

DESARROLLO DE UN MORTERO
MODIFICADO CON DIOXIDO DE TITANIO
PARA INHIBIR EL CRECIMIENTO DE LA
BACTERIA *Escherichia coli*

Autor: Daniel Escarcega Huerta

2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



Nombre de la tesis:

DESARROLLO DE UN MORTERO
MODIFICADO CON DIOXIDO DE TITANIO
PARA INHIBIR EL CRECIMIENTO DE LA
BACTERIA *Escherichia coli*

Tesis

Que como parte de los requisitos
para obtener el grado de

INGENIERO CIVIL

Presenta:

Daniel Escarcega Huerta



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil

DESARROLLO DE UN MORTERO MODIFICADO CON DIOXIDO DE
TITANIO PARA INHIBIR EL CRECIMIENTO DE LA BACTERIA *Escherichia*
coli

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

Daniel Escarcega Huerta

Dirigida por:

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza

Presidente

Dra. Hilda Romero Zepeda

Secretario

M.I Gerardo Medellín Aguilar

Vocal

Dr. Omar Chávez Alegría

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Diciembre 2020
México.

*Al fin y al cabo, somos lo que hacemos para dejar de ser lo
que somos...*

(Eduardo Galeano)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Esta tesis se desarrolló en el Laboratorio de Geotecnia Ambiental en el marco del proyecto CONACYT 270161.

DEDICATORIA

Dirección General de Bibliotecas UAQ

A mis padres por todo su apoyo y paciencia con el que siempre conté,

A mi familia y amigos,

A mí, por la fuerza de mis convicciones,

Y a aquellos que ya no le tienen miedo a la vida...

AGRADECIMIENTOS

De antemano quiero agradecer, a la educación pública, que fue el medio elemental de mi formación académica y en más de una manera de mi formación personal.

Al **Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza**, le agradezco su disposición, su tiempo, sus valiosas observaciones y aportes que fueron esenciales para la realización de esta tesis. Aplaudo su interés y curiosidad que tiene hacia la investigación y espero que contagie ese espíritu a las próximas generaciones.

Reconozco a la Universidad Autónoma de Querétaro, a la Facultad de Ingeniería, con todos sus profesores, trabajadores, compañeros y amigos, como los alquimistas de una mejor vida para mí. Mantengo la firme creencia que poner un pie en la universidad te cambia la vida por completo, sin olvidar el inherente deber de poner nuestro talento y esfuerzos al servicio de algo más grande que nosotros mismos.

Agradezco al Licenciado en Microbiología y gran amigo personal, **Jairo Sánchez Flores**, por su amistad, por las siempre sinceras atenciones y disposición de ayudarme sin pedir nada a cambio.

A la **Ing. Damaris de Jesús Rubio Ordaz**, agradezco infinitamente por su sutil pero incesante manera de alentarme a ser mejor cada día en lo académico, profesional y cuestiones personales.

A mí amiga y abuela, la **Sra. María del Carmen Hernández López**, por su eterna valentía y fuerza que siempre mantuvo en vida.

A **mi hermano**, por ser el día de hoy, un ejemplo de dedicación y empeño por el trabajo duro, haciendo su de su futuro y del que los que lo rodean, uno brillante.

Al **Sr. Víctor Antonio Escarcega Hernández al que yo llamo *mi padre***, que mientras pudo me enseñó lo necesario para ser un buen hombre, le agradezco profundamente por haberme apoyado incondicionalmente hasta su último aliento, que, de haber postergado, no imagino a otra persona que estuviera más orgullosa, de mí, que él.

Por último, mi agradecimiento e incommensurable admiración, a **mi madre**, la **Sra. Flor Angélica Huerta Ambriz**, por su cariño y apoyo que muestra todos los días a su familia, alguien que siempre tuvo muchos miedos, pero también siempre comprendió que hay cosas más importantes que el miedo y siguió adelante.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

INDICE GENERAL

Contenido

Página

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
INDICE GENERAL.....	IV
INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
SUMMARY.....	XI

Introducción.....	1
--------------------------	----------

Capítulo 1. Antecedentes.....	4
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Planteamiento del problema	6
1.3 Justificación	7
1.4 Hipótesis.....	8
1.5 Objetivo general.....	8

Capítulo 2. Fundamentación Teórica.....	9
2.1 Generalidades del concreto, cemento y mortero	10
2.1.1 Cemento Portland.....	11
2.1.2 Mortero	11
2.2 Conceptos básicos del TiO ₂ como catalizador en el proceso de fotocátalