoclave del cemento hidráulico

La determinación de la expansión por autoclave de un espécimen de pasta de cemento hidráulico endurecido permite estimar un índice de expansión tardía causada por la hidratación de CaO, MgO, la presencia de puzolanas con cuarzo o una combinación de estas. El método de ensayo corresponde al INTE C135:2018 y el requisito máximo permitido es de 0.8 % en el cambio de longitud causado por la autoclave de acuerdo con la norma INTE C147:2018. El largo del ensayo lleva alrededor de unas 6 horas en la autoclave una vez que el espécimen ya está curado, el equipo tiene un riesgo alto en caso de que ocurra un problema por lo que se deben tomar todas las medidas de seguridad necesarias (INTECO, 2015).

Se prevé que, de ocurrir una expansión rápida y por sobre los límites establecidos, existirá un alto riesgo de que más tarde se den expansiones perjudiciales o de expansión retardada. El ensayo de expansión por autoclave permite acelerar el tiempo de expansión (Mindess, 2019).

3.10 Expansión del cemento en barras de mortero almacenadas en agua

El método ensayo es el INTE C166:2020 y está relacionado con la cantidad de sulfato presente en el cemento dado que, almacenado en agua, la expansión de las barras de mortero puede ser excesiva cuando el cemento contiene demasiado sulfato. El método debe cumplir con la cantidad de agua dada por la prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico y los periodos de lectura son a las 24 h 15 min y a los 14 días de curado para finalmente medir la diferencia de longitud al 0.001 % más cercano. El máximo permitido por la norma INTE C147:2018 es una expansión de 0.02 %, una expansión inferior mostraría una calidad adecuada y aprobación del requisito (INTECO, 2015).

El ataque químico de sulfatos puede ocurrir sobre el concreto ya instalado por los minerales del suelo o por la presencia de sulfatos en el agua con la que se forma la pasta de cemento, en los agregados o en el cemento que se utiliza en sí. En este segundo tipo de ataque, se forman distintos compuestos perjudiciales para el concreto debido a que expanden el material y lo debilitan por lo que determinar si hay daño temprano por este fenómeno es un requisito

físico del material (Bennett & Nixon, 2016).

3.11 Determinación de la actividad fotocatalítica de aglutinantes hidráulicos método de ensayo Rodamina

A diferencia de los métodos de ensayo anteriores, este no es un requisito para evaluar las propiedades físicas ni mecánicas del cemento, sino permite evaluar la capacidad fotocatalítica de las piezas de cemento portland creadas a partir de la mezcla candidato. El método de ensayo corresponde al UNI 11259, la norma fue desarrollado por el Organismo de Unificación Nacional de Italia (UNI), el organismo es miembro de la Organización Internacional de Estandarización (ISO) y del Comité Europeo de Normalización (CEN) además de ser reconocida por el Estado Italiano y la Unión Europea (Peñañiel Carpio & Navarrete Angulo, 2019)

Para el ensayo, se utiliza como vector de análisis las tonalidades de la Rodamina B dispersas uniformemente en forma de círculo sobre la pieza de cemento y expuesto a la luz UV-A durante 26 horas. Algunas características de la Rodamina B son su baja foto sensibilidad a la luz UV, alta solubilidad en agua (50 g/L), estabilidad en entorno básico y buenas propiedades colorimétricas para el ensayo (Najar, 2021).

Se utiliza la obtención de coordenadas CIE $L^*a^*b^*$ como valores en el espacio RGB de color. Para observar la actividad fotocatalítica se cuantifica la decoloración de la Rodamina por exposición a luz UV-A. Se realiza midiendo el parámetro a^* , que es la referencia para el color rojo, en los tiempos 0, 4 y 26 horas denotados $a(0h)$, $a(4h)$ y $a(26h)$ respectivamente. Para cumplir con los requisitos R4 debe ser mayor a 20 % y R26 mayor a 50 % (Najar, 2021). Los parámetros mencionados se calculan de la siguiente manera:

$$R4 = \frac{a(0h) - a(4h)}{a(0h)} * 100 > 20 \% \quad (3.6)$$

$$R26 = \frac{a(0h) - a(26h)}{a(0h)} * 100 > 50 \% \quad (3.7)$$

El largo del ensayo lleva alrededor de unas 50 horas. Para la preparación, se cierra un círculo de aproximadamente 2 cm de radio en el centro de una cara de cada cubo, utilizando un agente hidrofóbico que va a mantener en su interior a la disolución de Rodamina B. La disolución colocada se deja secar durante las primeras 24 horas del proceso y debe alcanzar un mínimo donde la coordenada a^* medida como tiempo cero, debe ser al menos mayor o igual a 12. Este procedimiento se realiza antes de comenzar la exposición a la luz UV-A en el equipo apto. Los requisitos de exposición son una intensidad de irradiación cercana a 3.8 mW/cm² (Bernuy Chavez & Flores Cortez, 2020; Krýsa, 2012).

Un material que cumpla con la norma demuestra que serán eficientes para la limpieza fotocatalítica del medio ambiente o su entorno cuando se expone a la luz solar. La norma sugiere que un posible alcance es la limpieza del aire y eliminación de VOCs (Krýsa, 2012).

4 Metodología

El objetivo general del proyecto es desarrollar un mortero dopado con TiO_2 que permita eliminar fotocatalíticamente moléculas que se utilizan como modelo para la eliminación de humo ambiental. En la siguiente sección se presenta de manera detallada los métodos de ensayo, métodos analíticos y evaluaciones del proyecto empleados para desarrollar el material, así como las características de los reactivos y equipo experimental utilizado durante el desarrollo del proyecto.

4.1 Materiales

Las especificaciones de reactivos y materiales utilizados durante el proyecto se muestran en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Reactivos utilizados durante el desarrollo de la etapa experimental.

Área de aplicación	Fórmula química	Fabricante
Dióxido de titanio (Aeroxide P25)	TiO_2	EVONIK
Rodamina B	$\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$	MERK
Cemento Portland	CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3	Holcim
Arena sílica estandarizada	SiO_2	Gilson Co.

4.1.1 Contaminante modelo

La Figura 4.1, muestra la estructura molecular del contaminante modelo utilizado, rodamina B. La molécula es un tinte fluorescente, posee una absorbancia máxima entre los 550 nm y 554 nm, esto quiere decir que absorbe en la región del verde, mientras que emite cerca de los 633 nm, en la región del rojo. Pocas sustancias poseen esta propiedad específica por lo que se utiliza como molécula modelo de rastreo en investigaciones de calidad de aguas, tiempo de circulación o dispersión, entre otros (Aldrich, n.d.; Christ Robert D., 2014).

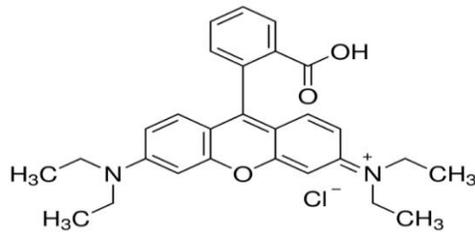


Figura 4.1. Estructura química de la rodamina B (Aldrich, n.d.).

La motivo por el que se utiliza esta molécula como contaminante modelo se debe a que en el año 2008 la rodamina B fue normalizada por parte de la norma italiana UNI-11259 como un método para la determinación de la actividad de los ligantes hidráulicos fotocatalíticos a través de un método colorimétrico (Moreno, 2018). Krýsa (2012) comienza explicando que la prueba descrita por la norma UNI-11259, utilizando el colorante Rodamina B, permite probar la capacidad fotocatalítica general para remover contaminantes del medio ambiente y concluye si una superficie es eficiente para la limpieza fotocatalítica sugiriendo como ejemplo final la limpieza del aire.

4.2 Equipo experimental

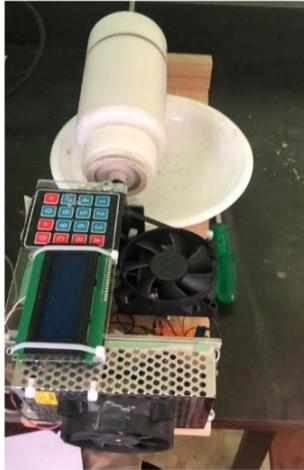
Los principales equipos utilizados durante el desarrollo de la etapa experimental se enuncian en el Cuadro 4.2, se detalla el fabricante, el ámbito de trabajo, la placa de la Universidad de Costa Rica y la tolerancia. Además, se utilizó equipo de laboratorio como cronómetros, paletas, moldes, vernier, cubetas, viales, beaker, probetas, tubos de ensayo, balones aforados, buretas y pipetas.

Cuadro 4.2 Equipos utilizados durante el desarrollo de la etapa experimental.

Equipo	Fabricante	Ámbito	Placa UCR	Tolerancia
Balanza granataria	OHAUS CORP.	0 g a 22000 g	182961	0.1 g
Balanza analítica	OHAUS CORP.	0 g a 210 g	342730	0.0001 g
Termocupla	FLUKE	-150 °C a 1000 °C	294122	0.1 °C
Mezclador mecánico	ibertast	-	375086	-
Tabla de flujo	CONTROLS	-	7670	-

Cámara húmeda de control automático	-	0 % a 100 % RH	384441	-
Máquina de ensayos hidráulica	MTS	0 kN a 250 kN	MU005	1N
Frasco Le Chatelier	POBEL	250 mL a 275 mL	-	0.05 mL
Aparato de Vicat	CHICAGO Testlab	0 mm a 50 mm	247091	0.5 mm
Comparador de longitud	UTEST	0 mm a 12.7 mm	384335	0.001mm
Autoclave	BOEKEL	0 Psi a 600 Psi	250442	5 Psi
Balanza analítica	METTLER	0 g a 41 g / 0 g a 120 g	238205	0.01 mg / 0.1 mg
Balanza granataria	METTLER TOLEDO	0 g a 4100 g	282516	0.1 g
Espectrofotómetro UV-Vis	Labsphere	-	349223	-
Pipeta	BOECO	10 μ L a 100 μ L	-	0.5 μ L
Cámara de luz UV	RAYONET	-	333679	-

En la Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4 se muestran los equipos especializados más importantes utilizados a lo largo del proyecto.



A)



B)

Figura 4.2. Equipo prototipo de molido pequeño (A) y equipo final de molido (B)
(Elaboración propia)

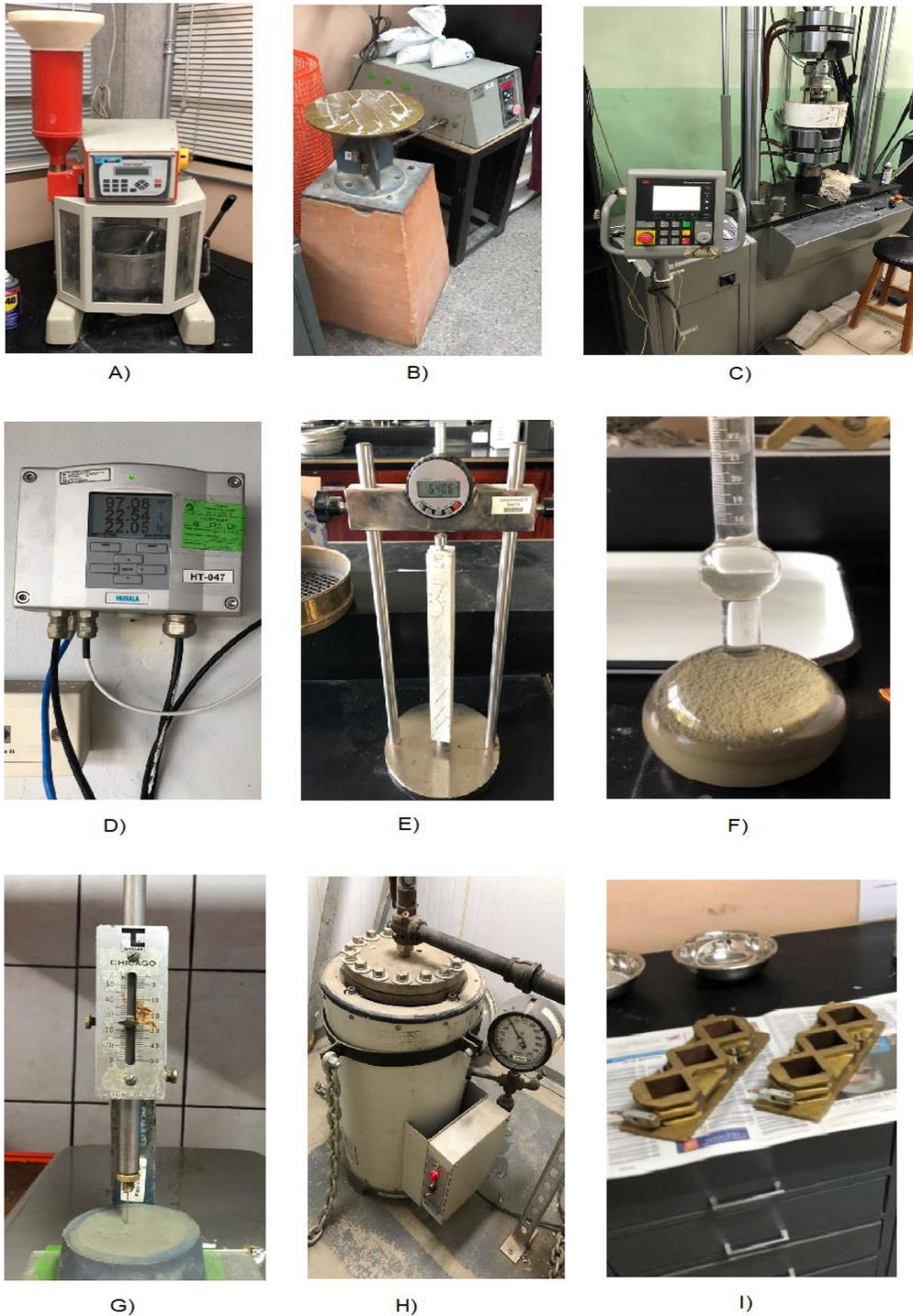


Figura 4.3. Equipo para batido de cemento (A), mesa de flujo por golpeteo (B), prensa hidráulica (C), controlador automático del cuarto húmedo (D), equipo de medición de longitud (E), frasco de l'Chatelier (F), equipo aguja de Vicat (G), equipo de autoclave (H) y moldes para probetas de mortero de 50 mm (I) (Elaboración propia).

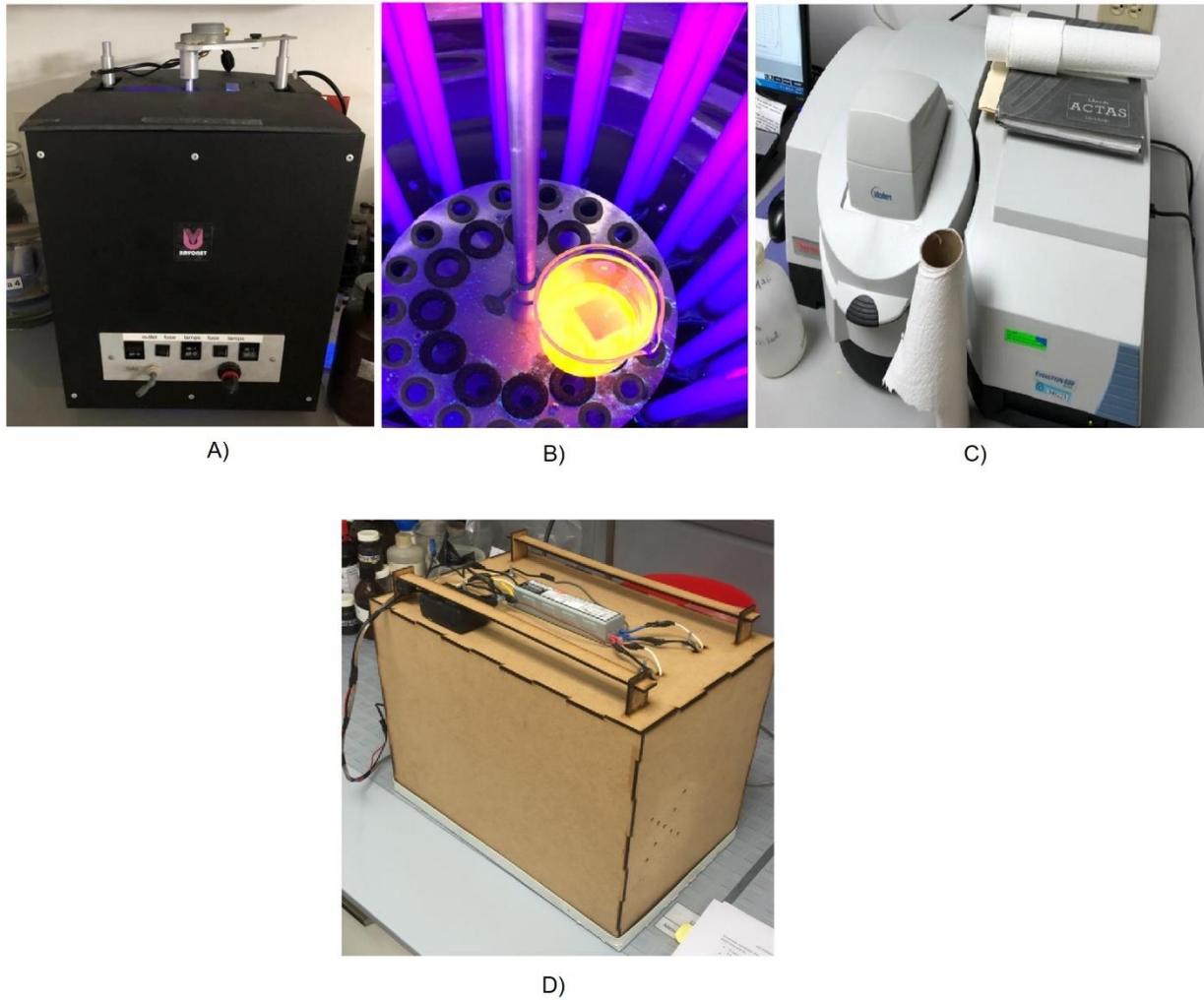


Figura 4.4. Equipo con lámparas de luz ultravioleta (A y B), espectrofotómetro UV-Vis (C) y cámara de exposición a luz UV para probetas cúbicas de cemento (D) (Elaboración propia)

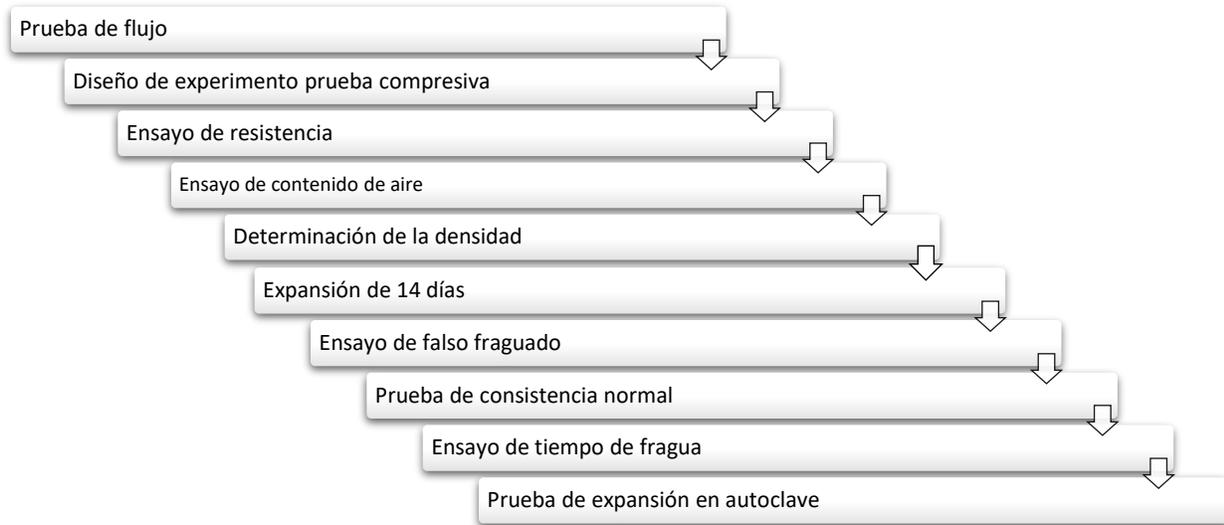
4.3 Metodología experimental

Para completar el desarrollo del mortero de cemento hidráulico dopado con TiO_2 se dividió el estudio en tres partes:

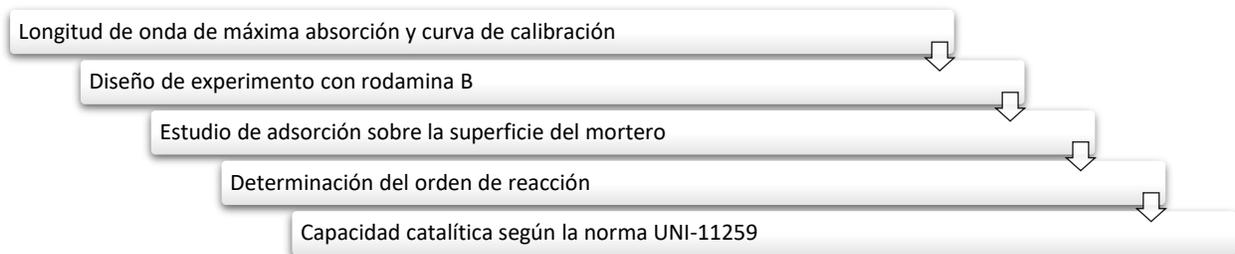
1. Determinar si las mezclas cumplen con los requisitos mecánicos y físicos según las normas técnicas INTECO destinadas para construcción en la evaluación de cementos hidráulicos; a partir de los resultados se eligió una mezcla candidato para cuantificar la capacidad fotocatalítica.
2. Cuantificación fotocatalítica del mortero en los laboratorios del CELEQ.
3. Análisis de la oportunidad de negocio que posee este producto en el mercado nacional.

La Figura 4.5 muestra los esquemas experimentales seguidos.

1. Requisitos mecánicos y físicos:



2. Pruebas de capacidad catalítica:



3. Innovación por la metodología puesta en marcha ajustada:

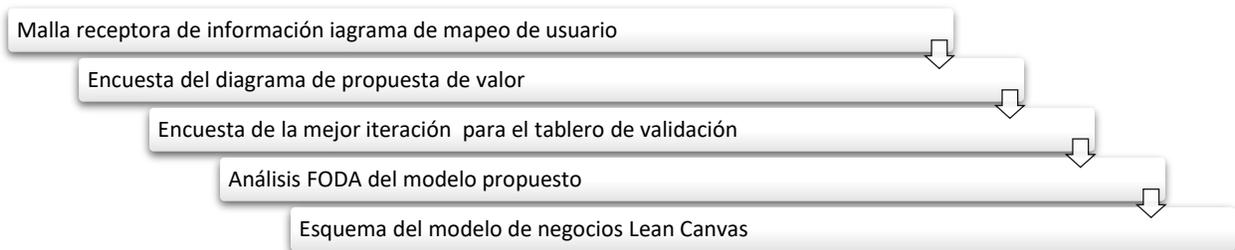


Figura 4.5. Esquemas experimentales del proyecto para determinar si cumple con los requisitos mecánicos y físicos, cuantificar la capacidad catalítica y analizar la oportunidad de negocio que posee este producto.

4.3.1 Diseño experimental para evaluar la resistencia a la compresión

En este proyecto se realizaron las mezclas con los siguientes porcentajes de dióxido de titanio en relación con el cemento (m/m): 0.0 %, 0.1 %, 2.5 % y 5.0 %. Las relaciones másicas de TiO₂-cemento se definió de acuerdo con las concentraciones observadas en otros estudios del mismo tema y en concordancia con el proyecto “Evaluación de la capacidad del cemento Portland dopado con nanopartículas de TiO₂ para la disminución de la bacteria E. coli en cuerpos de agua” realizado en la UCR (Masis et al., 2022). Además se estimó que con estos porcentajes de ensayo sí se contaba con el dióxido de titanio P 25 suficiente para terminar la investigación.

Como punto de partida, se realizaron ensayos preliminares según la norma INTE C143:2018 en los cuales se determina la cantidad de agua necesaria para cumplir con la prueba de flujo utilizando un mezclado simple y un premezclado por molido para las mezclas de mortero con relaciones de dióxido de titanio en cemento (m/m) de 0 %, 0.1 %, 2.5 % y 5 %. El ensayo de resistencia a la compresión permite determinar la resistencia a la compresión de los cementos hidráulicos y otros morteros. Debe haber cautela al utilizar los resultados para pronosticar la resistencia de concretos. El ensayo es la base de otras numerosas especificaciones y métodos por lo que es una referencia adecuada para el estudio de las repercusiones del dióxido de titanio nano particulado sobre las propiedades del cemento y mortero (INTECO, 2015).

Los Diseños de experimento Completamente al Azar (DCA) permiten comparar dos o más tratamiento considerando como fuentes de variabilidad únicamente los tratamientos y el error aleatorio. El Análisis de Varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) es una técnica que separa la variación total en sus partes y compara los aportes de cada variación. Los diseños requieren definir un nivel de significancia (α), para este proyecto se definió como 0.05 para ser comparado con el valor p calculado y determinar si hay diferencias significativas entre las medias de la variable de respuesta. Una significancia de 0.05 significa que hay una probabilidad del 5 % de errar y concluir que hay una diferencia cuando no la hay (Gutiérrez & Salazar, 2003).

Como variable de respuesta, se midió la resistencia a la compresión de especímenes de mortero de 50 mm por 50 mm de lado distribuidos aleatoriamente en el orden de fallado entre especímenes hechos en una misma mezcla de mortero y a la misma edad. La resistencia a la compresión se midió en kilo Newton. Se recalca que la aleatorización se debe especificar de esta manera debido a que la variabilidad de cada observación recae en el moldeado de cada cubo, el cual se realiza al azar y no en el periodo en el que se realiza la batida de la mezcla. Además, el equipo no permite mezclar la cantidad de material necesario para un solo cubo, el mínimo es para tres cubos.

Para el mezclado se siguió el procedimiento del mezclado de cemento Portland con la adición del catalizador como un factor de estudio. La relación arena cemento es de 2.75 y la relación agua cemento es la suficiente para obtener un flujo adimensional de 110 ± 5 en 25 golpes de la tabla de flujo. Se prepararon dos mezclas distintas: la primera colocando el agua en el tazón, luego el dióxido, seguido el cemento y se comienza el mezclado; la segunda, agregando primero el agua y luego una mezcla seca de cemento y dióxido de titanio homogenizado mediante un mezclador cilíndrico hermético lleno de balines. El tiempo de mezclado del homogeneizador es de 15 minutos mezclando en ambas direcciones, 15 minutos de reposo y 15 minutos de mezclado en una dirección.

El moldeado de cada cubo se realizó de forma manual apisonando 32 veces en dos capas según el orden de la norma. Inmediatamente después de completado el moldeo, los especímenes se numeraron y se colocaron en el cuarto húmedo por 24 horas. A las 24 horas se desmoldaron y se sumergieron en agua saturada con cal por 3 y 7 días. Al cumplir la edad de ensayo se les realizó la prueba destructiva de resistencia a la compresión en la máquina de ensayos hidráulica. En total se realizaron cuatro diseños DCA: a edades de tres días con mezclado simple; a siete días con mezclado simple; a tres días, moliendo previamente el cemento con el TiO_2 y por último, a siete días moliendo previamente el cemento con el TiO_2 .

4.3.2 Ensayos y requisitos mecánicos y físicos

La relación cemento dióxido de titanio y el método de mezclado elegido se determinan en la matriz de priorización y este conjunto candidato se utiliza para continuar con la segunda parte

del proyecto, se realizan la totalidad de los requisitos mecánicos y físicos del cemento según la norma INTE C147:2018, apartados 6.1 y 6.2. Los ensayos se realizan en los laboratorios acreditados del LanammeUCR en presencia de un encargado en todo momento. Se repitieron todos los procedimientos para las mezclas con cemento sin dióxido de titanio y cemento con dióxido de titanio y el resultado de cada prueba se comparó contra las especificaciones de dicha norma.

La prueba de resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico se realizó de acuerdo con el procedimiento de la norma INTE C57:2015 para 6 cubos por batida a edades de 3 días \pm 1 hora, 7 días \pm 3 horas y 28 días \pm 12 horas. Cada batida se realizó de acuerdo con la práctica para el mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento correspondiente a la norma INTE C144:2012 y se mantuvo la relación de agua que permitiera cumplir con un flujo adimensional de 110 ± 5 . El flujo se midió en cada ensayo de acuerdo con la norma método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico INTE C143:2018. Se preparó cada mortero en una batida independiente utilizando 500 g de cemento, 1375 g de arena estándar graduada, 25 g de dióxido de titanio en las corridas que lo requerían y agua suficiente para cumplir con el flujo especificado.

Para la medición de la densidad del cemento se siguió la norma determinación de la densidad del cemento hidráulico INTE C141:2018. El volumen de keroseno desplazado se midió por medio de un frasco Le Chatelier manteniendo la temperatura del líquido a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$. La densidad del cemento se calcula por medio de la fórmula (3.3).

Para conocer el contenido de aire se realizó el ensayo por triplicado, tanto para la mezcla de mortero puro como para la mezcla de mortero con dióxido de titanio según la norma contenido de aire en el mortero de cemento hidráulico INTE C136:2020. Para calcular el contenido de aire en porcentaje de volumen de aire se utiliza la fórmula (3.2). La diferencia de masa se calcula utilizando un recipiente cilíndrico con un diámetro de $76 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ y una profundidad de 88 mm ajustado para contener $400 \text{ mL} \pm 1 \text{ mL}$ de agua a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Cada batida se preparó con 350 g de cemento con o sin dióxido de titanio, 1400 g de arena 20-30 y agua suficiente para dar un flujo de $87 \frac{1}{2} \pm 7 \frac{1}{2}$ con 10 caídas del plato de flujo.

Cuando se determinó la expansión del cemento en barras de mortero almacenadas en agua se siguió la norma INTE C166:2020. El ensayo utiliza las mismas proporciones de mezcla que el ensayo de resistencia a la compresión incluido el tipo de arena. Se varía el molde utilizado de uno cubico a uno de 25 mm x 25 mm x 285 mm. Además, se almacenaron los especímenes durante $22,5 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$ antes de ser desmoldados. Subsecuentemente las barras se almacenan sumergidas en agua saturada con cal durante 14 días. La primera medición de longitud se realizó a las $24 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ de finalizado el mezclado y la segunda lectura a los 14 días. Se reportó el promedio de cambio de longitud los más cercano al 0.001 %.

A diferencia de los ensayos realizados hasta este punto en la metodología, los ensayos de falso fraguado, expansión en autoclave y tiempo de fragua se trabajan con pastas, en vez de trabajar con morteros. La diferencia es que no requiere de ninguna arena y requiere una nueva relación agua cemento. Para los ensayos de expansión en autoclave y tiempo de fragua se determinó la relación de agua mediante la determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico INTE C139:2018 utilizando una aguja de Vicat con el embolo de 10 mm. Se logró que la barra marcara un punto a $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ debajo de la superficie original tanto para la pasta de cemento puro como para la pasta de cemento con TiO_2 al tercer intento de repetir la prueba. Para todos los ensayos que se trabajan con pastas se utiliza el método de mezclado de pastas de la norma INTE C144:2012.

Para determinar si ocurre el falso fraguado, endurecimiento temprano o el fraguado instantáneo se realiza un ensayo en pastas siguiendo la norma INTE C169:2019 determinación del endurecimiento temprano del cemento hidráulico. La relación de agua a utilizar en este ensayo se determinó logrando una pasta con una penetración en aguja de Vicat de $32 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$ a los 30 s después de haberse soltado el vástago. La cantidad de cemento utilizando es de 500 g tanto para cemento puro como para cemento con TiO_2 . Para la prueba se realizó una sola medición de la penetración de la aguja de Vicat de 10 mm en la pasta tras $5 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$. Debido a que no se presentaron indicios de que el cemento se endureciera rápidamente no se determinó la penetración después del remezclado.

Similar al ensayo de expansión de barras de mortero en agua, se mide la posible expansión tardía causada por la hidratación de CaO, MgO o ambas, pero en barras de pasta de cemento.

El ensayo INTE C135:2018 expansión por autoclave del cemento hidráulico consistió en calentar en un ambiente de vapor saturado y enfriarlo nuevamente en un lapso de aproximadamente seis horas. El equipo utilizado es una autoclave anclada al suelo la cual se llevó hasta 2 MPa utilizando agua y siguiendo las adecuadas medidas de seguridad de la norma y las instrucciones de los operarios. Las mediciones por diferencia de longitud se realizaron a las $24 \text{ h} \pm 0.5 \text{ h}$ tras el moldeado y luego tras el proceso de autoclave, se calculó el cambio de longitud restando la lectura inicial con la lectura después de introducir las barras a la autoclave y se reportó el cambio al 0.01 % más cercano.

Por último, se realizó el ensayo INTE C137:2020 determinación del tiempo de fragua de un cemento hidráulico por medio de la aguja de Vicat. Al igual que el ensayo de autoclave, se utilizó una pasta que sus proporciones y mezclado sean para una consistencia normal. Utilizando un equipo de aguja de Vicat de 1 mm, se realizaron penetraciones periódicas aproximadamente cada 15 minutos durante aproximadamente 6 horas, tanto para la mezcla con TiO_2 como para la mezcla de cemento puro. Se determinó el tiempo inicial de fragua como el periodo entre el primer contacto entre el cemento y el agua hasta el tiempo en que la penetración es de 25 mm. Además, se determinó el tiempo final de fragua como el tiempo transcurrido entre el primer contacto del agua y el cemento y el momento en el que la aguja de Vicat ya no deja una marca circular completa en la superficie de la pieza.

4.3.3 Diseño de experimentos químicos

Para cuantificar la capacidad catalítica del cemento dopado con TiO_2 se utilizó la rodamina B que es una molécula modelo para la eliminación de humo ambiental en cementos y arcillas fotocatalíticas (Krýsa, 2012). Se utilizó un espectrofotómetro UV-vis para calcular la longitud de onda de máxima absorción realizando un barrido de longitud de onda entre 200 nm y 700 nm. El resultado se reporta por medio del software VISIONpro.

Se utilizaron los cambios de absorbancia para observar los efectos del catalizador y la degradación del tinte, ya que la rodamina B posee un tono rosado fosforescente muy estable. Mediante el software VISIONpro se construyó una curva de calibración utilizando disoluciones madre patrón de Rodamina B entre 0.399 mg/L y 2.795 mg/L a las cuales se les

mide la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia.

Para evitar lecturas alteradas se utiliza agua Mili-Q y la interferencia causada por la radiación absorbida por la celda y por el disolvente se cancelan realizando un espectro de línea base utilizando la misma cubeta y agua Mili-Q antes de cada corrida. Los cuidados que se deben tener son: permitirle al equipo estabilizarse durante media hora después que el equipo encienda y antes de comenzar las mediciones, realizar lavados adecuados a la cubeta, evitar burbujas y utilizar el equipo adecuado para limpiar la cubeta sin rayar su superficie.

Para el diseño de experimentos se utilizó rodamina B, piezas de mortero cortadas a partir de barras de cemento del ensayo de expansión de barras de cemento en LanammeUCR y tubos de ensayo de cuarzo para luz UV. Los niveles escogidos son muestras con mortero dopado con 5 % TiO_2 , muestras de mortero puro y muestras con únicamente la disolución y sin ninguna pieza dentro. Los tubos de ensayo de cuarzo con cemento contenían una sola pieza de entre 16.1 g y 17.2 g, además de 12 mL de disolución. Los tamaños de estas piezas son 0.8 cm x 0.8 cm x 13.5 cm debido a que los ensayos se realizan en tubos de ensayo de cuarzo especiales para la transmisión de luz UV. Se propuso un periodo de 1 hora donde las muestras permanecieran a oscuras para que se dé únicamente el fenómeno de adsorción antes de comenzar a exponer las muestras a luz UV.

Las nueve observaciones permanecieron juntas en la cámara de luz ultravioleta durante 1 hora y luego se dejaron enfriar y estabilizar durante 30 minutos, igualmente a oscuras. El espectrofotómetro se mantuvo encendido desde el comienzo de la prueba para que se estabilizara, además como parte del procedimiento se utilizó como blanco la misma agua Mili-Q utilizada en la preparación de las disoluciones de rodamina B. Los resultados se importan desde la memoria del equipo y se analizan en Excel.

Para estudiar el efecto de la adsorción se debe llevar el sistema a un equilibrio de adsorción por lo que se realiza un ensayo simple a oscuras utilizando un beaker de borosilicato, una pieza de cemento de 2.5 cm x 2.5 cm x 2 cm, un espacio oscuro y la disolución de rodamina B a utilizar. Tomando en cuenta el volumen del beaker, el volumen desplazado por la pieza y la disolución que se pierde al realizar las mediciones de absorbancia se decide sumergir la pieza en 100 mL de disolución.

Las mediciones se realizan cada 15 minutos desde el tiempo cero en que se sumerge la pieza. Para cada medición se realizan dos lavados de la cubeta, esta disolución contaminada se descarta; por medio de un gotero se extrae solo lo suficiente para llenar la cubeta y tras realizar la medición, el contenido es devuelto al beaker con el resto de la disolución y la pieza de cemento. Se toman mediciones cada 15 min durante 4.5 horas, seguidamente se deja el sistema de reacción en reposo hasta el día siguiente, tras 22 horas de comenzado el experimento se comienzan a tomar mediciones cada 15 minutos hasta alcanzar 24 horas con la pieza sumergida y a oscuras en todo momento. El propósito del experimento es determinar si tras 24 horas se ha logrado alcanzar un equilibrio de adsorción, el cual, debería verse reflejado como valores constantes de absorbancia en el tiempo. Los resultados podrían indicar, si tras 24 horas a oscuras, la adsorción alcanza un equilibrio.

Se realizó el estudio de la cinética de reacción considerando un equilibrio de adsorción y las mismas condiciones que el experimento anterior sustituyendo la pieza de cemento por una limpia. Se propuso un estudio donde se comienza a medir la absorbancia en la longitud de máxima absorción tras 22 horas oscuras y luego, a partir de las 24 horas de estadía a oscuras, comenzar a exponer el sistema a luz UV. El propósito del experimento es comparar el comportamiento de la degradación química con la ecuación de Langmuir-Hinshelwood para la cinética de reacción fotocatalítica de compuestos orgánicos. A partir de los resultados es posible diferenciar el orden de reacción y tras contrastar con la teoría es posible observar las implicaciones del sistema en las condiciones propuestas.

Finalmente se realizó la prueba de reacción según la norma UNI-11259. Lo realizado para esta prueba involucró la construcción de un prototipo para llevar a cabo la reacción. Se utilizaron dos tubos fluorescentes de luz UV-A de 8 watts de potencia, un balastro adecuado para esta potencia y un ventilador para mantener la temperatura regulada. La caja se construye en madera prefabricada MDF con dimensiones internas de 40 cm de largo, 28 cm de alto y 25 cm de ancho, mandados a cortar en impresión laser. Las dimensiones permitieron que los fluorescentes se colocaran a una altura de 20 cm de la cara superior de las piezas de cemento como se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Equipo de trabajo, ensayo de exposición de las probetas a luz UV (Elaboración propia).

Se prepararon 12 cubos en total siguiendo la norma INTE C57:2015, la mitad de los cuales se construyeron utilizando la relación cemento catalizador seleccionada de los objetivos anteriores. En cuanto a la relación agua cemento, se utiliza el criterio de que cada mezcla debe pasar el ensayo de flujo para garantizar una buena trabajabilidad y una cantidad controlada de poros en el cemento. Se utilizó una de las caras laterales de cada cubo donde se preparó un encierro circular de 4 cm de diámetro interno utilizando un molde circular y pasta lubricante como agente engrasante, la función de esta es retener la disolución de rodamina B mientras se evapora. Una vez dibujada la circunferencia se colocan 3 mL en total de la disolución de Rodamina B preparada. La concentración es de 27.75 mg/L tal que se logre una dispersión de 6.625×10^{-3} mg/cm² sobre la superficie circular preparada.

Los cubos con la disolución se dejaron en reposo durante 24 h para que se evapore y seque la superficie de estos. Pasado este tiempo, se sacaron los 12 cubos del cajón y se toman las imágenes en tiempo cero utilizando una cámara celular de 12 megapíxeles. Al devolver los cubos al cajón se encendieron los fluorescentes y se tomaron fotografías pasadas 4 y 26 horas. Finalmente, se utilizó la herramienta digital ImageJ para promediar el tono de la Rodamina B seca en cada cubo y extraer las coordenadas $a(0h)$, $a(4h)$ y $a(26h)$ de las imágenes de los

cubos expuestos a la luz UV-A durante 0 h, 4 h y 26 h respectivamente. Para cumplir con los requisitos, R4 debe ser mayor a 20 % y R26 mayor a 50 % (Najar, 2021). Los parámetros mencionados se calculan de la siguiente manera:

$$R4 = \frac{a(0h) - a(4h)}{a(0h)} * 100 > 20 \% \quad (4.1)$$

$$R26 = \frac{a(0h) - a(26h)}{a(0h)} * 100 > 50 \% \quad (4.2)$$

4.3.4 Evaluación de la estrategia de modelo de negocios

El estudio de caso se llevó de una forma estructurada y lineal, donde las conclusiones de un esquema de resultados llevaban al siguiente esquema buscando una mejora continua en el planteamiento de las ideas. Se utilizaron herramientas que ayudaron a implementar tanto las metodologías de “el pensamiento de diseño” (Design Thinking) como de “puesta en marcha ajustada” (Lean Startup).

Las herramientas utilizadas son las siguientes: tablero de validación, malla receptora de información, entrevistas a 3 clientes ideales, esquema de mapa de empatía, encuestas no probabilísticas, esquema de propuesta de valor, análisis FODA y un “esquema de lienzo para emprendedores” (Lean Canvas). Este último se utiliza en sustitución del esquema de modelo de negocios. El Lean Canvas permite validar ideas y conceptos, centrándose más en lograr un resumen viable del plan de negocio, específicamente planteando los problemas, soluciones, métricas clave y ventajas competitivas. Mientras que el esquema de modelo de negocios se centra más en una gestión operativa y estratégica sobre los planes de mercadeo logrando sentar bases para la implementación del negocio y no necesariamente validando la oportunidad de negocio.

Desde el comienzo de la formulación del proyecto se recopilaron todos los esquemas y cuadros de estudio estilo esquema o canvas ya que estos son parte de las hipótesis que se deben construir alrededor del producto, los clientes y los riesgos.

Terminado este proceso, se construye un producto mínimo viable centrado en la hipótesis que se desea probar. Tras el primer objetivo del proyecto se logró estimar el riesgo de continuar con uno u otro porcentaje de dióxido de titanio y además se definió el producto mínimo viable tomando en cuenta las mínimas necesidades del cliente. Estas necesidades son una presentación del producto que ya venga homogéneamente mezclado.

El centro de la metodología puesta en marcha ajustada es el ciclo de retroalimentación de crear-medir-aprender. A partir del producto mínimo viable seleccionado se comenzó a medir, en los objetivos dos y tres, las distintas propiedades y características necesarias para un buen desempeño del producto y finalmente, utilizar este conocimiento para completar todos los esquemas y cuadros alrededor del producto, en mejora continua.

Como punto de partida, el producto mínimo viable inicial consiste en la propuesta de vender una bolsa pequeña sellada de cemento con 5 % dióxido de titanio homogéneamente mezclado. El cliente inicial son floristerías que construyan sus propias macetas de cemento y para estimar los riesgos se debe generar el primer pivote del tablero de validación.

El tablero de validación se completó conforme se desarrollaba la idea en un producto mínimo viable más complejo. Sin embargo, el tablero de validación final no muestra las etapas de experimentación para cada pivote. Las primeras hipótesis generan el siguiente supuesto arriesgado: ¿estamos dispuestos a solo venderle a floristerías o personas que construyan macetas? El método para evaluarlo consistió en simplemente enumerar opciones de clientes a los que se podría contactar. El criterio mínimo de cumplimiento consiste en nombrar al menos 20 opciones en un día y finalmente, debido a que esto no fue posible lograrlo, se invalida el primer supuesto arriesgado. La conclusión es que se debe cambiar la hipótesis sobre el cliente y comenzar el siguiente pivote.

Antes de evaluar el siguiente pivote se utilizó la herramienta malla receptora de información para lograr resumir todos los avances hasta el momento y plantear posibilidades de mejora. La malla receptora de información forma parte de las herramientas Design Thinking y se utiliza de la siguiente manera: en el símbolo más (+), se escriben todas las cosas interesantes o relevantes de la idea inicial; en el símbolo de rayo se escriben las críticas constructivas o las posibilidades de mejora; en el símbolo de pregunta (?), se escriben las preguntas nuevas

a partir de esta experiencia y finalmente, en el símbolo de nube de ideas, se escriben las ideas que surgen de lo evaluado.

La malla receptora de información sienta las bases para una nueva hipótesis, problema y posible solución que generan el siguiente supuesto arriesgado: si expertos en el área de moldeado, manualidades o clientes ideales están interesados y logran entender la capacidad autolimpiante. El método para evaluarlo consistió en realizar entrevistas. El criterio mínimo de cumplimiento es que al menos el 50% debe estar interesado en el producto o lograr entender el planteamiento.

La experiencia obtenida por medio de las entrevistas permite validar la suposición ya que los resultados permiten cumplir con la métrica y, además, se genera un mapa de empatía para cada uno de los entrevistados como clientes clave con el propósito de entender al consumidor.

Debido a que se valida el supuesto, se introduce una segunda suposición riesgosa alrededor del mismo cliente: si estamos dispuestos a solo venderle a personas con experiencia. Este pivote de la suposición más riesgosa utiliza el mismo método para floristerías en donde se buscan enumerar al menos 20 posibles clientes ideales en un día, esta vez incluyendo emprendimientos, floristerías y personas que trabajan con artes plásticas. Nuevamente se invalidó la suposición debido a que no fue posible enunciar tantas opciones en un día.

Se genera un tercer pivote, utilizando una idea recopilada en la malla receptora de información e introducido como hipótesis de solución en el segundo pivote y en las entrevistas para escuchar la opinión. Se decide sustituir la propuesta de producto mínimo viable de un simple saco de cemento con TiO_2 a un Kit que incluya cemento, arena, uno más moldes y un manual de instrucciones. Se genera un esquema de propuesta de valor y dos nuevos pivotes para buscar validar dos supuestos riesgosos con un solo método. Los supuestos son: que el público no experto si va a mostrar interés a pesar de no necesariamente comprender por completo el fenómeno autolimpiante y que el rango de precio que el cliente está dispuesto a pagar está en un rango medio o alto. El método consiste en encuestar de forma no probabilística estos supuestos mientras se recopila información de utilidad para sentar las bases de una posible marca del producto.

A partir de los resultados anteriores en conjunto, se generó un análisis FODA y finalmente un Lean Canvas. Este último permite enunciar específicamente los primeros pasos de la columna vertebral del modelo de negocio con el cual se finaliza el primer ciclo de la metodología puesta en marcha ajustada (Araya, Rodríguez, Vargas & Villalobos, 2017). Las etapas que se deben completar en el esquema son las siguientes:

- Tres problemas que muestran otros comercios dentro del mismo segmento de mercado y cómo estas personas están resolviendo el problema.
- Establecer las capacidades o características principales de mi producto para cada problema.
- Enunciar el concepto de proposición de valor único o frase que logra comunicar el valor diferenciador del producto y por qué merece la atención de los clientes.
- Determinar los segmentos del mercado meta que se ven afectados por esos problemas y a aquellos a los que el producto les puede dar una solución
- Distinguir una ventaja única difícil de copiar.
- Señalar los canales por los cuales se va a alcanzar al cliente.
- Definir los indicadores que se deben utilizar para saber si el negocio va caminando.
- Enumerar los costos que se deben tener en cuenta.
- Señalar la forma en la que se dan los ingresos y planes de venta.

5 Resultados experimentales y discusión

El presente proyecto de investigación se basó en el desarrollo de una mezcla de cemento Portland de uso general con un porcentaje determinado de dióxido de titanio enfocándose específicamente en: el cumplimiento de ciertos requisitos de calidad vigentes para cementos a nivel nacional; la capacidad de degradar fotocatalíticamente la rodamina B, molécula utilizada como modelo para determinar la actividad catalítica de aglutinantes hidráulicos y en el estudio de la posible competitividad como propuesta de negocio del producto mínimo viable a partir de cemento fotocatalítico siguiendo la metodología puesta en marcha ajustada.

5.1 Ensayos mecánicos y físicos

5.1.1 Consideraciones generales

Se destacan los resultados de la prueba de flujo de morteros donde se determina la relación másica agua-cemento (A/C). Si bien el flujo no se incluye generalmente en las especificaciones de los cementos hidráulicos comerciales, el resultado se utiliza comúnmente en pruebas estándar que requieren que el mortero tenga un contenido de agua que proporcione un nivel de flujo especificado.

Se realizó un gráfico de cajas incluyendo cada repetición de la prueba en morteros que se realizó a lo largo del proyecto. Como se mencionó en el Método de prueba estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico, se obtuvo la masa de agua necesaria para lograr que una determinada cantidad de cemento y arena graduada obtuvieran una fluidez de $110 \% \pm 5 \%$. La relación de agua – cemento (A/C) cambió conforme se agregó el dióxido de titanio y cambió ligeramente conforme se sustituyó el saco de cemento por uno nuevo. Dicho gráfico se muestra en la Figura 5.1.

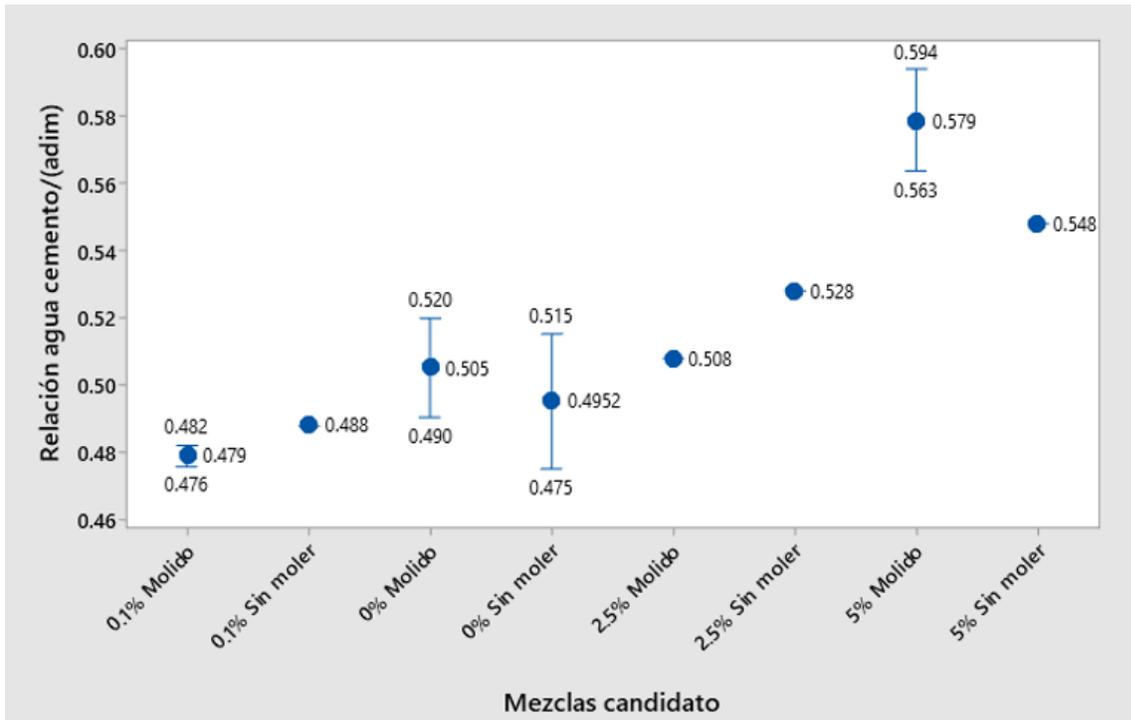


Figura 5.1. Promedio de la relación A/C utilizada en las repeticiones de la prueba de flujo para cada una de las mezclas candidato (Elaboración propia).

Se observó que el mayor requisito de agua lo tuvo la mezcla producida a partir de cemento homogenizado con 5 % dióxido de titanio en una batidora giratoria con balines metálicos. Igualmente, de las mezclas que no fueron homogenizadas previamente, la mezcla con 5 % TiO_2 posee el mayor requisito de agua. No obstante, todos los valores se encuentran entre 0.35 y 0.6 agua-cemento, relación recomendada para facilitar el mezclado y mantener la trabajabilidad del material (Junior et al., 2017). El motivo por el que ciertas mezclas poseen más repeticiones que otras, como se observa en el Cuadro A.1 es debido a que varios ensayos de calidad requieren que se mida el flujo justo antes de realizar el ensayo y cada una de estas repeticiones se tomó en cuenta.

5.1.2 Evaluación estadística para valorar la calidad del mortero con respecto a la resistencia a la compresión a los 3 y 7 días

Con el propósito de conseguir producir especímenes estables que cumplen o no con la norma

INTE C57:2015: “Resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico”, se preparó una serie de diseños de experimentos con estudio estadístico variando el porcentaje de dióxido de titanio y el procedimiento del mezclado. Las relaciones máxicas de TiO_2 -cemento se definió de acuerdo con las concentraciones observadas en otros estudios del mismo tema y en concordancia con el proyecto “Evaluación de la capacidad del cemento Portland dopado con nanopartículas de TiO_2 para la disminución de la bacteria *E. coli* en cuerpos de agua” realizado en la UCR (Masis et al., 2022).

Los cubos moldeados se llevan a su punto de falla en una prensa hidráulica y la resistencia a la compresión se compara contra los requisitos de la norma. La resistencia de cada espécimen se calcula según la ecuación (3.1) a partir de los resultados del Cuadro A.2,

Cuadro A.3, Cuadro A.4 y Cuadro A.5. En el Cuadro 5.1, Cuadro 5.2, Cuadro 5.3 y Cuadro 5.4 se resumen los resultados obtenidos para las cuatro series de experimentos realizados.

Cuadro 5.1 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple y fallados tras 3 días de curado, reportados como el promedio de los esfuerzos lo más cercano a 0.1 MPa.

Especímen cúbico N°	Resistencia a la Compresión (MPa) - Edad 3 días y mezclado simple			
	0 % contenido de TiO_2	0.1 % contenido de TiO_2	2.5 % contenido de TiO_2	5 % contenido de TiO_2
1	18.31	17.76	17.40	18.30
2	18.30	18.25	17.88	17.73
3	18.29	18.41	17.77	18.38
Promedio	18.3	18.1	17.7	18.1

Cuadro 5.2 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple y fallados tras 7 días de curado.

Especímen cúbico N°	Resistencia a la Compresión / (MPa) - Edad 7 días y mezclado simple			
	0 % contenido de TiO ₂	0.1 % contenido de TiO ₂	2.5 % contenido de TiO ₂	5 % contenido de TiO ₂
1	21.93	23.31	21.56	22.24
2	22.90	23.01	22.11	22.06
3	22.77	21.80	22.40	21.11
Promedio	22.5	22.7	22.0	21.8

Cuadro 5.3 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio mezclado por molido como pretratamiento y fallados tras 3 días de curado.

Especímen cúbico N°	Resistencia a la Compresión / (MPa) - Edad 3 días y mezclado por molido			
	0 % contenido de TiO ₂	0.1 % contenido de TiO ₂	2.5 % contenido de TiO ₂	5 % contenido de TiO ₂
1	21.39	20.10	18.64	19.30
2	21.58	21.26	19.51	18.43
3	21.72	20.07	18.82	18.79
Promedio	21.6	20.5	19.0	18.8

Cuadro 5.4 Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio mezclado por molido como pretratamiento y fallados tras 7 días de curado.

Especímen cúbico N°	Resistencia a la Compresión / (MPa) - Edad 7 días y mezclado por molido			
	0 % contenido de TiO ₂	0.1 % contenido de TiO ₂	2.5 % contenido de TiO ₂	5 % contenido de TiO ₂
1	26.95	26.43	24.44	23.65
2	27.44	26.40	24.71	23.25
3	27.81	26.80	23.50	24.89
Promedio	27.4	26.5	24.2	23.9

De acuerdo con la norma, se reporta el promedio de los esfuerzos de compresión de todos los especímenes elaborados de la misma mezcla y con la misma edad lo más cercano a 0.1 MPa. No se presentaron especímenes defectuosos debido a que todos los especímenes hechos de una misma mezcla y a la misma edad están por debajo del rango máximo permisible, el cual es de 8.7 % del promedio cuando tres cubos representan la edad de ensayo (INTECO, 2015).

Los motivos de los grupos de experimentos son establecer cuales mezclas tienen diferencias significativas causadas por la adición de dióxido de titanio y seleccionar la mezcla candidato

para continuar los ensayos de calidad.

Para comprobar las hipótesis, se emplea el programa Excel, donde se realizan los análisis de varianza ANOVA de un solo factor de la variable resistencia. Se decide evaluar únicamente el tratamiento de porcentaje y no juntarlo con el mezclado simple o molido debido a que no fue posible aleatorizar estos tratamientos ya que el equipo de molido se construyó pasado un tiempo después de los ensayos iniciales. Los datos necesarios son los siguientes:

- **Hipótesis nula (H_0):** Todas las medias son iguales
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Las medias de algunos de los tratamientos son diferentes
- **Nivel de confianza individual:** 95 %
- **Nivel de significancia (α):** 5 %

Como se indica en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se obtiene un valor p mayor que el nivel de significancia ($\alpha=0.05$), concluyendo que no hay motivo para rechazar la hipótesis nula en los casos de mezclado simple. Con este primer pretratamiento de mezclado simple, la resistencia a la compresión no varía significativamente entre los especímenes de la prueba. En cambio, en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el valor p obtenido es sustancialmente menor que el nivel de significancia ($\alpha=0.05$) por lo que se debe rechazar la hipótesis nula. Rechazar la hipótesis nula proporciona suficiente evidencia para decir que las medias de la resistencia a la compresión fueron estadísticamente distintas para al menos una de las mezclas en comparación con las demás. Se debe realizar un análisis de la diferencia mínima significativa LSD para determinar aquellas mezclas distintas, únicamente en el caso de material mezclado por molido.

Cuadro 5.5 Análisis de varianza edad de 3 días y mezclado simple.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Contenido de TiO ₂	3	0.6398	0.21326	2.82	0.107
Error	8	0.6044	0.07555		
Total	11	1.2441			

Cuadro 5.6 Análisis de varianza edad de 7 días y mezclado simple.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Contenido de TiO ₂	3	1.622	0.5406	1.46	0.296
Error	8	2.953	0.3692		
Total	11	4.575			

Cuadro 5.7 Análisis de varianza edad de 3 días y mezclado por molido.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Contenido de TiO ₂	3	15.073	5.0243	22.56	0.000
Error	8	1.781	0.2227		
Total	11	16.854			

Cuadro 5.8 Análisis de varianza edad de 7 días y mezclado por molido.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
Contenido de TiO ₂	3	26.391	8.7969	25.61	0.000
Error	8	2.748	0.3435		
Total	11	29.139			

Lo mostrado en el Cuadro 5.9 y el Cuadro 5.10 indica que, a edades de 3 y 7 días, las mezclas de mortero con 2.5 % y 5 % TiO₂ molido no presenta diferencias significativas en cuanto a la resistencia a la compresión mientras que todas las demás sí. Además, a los 7 días de curado, las mezclas de 0 % y 0.1 % TiO₂ molido tampoco presentaron diferencias significativas, fenómeno que se observaba ligeramente desde la edad de 3 días. Las mezclas restantes presentan diferencias significativas entre sus medias respectivas lo que indica que cuando hay un pretratamiento de molido se generan fenómenos distintos a la hora del curado de los morteros, en este caso, disminuyendo la resistencia a la compresión en las muestras con mayor porcentaje de TiO₂ a pesar de que se trabaja con los contenidos de agua requeridos por la norma.

Cuadro 5.9 Resultados del análisis LSD para los ensayos con una edad de 3 días y mezclado por molido, donde μ_A , μ_B , μ_C , μ_D son las medias para 0 %, 0.1 %, 2.5 % y 5 % respectivamente.

Hipótesis	Diferencia Poblacional	Diferencia muestral	Valor LSD	Decisión: Diferencia
H ₀ : $\mu_A = \mu_B$ vs H _a : $\mu_A \neq \mu_B$	$\mu_A - \mu_B$	1.08	0.89	Significativa
H ₀ : $\mu_A = \mu_C$ vs H _a : $\mu_A \neq \mu_C$	$\mu_A - \mu_C$	2.57	0.89	Significativa
H ₀ : $\mu_A = \mu_D$ vs H _a : $\mu_A \neq \mu_D$	$\mu_A - \mu_D$	2.72	0.89	Significativa
H ₀ : $\mu_B = \mu_C$ vs H _a : $\mu_B \neq \mu_C$	$\mu_B - \mu_C$	1.49	0.89	Significativa

Ho: $\mu_B = \mu_D$ vs Ha: $\mu_B \neq \mu_D$	$\mu_B - \mu_D$	1.64	0.89	Significativa
Ho: $\mu_C = \mu_D$ vs Ha: $\mu_C \neq \mu_D$	$\mu_C - \mu_D$	0.15	0.89	No Significativa

Cuadro 5.10 Resultados del análisis LSD para los ensayos con una edad de 7 días y mezclado por molido, donde μ_A , μ_B , μ_C , μ_D son las medias para 0 %, 0.1 %, 2.5 % y 5 % respectivamente.

Hipótesis	Diferencia Poblacional	Diferencia muestral	Valor LSD	Decisión: Diferencia
Ho: $\mu_A = \mu_B$ vs Ha: $\mu_A \neq \mu_B$	$\mu_A - \mu_B$	0.85	1.10	No Significativa
Ho: $\mu_A = \mu_C$ vs Ha: $\mu_A \neq \mu_C$	$\mu_A - \mu_C$	3.18	1.10	Significativa
Ho: $\mu_A = \mu_D$ vs Ha: $\mu_A \neq \mu_D$	$\mu_A - \mu_D$	3.46	1.10	Significativa
Ho: $\mu_B = \mu_C$ vs Ha: $\mu_B \neq \mu_C$	$\mu_B - \mu_C$	2.33	1.10	Significativa
Ho: $\mu_B = \mu_D$ vs Ha: $\mu_B \neq \mu_D$	$\mu_B - \mu_D$	2.61	1.10	Significativa
Ho: $\mu_C = \mu_D$ vs Ha: $\mu_C \neq \mu_D$	$\mu_C - \mu_D$	0.28	1.10	No Significativa

El mezclado simple involucra preparar los materiales pesados y listos para mezclarlos en la batidora de cemento, luego colocar la arena en el alimentador de arena, el agua en el tazón, seguidamente el dióxido de titanio sobre el agua y finalmente colocar el cemento sobre el dióxido de titanio dejando que ambos se empapen. Durante el ciclo de mezclado, las paletas giratorias logran homogeneizar los materiales lo suficiente para no mostrar grumos a simple vista, sin embargo, para asegurar el mezclado homogéneo se planteó el pretratamiento por molido que consiste en colocar un kilogramo de cemento y el porcentaje de dióxido de titanio en una tómbola giratoria seca durante dos ciclos de 15 minutos como se mencionó en la sección 4.3.1. La tómbola contiene una cantidad fija de balines metálicos que se encargan de moler y homogeneizar los materiales, luego se empaquetan herméticamente hasta la hora de realizar el mezclado para los ensayos. El procedimiento es recomendado para evitar la aglomeración de TiO_2 y mejorar la homogenización de los materiales (Hegyi et al., 2018; Janus et al., 2019; Janus & Zajac, 2016).

Debido a que ninguna mezcla presentó una resistencia menor a 13 MPa en edades de 3 días ni menor a 20 MPa en edades de 7 días según estipula la norma, se decidió preparar una

matriz de priorización mostrada en el Cuadro 5.11 donde se califica del 1 al 5, siendo 5 muy favorable y 1 poco favorable. El fin es seleccionar el método de mezclado y la mezcla candidato con mejor perfil en conjunto. Se prevé la importancia a futuro del material según lo observado hasta el momento, especialmente en los temas de: variación en la resistencia a la compresión; almacenamiento para evaluar el mezclado simple y el molido, además interés de estudio para evaluar la intención de agregar más o menos TiO_2 ; el tiempo requerido para preparar el material contemplando que moler 1 kg de mezcla se tardan aproximadamente 45 minutos mientras que el mezclado simple requiere cero tiempo adicional, y los costos junto al valor agregado que podría proveer cada tratamiento.

Cuadro 5.11 Matriz de priorización para el método de mezclado y la concentración de TiO_2 de la mezcla candidato.

Opción	Criterio												Decisión
	Interés de estudio	Peso	Suma	Resistencia a la compresión	Peso	Suma	Almacenamiento	Peso	Suma	Costos y valor agregado	Peso	Suma	
Mezclado simple	3	40 %	1.2	5	25 %	1.25	2	20 %	0.4	3	15 %	0.45	3.30
Molido	3	40 %	1.2	3	25 %	0.75	5	20 %	1	5	15 %	0.75	3.70
0% TiO_2	1	40 %	0.4	4	25 %	1	3	20 %	0.6	1	15 %	0.15	2.15
0.1% TiO_2	2	40 %	0.8	4	25 %	1	3	20 %	0.6	3	15 %	0.45	2.85
2.5% TiO_2	4	40 %	1.6	3	25 %	0.75	3	20 %	0.6	4	15 %	0.6	3.55
5% TiO_2	5	40 %	2	3	25 %	0.75	3	20 %	0.6	3	15 %	0.45	3.80

Del Cuadro 5.11 se observa que el mezclado con el pretratamiento de molido y la mezcla con 5 % TiO_2 consiguieron la mayor calificación. El estudio contempla el riesgo de afectar la resistencia a la compresión por lo que se realiza el ensayo completo, incluyendo las edades de 3, 7 y 28 días, con seis especímenes por ensayo. Se presentan las ventajas que: con pretratamiento de molido, se previenen nubes de polvo de TiO_2 a la hora de realizar la batida de cemento; al utilizar un alto contenido de catalizador se aprecian mejor los efectos durante

las pruebas de calidad del material; durante las pruebas químicas, un mayor porcentaje de catalizador podría mostrar resultados más marcados; y que la relación TiO_2 – cemento de 5 % también se utiliza para el proyecto. “Evaluación de la capacidad del cemento Portland dopado con nanopartículas de TiO_2 para la disminución de la bacteria *E. coli* en cuerpos de agua” realizado en la UCR (Masis et al., 2022).

5.1.3 Verificación de los supuestos del análisis de varianza

La herramienta estadística ANOVA requiere una verificación de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia para los cuatro ejercicios de ANOVA realizados. Al verificar el cumplimiento en todos los diseños de experimentos se aumenta la capacidad de detectar efectos reales y se le da validez al análisis del experimento.

El supuesto de normalidad se cumple para todos los diseños ya que se distribuyen de manera normal a lo largo de la línea a 45° como se muestra en la Figura 5.2 (Gutiérrez & Salazar, 2003).

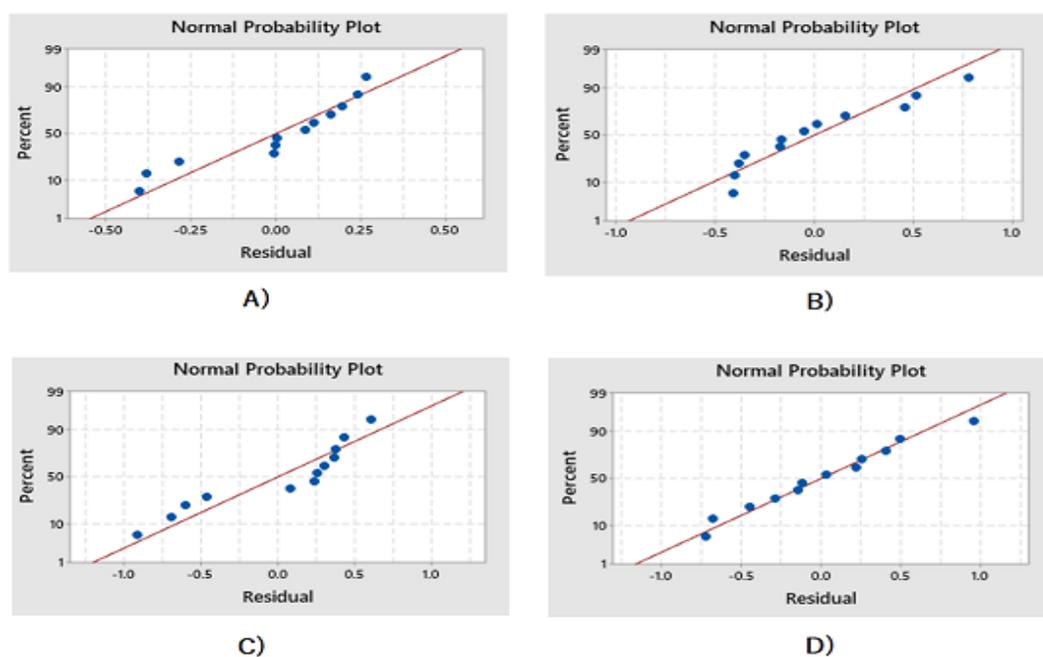


Figura 5.2. Gráficos de normalidad de los residuos para los modelos de resistencia a la compresión a los 3 días por mezclado simple (A), 3 días por mezclado con molido (B), 7 días por mezclado simple (C) y 7 días por mezclado con molido (D) (Elaboración propia).

Se grafica el residuo en función del valor ajustado para verificar visualmente que se cumpla el supuesto de varianza constante. En este caso se debe esperar observar una variabilidad similar y que no se amplíen o disminuyan en forma de cono conforme aumenta el valor del factor. Según lo que se observa en la Figura 5.3, no hay dependencia de la varianza al factor por lo que se comprueba el supuesto y por lo tanto el ajuste a los datos es adecuado (Gutiérrez & Salazar, 2003).

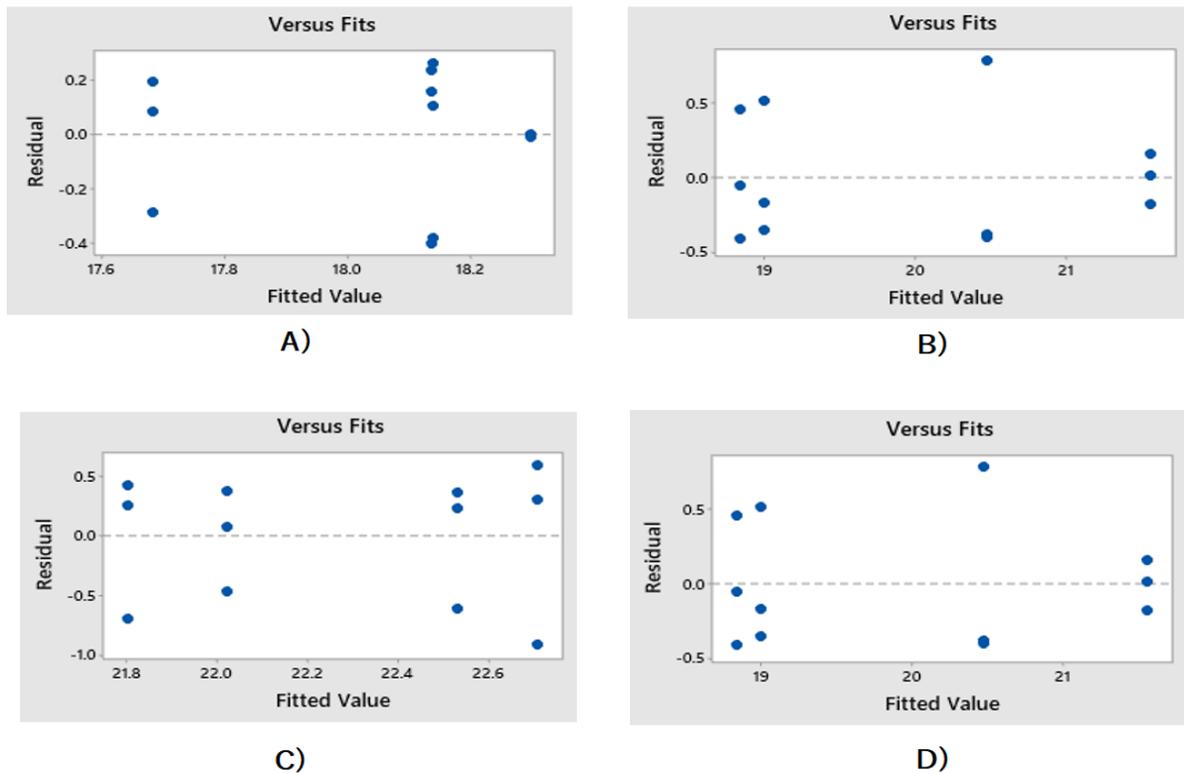


Figura 5.3. Gráficos de varianza constante de los residuos según los valores fijados para los modelos de resistencia a la compresión a los 3 días por mezclado simple (A), 3 días por mezclado con molido (B), 7 días por mezclado simple (C) y 7 días por mezclado con molido (D) (Elaboración propia).

Para verificar el supuesto de independencia con el orden de observación se utiliza el orden que fue aleatorizado de forma conveniente. El equipo no permite realizar menos de tres cubos por batida, lo cual limita la aleatorización. Tampoco se aleatoriza el tipo de mezclado, ni se considera como un factor extra debido a que el equipo necesario no estaba construido al momento en que se comenzaron las corridas experimentales. Tomando esto en cuenta, se siguió el orden 0.1 % TiO_2 , 0.0 % TiO_2 , 2.5 % TiO_2 y 5.0 % TiO_2 . En la Figura 5.4, se observa que los residuos no

siguen ninguna tendencia ascendente, descendente ni constante por lo que se indica una correcta aleatorización del diseño experimental (Gutiérrez & Salazar, 2003).

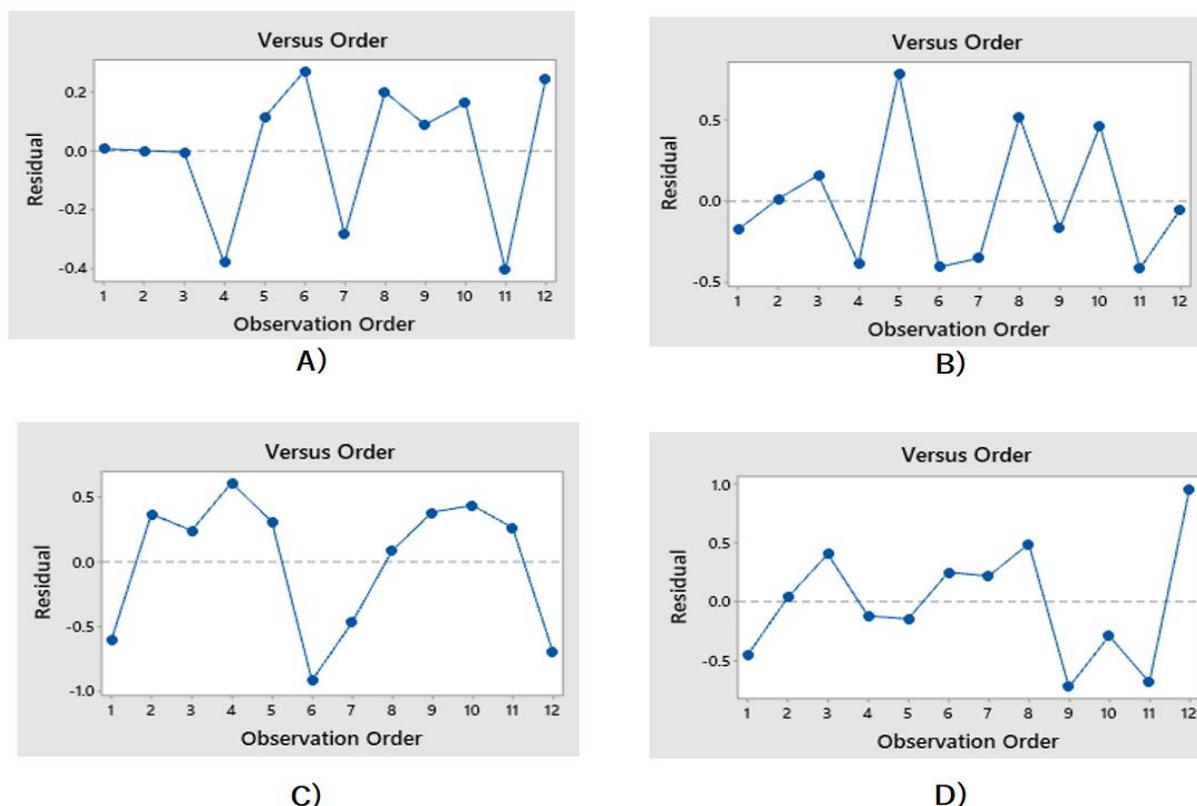


Figura 5.4. Gráficos de independencia de los residuos con el orden de observación según los valores fijados para los modelos de resistencia a la compresión a los 3 días por mezclado simple (A), 3 días por mezclado con molido (B), 7 días por mezclado simple (C) y 7 días por mezclado con molido (D) (Elaboración propia).

5.1.4 Ensayo de resistencia a la compresión de morteros para la mezcla molida de cemento con 5.0 % dióxido de titanio

Con el fin de obtener un criterio de aceptación de la calidad del material de cemento se realiza nuevamente el ensayo de resistencia a la compresión completo según la norma INTE C57:2015. Todo el cemento utilizado pasa por el pretratamiento de molido un día antes del mezclado y se almacena en dos juegos de bolsas con cierre hermético. Se utiliza arena estándar graduada normalizada en una relación arena cemento de 2.75 y agua destilada en una relación tal que cumpla los ensayos de flujo. Los resultados se presentan en el Cuadro

5.12, tanto del cemento dopado con TiO_2 como del cemento sin nada de dióxido de titanio, esto con el fin de comparar los efectos de la adición del catalizador contra la norma.

Cuadro 5.12 Resultados de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico y cemento con 5 % TiO_2 usando especímenes cúbicos de 50mm.

Mezcla	Edad de ensayo		
	3 días /(MPa)	7 días /(MPa)	28 días /(MPa)
5 % Catalizador	14.296	20.453	30.005
	14.240	20.772	30.381
	13.890	20.426	30.774
	13.987	20.559	30.392
	14.142	20.586	30.174
	14.084	20.390	30.211
0 % Catalizador	19.155	23.980	33.932
	18.587	23.997	34.694
	19.427	23.642	35.154
	17.899	23.582	34.345
	19.316	23.621	34.467
	19.364	24.115	34.414

Como se observa en el Cuadro 5.13, las resistencias promedio de las mezclas logran estar por sobre el valor mínimo requerido por norma. Tanto los morteros elaborados a partir de cemento y TiO_2 molido, como los de solo cemento, logran aprobar la norma. Se observa además que las mezclas con TiO_2 mostraron una menor resistencia a la compresión que las muestras sin TiO_2 . Este fenómeno se observó también en los resultados del apartado 5.1.2, para los morteros con el pretratamiento de molido.

El motivo de la disminución en la resistencia puede ser el aumento en la cantidad de agua libre que puede reaccionar con el cemento, ya que, al aumentar la cantidad de TiO_2 , es necesario aumentar la cantidad de agua para mantener un flujo y una trabajabilidad adecuada. Sin embargo, durante la fragua, el TiO_2 no reacciona con el agua ni la retiene, por lo que el cemento dispone de una cantidad más alta de agua que lo usual. Una mayor relación agua

cemento tiende a disminuir la resistencia a la compresión (Li et al., 2018). Este es el principal cambio contra una gran cantidad de investigaciones sobre el tema; al no mantener el contenido de agua constante conforme se varía el contenido de catalizador se está abriendo una ventana a un sin número de nuevos resultados. La principal motivación a variar el contenido de agua es para seguir la línea e instrucciones de las normas respecto al cumplimiento de la prueba de flujo.

Cuadro 5.13 Resultados de la resistencia a la compresión promedio reportada por norma y de los morteros de cemento con 5 % TiO₂ según la relación A/C y el flujo.

	Edad de 3 días			Edad de 7 días			Edad de 28 días		
	Resistencia/(MPa)	Flujo	A/C	Resistencia/(MPa)	Flujo	A/C	Resistencia/(MPa)	Flujo	A/C
Norma	13.0	110±5	-	20.0	110±5	-	28.0	110±5	-
5 % TiO ₂	14.1	115	57.9 %	20.5	112	56.0	30.3	112	55.6 %
Puro	18.9	108	52.8 %	23.8	114	50.4	34.5	109	50.0 %

5.1.5 Determinación del contenido de aire presente en el cemento para la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio

En concretos y morteros, el contenido de aire es influenciado por muchos factores además del potencial del cemento para atrapar el aire. El propósito de este ensayo es determinar si el cemento con 5 % TiO₂ cumple con el criterio de calidad de la norma INTE C147:2018. El porcentaje de aire máximo permitido es de 12 %, utilizando arena 20-30 y ensayado con la prueba del contenedor de 400 mL. Se prevé que el dióxido de titanio nano particulado tenga un efecto fuerte sobre el contenido de aire por lo que se realizó el ensayo por triplicado. Los resultados de la medición de masa en se muestran en el Cuadro 5.14, obtenidos siguiendo el procedimiento descrito por la norma INTE C136:2020.

Cuadro 5.14 Resultados de la medición de masa del contenido del embace de 400mL.

Repeticiones	Masa del mortero de 400 mL /(g)	
	0 % TiO ₂	5 % TiO ₂
Rep 1	847.4	856.2
Rep 2	848.2	854.6
Rep 3	847.0	854.0

Para el cálculo del contenido de aire se utiliza la ecuación (3.2) descrita en la sección 3.4 sobre el método de ensayo. Los materiales utilizados se muestran en el Cuadro A.9 donde se indican el porcentaje de agua utilizado necesario para determinar el porcentaje de aire. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.15. Ambos tratamientos mostraron resultados inferiores al límite máximo de 12 % por lo que aprueban el requisito. Además, se observa que al agregar dióxido de titanio nano particulado el contenido de aire tiende a disminuir debido a que los espacios vacíos se llenan del catalizador, desplazando el aire. La disminución del contenido de aire puede asociarse con una mayor durabilidad de la mezcla (Moreno, 2018)

Cuadro 5.15 Resultados del cálculo de contenido de aire para el cemento hidráulico patrón y el cemento candidato con 5 % TiO₂.

Repeticiones	Contenido de aire, % volumen	
	0 % TiO ₂	5 % TiO ₂
Rep 1	6	4
Rep 2	6	4
Rep 3	6	4

5.1.6 Determinación de la densidad del cemento para la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio

La densidad es una de las propiedades físicas del cemento hidráulico necesarias para algunos diseños de mezclas de concreto por lo que, si bien no corresponde a un parámetro de calidad como tal, este ensayo es necesario reportarlo como preámbulo a otras investigaciones. Para el cálculo se utiliza la ecuación (3.3) y el procedimiento de la norma INTE C141:2018 como se indica en la sección 3.5.

En el Cuadro 5.16 se muestran los datos medidos en el ensayo de la determinación de la densidad del cemento. El líquido utilizado es keroseno como lo indica la norma, ya que no reacciona con el cemento. Se observa que al sustituir una parte del peso de la mezcla por dióxido de titanio nano particulado la densidad tiende a aumentar, esto es debido a que el catalizador nano particulado es un material más fino que el cemento con una relación peso volumen más alta en comparación (Middlemas, 2014). El resultado concuerda con la disminución en el contenido de aire mostrado en resultados anteriores. Moreno (2018) reporta resultados similares en cementos comerciales, modificados y grises donde el catalizador tiene un efecto de relleno y se observa la disminución de grandes poros.

Cuadro 5.16 Datos necesarios y resultados del cálculo de la densidad del cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO₂.

Valores	Mezcla	
	0 % TiO ₂	5 % TiO ₂
Ma /(g)	317.1	324.0
Mt /(g)	379.7	385.9
Vinicial /(mL)	0.3	1.1
Vfinal /(mL)	22.9	23.0
T /(°C)	23.2	23.2
Mc /(g)	62.6	61.9
Densidad /(g/cm ³)	2.77	2.83

Donde Ma es la masa del frasco con el líquido en la primera graduación; Mt es la masa del frasco con el líquido y el cemento; Vinicial es el volumen en la primera graduación; Vfinal es el volumen final con el cemento; T es la temperatura del líquido (Keroseno) y Mc es la masa del cemento usado.

5.1.7 Expansión causada por el almacenamiento en agua de barras de mortero de la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio

La expansión de barras por almacenamiento en agua está relacionada con las impurezas de sulfato presentes en el cemento o en el agua utilizada para el mezclado. Los resultados deben presentar expansiones menores al 0.02 % tras los 14 días de curado para cumplir con los requisitos de la norma. Los 4 especímenes elaborados son de 25 mm x 25 mm x 285 mm y

se comparan con un patrón metálico de referencia por medio de un comparador de longitud antes y después de los 14 días de curado. La relación de agua utilizada es tal que cumple con un flujo adimensional de 110 ± 5 . El promedio de los datos obtenidos de la medición de longitud de las tres barras moldeadas por cada mezcla se muestran en el Cuadro 5.17, según el tiempo de curado y almacenamiento después de moldeados.

Cuadro 5.17 Medida del cambio de longitud del cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO₂.

Almacenamiento	Mezcla	Longitud del espécimen / (mm)			
		1	2	3	4
Lectura a las 24h \pm 15min	0 % TiO ₂	4.793	3.283	4.493	3.799
	5 % TiO ₂	3.912	3.453	3.987	2.629
Lectura a los 14 días	0 % TiO ₂	4.802	3.291	4.501	3.804
	5 % TiO ₂	3.924	3.465	4.006	2.645

Al contrastar los resultados del Cuadro 5.18 contra la norma INTE C147:2018, se observa que sí se cumple el requisito para el ensayo ya que los valores promedio para 5 % TiO₂ están por debajo de 0.02 %. Se prevé que el TiO₂ utilizado no tenga trazas de sulfato ni mucho menos el agua destilada utilizada, por lo que el resultado es adecuado.

Cuadro 5.18 Resultados de la expansión de las barras de mortero de cemento hidráulico y cemento con 5 % TiO₂ almacenadas en agua.

Mezcla	Diferencia de longitud del espécimen / (mm)				
	1	2	3	4	Promedio
0 % TiO ₂	0.009 %	0.008 %	0.009 %	0.005 %	0.008 %
5 % TiO ₂	0.013 %	0.013 %	0.020 %	0.016 %	0.015 %

5.1.8 Determinación del grado en que una pasta de la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio desarrolla un endurecimiento temprano

Un falso fraguado severo puede tener un gran impacto a la hora de colocar el concreto o material en su lugar, ya que dificulta la trabajabilidad y altera la consistencia del material. En

el falso fraguado, la rigidez puede desvanecerse mediante un nuevo mezclado sin la adición de agua mientras que, en un fraguado instantáneo, el remezclado no logra recobrar la plasticidad del material. Los cementos con un falso fraguado severo tienden a requerir más agua para alcanzar los valores de flujo requeridos por lo que la mezcla con catalizador puede ser candidata a mostrar este fenómeno. El agua extra puede resultar en resistencias un poco más bajas y mayor contracción por secado (INTECO, 2015).

El requisito planteado por norma es un porcentaje de penetración final mayor al 50 %, los resultados del Cuadro 5.19 muestran que ninguna de las dos mezclas presenta falso fraguado. Al contrastar los resultados entre la mezcla patrón y la mezcla con catalizador se observa que ocurre un fraguado más veloz al incluir el dióxido de titanio. El dióxido de titanio acelera el fraguado del cemento causando un aumento de la viscosidad y una rápida solidificación. Sin embargo, la disminución en el tiempo de fraguado no es tan severo como para considerarse falso fraguado (Daniyal et al., 2019; L. Wang et al., 2018).

Cuadro 5.19 Resultados del ensayo sobre la determinación del endurecimiento temprano del cemento hidráulico patrón y cemento con 5.0 % TiO_2 .

Valores	Mezcla	
	0 % TiO_2	5 % TiO_2
Penetración inicial /(mm)	30	34
Penetración final /(mm)	27	26
Porcentaje de penetración final	90 %	76 %

5.1.9 Determinación del tiempo de fragua para la mezcla molida de cemento con 5.0 % TiO_2

Para este ensayo se requieren los datos obtenidos por medio del ensayo de consistencia normal descrito en la sección 3.6. El resumen de resultados se muestra en el Cuadro 5.20. El contenido de agua necesario para alcanzar la consistencia normal es tal que una menor cantidad de agua se reflejaría en una porción del cemento que no lograría reaccionar, mientras que una mayor cantidad de agua se refleja en una reducción de la resistencia del material por el exceso de agua, sin embargo, aumenta la trabajabilidad (Civilology, 2010).

Cuadro 5.20 Resultados de la determinación de la consistencia normal para pastas del cemento hidráulico patrón y cemento con 5.0 % TiO₂.

Mezcla	Contenido de agua	
	Masa de agua/(g)	Relación agua cemento, A/C
0 % TiO ₂	184.0	28.30 %
5 % TiO ₂	197.6	30.40 %

Se observa en el Cuadro 5.21 que los tiempos de fragua para las mezclas de cemento fotocatalítico son ligeramente menores, además, al contrastarlos con la norma, se observa que: ambos tiempos de fragua inicial son mayores a 45 minutos y ambos tiempos de fragua final son menores a 420 minutos. Las mezclas presentan un tiempo de fragua que cumple con los requisitos de la norma INTE C147:2018.

La diferencia en el tiempo de fragua de las mezclas, según Wang et al, (2018), se debe a que las pastas dopadas con nano TiO₂ tienden a mostrar un fraguado más veloz conforme se aumenta la relación de catalizador en la mezcla. A pesar de que el catalizador es químicamente inerte con los componentes del cemento, puede proporcionar espacios adicionales para que se depositen los productos hidratados, acelerando la hidratación y el fraguado.

Cuadro 5.21 Tiempos de fragua obtenidos del cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO₂ por medio de la aguja de Vicat.

Mezcla	Tiempo de fragua/(min)	
	Inicial	Final
0 % TiO ₂	150 min	360 min
5 % TiO ₂	135 min	352 min

Cabe destacar que el tiempo de fragua de pastas medido por medio de este ensayo no necesariamente se va a replicar en morteros o concreto.

5.1.10 Expansión causada por autoclave en barras de pasta de la mezcla molida de cemento con 5 % dióxido de titanio

La expansión por autoclave genera un índice de la posible expansión causada por la presencia

de CaO, MgO o ambas. Para lograr estabilidad estructural es importante que los materiales de cemento no sufran ningún cambio apreciable de volumen, la expansión tardía no deseada puede causar agrietamiento en vigas o en piso si no se es precavido. La expansión en presencia de CaO y MgO es tan agresiva que usualmente se utilizan como aditivos compensadores de la contracción del cemento. Mal funcionamiento en los hornos de cemento puede causar un exceso de estos componentes. Una fuente de interferencia es la presencia de puzolanas con granos finos de cuarzo debido a que estos no son inertes en el cemento (Chatterji, 1995; INTECO, 2015). Los resultados de las mediciones de longitud antes y después de la autoclave se muestran en el Cuadro 5.22.

Cuadro 5.22 Medida del cambio de longitud debido a la autoclave para el cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO₂.

Almacenamiento	Mezcla	Longitud del espécimen/(mm)	
		1	2
Lectura inicial	0 % TiO ₂	5.027	3.013
	5 % TiO ₂	4.720	4.839
Lectura tras autoclave	0 % TiO ₂	5.117	3.136
	5 % TiO ₂	4.845	4.966

La norma indica que el cambio máximo de longitud permisible es de 0.8%, según los resultados del Cuadro 5.23 se observa que la expansión promedio de las barras es considerablemente menor al máximo, por lo que cumple con los requisitos de la norma y no hay razón para suponer que el catalizador pueda causar una excesiva expansión tardía del cemento.

Cuadro 5.23 Resultados de la expansión por autoclave en barras de pastas de cemento hidráulico y cemento con 5 % TiO₂.

Mezcla	Diferencia de longitud del espécimen/(mm)		
	1	2	Promedio
0 % TiO ₂	0.090 %	0.123 %	0.11 %

5 % TiO₂

0.125 %

0.127 %

0.13 %

5.2 Pruebas de capacidad catalítica

5.2.1 Longitud de onda de máxima absorción

Como se explicó en la sección 4.3.3, se debe valorar la longitud de onda máxima de absorción a utilizar en los siguientes experimentos: diseño de experimentos sobre la degradación química comparando las probetas con dióxido de titanio y sin dióxido de titanio; curva de calibración y cuantificación de la Rodamina B y la cinética de reacción para un sistema de reacción específico, tras 24 horas de adsorción a oscuras de la Rodamina B.

Durante todos los ensayos, incluido el barrido, se utiliza agua ultrapura Mili-Q como disolvente y rodamina B de MERK Milipore como soluto. En la Figura 5.5, se observa el reporte de resultados del software VISIONpro para el barrido de longitud de onda por medio de un espectrofotómetro UV-Vis utilizando el intervalo entre 200 nm y 700 nm. Se observa un pico en 554 nm el cual concuerda con las propiedades del compuesto (Aldrich, n.d.; National Bureau, 1976).

La mayoría de los instrumentos permiten medir absorbancias en una escala de 0 a 2, esto debido a que la absorbancia se define como \log_{10} del cambio entre la intensidad incidente y emitida. Debido a esto es necesario utilizar la longitud de onda de mayor absorbancia, logrando así una mejor relación señal ruido (Higson, 2004).

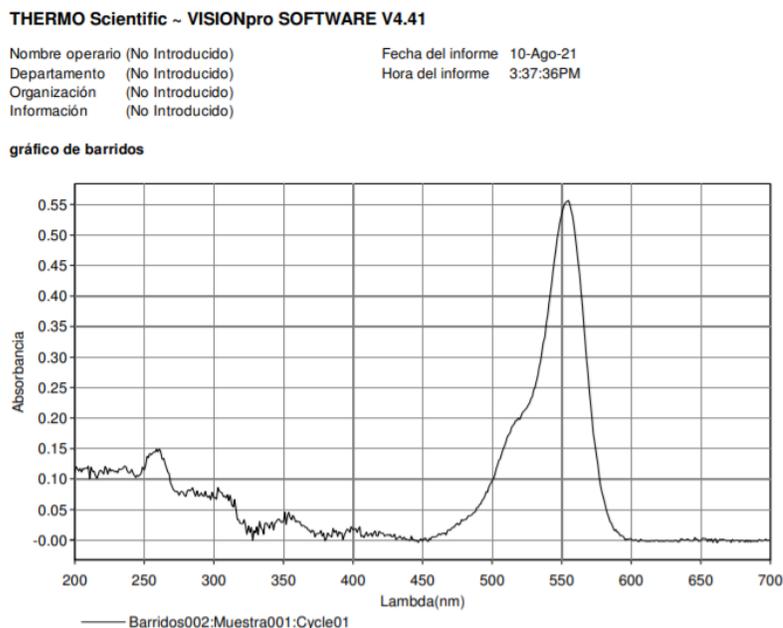


Figura 5.5. Gráfico de barrido de longitud de onda para una disolución de Rodamina B (Elaboración propia).

5.2.2 Curva de calibración

Para la determinación del orden de reacción se hizo uso del método espectrofotométrico nuevamente mediante una curva de calibración y cuantificación. Se utilizó la longitud de onda de máxima absorción como 554 nm que corresponde a un punto del espectro visible (Crow, 2010).

Se realizó una curva de calibración mostrada en la Figura 5.6. Se utilizaron disoluciones madre patrón de rodamina B entre 0.399 mg/L y 2.795 mg/L y se midió por triplicado la absorbancia a 554 nm. La curva presenta una recta con un factor de correlación R^2 de 0.998. La ecuación de la recta (Ley de Beer-Lambert) es la siguiente:

$$ABS = 0.1874 * [Rodamina B] - 0.0076 \quad (5.1)$$

Donde ABS es la absorbancia y sus unidades son adimensionales y $[Rodamina B]$ es la concentración del soluto en mg/L. Mediante la curva se puede determinar la concentración de la rodamina B para cada valor de absorbancia dentro del rango calculado.

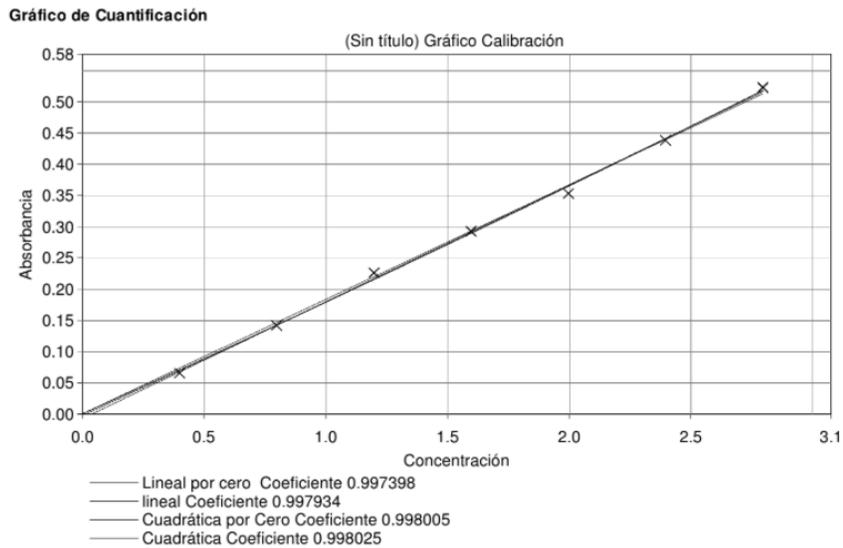


Figura 5.6. Curva de calibración de la rodamina B a una longitud de onda de 554 nm obtenido mediante el software VISIONpro (Elaboración propia).

5.2.3 Diseño experimental para evaluar la ocurrencia de reacción química

Para determinar la influencia del catalizador se realiza un diseño de experimentos con un solo factor: la diferencia entre la absorbancia inicial y la absorbancia de la disolución tras una hora expuesto a luz UV, como se explica en la sección 4.3.3. El pretratamiento aplicado a todas las piezas consiste en sumergirlas en la disolución y permitir que permanezcan 1 hora sin agitación y a oscuras antes de encender las lámparas UV para comenzar la reacción. Las piezas utilizadas son de morteros con y sin catalizador. En aquellas muestras con catalizador, este no sustituye el cemento, es decir que se añade un 5 % del peso del cemento a la mezcla a la hora de realizar el batido.

En el Cuadro 5.24 se muestran los resultados obtenidos tras aleatorizar el orden de todas las repeticiones y tratamientos. El tratamiento de disolución y cemento fotocatalítico generó una diferencia 25 % mayor que la diferencia de absorbancia medida para el tratamiento de cemento puro. Además, los datos son necesarios para realizar un diseño estadístico ANOVA. El haber mantenido las piezas de mortero sumergidas en la disolución durante 1 hora antes de encender la luz UV provocó que se adsorba la rodamina B sobre la superficie del mortero,

las consecuencias son una reducción de la concentración en la disolución y manchas color rosado visibles sobre el mortero. La adsorción es un fenómeno que se sumará a la degradación UV durante la hora siguiente y tendrá un efecto en la concentración de la disolución hasta que se haya alcanzado el equilibrio de adsorción.

Cuadro 5.24 Diferencia en la absorbancia medida tras los tratamientos propuestos para la degradación de la molécula modelo, rodamina B.

Repeticiones	Diferencia en la absorbancia		
	Solo disolución	Disolución y cemento puro	Disolución y cemento fotocatalítico
1	0.031	0.147	0.201
2	0.009	0.149	0.205
3	-0.004	0.154	0.194
Promedio	0.012	0.150	0.200

Según los resultados obtenidos en el Cuadro 5.25, se obtiene un valor p menor al nivel de significancia ($\alpha=0.05$), concluyendo que al menos uno de los tratamientos difiere del resto. Rechazar la hipótesis nula proporciona suficiente evidencia para decir que las medias de la diferencia entre absorbancia inicial y final fueron estadísticamente distintas para al menos uno de los sistemas de reacción en comparación con las demás. Se observa que la disolución sin ninguna pieza de cemento en su interior no tuvo un gran cambio entre las mediciones de absorbancia. Además la rodamina B posee una baja auto fotólisis por lo que requiere de catalizadores para degradarse con luz UV (Chen et al., 2011). Se debe realizar un análisis de la diferencia mínima significativa LSD para determinar si hay diferencias significativas entre el uso de cemento fotocatalítico o no fotocatalítico.

Cuadro 5.25 Resultados del análisis de varianza correspondiente a los ensayos degradación química.

Origen	SC Ajust.	GL	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Tratamiento	0.05689	2	0.02844	239.03	0.000
Error	0.00071	6	0.00012		
Total	0.05760	8			

Los resultados del LSD realizado se muestran en el Cuadro 5.26. La diferencia es significativa entre todos los tratamientos siendo A el tratamiento de solo disolución, B el tratamiento de cemento sumergido en la disolución y C cemento dopado con 5 % TiO_2 sumergido en la disolución. Esto significa que el tratamiento del catalizador posee una influencia importante sobre la cantidad de rodamina B que se degradó en una 1 hora. Cabe destacar que la influencia de la adsorción es importante, sin embargo, es equivalente entre las piezas de cemento por lo que se confirma la presencia de la reacción química en este ambiente.

Cuadro 5.26 Resultados del análisis LSD correspondiente a los ensayos degradación química.

Hipótesis	Diferencia Poblacional	Diferencia muestral	Valor LSD	Decisión: Diferencia
$H_0: \mu_A = \mu_B$ vs $H_a: \mu_A \neq \mu_B$	$\mu_A - \mu_B$	0.14	0.02	Significativa
$H_0: \mu_A = \mu_C$ vs $H_a: \mu_A \neq \mu_C$	$\mu_A - \mu_C$	0.19	0.02	Significativa
$H_0: \mu_B = \mu_C$ vs $H_a: \mu_B \neq \mu_C$	$\mu_B - \mu_C$	0.05	0.02	Significativa

5.2.4 Verificación de los supuestos del análisis de varianza para el diseño de experimentos de reacción química

Se realiza la comprobación de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia para el diseño experimental de la evaluación de la ocurrencia de reacción. En la Figura 5.7, se muestra la verificación de los tres supuestos. El supuesto de normalidad (A) se cumple ya que la distribución de los residuos es normal a lo largo de la recta. Para el supuesto de independencia (B) se observa una varianza aleatoria y no se sigue un orden creciente o decreciente de los residuos por lo también se verifica su cumplimiento. Por último, se observa que los residuos no siguen ninguna tendencia, lo que se indica una correcta aleatorización del diseño experimental y se cumple el supuesto de independencia del orden de medición (C) (Gutiérrez & Salazar, 2003).

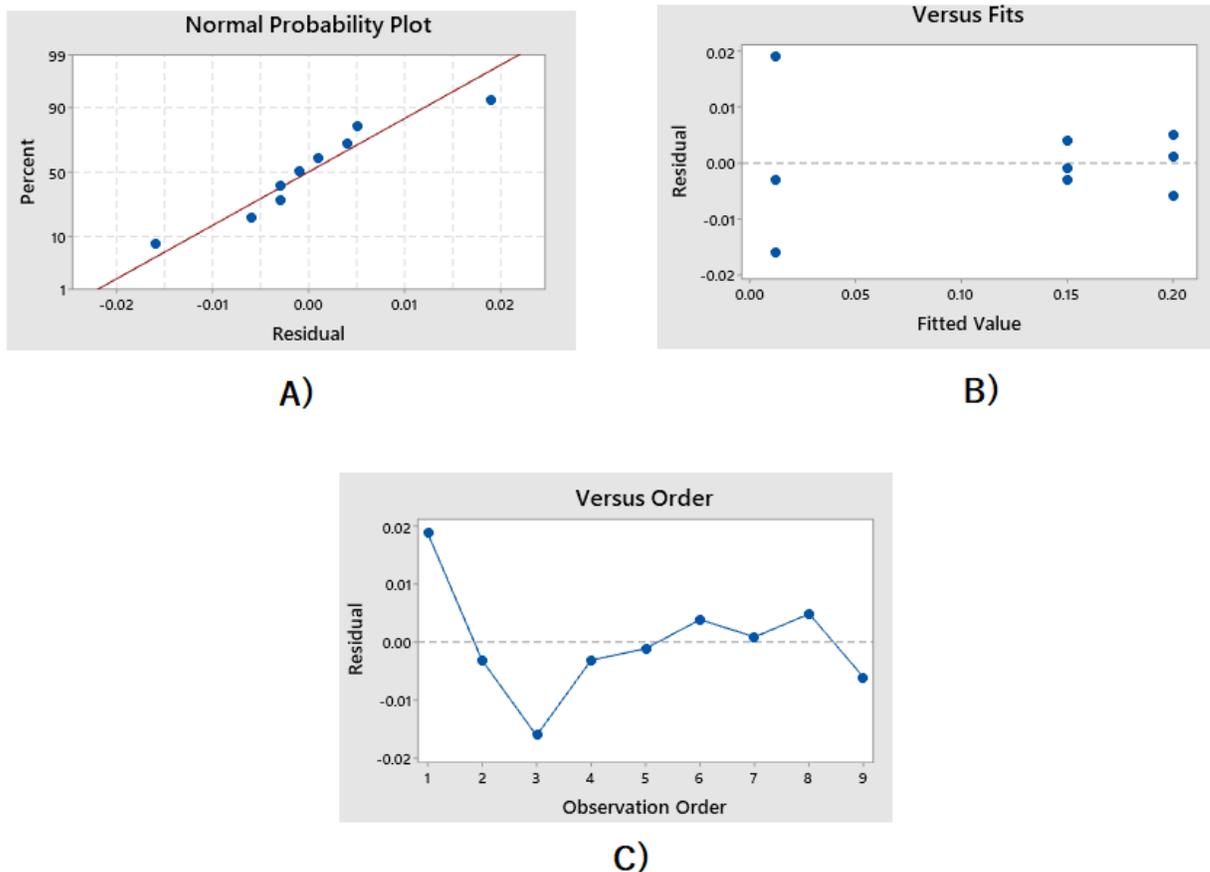


Figura 5.7. Gráficos de los supuestos para el diseño experimental: supuesto de normalidad (A), supuesto de varianza constante (B) y supuesto de independencia del orden de medición (C) (Elaboración propia).

5.2.5 Estudio de adsorción de la rodamina B hacia la superficie del mortero

Al comprender que la adsorción posee un impacto sobre la concentración de la rodamina B en la muestra, se plantea un experimento simple con el objetivo de conocer el comportamiento y la magnitud de la adsorción de la rodamina B hacia la superficie del mortero. El método se describe en la Sección 4.3.3. Utilizando un gotero, cada 30 minutos, se llena la cubeta de cuarzo, se mide la absorbancia de la muestra a 554 nm y se devuelve el contenido de la muestra al beaker de borosilicato con el contenido del experimento. De esta forma el cambio de volumen del sistema es mínimo, considerando únicamente la pérdida por los lavados de la cubeta antes de cada medición. A partir de los resultados se obtiene la concentración de rodamina B restante en la muestra.

En la Figura 5.8, se muestran los resultados del ensayo, se realizaron mediciones durante las primeras 4.5 horas y desde las 22 horas hasta las 24.5 horas. Los resultados se muestran en el Cuadro A.16, la medición inicial indica una concentración de 2.954 mg/L. Luego de 4.5 horas se alcanza una concentración de 2.767 mg/L lo que significa una reducción promedio de 6.33 % en la concentración durante las primeras 4.5 horas únicamente por el efecto de la adsorción. Seguidamente, a las 22 horas, se obtiene una concentración 2.415 mg/L la cual se mantiene relativamente constante durante las siguientes 2.5 horas. Se estima que la muestra encontró un equilibrio de adsorción pasadas las primeras 24 h, reduciendo la concentración en un 18.35 %.

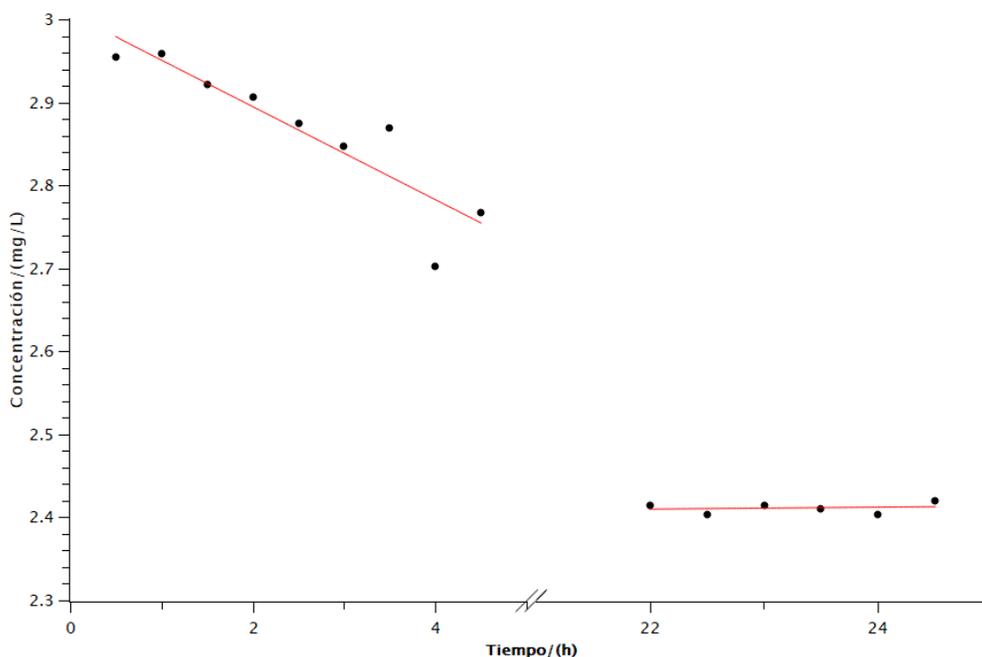


Figura 5.8. Gráfica de la evaluación sobre la adsorción de la Rodamina B en la superficie de una pieza de cemento dopado con 5 % TiO_2 (Elaboración propia).

5.2.6 Determinación del orden de reacción

Para la determinación del orden de reacción y el porcentaje de degradación de la Rodamina B se tomó una pieza del grupo de piezas de mortero con las mismas características, sus

dimensiones son 2.5 cm x 2.5 cm x 2 cm, cortadas por medio de un esmeril y lijadas en sus 6 lados. El contenedor es un beaker de borosilicato sin grabados. A pesar de que el material idóneo hubiera sido cuarzo, el vidrio de borosilicato tiene una alta transmisión en el rango UV-A, alrededor del 90% (Dionysiou et al., 2016). El espécimen se dejó a oscuras durante 23 horas, sumergido en una disolución de rodamina B con una absorbancia inicial de 0.549, la cual corresponde a una concentración de 2.968 mg/L, calculada por medio de la curva de calibración.

Tras 23 horas a oscuras y sin agitación, se comenzó la medición de la absorbancia cada 15 minutos sin exponer la muestra a luz ultravioleta, cumplidas las 24 horas se colocó el sistema de reacción en la cámara de luz UV y se continuó midiendo la absorbancia cada 15 minutos durante 3 horas. Los resultados se muestran en la Figura 5.9, la primera medición pudo agitar la disolución interfiriendo en el equilibrio de adsorción alcanzado en las primeras 23 horas. A las 24 horas, en el minuto 0, se observa que comienza a decrecer la absorbancia medida traducida a concentración por medio de la curva de calibración. Los puntos durante las siguientes tres horas de exposición a luz UV se ajustan a una recta con un factor de correlación R^2 de 0.9863. El orden de reacción de este sistema es cero debido a que la velocidad de reacción no depende de la concentración de la rodamina como se observa en los resultados, sino que es constante con el tiempo. En la ecuación (5.2) se presenta la ecuación del orden de reacción cero y en la ecuación (5.3) se presenta la ecuación de la recta obtenida a partir de las concentraciones obtenidas. La constante de velocidad de reacción para el sistema es igual a 0.0022 mg/(L s).

$$[\text{Rodamina B}]_t = -k * t + [\text{Rodamina B}]_0 \quad (5.2)$$

$$[\text{Rodamina B}]_t = -0.0022 * t + 2.5826 \quad (5.3)$$

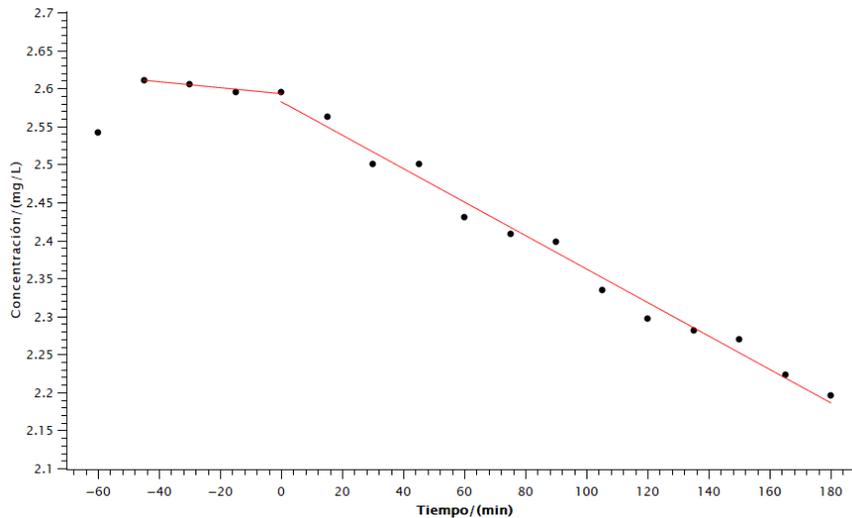


Figura 5.9. Gráfica de los resultados sobre la reacción de la Rodamina B en la superficie del mortero dopado con 5 % TiO₂ (Elaboración propia).

Las implicaciones de los resultados son: se comprueba la ocurrencia de reacciones químicas que reducen la concentración de la rodamina B en la disolución; la reacción es de orden 0, posiblemente debido a que el TiO₂ que entra en contacto con la rodamina B adsorbida no se desactiva con el tiempo y además muestra sitios activos que no se saturan conforme se absorbe el contaminante. Puede suceder que las sales se disuelvan en el agua conforme se forman sin interferir en los sitios activos o que la mineralización sea completa, liberando el sitio activo al producir únicamente CO₂ y H₂O (Oturán & Aaron, 2014).

Además, se observa que no necesariamente se cuantifica la capacidad fotocatalítica del mortero en otras situaciones y que por la ecuación (2.1), de Langmuir, era esperable ver uno de dos comportamientos: en soluciones diluidas con concentraciones menores a 10⁻³ mol/L, el nominador de la velocidad de reacción tiende a ser mucho menor a 1 y la reacción concuerda con el pseudo primer orden; mientras que a concentraciones mayores a 5x10⁻³ mol/L o sistemas en saturación de soluto, el nominador tiende a ser mucho mayor a 1 y el esquema de velocidad de reacción pasa a ser de pseudo orden cero. Sin embargo, el resultado

observado es que, a bajas concentraciones, cerca del orden de 5×10^{-6} mol/L, el orden de reacción no es de primer orden sino de orden cero.

Las reacciones fotocatalíticas que concuerdan con la ecuación de Langmuir-Hinshelwood a esas concentraciones, presentan el catalizador de forma dispersa y particulada en la disolución por lo que el área superficial de reacción es alto. Es esperable que al disminuir el área superficial también disminuya el grado de reacción y se requiera una concentración baja para alcanzar la saturación del sistema. El orden de reacción de este experimento es 0 y se comporta como un sistema altamente concentrado al considerar las bajas cantidades de catalizador expuesto, por lo que concuerda con el comportamiento de Langmuir-Hinshelwood (Gaya, 2013).

5.2.7 Capacidad catalítica según la metodología de la norma UNI-11259

Finalmente se evaluó el experimento de la norma UNI-11259 para la determinación de la actividad fotocatalítica de aglutinantes hidráulicos - método de ensayo Rodamina B. Mediante la norma se evalúa la capacidad auto limpiante y posiblemente la capacidad para degradar contaminantes orgánicos del entorno.

El método consistió en medir la capacidad autolimpiante basándose en métodos colorimétricos. Se utilizó el software Image J para cuantificar la evolución del color sobre las piezas de cemento hidráulico impregnadas con 3 mL de una disolución de rodamina con concentración de 27.5 mg/L. Dosis suficiente para lograr el requisito donde $a(0h)$ debe ser mayor o igual a 12, condición alcanzada en todos los cubos a excepción del cubo 1 para cemento dopado con el catalizador al 5 %, según se observa en el Cuadro 5.27. En el cubo 1 mencionado, ocurre un ligero derrame de la disolución antes del secado resultando en una baja concentración de rodamina B en la superficie y consecuentemente en un valor menor al requerido para la coordenada de $a(0h)$ al analizar la imagen con el programa ImageJ.

Cuadro 5.27 Resultados de los ensayos UNI 11259 Determinación de la actividad fotocatalítica de los aglutinantes hidráulicos Método de prueba de Rodamina

Condiciones	Coordenadas a del CIELAB					
	1	2	3	4	5	6

En los	0 h Puro	14.59	16.32	18.61	13.12	16.77	14.46
	0 h 5%	9.00	16.21	13.49	13.81	13.29	18.45
	4 h Puro	12.12	14.95	16.76	11.16	16.09	12.59
	4 h 5%	1.49	4.47	2.90	6.88	4.19	4.78
	26 h Puro	5.52	8.53	11.03	4.53	7.73	7.19
	26 h 5%	0.38	-0.46	0.14	1.58	-0.03	0.13

especímenes dopados con dióxido de titanio se observó una alta degradación de la rodamina B. La cuantificación del cambio en el tono demostró que todos los 5 cubos que sí lograron cumplir con la condición inicial lograron superar por mucho el 20% de degradación en 4 h y el 50 % de degradación en 26 h, logrando en promedio un valor de R4 de 68.7 % y R26 de 98.0 % como se observa en la el Cuadro 5.28. Los resultados sugieren que el material si presenta condiciones de capacidad autolimpiante bajo el procedimiento propuesto. Algunos factores que aportan a este resultado son: homogenizar el catalizador en el cemento en seco, utilizar una relación agua cemento adecuada, un molde liso, arena fina y un batido de la mezcla adecuado. Todos los factores logran una superficie lisa y homogénea necesaria para fomentar la capacidad autolimpiante a corto y largo plazo previniendo la incrustación de material que deteriore el aspecto de la pieza como sucedió con las velas de la Iglesia del Jubileo (Cardellicchio, 2020; Kowalski & Januszkiewicz, 2017).

Cuadro 5.28 Resultados de la actividad fotocatalítica determinados según la norma UNI 11259 para los especímenes con 5 % dióxido de titanio

Parámetro	Muestras de cemento con 5 % dióxido de titanio					
	1	2	3	4	5	6
R4	N/A	72.42	78.50	50.18	68.47	74.09
R26	N/A	102.84	98.96	88.56	100.23	99.30

En contraste, los resultados para las piezas que no cuentan con catalizador mostraron no cumplir con el requisito de cuatro horas, mientras que, en promedio, si lograron cumplir con el requisito de veintiséis horas. Como la métrica de R26 es ambigua debido a la imprecisión del experimento, se concluye a partir de la métrica R4. El tratamiento sin dióxido de titanio no muestra una degradación suficiente para cumplir con los requisitos de la norma por lo que

no muestra una actividad fotocatalítica adecuada para la autolimpieza. Es necesario realizar más ensayos para identificar el equipo adecuado para realizar la prueba fotocatalítica ya que la norma italiana no contempla factores como la fuente UV-A, las concentraciones, tonos del cemento, agente engrasador, herramienta para detectar el cambio de tono ni la forma correcta o dosis para garantizar un tono uniforme en la superficie del espécimen de cemento (Bernuy Chavez & Flores Cortez, 2020). Algunos de estos factores pueden generar mucho ruido en los resultados y provocar una alta variación de observaciones como la observada en este ensayo en el Cuadro 5.29 en donde se observan mediciones de R26 desde 40.7 % hasta 65.5 %.

Cuadro 5.29 Resultados de la actividad fotocatalítica determinados según la norma UNI 11259 para los especímenes con 5 % dióxido de titanio

Parámetro	Muestras de cemento Puro					
	1	2	3	4	5	6
R4	16.93	8.39	9.94	14.94	4.05	12.93
R26	62.17	47.73	40.73	65.47	53.91	50.28

5.3 Innovación por la metodología de puesta en marcha ajustada

Para el objetivo actual se busca observar la oportunidad comercial del producto en una escala no estructural. La finalidad es discernir al menos una ruta de mercadeo alternativa tomando en cuenta la limitante actual alrededor de la ausencia de normas estructurales necesarias para validar el material en el uso de construcción de forma segura. Algunas de estas normas faltantes son la INTE C134:2019: “Análisis químico del cemento hidráulico”, INTE C160:2019: “Determinación del cambio de longitud en morteros de cemento hidráulico, expuestos a una disolución de sulfato”, INTE C158:2016: “Determinación del calor de hidratación del cemento hidráulico”, INTE C153:2018: “Extracción de muestras y cantidad de ensayos para cemento hidráulico”, INTE C154: “Digestión asistida por microondas para el análisis de elementos traza en cementos”, INTE C41:2017: “Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico”, y distintas otras normas (INTECO, 2015).

El eje central de la metodología “puesta en marcha ajustada” (Lean Startup) es el ciclo de retroalimentación de crear-medir-aprender. Los ciclos generan nuevas ideas y permiten validar o invalidar hipótesis complejas desglosando el trabajo en pequeños esquemas simples. Con propósito de analizar la oportunidad de negocio que posee este producto en su estado actual, se genera la primera revolución del ciclo partiendo de los resultados obtenidos hasta el momento. Tras el primer objetivo del proyecto se definió el producto mínimo viable tomando en cuenta las mínimas necesidades del cliente, estas necesidades son una presentación del producto que ya venga homogéneamente mezclado y con una composición definida que funcione: cemento Portland de uso general con un 5 % de su peso en nano dióxido de titanio Aeroxide-P25.

5.3.1 Problema de investigación

El problema de mercadeo es: ¿Cómo explotar el uso de un cemento no estructural que se basa en la autolimpieza de su superficie?

El problema de investigación es: ¿Tiene al menos una ruta como cemento no estructural que le brinde oportunidad de negocio en el mercado nacional para ser utilizado como fotocatalizador de humo ambiental?

Las unidades de muestreo para esta sección se elegirán por métodos no probabilísticos según juicio y siguiendo los lineamientos establecidos por la metodología puesta en marcha ajustada y herramientas anexas.

La metodología puesta en marcha ajustada permite sumar herramientas que se alineen a la metodología de “el pensamiento de diseño” (Design Thinking) por lo cual se suma el procedimiento descrito por los Tableros de Validación y se toma el pivote número cero o comienzo, como el inicio del ciclo. El tablero de validación concuerda con la metodología porque cada pivote requiere de hipótesis iniciales (que pueden ser plasmadas en un Lean Canvas), luego se construye un producto mínimo viable (PMV) con características funcionales básicas, las cuales deben ser teóricas durante el proyecto actual. Este PMV permitirá realizar experimentos directamente con las personas que podrían ser potenciales clientes, con el fin de validar o no, las hipótesis iniciales tanto del modelo de negocio como

del tablero de validación (Araya, Rodríguez, Vargas & Villalobos, 2017). Alcanzado el último pivote se utiliza toda esta información recopilada para completar un “esquema de lienzo para emprendedores” (Lean Canvas).

5.3.2 Tablero de Validación: inicio

Como cliente inicial y comienzo del ciclo, por lluvia de ideas, se propuso a los dueños y empleados de floristerías que estén dispuestos a construir sus propias macetas. El motivo está ligado a la capacidad del semiconductor para descomponer sustancias orgánicas como grasas y suciedad, haciéndolas fáciles de lavar bajo la acción del agua (Hegyí et al., 2018). Generando un posible nicho publicitario en la jardinería y exteriores.

La hipótesis problema para este cliente consiste en la posibilidad de que muestren desconfianza respecto al margen de ganancias que les podría generar. Cada hipótesis problema se trabajó con un supuesto más riesgoso particular por lo cual para estas hipótesis, a partir de una lluvia de ideas, se identifica como primer supuesto más riesgoso el decidir si el proyecto está a gusto o no con solo venderle y contactar con floristerías. La metodología que se utilizó para validar o invalidar el supuesto consiste en un ejercicio simple: nombrar o listar candidatos que cumplan con ser floristerías y construyan macetas. Los comercios no necesariamente deben estar interesados en el producto, pero contar con un mercado limitado o pequeño requiere detalles específicos con los que no se cuenta como estudios de rentabilidad, factibilidad y comunicación con el cliente. De ser posible entrar en un mercado más amplio, se puede lanzar el producto al aire y confiar un poco más en el apoyo gradual que se le da por medios de comunicación un poco más masivos como redes sociales (Maurya, 2012). Se da inicio al primer ciclo como se muestra en la Figura 5.10.

leanstartupmachine **Validación** Propuesta: **Cemento fotocatalítico** Nombre del proyecto:

Track Pivots	Start	1st Pivot	2nd Pivot	3rd Pivot	4th Pivot
Customer Hypothesis	Los dueños y empleados de floristerías que estén dispuestos a construir sus propias macetas				
Problem Hypothesis	Están interesados en vender macetas, sin embargo, sienten que no le generan mucho margen de ganancia debido a que cualquiera puede vender las mismas macetas				
Solution Hypothesis	Tp: No define una solución hasta haber validado el problema				

Design Experiment	Riskiest Assumption	Invalidated	Validated
<p>Tp: Borrar todos los posts de esta línea tras cada experimento</p> <p>Los comercios pueden buscar convenios comerciales</p> <p>Core Assumptions Suposiciones que si se invalidan, el negocio no puede seguir existiendo</p> <p>Se va a poder suplir la demanda del producto</p> <p>Pedirán más normas técnicas o garantías de uso</p>	<p>Estamos dispuestos a solo venderle y contactar con floristerías</p> <p>Método Enunciar empresas que cumplan con el perfil</p> <p>Criterio mínimo de éxito Nombrar al menos 20 antes de 24 horas</p>	<p>Si se invalida, pivot al menos una hipótesis</p> <p>1 2</p> <p>3 4</p> <p>5 6</p>	<p>Si se valida, elegir la siguiente suposición más riesgosa</p> <p>1 2</p> <p>3 4</p> <p>5 6</p>

GET OUT OF THE BLDG

© 2012 Lean Startup Machine. You are free to use it and earn money with it as an entrepreneur, consultant, or executive, as long as you are not a software company (the latter need to license it from us).

Figura 5.10. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, primer supuesto arriesgado de la hipótesis inicial (Elaboración propia).

El criterio mínimo para validar el supuesto fue lograr nombrar al menos 20 posibles candidatos en menos de 24 horas. Tras el ejercicio, se obtuvieron 7 posibles comercios de 20, por lo que se invalida el supuesto. Invalidar el supuesto significa que se debe realizar un pivote de alguna de las hipótesis como sustituir el posible cliente.

5.3.3 Tablero de Validación: primer pivote

Como punto de partida de este nuevo primer pivote se decidió realizar una lluvia de ideas utilizando el conocimiento hasta el momento. El producto mínimo viable seleccionado ha conseguido atravesar, en los objetivos dos y tres, las distintas propiedades y características necesarias para un buen desempeño del producto y finalmente se debe utilizar este conocimiento como refuerzo a la hora de exponer el producto mínimo viable. Sin embargo, se decide que para completar todos los esquemas y cuadros alrededor del producto es

necesario lograr encontrarle el atractivo, las ventajas, posibilidades de mejora y posibles oportunidades.

Para esta etapa se debe resumir lo que se ha generado para el usuario. Junto con el prototipo del cemento fotocatalítico, se presentan las ideas y prejuicios acerca de los resultados. Se utiliza la herramienta malla receptora de información para completar esta tarea como se muestra en la Figura 5.11. La malla receptora de información se utiliza de la siguiente manera: en el símbolo más (+), se escriben todas las cosas interesantes o relevantes de la idea inicial; en el símbolo de rayo se escriben las críticas constructivas o las posibilidades de mejora; en el símbolo de pregunta (?), se escriben las preguntas nuevas a partir de esta experiencia y finalmente, en el símbolo de nube de ideas, se escriben las ideas que surgen de lo evaluado.

<ul style="list-style-type: none"> -No estructural. -Muy fácil empaclado de cemento y TiO₂. -Color blancuzco bonito. -Comprobado como autolimpiante. -Novedoso y versátil. -Se le puede sacar mucho margen de ganancia. 	+	<ul style="list-style-type: none"> -El cemento en general es demasiado barato. -Muy poca gente usa cemento, baja interacción y usabilidad, actualmente. -No se puede pintar y el cemento no se ve feo? -El usuario no lo conoce y puede que no lo entienda. 	
<ul style="list-style-type: none"> -Mejor forma de dar a conocer y alcanzar más usuarios? -Se puede hacer más que macetas? -Como conseguir más inversionistas. -Por qué no cambiar a otros usuarios? -Hay plan de contingencia? 	?	<ul style="list-style-type: none"> -Incluir algo además del cemento e instrucciones. -Venderlo como un kit. -Promover el efecto de cemento autolimpiante. -No darle estrellato al fenómeno fotocatalítico. -Si lo anterior no atrae usuarios se puede estudiar en concreto estructural. 	

Figura 5.11. Malla receptora de información para nuevo primer pivote del tablero de validación (Elaboración propia).

Se vuelve vital para el producto dar a conocer su valor diferencial de una forma didáctica para llamar la atención de más posibles clientes. Un público meta que podría consumir

grandes cantidades del material consiste en experimentados en el área de moldeado y manualidades. Los anteriores son clientes ideales debido a que se les facilita entender el provecho del material, pueden llegar a consumir gran cantidad del producto en proyectos extensos, entiende instrucciones un poco más técnicas y permitiría establecer convenios.

La nueva hipótesis de cliente son personas con experiencia en el uso del cemento para moldeado y creación de piezas de cemento utilitario. La hipótesis problema es conocer si están de acuerdo con la propuesta de trabajar utilizando cemento autolimpiante en vez del cemento convencional y si de esta forma comprarían gran cantidad del material.

La hipótesis de cliente y de problema generan un nuevo supuesto arriesgado: si los expertos en el área de moldeado, manualidades o clientes ideales están interesados y logran entender la capacidad autolimpiante. Por medio de entrevistas y encuestas largas no probabilísticas se genera un perfil de cada persona experimentada ideal que se recaba en mapas de empatía. La métrica es tal que al menos el 50% de los encuestados debe comprender el producto o mostrar interés en obtenerlo.

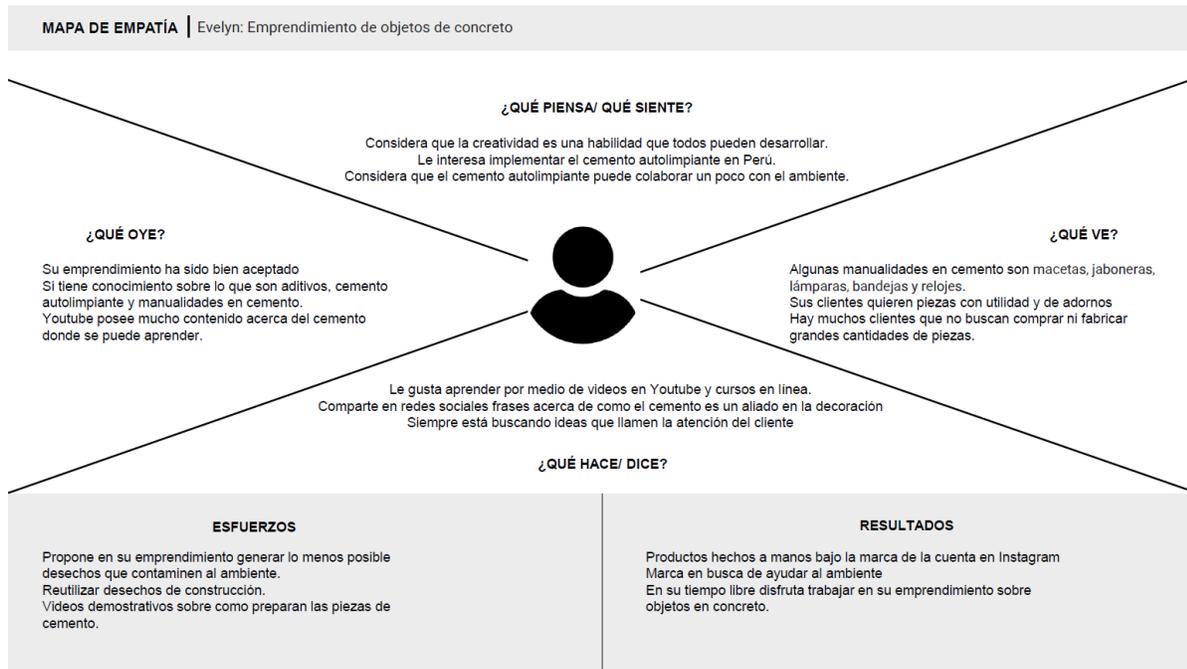


Figura 5.12. Mapa de empatía generado a partir de la encuesta virtual sobre Evelyn y su emprendimiento de objetos de concreto (Elaboración propia).

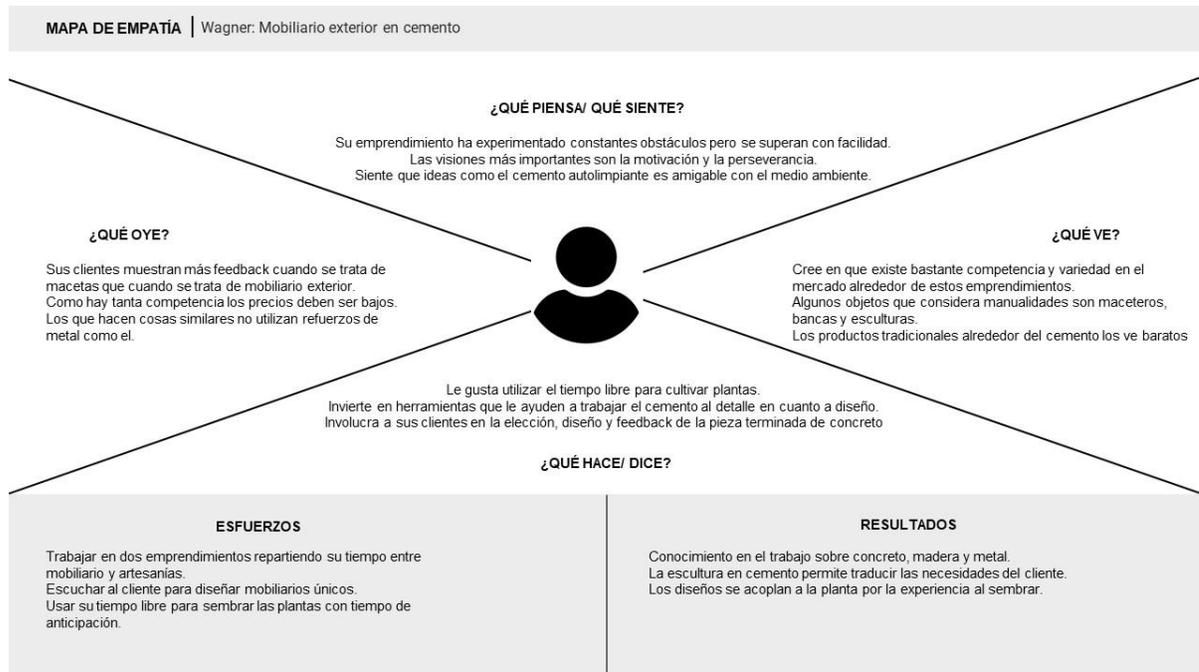


Figura 5.13. Mapa de empatía correspondiente a Wagner, generado a partir de una encuesta virtual (Elaboración propia).

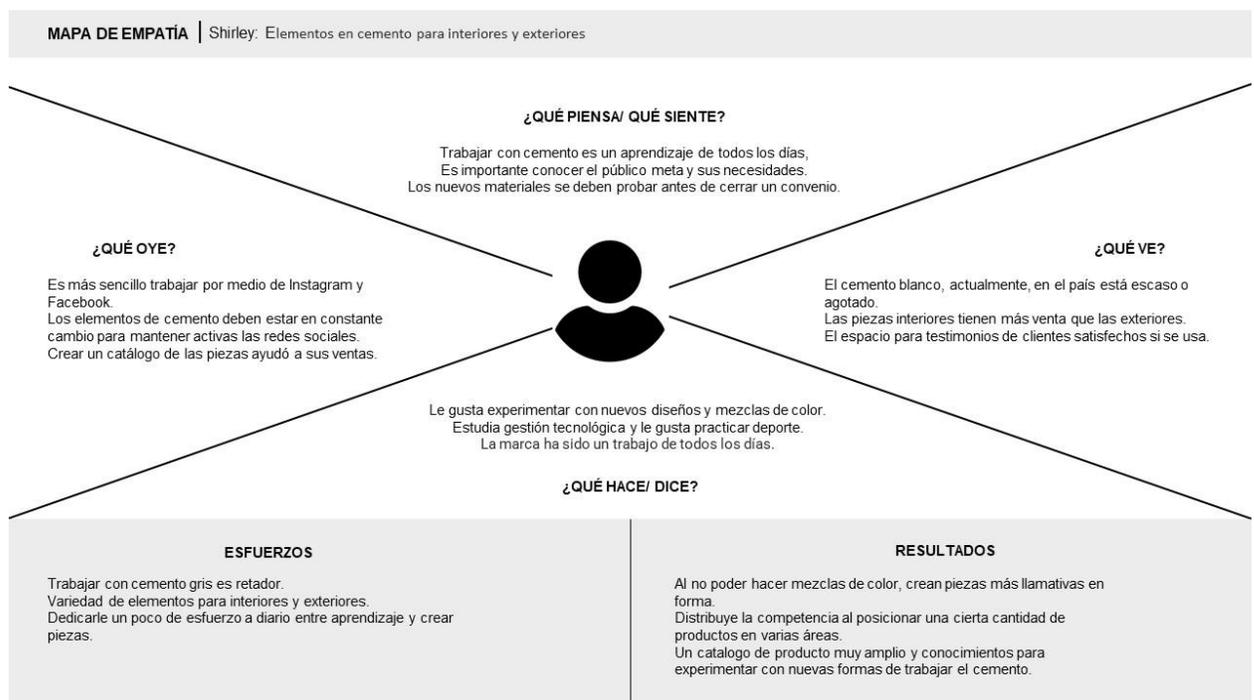


Figura 5.14. Mapa de empatía correspondiente a Shirley, generado a partir de una encuesta virtual (Elaboración propia).

Los encuestados muestran interés en productos sostenibles o amigables para el ambiente. A pesar de que no se puede asegurar que el cemento autolimpiante ayuda a mitigar la contaminación ambiental contemplando el ciclo de vida de los materiales que necesita, el tema debe retomarse al momento de generar la marca del producto y sustentarse con nuevas investigaciones.

A continuación, se muestran las preguntas más relevantes y sus respuestas:

¿Si se le propone este kit, estaría interesado en comprarlo o formar un convenio comercial con el proyecto?

- Claro, como kit para personas que no se dediquen a fabricar en grandes cantidades estaría muy bien.
- Estaríamos interesados en probar el producto, pero sin fines comerciales. Trabajamos con algunos productos que son más baratos y vienen en mayor cantidad, los tradicionales.
- Podríamos conversar para un convenio comercial una vez se realicen pruebas y confirmemos que es útil para nuestro producto.

¿Considera que la propuesta inicial es llamativa y por qué? ¿Qué aspectos del aditivo considera claros y que aspectos considera confusos?

- Claro que es llamativa, ya en algunos países se usa, nosotros estamos considerando usarlo aquí en Perú para así colaborar un poco con el medio ambiente. Todos están claros.
- Si, porque es innovador y amigable con el medio ambiente. El aditivo no se venderá por aparte si no que ya mezclado con el cemento por lo cual el aditivo es en polvo y no líquido.

- Se podría probar, puede funcionar para limpiar piezas.

A partir de los resultados de la encuesta se puede concluir que no hay demasiado interés en invertir en el proyecto de forma inmediata, sin embargo, si se muestra un interés en participar del tema de una u otra forma, ya sea por cuenta propia del encuestado o probando el producto. Además, sí se demuestra que comprenden el planteamiento del producto, por estos dos motivos se permite validar el primer supuesto riesgoso ya que más del 50 % mostro interés. En la Figura 5.15 se muestra el supuesto riesgoso mencionado que debe ser movido a la posición 1 bajo “Validated” para los supuestos validados.



Figura 5.15. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, primer supuesto arriesgado del pivote 1 (Elaboración propia).

Al validar el supuesto más riesgoso simplemente se evalúa el siguiente en la lista, sin necesidad de sustituir el cliente o problema. El motivo por el cual el tablero de validación

funciona de esta manera es que busca demostrar el progreso cuando uno está inmerso en un suelo de extrema incertidumbre. Protege al proyecto de ejecutar con éxito un plan que no conduce a ninguna parte, ya que un supuesto validado no significa que el siguiente no pueda romper el negocio (Niculescu et al., 2014).

Se introduce una nueva suposición: si estamos dispuestos a solo venderle a clientes con experiencia. Este pivote de la suposición más riesgosa utiliza el mismo método que el utilizado anteriormente para floristerías en donde se buscan enumerar al menos 20 posibles clientes ideales en un día, esta vez incluyendo emprendimientos, floristerías y personas que trabajan con artes plásticas. Se incluyen solo los emprendimientos nacionales ya que durante la búsqueda de personas con experiencia en moldeado se llegó a alcanzar emprendedores en el extranjero. Nuevamente se debe invalidar la suposición debido a que no fue posible enunciar tantas opciones en un día. En la Figura 5.16 se muestra cómo se debe mover el supuesto a la posición 2, bajo “Invalidated” para supuestos no validados.



Figura 5.16. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, segundo supuesto arriesgado del pivote 1 (Elaboración propia).

5.3.4 Tablero de Validación: segundo y tercer pivote

Se sustituye la hipótesis del consumidor y del problema, utilizando una idea recopilada en la malla receptora de información e introducido como hipótesis de solución en el primer pivote y también en las entrevistas, en estas últimas, el objetivo era escuchar la opinión preliminar de experimentados en moldeo. Se decide sustituir la propuesta de producto mínimo viable, de una bolsa sellada de cemento con TiO_2 , a un Kit que incluya: cemento, arena, uno más moldes de polipropileno laminado y un manual de instrucciones.

El polipropileno laminado es un termoplástico que se puede termoformar, moldear y soldar para para fabricar. Los beneficios son la alta resistencia a la abrasión, resistencia química, a la humedad, resistente a las grietas por tensión, capaz de retener rigidez y flexible (Barkston Plastics Ltd, 2013). Se ha utilizado anteriormente para el mismo motivo de moldeo en concreto y muestra buenos resultados como se observa en la Figura 5.17.



Figura 5.17. 10 moldes de polipropileno laminado para hacer macetas de concreto de dimensiones 7 cm x 10 cm x 10 cm aproximadamente (Duane Diseño Vivo, n.d.).

Se genera un esquema de propuesta de valor y dos nuevos pivotes en el tablero de validación para buscar validar dos supuestos riesgosos con un solo método. La propuesta de valor se genera considerando que el producto sirve para muchos segmentos de los clientes pero cada persona lo comprará por distintos motivos o intereses (PROINNOVA UCR, n.d.). El esquema Propuesta de Valor, también conocido como mapa de valor de Osterwalder, logra sintetizar las necesidades que este producto podría estar cubriendo un segmento del cliente meta y las necesidades que vive este cliente en su día a día (Kristensen & Ucler, 2016). Los resultados

permiten discutir y enunciar los factores diferenciadores del producto, como se muestra en la Figura 5.18.



Figura 5.18. Esquema de propuesta de valor para el segmento de cliente ideal, personas con edades entre 20 y 40 años, de la gran área metropolitana que tengan un ingreso medio y pasen la mayor parte de su tiempo en la casa (Duane Diseño Vivo, n.d.).

Los factores diferenciadores del Kit son la calidad del producto final, mínimas barreras de dificultad, servicio post venta en redes sociales, variada posibilidad de elección, constante innovación de moldes y productos, asesoría experimentada y tecnología tanto innovadora como llamativa.

Respecto al tablero de validación, los dos nuevos pivotes y supuestos son: que el público no experto sí va a mostrar interés, a pesar de no comprender por completo el fenómeno autolimpiante y además, que el rango de precio que le interesa al cliente no es muy bajo.

La hipótesis de cliente ha llegado a su mejor iteración utilizando los recursos disponibles. Los supuestos mencionados, si bien no permiten definir estadísticamente el mercado más

propicio ni estimar la rentabilidad del negocio, si establece las pautas necesarias para explicar el negocio y como la empresa ganará dinero a lo largo del tiempo, aporta indicadores suficientes tomando en consideración el hecho que es un producto mínimo viable (Spieth, Schneckenberg & Ricart 2014). La validación de los supuestos llevaría a supuestos sumamente robustos como son la expectativa a largo plazo, el costo inicial y la huella de carbono del producto. Invalidar los supuesto o alguno de los supuestos robustos, llevaría a sustituir el cliente y el producto mínimo viable. La siguiente iteración del producto debe ser continuar con las normas necesarias para participar en un mercado de construcción.

Para evaluar los supuestos mencionados y mostrados en la Figura 5.19, sobre el interés del público meta y el rango de precio, se preparó una encuesta de forma no probabilística por cuota de 80 personas. Se evaluó subjetivamente los resultados de forma tal que se pueden considerar como candidatos a clientes, la encuesta por si sola genera un interés por el producto sin necesidad de generar publicidad (Hernández, 2016). La meta de validar o invalidar dos supuestos no justifica la necesidad de realizar una encuesta probabilística mientras que el principio del producto mínimo viable si fundamenta la encuesta no probabilística.



Figura 5.19. Tablero de validación sobre la propuesta de cemento fotocatalítico, primer y segundo supuesto del pivote en conjunto 2 y 3 (Elaboración propia).

En la séptima pregunta de la encuesta, mostrada en la Figura 5.20, se observa que hubo una aprobación de 63 respuestas de las 80 encuestas realizadas. 12 encuestados respondieron en la pregunta 2 del cuestionario que no están dispuestos a trabajar con cemento, por lo cual no alcanzaron esta pregunta. Por la alta aprobación se valida el primer supuesto. Se ha logrado aprovechar las tecnologías disponibles, los productos y la forma de realizar las cosas para lograr que el mercado perciba este producto mínimo viable con un valor superior, la metodología del proyecto actuó como una fuerza de destrucción creativa remplazando los criterios del problema hasta alcanzar una oportunidad estrella (Araya, Rodríguez, Vargas & Villalobos, 2017).

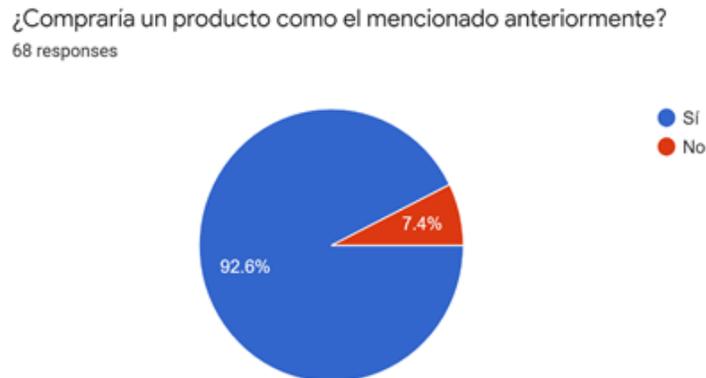


Figura 5.20. Resultados de la séptima pregunta de la encuesta: ¿Compraría un producto como el mencionado anteriormente? (Elaboración propia).

Los resultados de la pregunta final de la encuesta mostrados en la Figura 5.21, permiten observar la experiencia de usuario que tuvieron los posibles clientes al informarse de la propuesta por primera vez gracias a la información brindada dentro de la encuesta. Se logra validar el segundo supuesto con un 66.7% de los que respondieron las preguntas inclinadas por precios medios o altos entre las opciones disponibles. Además, es posible estimar el margen con el que se podría trabajar cotizando los precios actuales del mercado en material: ₡1747 en un molde de polipropileno traído desde México (Duane Diseño Vivo, 2021), ₡70 en medio kilogramo de cemento Holcim (EPAENLINEA, n.d.), ₡678 en un kilogramo y medio de arena sílica (CONCRETECR, 2021) y ₡42 en los 25 gramos de dióxido de titanio Aeroxide P25 que lleva cada mezcla teóricamente (YUEJIANG, 2019). La suma total en materiales podría rondar los ₡2537, motivo suficiente por el cual es necesario que los clientes se inclinen por precios medios o altos, considerando que aún se deben tomar en cuenta los costos de importación, almacenamiento y producción, entre otros.

En una empresa grande, las tarifas de compras masivas permiten, junto con otros factores, disminuir el costo promedio por unidad entre mayor se vuelve la producción y productividad (Osterwalder et al., 2010). Los precios anteriores parten del hecho que se compre, almacene y se gaste la totalidad del contenido. La mayor limitante es la compra del dióxido de titanio cuya presentación viene en una o más toneladas (YUEJIANG, 2019).

¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un producto de este estilo que incluya medio kilogramo de cemento autolimpiante sellado, un kilogramo y medio de arena, 1 molde y el manual?

63 responses

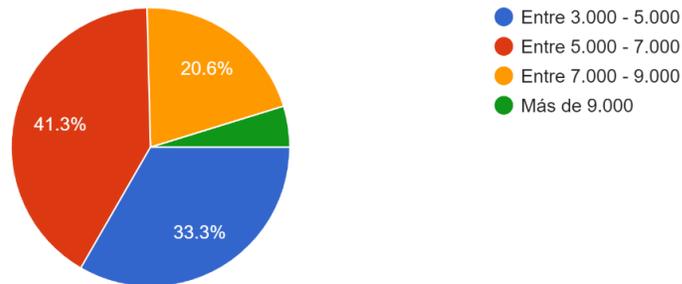


Figura 5.21. Resultados de la undécima pregunta de la encuesta: ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un producto de este estilo que incluya medio kilogramo de cemento autolimpiante sellado, un kilogramo y medio de arena, 1 molde y el manual? (Elaboración propia).

5.3.5 Análisis FODA y Lean Canvas

A partir de los resultados anteriores en conjunto, se genera un análisis FODA y finalmente un Lean Canvas. El análisis FODA se elabora alrededor de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del modelo de negocios en conjunto con elementos que puede tener consecuencias para uno o varios de los bloques que forman el negocio e impulsar la innovación en la organización. La meta del análisis FODA es ser una parte importante del proceso de diseño de prototipos de modelos de negocios y eventualmente convertirse en nuevos modelos que se acoplen a la empresa conforme esta siga su crecimiento y expansión (Osterwalder et al., 2010)

FODAANÁLISIS

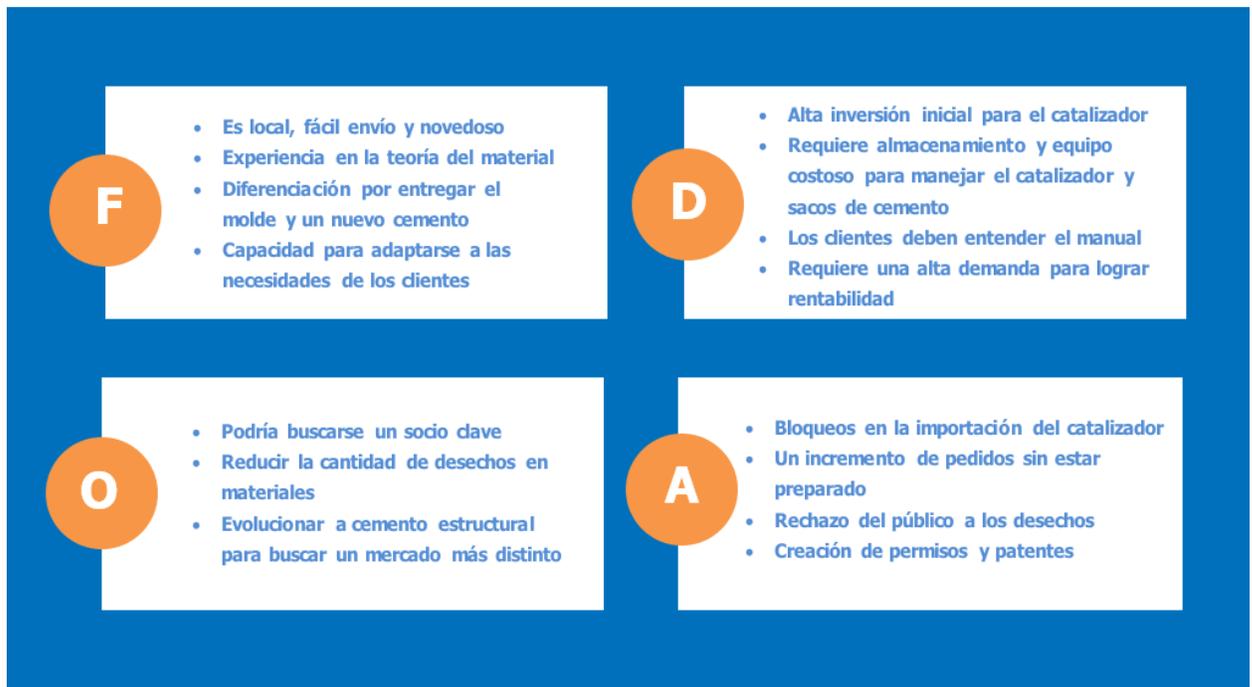
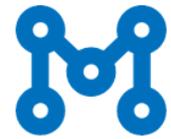


Figura 5.22. Esquema del análisis FODA realizado para recopilar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del modelo propuesto (Elaboración propia).

Los resultados muestran que las fortalezas se alinean a la visión del cliente más que al aporte ambiental o por sus propiedades de limpieza, el estudio del impacto del catalizador sobre su entorno debe realizarse a mayor profundidad. Las oportunidades incluyen el interés observado en el juicio de personas experimentadas a probar el material, el interés por disminuir la contaminación y la iteración para seguir creciendo el proyecto. Las debilidades y amenazas se alinean a los posiblemente altos costos de implementar el emprendimiento, la necesidad de construir un plan robusto sobre los procesos operativos y la protección de la marca de forma tanto económica como legal. A la hora de evaluar la oportunidad de negocio, se incorpora al análisis anterior un corto estudio de posicionamiento efectivo del proyecto llamado Lean Canvas.

El esquema de Lean Canvas permite enunciar específicamente los primeros pasos de la columna vertebral del modelo de negocio con el cual se finaliza el primer ciclo de la metodología de puesta en marcha ajustada. La herramienta se construye alrededor de un segmento del consumidor, a pesar de que el emprendimiento puede venderle productos a cualquiera, no se puede construir, diseñar y posicionar efectivamente un producto para todos, sino que hay que comenzar con un cliente específico en mente y obtener la mayor cantidad de conclusiones posibles (Araya, Rodríguez, Vargas & Villalobos, 2017).

Ambas herramientas permiten gestionar ideas sobre el modelo de negocio, especialmente la puesta en marcha y el seguimiento necesario sobre los aprendizajes iniciales. En adelante, se comienza por alinear los distintos clientes que deben llegar a utilizar este producto, los canales por su alcance sobre los clientes, costos e ingresos primordiales, métricas de actividad y las ventajas del producto. Aunque se puede completar el esquema de distintas formas, utilizar un enfoque centrado en el cliente y una actitud de “hacer las cosas” ayuda a concluir cuáles son las próximas hipótesis que se necesitan probar para hacer avanzar un producto (Maurya, 2012).

El esquema Lean Canvas se completó en el siguiente orden, teniendo en cuenta un enfoque dirigido en los clientes planteado por Maurya (2012):

1. Problema del Cliente: Se utilizó el mismo segmento de clientes que en la propuesta de valor: personas con edades entre 20 y 40 años, de la gran área metropolitana que tengan un ingreso medio y pasen la mayor parte de su tiempo en la casa. Los problemas justifican la necesidad o interés en comprar el Kit de cemento. Además se enuncian algunas alternativas existentes que solucionan los problemas, las principales permiten invertir una gran cantidad de tiempo y las alternativas permiten cierto aprendizaje personal.
2. Segmentos de clientes: Se identificó cualquier otro rol de cliente que interactuará con este producto dentro de los mercados meta. Principalmente consumidores que utilizan el producto para sus clientes.
3. Primeros Clientes: El esquema se utilizó para reducir las características distintivas de

los primeros clientes prototipo. El cliente inicial tiene un impacto en la estimación de la inversión inicial. En la propuesta de valor se encontró necesario crear relaciones más perdurables por medio de redes sociales, por este motivo los clientes iniciales siguen una imagen virtual importante.

4. Propuesta de valor única: Un mensaje único, claro y convincente que indica las diferencias y porque vale la pena comprarlo. La estrategia competitiva y de lanzamiento debe ser trabajada a partir de la propuesta que se está planteando, además, la propuesta de valor del esquema debe lograr resumir la información de la Figura 5.18.
5. Soluciones: A pesar de que se tienen muchas hipótesis sin probar, las soluciones son funciones o capacidades principales que logran resolver cada problema.
6. Canales: Si bien hay una gran cantidad de opciones disponibles para emprendimientos, algunos canales pueden ser totalmente inaplicables dependiendo del producto, mientras que otros pueden ser más viables durante las etapas posteriores de su inicio. El canal seleccionado debe estar alineado con las propuestas de seguimiento y tener un bajo costo al comienzo, por lo que se seleccionan redes sociales. Conforme se incrementa el flujo, los convenios comerciales locales pueden permitir expandir rápidamente el emprendimiento.
7. Fuentes de ingresos y principales costos fijos o variables: La actividad de colocar el precio del producto se debe desarrollar con mayor detenimiento, es a la vez una de las cosas más complicadas e importantes para hacerlo bien. El modelo de precios mantiene el negocio, señala la marca, el posicionamiento del emprendimiento y determina los clientes. Por el tipo de producto, al comienzo se logran reducir costos en investigación y desarrollo, costo de adquisición del cliente, administrativo y cargos por laboratorios o renta. Un ligero crecimiento debe contemplar los costos anteriores para garantizar la calidad del producto.
8. Métricas Clave: Los índices clave que miden cómo va el negocio en tiempo real son relacionadas a las ventas, la pérdida de material, quejas y la cantidad de comunicación

dirigida al consumidor que se realice en el comienzo del emprendimiento.

9. Ventaja Única: Una perspectiva interesante para tener en cuenta es que cualquier cosa que vale la pena copiar será copiada. Una verdadera ventaja única es algo que no se puede copiar o comprar fácilmente. En este proyecto, el concepto es la aplicación del dióxido de titanio autolimpiante como catalizador para la reacción de oxidación avanzada debido a que es un tema novedoso en el país y cualquier promoción o competencia que se genere favorecería la entrada de material al país y podría llegar a reducir los costos de materia prima.

La propuesta de oportunidad de negocio logra converger en un paquete de piezas clave para que los consumidores logren construir sus propias piezas de cemento utilitario en casa, invirtiendo poco tiempo en el proceso y logrando compartir los resultados en redes sociales si lo desean, mismo medio por el cual se brindará seguimiento por parte de la empresa. El motivo del seguimiento en redes sociales es consolidar un canal de ventas, el cual, en conjunto con los convenios comerciales locales y las ventas por plataformas de comercio por internet, deben permitirle a la empresa acabar con un batch completo de inventario. Consumir todo el inventario de dióxido de titanio significa que el cemento fotocatalítico va a retener el catalizador, el cual debe continuar reaccionando con la luz y los contaminantes de su entorno. La pieza se convierte en otra parte más de las superficies de concreto que hay en las ciudades, solo que esta vez está destinada a la reducción de contaminantes.

El reto de inventario permite valorar la viabilidad del negocio y podría ser la pauta que marque la siguiente decisión de producto mínimo viable. El proyecto presenta la oportunidad de continuar con los ensayos en concreto y buscar mercado en el área de la construcción, pero esto podría significar dejar atrás la idea del Kit de cemento, idea que habría logrado cumplido su cometido. Los resultados se muestran en la Figura 5.23.

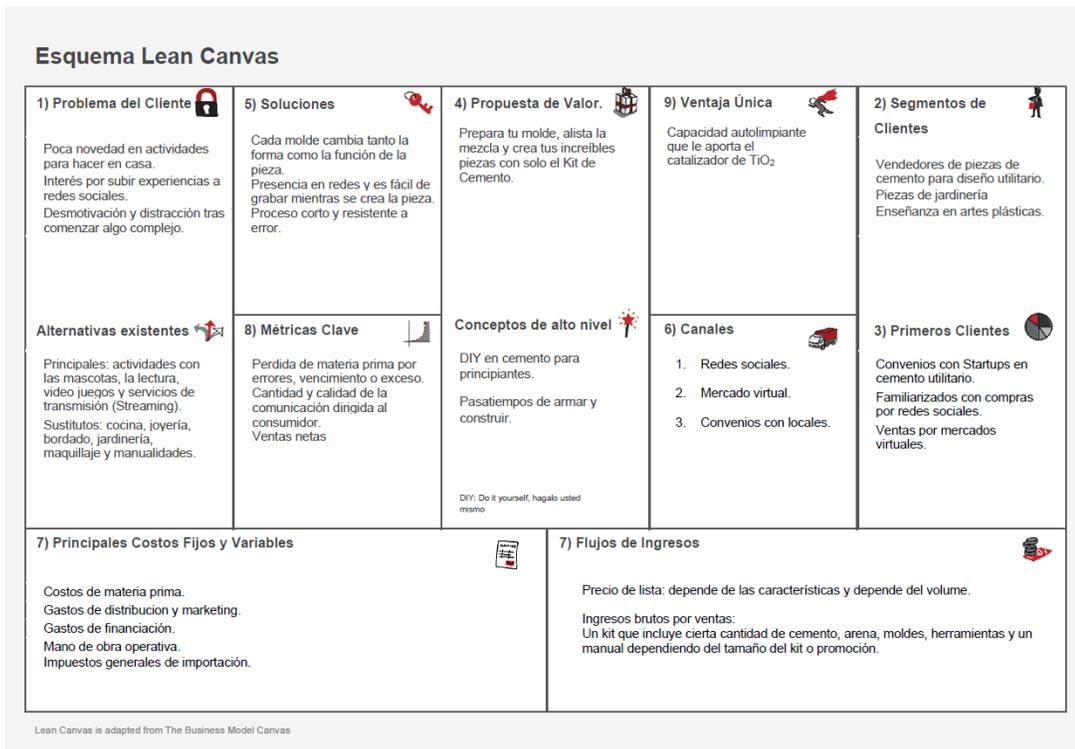


Figura 5.23. Resultados del esquema Lean Canvas para el Kit de Cemento según la metodología puesta en marcha ajustada para el estudio de oportunidad de negocio (Maurya, 2012).

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La mezcla con 5 % TiO_2 molido requiere en promedio una relación másica agua-cemento de 0.579 para cumplir el ensayo estándar de flujo para morteros y corresponde a la mayor relación de agua observada en comparación a las mezclas de 2.5 % TiO_2 molido (0.508), 0.1 % TiO_2 molido (0.477), 0 % TiO_2 molido (0.505), 5 % TiO_2 con mezclado simple (0.548), 2.5 % TiO_2 con mezclado simple (0.528), 0.1 % TiO_2 con mezclado simple (0.488) y 0 % TiO_2 con mezclado simple (0.495).
- Al comparar la mezcla candidato 5 % TiO_2 molido con la mezcla 0 % TiO_2 molido aparece una diferencia significativa en cuanto a la resistencia a la compresión con un intervalo de confianza del 95 %. Todos los tratamientos cumplen con la norma INTE C57:2015 de resistencia a la compresión pero la mezcla candidato 5 % TiO_2 presenta la menor resistencia observada con 18.8 MPa a 3 días de curado y 23.9 MPa a 7 días de curado en comparación a las mezclas 0 % TiO_2 molido (21.6 MPa a 3 días)(27.4 MPa a 7 días), 0.1 % TiO_2 molido (20.5 MPa a 3 días)(26.5 MPa a 7 días) y 2.5 % TiO_2 molido (19.0 MPa a 3 días)(24.2 MPa a 7 días).
- El prototipo de cemento molido con 5 % TiO_2 supera los requisitos mecánicos y físicos según la norma INTE C147:2018: “Requisitos cemento hidráulico”. Supera los límites mínimos de resistencia a la compresión a los 3 días (13 MPa), 7 días (20 MPa) y 28 días (30 MPa) con resultados promedio de 14.1 MPa, 7 días 20.5 MPa y 28 días 30.3 MPa respectivamente; se encuentra por debajo del límite en contenido de aire (12 %) con resultados de 4 % en volumen; por debajo del límite de expansión por almacenamiento en agua durante 14 días (0.02 %) con resultados de 0.015 % en longitud; supera el porcentaje de penetración final (50 %) para el ensayo de endurecimiento temprano con resultados del 76 % de penetración final; tiempos de fragua inicial mayores al mínimo (45 min) y menores al requisito final (420 min) con resultados de 135 minutos y 352 minutos respectivamente y la mezcla se encuentra por

debajo del límite de expansión por autoclave (0.8 %) con resultados de 0.13 % en longitud.

- El tratamiento de cemento fotocatalítico generó, en promedio, una diferencia 25 % mayor en la disminución de la concentración de rodamina B sobre el tratamiento de cemento puro. El tratamiento del catalizador posee una influencia sobre la cantidad de rodamina B que se degradó en una hora, con un intervalo de confianza del 95 %.
- Se muestra una disminución lineal de la concentración durante 3 horas con un factor de correlación R^2 de 0.9863 por lo que el orden de reacción de este sistema es cero debido a que la velocidad de reacción no depende de la concentración de la rodamina B, sino que es constante con el tiempo. Se comprueba la ocurrencia de reacciones químicas que reducen la concentración de la rodamina B en la disolución con el cubo de mortero dopado con dióxido de titanio .
- Al cuantificar la actividad fotocatalítica según la norma UNI-11259 se concluye que 5 cubos con tratamientos de TiO_2 lograron superar el 20% de degradación en 4 horas y superar el 50 % de degradación en 26 horas, logrando en promedio un valor de R_4 a 4 horas de 68.7 % y R_{26} a 26 horas de 98.0 %. En contraste, el tratamiento sin dióxido de titanio no mostró una degradación suficiente para cumplir con los requisitos de la norma.
- La propuesta de oportunidad de negocio converge en un paquete de piezas clave para que los consumidores logren construir sus propias piezas de cemento utilitario en casa, invirtiendo poco tiempo en el proceso y logrando compartir los resultados en redes sociales.

6.2 Recomendaciones

- Completar los estudios según la norma INTE C147:2018 requisitos de cemento hidráulico incluidos los requisitos químicos, empaque y etiquetado, reporte de elementos traza en el cemento y designación del tipo y composición del cemento Portland dopado con 5 % dióxido de titanio.

- Se recomienda estudiar y cuantificar la capacidad fotocatalítica del mortero dopado con 5 % dióxido de titanio sobre contaminantes dispersos en el aire como son los NO_x, VOCs, partículas PM_{2.5} y corrientes de aire contaminadas por gases de escape de automóviles.
- El riesgo de sobre inventariar las materias primas sugiere que se debe valorar la viabilidad del negocio y podría ser la pauta que marque la siguiente decisión de producto mínimo viable. El proyecto presenta la oportunidad de continuar con los ensayos en concreto y buscar mercado en el área de la construcción.

7 REFERENCIAS

- Aldrich, S. (n.d.). *Rhodamine B* $\geq 95\%$ (HPLC). Retrieved August 16, 2021, from https://www.sigmaaldrich.com/CR/es/product/sigma/r6626?gclid=CjwKCAjw9uKIBhA8EiwAYPUS3HhLVaUtPEni7X6mtbluwZ1fqdhDqTz-_n0EQa3FfWqdvAYINeUa0BoCkOkQAvD_BwE
- Ameta, S. C., & Ameta, R. (2018). Emerging Green Chemical Technology. In *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment - Emerging Green Chemical Technology*. Elsevier.
<https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt011PN4Q4/advanced-oxidation-processes/photocatal-references>
- Araya, L., Rodríguez, J., Vargas, M., & Villalobos, G. (2017). Lean Start-Up as a Strategy for the Development and Management of Dynamic Entrepreneurships. *Dimensión Empresarial*, 16(2), 193–209. <https://doi.org/10.15665/dem.v16i2.1487>
- Ashby, M., Ferreira, P., & Schodek, D. (2009). Self-Cleaning and Antipollutant Concrete. In *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design - An Introduction for Engineers and Architects*. Elsevier.
<https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt009AJF01/nanomaterials-nanotechnologies/self-cleaning-antipollutant>
- ASTM International. (2020). *Standard Terminology Relating to Hydraulic and Other Inorganic Cements*. ASTM International. <https://doi.org/https://doi.org/ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/10.1520/C0219-20A>
- Atalay, S., & Ersöz, G. (2016). *Review on Catalysis in Advanced Oxidation Processes*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28950-2_4
- Aureliano, F. d'S., Costa, A. A. F., Júnior, I. F., & Pedroso, R. d' O. (2019). Manufacture of structural blocks of concrete with waste tire rubbers. *Procedia Manufacturing*, 38, 464–470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.059>
- Bahnemann, D. (2004). Photocatalytic water treatment: solar energy applications. *Solar Energy*, 77(5), 445–459. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.031>
- Barkston Plastics Ltd. (2013). *Technical Data sheet - Polypropylene PPH 4042*. 1.
- Bartos, P. J. M. (2017). Glassfibre Reinforced Concrete. In *Principles, Production, Properties and Applications*. Whittles Publishing.
<https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt011D3IF1/glassfibre-reinforced/active-de-pollution-environment>

- Bennett, D., & Nixon, R. (2016). Corrosion and Materials Fundamentals for Engineers in Wastewater Treatment Plants & Collection Systems. In *Corrosion and Materials Fundamentals for Engineers in Wastewater Treatment Plants & Collection Systems (3rd Edition)* (3rd Editio). NACE International.
<https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0113WUM5/corrosion-materials-fundamentals/sulfate-attack>
- Berdahl, P. H., & Akbari, H. (2008). *Evaluation of titanium dioxide as a photocatalyst for removing air pollutants*. <http://www.energy.ca.gov/2007publications/CEC-500-2007-112/CEC-500-2007-112.PDF>
- Bernuy Chavez, G. O., & Flores Cortez, H. H. (2020). *Evaluación de las propiedades mecánicas y capacidad autolimpiable del mortero c/a 1:5 de cemento portland tipo I modificado con dióxido de titanio (TiO₂), en la ciudad de Lima*.
https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/653673/Bernuy_ChG.pdf?sequence=3
- Brame, J. A. (2014). Using Nanomaterials to Solve Environmental Problems: Advancing the Science and Engineering of Photocatalysis. In *ProQuest Dissertations and Theses*.
<https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/docview/1728149762?accountid=28692>
- Cardellicchio, L. (2020). Self-cleaning and colour-preserving efficiency of photocatalytic concrete: case study of the Jubilee Church in Rome. *Building Research and Information*, 48(2), 160–179. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1622405>
- Cassar, L. (2004). Photocatalysis of Cementitious Materials: Clean Buildings and Clean Air. *MRS Bulletin*, 29(5), 328–331. [https://doi.org/DOI: 10.1557/mrs2004.99](https://doi.org/DOI:10.1557/mrs2004.99)
- Catherine, P. (2017). Prototipo de concreto con desechos sólidos generados en la Universidad Católica de Colombia. In *Programa de ingeniería civil*. Universidad Católica de Colombia.
- Cedillo-González, E. I., Hernández-López, J. M., Ruiz-Valdés, J. J., Barbieri, V., & Siligardi, C. (2020). Self-cleaning TiO₂ coatings for building materials: The influence of morphology and humidity in the stain removal performance. *Construction and Building Materials*, 237, 117692.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117692>
- Chatterjee, D., & Dasgupta, S. (2005). Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 6(2), 186–205.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2005.09.001>
- Chatterji, S. (1995). Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 51–56.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)00111-B](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00111-B)

- Chen, J., Kou, S., & Poon, C. (2011). Photocatalytic cement-based materials: Comparison of nitrogen oxides and toluene removal potentials and evaluation of self-cleaning performance. *Building and Environment*, *46*(9), 1827–1833.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.03.004>
- Chen, J., Kou, S., & Poon, C. (2012). Hydration and properties of nano-TiO₂ blended cement composites. *Cement and Concrete Composites*, *34*(5), 642–649.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.009>
- Chen, X., Lin, S., & Kou, S. (2018). Effect of composite photo-catalysts prepared with recycled clay brick sands and nano-TiO₂ on methyl orange and NO_x removal. *Construction and Building Materials*, *171*, 152–160.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.099>
- Chihiro, Y. (2019, April 5). Environmental Water Research; Studies from Tokyo Institute of Technology Reveal New Findings on Environmental Water Research (Photodegradation of Pharmaceuticals and Personal Care Products In Water Treatment Using Carbonaceous-tio₂ Composites: a Critical. *Ecology, Environment & Conservation*, 1525. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/wire-feeds/environmental-water-research-studies-tokyo/docview/2202630867/se-2?accountid=28692>
- Christ Robert D., W. R. L. S. (2014). A User Guide for Remotely Operated Vehicles. In *ROV Manual - A User Guide for Remotely Operated Vehicles* (2nd Editio). Elsevier.
<https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt00UBN2ML/rov-manual-user-guide/dissolved-gases>
- Civilology. (2010). *Cement Consistency Test - Standard Consistency of Cement by Vicat Apparatus*. Consistency Test. <http://www.civilology.com/consistency-test-of-cement/>
- CONCRETECR. (2021). *ARENA SILICA*. Concrete Supplies S.A.
<https://www.concretecr.com/products/26/arena-silica>
- Crow, M. (2010). Environmental remediation and semiconductor photocatalysis [University of Strathclyde]. In *PQDT - UK & Ireland*. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/docview/1779950272?accountid=28692>
- Daniyal, M., Akhtar, S., & Azam, A. (2019). Effect of nano-TiO₂ on the properties of cementitious composites under different exposure environments. *Journal of Materials Research and Technology*, *8*(6), 6158–6172.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.010>
- Diamanti, M. V., Ormellese, M., & Pedferri, M. (2008). Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. *Cement and*

- Concrete Research*, 38(11), 1349–1353.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.07.003>
- Dionysiou, D. D., Puma, G. L., Jinhua Ye, J. S., & Bahnemann, D. (2016). Photocatalysis Applications. In *Physical Sciences*. Royal Society of Chemistry.
<https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0110N731/photocatalysis-applications/self-clean-titanium-dioxide>
- Dolatabadi, M. H. (2013). Properties and Performance of Photocatalytic Concrete. In *University of Toronto*.
- Duane Diseño Vivo. (n.d.). *11 Moldes Para Hacer Macetas De Concreto 1 Maceta Ch Gratis*. Retrieved January 7, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-775952780-11-moldes-para-hacer-macetas-de-concreto-1-maceta-ch-gratis-_JM
- Duane Diseño Vivo. (2021). *Kit 7 Moldes Para Hacer Macetas De Concreto 4 Cm Alto*. Mercado Libre México. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-959850101-kit-7-moldes-para-hacer-macetas-de-concreto-4-cm-alto-_JM#position=4&search_layout=grid&type=item&tracking_id=3e65b60a-7629-4872-86a0-46d04558b0ef
- EPAENLINEA. (n.d.). *Cemento Holcim 50 kg | Ferretería EPA*. EPA. Retrieved January 20, 2022, from <https://cr.epaenlinea.com/cemento-holcim-50-kg.html>
- Esping, O., & Löfgren, I. (2005). *Cracking due to plastic and autogenous shrinkage - Investigation of early age deformation of self-compacting concrete* (Issue September). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27325.36323>
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001>
- Gaya, U. I. (2013). *Heterogeneous Photocatalysis Using Inorganic Semiconductor Solids*. Springer Netherlands. <https://books.google.co.cr/books?id=OovEBAAQBAJ>
- Gaya, U. I., & Abdullah, A. H. (2008). Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: a review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 9(1), 1–12.
- Giraldo, L. F. G., Franco, E. A. M., & Arango, J. J. S. (2009). *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. Red Revista Lasallista de Investigación. <https://books.google.co.cr/books?id=gi5WnQAACAAJ>
- Grespania. (n.d.). *Self cleaning, bactericide and decontaminating*. H&C TILES. Retrieved March 1, 2021, from <https://www.grespania.com/>

- Gruber, M., Kim, S. M., & Brinckmann, J. (2015). What is an Attractive Business Opportunity? An Empirical Study of Opportunity Evaluation Decisions by Technologists, Managers, and Entrepreneurs. *Strategic Entrepreneurship Journal*, 9(3), 205. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/scholarly-journals/what-is-attractive-business-opportunity-empirical/docview/1708001695/se-2?accountid=28692>
- Gutiérrez, E., Briceño, J., Herrera, J., Solorzano, D., Hugo, D., & Felix, J. (2015). Sexto Informe de Calidad del Aire: GAM 2013-2015. *Informe Anual de Calidad Del Aire*.
- Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2003). *Análisis y diseño de experimentos* (2ed ed.). McGraw-Hill. <https://books.google.com.gt/books?id=1zqtAAAACAAJ>
- Hanson, S. (2014). Evaluation of concrete containing photocatalytic titanium dioxide [The University of Utah]. In *ProQuest Dissertations and Theses*. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/dissertations-theses/evaluation-concrete-containing-photocatalytic/docview/1548716428/se-2?accountid=28692>
- Hegyí, A., Lázărescu, A., Dico, C., & Szilagyí, H. (2018). The effect of tio₂ on the properties of cementitious composite materials. In *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM* (Vol. 18, Issue 6.3, pp. 391–398). Surveying Geology & Mining Ecology Management (SGEM). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5593/sgem2018/6.3/S26.051>
- Hernández, Ó. (2016). *Estadística Elemental Para Ciencias Sociales* (4ta ed.). Editorial Universidad de Costa Rica. <https://books.google.co.cr/books?id=4Bn033JrE8wC>
- Hewlett, P. C., & Liska, M. (2019). Lea's Chemistry of Cement and Concrete. In *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (5th Edition)* (5th Editio). Elsevier. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0122CTP1/leas-chemistry-cement/aggregate-strength-density>
- Higson, S. (2004). Analytical Chemistry. In *Oxford University Press*. Oxford University Press. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt008IJRK1/analytical-chemistry/absorption-how-much-radiation>
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95(1), 69–96. <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>
- Howe, K. J., Hand, D. W., Crittenden, J. C., Trussell, R. R., & Tchobanoglous, G. (2012). Principles of Water Treatment. In *Principles of Water Treatment*. John Wiley & Sons. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPWT00004/principles-water-treatment/principles-water-treatment>
- Hwang, C. L., & Chandra, S. (1996). The use of rice husk ash in concrete. In S. Chandra

- (Ed.), *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing* (pp. 184–234). William Andrew Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-081551393-3.50007-7>
- IHS Markit. (2018). *Titanium Dioxide*. Chemical Economics Handbook. <https://ihsmarkit.com/products/titanium-dioxide-chemical-economics-handbook.html>
- Imam, M. A., Froes, F. H., & Housley, K. L. (2010). Titanium and Titanium Alloys. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (pp. 1–41). American Cancer Society. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0471238961.2009200119050107.a01.pub3>
- INTECO. (2015). *INTE C57:2015. Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm*. ASTM. https://www.inteco.org/en_US/shop/product/inte-c57-2015-construccion-resistencia-a-la-compresion-de-morteros-de-cemento-hidraulico-usando-especimenes-cubicos-de-50-mm-metodo-de-ensayo-933?variant=896
- ISO. (2010). *ISO 10678:2010(en) Determination of photocatalytic activity of surfaces in an aqueous medium by degradation of methylene blue*. Fine Ceramics (Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10678:ed-1:v1:en>
- Jamalullail, N., Mohamad, I. S., Norizan, M. N., Baharum, N., & Mahmed, N. (2017). *Short review: Natural pigments photosensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC)*. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2017.8305367>
- Janus, M., Kusiak-Nejman, E., Rokicka-Konieczna, P., Markowska-Szczupak, A., Zajac, K., & Morawski, A. W. (2019). Bacterial Inactivation on Concrete Plates Loaded with Modified TiO₂ Photocatalysts under Visible Light Irradiation. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 24(17). <https://doi.org/10.3390/molecules24173026>
- Janus, M., & Zajac, K. (2016). Concretes with Photocatalytic Activity. *High Performance Concrete Technology and Applications*. <https://doi.org/10.5772/64779>
- Joshaghani, A., Balapour, M., Mashhadian, M., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Effects of nano-TiO₂, nano-Al₂O₃, and nano-Fe₂O₃ on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study. *Construction and Building Materials*, 245, 118444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118444>
- Junior, H., Fiorelli, J., & Santos, S. (2017). Sustainable and Nonconventional Construction Materials Using Inorganic Bonded Fiber Composites. In *Sustainable and Nonconventional Construction Materials Using Inorganic Bonded Fiber Composites*. Elsevier. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSNCMUIB2/sustainable-nonconventional/sustainable-nonconventional>

- Kahn, J. A. (1984). Non-Rutile Feedstocks for the Production of Titanium. *JOM*, 36(7), 33–38. <https://doi.org/10.1007/BF03338498>
- Karlsson, M. C. F. (2014). Recovery and Reuse of TiO₂ and Other Pigments from Paint Waste [Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden)]. In *PQDT - Global*. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/dissertations-theses/recovery-reuse-tio-sub-2-other-pigments-paint/docview/2314596806/se-2?accountid=28692>
- Kennedy, I. M. (2007). The health effects of combustion-generated aerosols. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 2757–2770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.116>
- Khawar, A., Qureshi, M. I., Shahzad, S., & Khan, S. U. (2021). Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 285, 122952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122952>
- Kim, D. H., Ho, H. J., Park, H. S., Kim, J. K., & Park, J. H. (2020). Improving the production efficiency of high-titania slag in Ti extraction process: fluxing effect on formation of pseudobrookite. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)*, 10(1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-63532-4>
- Kirgiz, M. S. (2019). Nano Hybrids and Composites. In *Nano Hybrids and Composites, Volume 24* (Volume 24). Trans Tech Publications Ltd. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt01232BS1/nano-hybrids-composites/effect-nanomaterial-setting>
- Koli, V. B., Mavengere, S., & Kim, J.-S. (2019). An efficient one-pot N doped TiO₂-SiO₂ synthesis and its application for photocatalytic concrete. *Applied Surface Science*, 491, 60–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.123>
- Kowalski, K. G., & Januszkiewicz, K. (2017). Envisioning “city oasis” on the urban environment. Climate change oriented design for air purification in big cities. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM*, 17, 381–388. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5593/sgem2017H/43>
- Kralchevska, R., Milanova, M., Tsvetkov, M., Dimitrov, D., & Todorovsky, D. (2012). Influence of gamma-irradiation on the photocatalytic activity of Degussa P25 TiO₂. *Journal of Materials Science*, 47(12), 4936–4945. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s10853-012-6368-4>
- Kristensen, K., & Ucler, C. (2016). Collaboration model canvas : Using the business model canvas to model productive collaborative behavior. *2016 International Conference on Engineering, Technology and Innovation/IEEE Lnternational Technology Management Conference*. <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC39735.2016.9026160>

- Krýsa, J. (2012). *Photocatalytic performance test*. https://www.macoma.us/wp-content/uploads/2020/03/fn_testing_certificate_rhodamine.pdf
- Lamond, J. F., & Pielert, J. H. (2006). Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials: (STP 169D). In *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials: (STP 169D)*. ASTM International. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSTPCCMM2/significance-tests-properties/significance-tests-properties>
- León, S., García, S., Guevara, D., & Herrera, J. (2012). Informe De Calidad Del Aire 2011. *Municipalidad de San José*.
- Li, Z., Ding, S., Yu, X., Han, B., & Ou, J. (2018). Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *111*(April), 115–137. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.05.019>
- Liu, P., Yu, X., Wang, F., Zhang, W., Yang, L., & Liu, Y. (2017). Degradation of formaldehyde and benzene by TiO₂ photocatalytic cement based materials. *Journal of Wuhan University of Technology. Materials Science Edition*, *32*(2), 391–396. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s11595-017-1608-8>
- Macphee, D. E., & Folli, A. (2016). Photocatalytic concretes — The interface between photocatalysis and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*, *85*, 48–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.03.007>
- Masis, J. M., Urcuyo, R., Fuentes, P., & Chacón, L. M. (2022). *Sigpro - EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL CEMENTO PORTLAND DOPADO CON NANOPARTÍCULAS DE TIO₂ PARA LA DISMINUCIÓN DE LA BACTERIA E. COLI EN CUERPOS DE AGUA*. Centro De Investigación Electroquímica Y Energía Química. <https://vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/projects/C0147>
- Matthews, R. W. (1989). Photocatalytic oxidation and adsorption of methylene blue on thin films of near-ultraviolet-illuminated TiO₂. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, *85*(6), 1291–1302. <https://doi.org/10.1039/F19898501291>
- Maurya, A. (2012). *Running Lean: Iterate from Plan A to a Plan That Works* (2nd ed.). O'Reilly Media, Inc.
- Mehta, K., & Monteiro, P. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870/chapter/chapter1>
- Mejía, M., Chinchilla, V., & Mendoza, C. (2012). *Determinación De La Resistencia a La*

Compresión De Mortero Empleando Especímenes Cilíndricos Y Cúbicos, Utilizando Arena Del Occidente Del País". 213. [http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15315/1/TESIS DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTERO EMPLEANDO ESPECIMENES CILÍNDRICO.pdf](http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15315/1/TESIS%20DETERMINACI%C3%93N%20DE%20LA%20RESISTENCIA%20A%20LA%20COMPRESI%C3%93N%20DE%20MORTERO%20EMPLEANDO%20ESPECIMENES%20CIL%C3%8DNDRICO.pdf)

- Middlemas, S. C. (2014). Energy-conscious production of titania and titanium powders from slag [The University of Utah]. In *ProQuest Dissertations and Theses*. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/dissertations-theses/energy-conscious-production-titania-titanium/docview/1652862797/se-2?accountid=28692>
- Mills, A. (2012). An overview of the methylene blue ISO test for assessing the activities of photocatalytic films. *Applied Catalysis B: Environmental*, 128, 144–149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.01.019>
- Mindess, S. (2019). Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (2nd Edition)* (2nd Editio). Elsevier. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0122YWW3/developments-in-formulation/selection-of-cement>
- Misra, M. (2020). Experiencing Tentacle Difficulties? SWOT It Out! A SWOT Analysis on the Giant Pacific Octopus Marine Conservation Tourism Programs at the Seattle Aquarium. In *ProQuest Dissertations and Theses*. University of Washington. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/dissertations-theses/experiencing-tentacle-difficulties-swot-out/docview/2440680925/se-2?accountid=28692>
- Moreno, I. (2018). *Fotocatálisis en materiales en base de cemento*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Najar, S. N. O. (2021). Evaluación de las propiedades fotocatalíticas de adoquines para obras de infraestructura vial adicionado con tio2 (dióxido de titanio) en la ciudad de Arequipa 2021. *Universidad Católica San Pablo*.
- Nasvik, J. (2000). Flash set and false set. *Concrete Construction*, 45(9), 46. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/trade-journals/flash-set-false/docview/198201938/se-2?accountid=28692>
- National Bureau. (1976). *Journal of Research of the National Bureau of Standards: Physics and chemistry* (Issue v. 80). National Bureau of Standards. <https://books.google.co.cr/books?id=dpxGPVBpbvUC>
- Niculescu, G., Jinaru, A., & Cojocaru, F. (2014). Beyond Lean Startup Towards Integrated Lean Startup. *Annals of the Constantin Brancusi University of Targu Jiu-Letters & Social Sciences Series*, 4, 21–27. <http://www.redi-bw.de/db/ebSCO.php/search.ebSCOhost.com/login.aspx%3Fdirect%3Dtrue%26db%3Daph%26AN%3D101758982%26site%3Dehost-live>

- Ochiai, T., & Fujishima, A. (2012). Photoelectrochemical properties of TiO₂ photocatalyst and its applications for environmental purification. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(4), 247–262.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.07.001>
- Ohtani, B., Prieto-Mahaney, O. O., Li, D., & Abe, R. (2010). What is Degussa (Evonik) P25? Crystalline composition analysis, reconstruction from isolated pure particles and photocatalytic activity test. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 216(2), 179–182.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2010.07.024>
- Osterwalder, A., Pigneur, Y., Smith, A., & Movement, T. (2010). *Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Wiley.
- Oturan, M. A., & Aaron, J.-J. (2014). Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
- Palau, J., Colomer, M., Peña-Roja, J. M., & Martínez-Soria, V. (2012). Photodegradation of Toluene, m-Xylene, and n-Butyl Acetate and Their Mixtures over TiO₂ Catalyst on Glass Fibers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(17), 5986–5994.
<https://doi.org/10.1021/ie300357x>
- Peñañiel Carpio, F. J., & Navarrete Angulo, S. M. (2019). *Estudio de las características del fotocatalizador dióxido de titanio en hormigones, según la norma UNI 11259* [Quito: UCE]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20195>
- PIANC.org. (2014). Mechanical and Electrical Engineering Lessons Learnt from Navigation Structures, PIANC Report No. 138. In *Mechanical and Electrical Engineering Lessons Learnt from Navigation Structures, PIANC Report No. 138*. PIANC. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMEELLNS4/mechanical-electrical/mechanical-electrical>
- Pilkington. (n.d.). *Self-cleaning Glass*. Pilkington Activ. Retrieved March 1, 2021, from <https://www.pilkington.com/en-gb/uk/householders/types-of-glass/self-cleaning-glass>
- Poscher, A., Luidold, S., Schnideritsch, H., & Antrekowitsch, H. (2016). Extraction of Lanthanides from Spent Polishing Agent. In I. Borges De Lima & W. B. T.-R. E. I. Leal Filho (Eds.), *Rare Earths Industry. Technological, Economic, and Environmental Implications* (pp. 209–222). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00014-0>
- PROINNOVA UCR. (n.d.). *Documentos de interés – Propuesta de Valor*. Pensando En Mi Proyecto. Retrieved January 10, 2022, from <http://www.proinnova.ucr.ac.cr/es/documentos-de-interes/>

- Ram, M. K., Andreescu, S., & Ding, H. (2011). *Nanotechnology for Environmental Decontamination*. McGraw-Hill Education.
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071702799>
- Ramachandran, V. S. (1995). Concrete Admixtures Handbook - Properties, Science, and Technology. In *Concrete Admixtures Handbook - Properties, Science, and Technology (2nd Edition)* (2nd Editio). William Andrew Publishing/Noyes.
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCAHPSTE3/concrete-admixtures-handbook/concrete-admixtures-handbook>
- Rupnow, T. D., Schaefer, V. R., Wang, K., & Hermanson, B. L. (2007). *Improving Portland Cement Concrete Mix Consistency and Production Rate though Two-Stage Mixing. IHRB Proje*(Report), 96.
- Seo, D., & Yun, T. S. (2017). NO_x removal rate of photocatalytic cementitious materials with TiO₂ in wet condition. *Building and Environment*, *112*, 233–240.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.037>
- Sikkema, J. (2013a). Photocatalytic Degradation of NO_x by concrete pavement containing TiO₂ [Iowa State University]. In *Iowa State University*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31274/etd-180810-1864>
- Sikkema, J. (2013b). The effect of photocatalytic layer depth on no oxidation rate and comparison with photocatalytic mortars. *Catalysis Today*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31274/etd-180810-1864>
- Sikkema, J., Alleman, J., Cackler, T., Taylor, P. C., & Gopalakrishnan, K. (2014). *Climate Change , Energy , Sustainability and Pavements* (K. Gopalakrishnan, W. J. Steyn, & J. Harvey (eds.)).
- Sorathiya, J., Shah, S., & Kacha, S. (2018). *Effect on Addition of Nano "Titanium Dioxide" (TiO2)on Compressive Strength of Cementitious Concrete. 1*, 219–211.
<https://doi.org/10.29007/sq9d>
- Spieth, P., Schneckenberg, D., & Ricart, J. E. (2014). Business model innovation - state of the art and future challenges for the field. *R&D Management*, *44*(3), 237–247.
<https://doi.org/10.1111/radm.12071>
- Su, R., Bechstein, R., S , L., Vang, R. T., Sillassen, M., Esbj rnsson, B., Palmqvist, A., & Besenbacher, F. (2011). How the Anatase-to-Rutile Ratio Influences the Photoreactivity of TiO₂. *The Journal of Physical Chemistry C*, *115*(49), 24287–24292. <https://doi.org/10.1021/jp2086768>
- Sun, H., Wang, J., Dong, X., & Xue, Q. (2012). A literature review of titanium slag metallurgical processes. *Metalurgia International*, *XVII*(7), 155–160.

- Tong, T. (2015). The Unintended Ecological Consequences and Interactions of Nanotitania in Aquatic Environments: From Single- to Multi-Nanomaterial Systems [Northwestern University]. In *ProQuest Dissertations and Theses*. <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/dissertations-theses/unintended-ecological-consequences-interactions/docview/1690851845/se-2?accountid=28692>
- TZMI. (2021). *What are the titanium and zirconium value chains?* Markets & Strategic. <https://www.tzmi.com/what-are-the-titanium-and-zirconium-value-chains/>
- U.S. Geological Survey. (2011). Mineral Commodity Summaries 2011. In *Mineral Commodity Summaries*. <https://doi.org/10.3133/mineral2011>
- USEPA. (2008). *EPA document # Risk and Exposure Assessment to Support the Review of the NO₂ Primary National Ambient Air Quality Standard. 2.*
- Vallero, D. (2014). Foundations of Air Pollution. In *Fundamentals of Air Pollution (5th Edition)*. Elsevier. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt010WM7U4/fundamentals-air-pollution/part-i-foundations-air>
- Wang, J. L., & Xu, L. (2012). Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(3), 251–325. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.507698>
- Wang, L., Zhang, H., & Gao, Y. (2018). Effect of TiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of cement at low temperatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8934689>
- Wood, A., Bahrami, P., & Safarik, D. (2014). *Green Walls in High-Rise Buildings: An output of the CTBUH Sustainability Working Group*. Images Publishing Group Pty Limited. <https://books.google.co.cr/books?id=OrVqBQAAQBAJ>
- Xu, Y., Jin, R., Hu, L., Li, B., Chen, W., Shen, J., Wu, P., & Fang, J. (2020). Studying the mix design and investigating the photocatalytic performance of pervious concrete containing TiO₂-Soaked recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119281>
- Yang, L., Hakki, A., Zheng, L., Jones, M. R., Wang, F., & Macphee, D. E. (2019). Photocatalytic concrete for NO_x abatement: Supported TiO₂ efficiencies and impacts. *Cement and Concrete Research*, 116(November 2018), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.002>
- Yaqoob, S., Ullah, F., Mehmood, S., Mahmood, T., Ullah, M., Khattak, A., & Zeb, M. A. (2018). Effect of waste water treated with TiO₂ nanoparticles on early seedling growth of *Zea mays* L. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(3), 424–431.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2166/wrd.2017.163>

- YUEJIANG. (2019). *Find High-Quality degussa p25 titanium dioxide for Multiple Uses*. Alibaba. <https://www.alibaba.com/showroom/degussa-p25-titanium-dioxide.html>
- Zhang, J., Tian, B., Wang, L., Xing, M., & Lei, J. (2018). *Photocatalysis*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2113-9>
- Zhang, M. hong. (2010). Effect of photocatalyst tio2 on workability, strength, and self - cleaning efficiency of mortars for applications in tropical environment. *35th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES*.
- Zhou, W., Liu, X., Cui, J., Liu, D., Li, J., Jiang, H., Wang, J., & Liu, H. (2011). Control Synthesis of Rutile TiO₂ Microspheres, Nanoflowers, Nanotrees and Nanobelts via Acid-Hydrothermal Method and Their Optical Properties. *CrystEngComm*, 13, 4557–4563. <https://doi.org/10.1039/C1CE05186E>
- Zouzelka, R., & Rathousky, J. (2017). Photocatalytic abatement of NO_x pollutants in the air using commercial functional coating with porous morphology. *Applied Catalysis B: Environmental*, 217, 466–476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.009>

8 NOMECLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Área de la superficie cargada	mm ²
ABS	Absorbancia	adim
A/C	Relación agua cemento	adim
B	Penetración final	mm
D	Penetración inicial	mm
G	Tiempo de la última penetración	min
GL	Grados de libertad total	adim
H	Tiempo de la primera penetración	min
I	Penetración en el tiempo H	mm
J	Penetración en el tiempo G	mm
K	Número de grupos independientes	adim
L	Longitud	mm
LSD	Diferencia mínima significativa	adim
Ma	Masa del frasco con el líquido	g
MC	Media de los cuadrados	adim
Mc	Masa del cemento usado	g
Mt	Masa del frasco con el líquido y cemento	g
N	Número total de observaciones	adim
P	Carga máxima total	N
PP	Porcentaje de penetración final	adim
R	Relación de la decoloración de la rodamina B	Adim
SC	Suma de cuadrados	adim
T	Temperatura	°C
Vfinal	Volumen final	mL
Vinicial	Volumen inicial	mL
W	Masa de 400 mL de mortero fresco	g
fm	Resistencia a la compresión	MPa
k	Constante de velocidad de reacción	mg/(L s)
n	Número de repeticiones	adim
ρ	Densidad	g/cm ³
t	Tiempo	s
α	Nivel de significancia	adim
<i>Subíndices</i>		
ads	Adsorción	adim

APENDICES

A. Datos experimentales

Cuadro A.1 Resultados de la relación másica agua cemento (A/C) que cumple con un flujo de 110 ± 5 en 25 golpes de la tabla de flujo para la totalidad de mediciones de flujo a lo largo de todas las pruebas que lo requirieron.

0% Sin moler	0.1% Sin moler	2.5% Sin moler	5% Sin moler	0% Molido	0.1% Molido	2.5% Molido	5% Molido
0.488	0.488	0.528	0.548	0.48	0.48	0.508	0.548
0.488	0.488	0.528	0.548	0.48	0.48	0.508	0.548
0.488	0.488	0.528	0.548	0.476	0.476	0.508	0.548
0.488	0.488	0.528	0.548	0.48	0.48	0.508	0.548
0.524				0.524			0.608
				0.528			0.608
				0.504			0.592
				0.5			0.584
				0.5			0.588
				0.514			0.588
				0.538			0.592
				0.538			0.592

Cuadro A.2 Resultados de la carga máxima total a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple.

Especimen cúbico N°	Carga máxima (N) - Edad 3 días y mezclado simple			
	0 % contenido de TiO ₂	0.1 % contenido de TiO ₂	2.5 % contenido de TiO ₂	5 % contenido de TiO ₂
1	45763	44397	43490	45748
2	45750	45627	44696	44336
3	45733	46020	44421	45948

Cuadro A.3 Resultados de la carga máxima total a 7 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple.

Especímen cúbico N°	Carga máxima (N) - Edad 7 días y mezclado simple			
	0 % contenido de TiO ₂	0.1 % contenido de TiO ₂	2.5 % contenido de TiO ₂	5 % contenido de TiO ₂
1	54822	58286	53891	55588
2	57248	57536	55273	55160
3	56930	54491	56007	52775

Cuadro A.4 Resultados de la carga máxima total a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.

Especímen cúbico N°	Carga máxima (N) - Edad 3 días y mezclado por molido			
	0 % contenido de TiO ₂	0.1 % contenido de TiO ₂	2.5 % contenido de TiO ₂	5 % contenido de TiO ₂
1	53468	50238	46609	45753
2	53940	53157	48770	46071
3	54304	50187	47062	46975

Cuadro A.5 Resultados de la carga máxima total a 7 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.

Especímen cúbico N°	Carga máxima (N) - Edad 7 días y mezclado por molido			
	0 % contenido de TiO ₂	0.1 % contenido de TiO ₂	2.5 % contenido de TiO ₂	5 % contenido de TiO ₂
1	67367	66073	61089	59120
2	68589	66009	61774	58133
3	69513	66999	58738	57236

Cuadro A.6 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de 110 ± 5 de acuerdo con la norma INTE C147:2018 para el ensayo de resistencia a la compresión con 6 cubos fallados a una edad de 3 días.

Resultados	Cantidades de material mezclado – Edad 3 días	
	Cemento Puro	5 % Cat
Cemento /(g)	500	525
Agua /(g)	264	304
Arena /(g)	1375	1375
Fluidez	108	115

Cuadro A.7 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de 110 ± 5 de acuerdo con la norma INTE C147:2018 para el ensayo de resistencia a la compresión con 6 cubos fallados a una edad de 7 días.

Resultados	Cantidades de material mezclado – Edad 7 días	
	Cemento Puro	5 % Cat
Cemento /(g)	500	525
Agua /(g)	252	294
Arena /(g)	1375	1375
Fluidez	114	112

Cuadro A.8 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de 110 ± 5 de acuerdo con la norma INTE C147:2018 para el ensayo de resistencia a la compresión con 6 cubos fallados a una edad de 28 días.

Resultados	Cantidades de material mezclado – Edad 28 días	
	Cemento Puro	5 % Cat
Cemento /(g)	500	525
Agua /(g)	250	292
Arena /(g)	1375	1375
Fluidez	109	112

Cuadro A.9 Resultados de la masa de los componentes necesaria para alcanzar un flujo de $87 \frac{1}{2} \pm 7 \frac{1}{2}$ de acuerdo con la norma INTE C136:2020 para el ensayo de contenido de aire

Resultados	Cantidades de material mezclado – Contenido de aire	
	Cemento Puro	5 % Cat
Cemento /(g)	350	367.5
Agua /(g)	246	280
Arena 20-30 /(g)	1400	1400
Fluidez Rep 1	89	82
Fluidez Rep 2	81	88
Fluidez Rep 3	82	86

Cuadro A.10 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de mortero a las 24 h \pm 15 min a partir del momento en que se mezcló el cemento

Especimen barra N°	Medición por comparador de longitud - Inicial					
	Cemento Puro /(mm)			5 % Cat /(mm)		
1	4.790	4.795	4.795	3.915	3.910	3.910
2	3.284	3.281	3.283	3.452	3.454	3.452
3	4.492	4.494	4.492	3.987	3.989	3.984
4	3.800	3.798	3.798	2.627	2.633	2.628

Cuadro A.11 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de mortero dopado con dióxido de titanio tras 14 días a partir del momento en que se mezcló el cemento.

Especimen barra N°	Medición por comparador de longitud – Tras 14 días					
	Cemento Puro /(mm)			5 % Cat /(mm)		
1	4.803	4.802	4.802	3.925	3.924	3.924
2	3.291	3.29	3.291	3.467	3.463	3.466
3	4.502	4.501	4.501	4.007	4.007	4.005
4	3.803	3.805	3.804	2.645	2.645	2.645

Cuadro A.12 Resultados de la masa de agua que se requiere para alcanzar una penetración inicial de 32 mm \pm 4 mm de acuerdo con la norma INTE C169:2019 para el ensayo de endurecimiento temprano.

Resultados	Cantidades de material mezclado – Endurecimiento temprano	
	Cemento Puro	5 % Cat
Cemento /(g)	500	500
Agua /(g)	155	165

Cuadro A.13 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de pasta dopada con dióxido de titanio tras 24 h \pm 30 min del moldeado según el método de ensayo INTE C135:2018 expansión por autoclave.

Especimen barra N°	Medición por comparador de longitud – Antes del ingreso al Autoclave					
	Cemento Puro /(mm)			5 % Cat /(mm)		
1	5.026	5.027	5.029	4.717	4.723	4.719
2	3.012	3.013	3.013	4.842	4.835	4.839

Cuadro A.14 Resultados de las mediciones de la expansión utilizando un comparador de longitud por triplicado de cada barra de pasta dopada con dióxido de titanio tras el ciclo de casi 6 h en la autoclave según el método de ensayo INTE C135:2018 expansión por autoclave.

Especimen barra N°	Medición por comparador de longitud – Tras el Autoclave					
	Cemento Puro /(mm)			5 % Cat /(mm)		
1	5.114	5.121	5.117	4.842	4.842	4.85
2	3.136	3.135	3.136	4.966	4.965	4.966

Cuadro A.15 Resultados de la curva de calibración para 7 disoluciones patrón de Rodamina B, utilizando agua Mili-Q como disolvente, a las cuales se le mide la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software resultado se reporta por medio del software VISIONpro.

Patrón	Conc.	Rep.	554.00nm
Patrón01	0.399	1	0.065
		2	0.065
		3	0.065
Patrón02	0.798	1	0.142
		2	0.141
		3	0.141
Patrón03	1.198	1	0.225
		2	0.227
		3	0.226
Patrón04	1.597	1	0.294
		2	0.292
		3	0.292
Patrón05	1.996	1	0.353
		2	0.354
		3	0.353

		1	0.438
Patrón06	2.396	2	0.439
		3	0.439
		1	0.522
Patrón07	2.795	2	0.524
		3	0.524

Cuadro A.16 Resultados del impacto de la adsorción sobre la concentración de la Rodamina B en la muestra, en un ambiente controlado a temperatura ambiente y a oscuras. Se le mide la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software VISIONpro.

Muestra	Rep.	554.00nm
Abs Inicial	1	0.542
	2	0.543
	3	0.543
	Media:	0.543
11:42am/30mi	1	0.547
	2	0.545
	3	0.545
	Media:	0.546
12:12pm/1h	1	0.547
	2	0.547
	3	0.547
	Media:	0.547
12:42pm/1h30	1	0.541
	2	0.54
	3	0.54

	Media:	0.54
1:12pm/2h	1	0.538
	2	0.537
	3	0.537
	Media:	0.537
1:42pm/2h30m	1	0.532
	2	0.532
	3	0.531
	Media:	0.531
2:12pm/3h	1	0.526
	2	0.527
	3	0.526
	Media:	0.526
2:42pm/3h30m	1	0.53
	2	0.529
	3	0.53
	Media:	0.53
3:12pm/4h	1	0.5
	2	0.499
	3	0.499
	Media:	0.499
3:42pm/4h30m	1	0.512
	2	0.512
	3	0.511
	Media:	0.511
9:12am/22h30	1	0.445

	2	0.445
	3	0.444
	Media:	0.445
9:42am/23h	1	0.443
	2	0.442
	3	0.443
	Media:	0.443
10:12am/23h3	1	0.445
	2	0.445
	3	0.445
	Media:	0.445
10:42am/23h	1	0.444
	2	0.444
	3	0.444
	Media:	0.444
11:12am/23h3	1	0.443
	2	0.443
	3	0.442
	Media:	0.443
11:42am/24h	1	0.446
	2	0.447
	3	0.446
	Media:	0.446

Cuadro A.17 Resultados de la determinación del orden de reacción medido a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software VISIONpro.

Muestra	Rep.	554.00nm
0. Inicial	-1440 min	0.549
	1	0.468
	2	0.469
	3	0.469
1. T-1h	-60 min	0.469
	1	0.482
	2	0.482
	3	0.481
2. T-45min	-45 min	0.482
	1	0.481
	2	0.481
	3	0.481
3. T-30min	-30 min	0.481
	1	0.479
	2	0.479
	3	0.479
4. T-15min	-15 min	0.479
	1	0.492
	2	0.491
	3	0.491
5. 24h	0 min	0.481
	1	0.467
	2	0.467
	3	0.467

5.1 24h	0 min	0.479
	1	0.472
	2	0.473
	3	0.473
L1. 11:15	15 min	0.473
	1	0.461
	2	0.461
	3	0.461
L2. 11:30	30 min	0.461
	1	0.461
	2	0.462
	3	0.461
L3. 11:45	45 min	0.461
	1	0.449
	2	0.448
	3	0.448
L4. 12:00	60 min	0.448
	1	0.443
	2	0.444
	3	0.443
L5. 12:15	75 min	0.444
	1	0.442
	2	0.442
	3	0.442
L6. 12:30	90 min	0.442
	1	0.43

	2	0.43
	3	0.431
L7. 12:45	105 min	0.43
	1	0.423
	2	0.423
	3	0.423
L8. 1:00	120 min	0.423
	1	0.419
	2	0.42
	3	0.42
L9. 1:15	135 min	0.42
	1	0.418
	2	0.418
	3	0.418
L10. 1:30	150 min	0.418
	1	0.409
	2	0.409
	3	0.409
L11. 1:45	165 min	0.409
	1	0.406
	2	0.404
	3	0.402
L12. 2:00	180 min	0.404

B. Resultados intermedios

Cuadro B.18 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple.

Especímen cúbico N°	Resistencia (MPa) - Edad 3 días y mezclado simple			
	0 % contenido de TiO ²	0.1 % contenido de TiO ²	2.5 % contenido de TiO ²	5 % contenido de TiO ²
1	18.31	17.76	17.40	18.30
2	18.30	18.25	17.88	17.73
3	18.29	18.41	17.77	18.38
Promedio	18.30	18.10	17.70	18.10

Cuadro B.19 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 7 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado simple.

Especímen cúbico N°	Resistencia (MPa) - Edad 7 días y mezclado simple			
	0 % contenido de TiO ²	0.1 % contenido de TiO ²	2.5 % contenido de TiO ²	5 % contenido de TiO ²
1	21.93	23.31	21.56	22.24
2	22.90	23.01	22.11	22.06
3	22.77	21.80	22.40	21.11
Promedio	22.50	22.70	22.00	21.80

Cuadro B.20 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 3 días de curado de los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.

Especímen cúbico N°	Resistencia (MPa) - Edad 3 días y mezclado por molido			
	0 % contenido de TiO ²	0.1 % contenido de TiO ²	2.5 % contenido de TiO ²	5 % contenido de TiO ²
1	21.39	20.10	18.64	19.30
2	21.58	21.26	19.51	18.43
3	21.72	20.07	18.82	18.79
Promedio	21.60	20.50	19.00	18.80

Cuadro B.21 Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a 7 días de curado de

los especímenes de mortero preparados con distintas concentraciones de dióxido de titanio por mezclado con molido.

Especímen cúbico N°	Resistencia (MPa) - Edad 7 días y mezclado por molido			
	0 % contenido de TiO ²	0.1 % contenido de TiO ²	2.5 % contenido de TiO ²	5 % contenido de TiO ²
1	26.95	26.43	24.44	23.65
2	27.44	26.40	24.71	23.25
3	27.81	26.80	23.50	24.89
Promedio	27.40	26.50	24.20	23.90

Cuadro B.22 Resumen de resultados del impacto de la adsorción sobre la concentración de la Rodamina B en la muestra, en un ambiente controlado a temperatura ambiente y a oscuras. Se le mide la absorbancia a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software VISIONpro. Se calcula la concentración utilizando la ecuación de la recta de la curva de calibración.

Tiempo / (h)	Absorbancia	Concentración / (mg/L)
0.5	0.546	2.954
1	0.547	2.959
1.5	0.54	2.922
2	0.537	2.906
2.5	0.531	2.874
3	0.526	2.847
3.5	0.53	2.869
4	0.499	2.703
4.5	0.511	2.767
22	0.445	2.415
22.5	0.443	2.404
23	0.445	2.415
23.5	0.444	2.410

24	0.443	2.404
24.5	0.446	2.420
0.5	0.546	2.954

Cuadro B.23 Resultados de la evaluación sobre la reacción de la Rodamina B en la superficie de una pieza de cemento dopado con 5 % TiO₂ medido a la longitud de onda de máxima absorbancia de 554 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-vis y el software resultado se reporta por medio del software VISIONpro. Se calcula la concentración utilizando la ecuación de la recta de la curva de calibración.

Tiempo / (min)	Concentración / (mg/L)
-60	2.542
-45	2.611
-30	2.606
-15	2.595
0	2.595
15	2.563
30	2.500
45	2.500
60	2.430
75	2.409
90	2.398
105	2.334
120	2.297
135	2.281
150	2.270
165	2.223
180	2.196

C. Muestra de cálculos

C.1. Cálculo de la resistencia a la compresión a partir de las áreas superficiales de cada cubo, en MPa:

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (C.1)$$

Donde P es la carga máxima total en Newtons y A es el área de la superficie cargada en milímetros cuadrados. Utilizando los resultados del Cuadro A.2 , fila 4 y columna 3, se obtiene:

$$f_m = \frac{45627}{50^2} = 18.25 \text{ N}$$

La resistencia a la compresión se muestra en el Cuadro B.18, fila 4 y columna 3.

C.2. Cálculo de la diferencia mínima significativa LSD para los ensayos donde se rechaza la hipótesis nula, en edades de 3 días molido y 7 días molido:

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{\frac{2 * MC \text{ Ajust.}}{n}} \quad (C.2)$$

Donde el valor de $t_{\alpha/2, N-k}$ se lee de las tablas de distribución T de Student con $N-k$ grados de libertad, el MC Ajust. es el cuadrado medio del error y se obtiene del Cuadro 5.8 para la edad de mezclado de 7 días molido y n es el número de observaciones por cada factor.

$$LSD = t_{0.05/2, 12-4} \sqrt{\frac{2 * 0.3435}{3}} = 1.10$$

El resultado del LSD se muestra en el Cuadro 5.10, columna 4.

C.3. Cálculo del contenido de aire en porcentaje de volumen:

$$\text{Contenido de aire, \% volumen} = 100 - W * \frac{182,7 + A/C}{2000 + 4 * A/C} \quad (C.3)$$

Donde W es la masa de 400 mL de mortero en gramos, A/C es la relación agua cemento basada en la masa del cemento utilizado. Utilizando los resultados de masa del mortero del Cuadro 5.14, fila 3, columna 2 y los resultados de la masa de agua y cemento del Cuadro A.9, filas 3 y 4, columna 2, se obtiene:

$$\text{Contenido de aire, \% volumen} = 100 - 847.4 * \frac{182,7 + 246/350}{2000 + 4 * 246/350} = 6$$

El resultado del contenido de aire se muestra en el Cuadro 5.15, fila 3 y columna 2.

C.4. Cálculo de la densidad del cemento hidráulico patrón y cemento con 5 % TiO₂:

$$\rho = \frac{M_t - M_a}{V} \quad (\text{C.4})$$

Donde ρ es la densidad del cemento en gramos por centímetros cúbicos; M_t es la masa del frasco conteniendo el líquido y el cemento, en gramos; M_a es la masa del frasco con el líquido en la primera graduación, en gramos y V es el volumen desplazado del líquido en centímetros cúbicos. De acuerdo con los resultados del Cuadro 5.16, filas de la 3 a la 6 y columna 2, se obtiene:

$$\rho = \frac{379.7 - 317.1}{22.9 - 0.3} = 2.77 \text{ g/cm}^3$$

La densidad del cemento obtenida se muestra en el Cuadro 5.16, fila 9 y columna 2.

C.5. Cálculo del promedio de las lecturas de expansión de barras de mortero sumergidas en agua por 14 días:

$$\Delta L = \frac{L1 + L2 + L3}{3} \quad (\text{C.5})$$

Donde ΔL es el promedio de las lecturas de expansión y L es la lectura del equipo de cambio de longitud el cual compara la longitud de un patrón de 250 mm contra la longitud del de la pieza antes y después de estar almacenada en agua durante 14 días. De acuerdo con los resultados del Cuadro A.11, fila 3 y columnas de la 2 a la 4, se obtiene:

$$\Delta L = \frac{4.803 + 4.802 + 4.802}{3} = 4.802 \text{ mm}$$

El promedio de la diferencia de longitud obtenida se muestra en el Cuadro 5.17, fila 5 y columna 3.

C.6. Cálculo de la concentración utilizando la ecuación (5.1) de la recta de la curva de calibración:

$$ABS = 0.1874 * [Rodamina B] - 0.0076$$

$$[Rodamina B] = \frac{ABS + 0.0076}{0.1874} \quad (C.6)$$

De acuerdo con los resultados del Cuadro B.22, fila 2 y columna 2, se obtiene:

$$[Rodamina B] = \frac{0.546 + 0.0076}{0.1874} = 2.954 \text{ mg/L}$$

La concentración de Rodamina B obtenida se muestra en el Cuadro B.22, fila 2 y columna 3.

ANEXOS

Anexo I. Resultados de la actividad fotocatalítica determinados según la norma UNI 11259.



Anexo II. Encuesta sobre el kit de cemento utilitario destinada a personas experimentadas.

Encuesta: Kit de cemento utilitario para expertos

Este cuestionario tiene como propósito conocer la aceptación de un posible kit de cemento utilitario y va a tomarle menos de 10 minutos de su tiempo. Lo anterior forma parte del proyecto final de graduación del estudiante Joshua Rodríguez para Ingeniería Química en la Universidad de Costa Rica. Muchas gracias!

 jrodguadamuz@gmail.com (not shared) [Switch account](#) 

* Required

¿Cuál es su nombre y su edad? *

Your answer

¿A qué se dedica y qué disfruta hacer en su tiempo libre? *

Your answer

¿Cómo ha sido su experiencia con la creatividad y materiales? ¿Y con que materiales a trabajado? *

Your answer

¿Qué redes sociales o medios de información utiliza y ha visto algo en estos medios sobre otros que realicen lo mismo que usted? *

Your answer

¿Qué opina sobre tener su propio emprendimiento o su propia empresa? ¿Cómo ha sido su experiencia? *

Your answer

¿Conoce cómo se realizan manualidades en cemento? ¿Podría mencionar algunos objetos de cemento que considere manualidades? *

Your answer

¿Conocía lo que son los aditivos para cemento? *

Los aditivos son ingredientes del concreto o mortero que, además del agua, arena, y cemento se agregan antes o durante el mezclado. Y hay de todo tipo, para que se endurezca más rápido, para que pegue mejor a las paredes, para que resista el hielo y muchos más.

- Sí
- No

¿Le gustaría leer un poco de información sobre mi proyecto? *

- Sí
- No

Next

Page 1 of 3

Clear form

Encuesta: Kit de cemento utilitario para expertos

 jrodguadamuz@gmail.com (not shared) [Switch account](#) 

* Required

Kit de cemento utilitario

El proyecto de graduación consiste en trabajar el cemento con un nuevo aditivo que no es dañino para la salud. La utilidad del aditivo es proteger al cemento y lograr que se manche menos sin afectar su desempeño.

La tecnología es nueva en Costa Rica, no así en otras partes del mundo, sin embargo, para introducirlo al país primero debe pasar las normas nacionales sobre cemento y construcción. Aunque nos faltan muchas reglas para que podamos hacer edificios, casas, aceras o demás, ya le estamos buscando usos, algo en lo que la gente esté interesada.

El aditivo funciona con el sol, cuando se expone a la energía del sol puede limpiar algunos tipos de suciedad que haya caído en la pieza de cemento como moho u hongos, pero también estamos estudiando cuan capaz es de limpiar un poco el aire, eliminando el humo o el smog. El aditivo se llama dióxido de titanio.

La propuesta inicial se conoce como "cemento autolimpiante" por su capacidad para eliminar algunas manchas y por la fama que posee este nombre en otros países. La propuesta comercial a pequeña escala consistía en estudiar la aceptación de cemento autolimpiante en bolsas selladas de uno o dos kilos a quienes estuvieran interesado en hacer sus propias piezas como macetas, joyeros para colocar cerca de ventanas o decoraciones de jardín.

El precio del cemento homogéneamente mezclado con el aditivo rondaría los 2000 colones por 2 kilogramos de material sellado y no incluiría ni arena ni el envío, pero sí un corto manual con información del material y las principales diferencias del cemento convencional, por ejemplo, la cantidad de agua necesaria para prepararlo.

¿Considera que la propuesta inicial es llamativa y por qué? *

Your answer

¿Que aspectos del aditivo considera claros y que aspectos considera confusos?

*

El propósito de la pregunta es conocer que tan confusa puede resultar la información.

Your answer

Back

Next

Page 2 of 3

Clear form

Encuesta: Kit de cemento utilitario para expertos

 jrodguadamuz@gmail.com (not shared) [Switch account](#)



* Required

Kit de cemento utilitario

El Kit de cemento utilitario es la propuesta final de este estudio. Consiste en una bolsa sellada de cemento mezclado junto a un nuevo aditivo que protege al cemento y logra que se manche menos, una bolsa pequeña de arena, un juego de moldes y un manual de instrucciones detalladas.

La bolsa sellada de cemento y el aditivo pesarían medio kilogramo, la bolsa de arena pesaría 1.5 kilogramos. Los moldes, que serán para macetas de distintas formas, vendrán con un manual de instrucciones detalladas del paso a paso sobre como mezclar los materiales y finalmente como desmoldar la maceta. El precio rondaría entre los 3.000 y 9.000 cólonos.

¿Si se le propone este kit, estaría interesad@ en comprarlo o formar un convenio comercial con el proyecto? *

Your answer

¿Considera que este conjunto brinda lo necesario para crear sus propias piezas de cemento en casa? *

Sí

No

Other:

[Back](#)

[Submit](#)

 Page 3 of 3

[Clear form](#)

Anexo III. Encuesta sobre el kit de cemento destinado a 80 personas.

Encuesta: Kit de cemento utilitario

Este cuestionario tiene como propósito conocer la aceptación de un posible kit de cemento utilitario y va a tomarle menos de 4 minutos de su tiempo. Lo anterior forma parte del proyecto final de graduación del estudiante Joshua Rodríguez para Ingeniería Química en la Universidad de Costa Rica. Favor llenar el formulario una única vez, agradecemos su tiempo.

 jrod shared [Switch account](#) 

* Required

¿En qué rango de edad (años cumplidos) se encuentra? *

Menos de 18 años

De 19 a 29

De 30 a 40

De 41 a 50

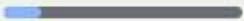
De 51 a 60

Más de 61 años

2. ¿Ha hecho alguna manualidad con cemento o estaría dispuesto a intentarlo? *

Sí

No

[Next](#)  Page 1 of 6 [Clear form](#)

Manualidades con cemento

Complete la oración: considero que trabajar con cemento es... *

1 2 3 4 5 6

Muy fácil Muy difícil

Cuando compra una planta, ¿en que aspectos se fija? *

Seleccione todas las que apliquen.

Como regalo

Que tenga un maceta bonita

Como algo decorativo

Que ayude al medio ambiente

Para tenerla en exteriores

Para tenerla en interiores

No suelo comprar plantas

Other: _____

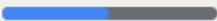
¿Tiene objetos de diseño utilitario en cemento? *

Diseño utilitario son objetos de decoración, además de ser prácticos, útiles y funcionales.

Sí

No

Desconozco

Back Next  Page 3 of 6 Clear form

Diseño Utilitario en Cemento

¿Qué objetos utilitarios de cemento tiene? *

Seleccione todas las que apliquen

Artículos de escritorio

Adornos

Macetas

Vajilla

Artículos de cocina

Joyeros

Other: _____

Back Next  Page 4 of 6 Clear form

Encuesta: Kit de cemento utilitario



jrod

(shared) [Switch account](#)

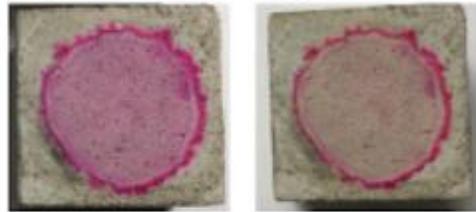
* Required

Acerca del Kit de Cemento

En este proyecto le añadimos un nuevo producto al cemento que permite combatir algunas manchas cuando esta expuesto al sol. El producto propuesto consistiría en un kit con este cemento, arena, moldes y un manual de instrucciones para que cualquiera pueda construir sus piezas de cemento en casa.

A continuación se muestran un par de imágenes ilustrativas sobre la auto limpieza del cemento que vendría en el Kit. Este cemento es capaz de descomponer cierta cantidad de algunos contaminantes como el smog del aire, pequeñas cantidades de moho y hollín gracias a los rayos del sol. De aquí el nombre cemento autolimpiante. A continuación se muestran un par de imágenes sobre el experimento de autolimpieza:

Cemento autolimpiante manchado de rosado. Antes y después de estar bajo luz negra durante 4 horas



Cemento común manchado de rosado. Antes y después de estar bajo luz negra durante 4 horas

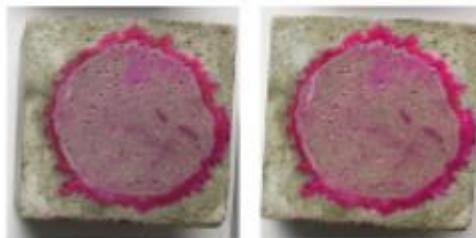


Imagen ilustrativa sobre los moldes plásticos que podrían venir incluidos en el kit de cemento, arena, molde y manual de instrucciones.



¿Compraría un producto como el mencionado anteriormente? *

- Sí
- No

¿Le gustaría que se incluya más información acerca del efecto autolimpiante para comprenderlo mejor? *

- Sí
- No

Back

Next

Page 5 of 6

Clear form

Kit de cemento utilitario

Ordene según su prioridad los factores que le gustaría que tuviera un kit de este estilo. Considere que 1 es lo menos importante y 3 lo más importante. *

	1	2	3
Cantidad de moldes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Que incluya todos los accesorios y herramientas necesarias sin falta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Que cada molde se pueda utilizar más de una vez	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Variedad de moldes para armar objetos diferentes a macetas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Precio accesible	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

¿Dónde preferiría comprar este producto? *

Seleccione todas las que apliquen

Supermercados

Tiendas de regalo

Floristerías

Internet

¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un producto de este estilo que incluya medio kilogramo de cemento autolimpiante sellado, un kilogramo y medio de arena, 1 molde y el manual? *

Entre 3.000 - 5.000

Entre 5.000 - 7.000

Entre 7.000 - 9.000

Más de 9.000

Back Submit  Page 6 of 6 Clear form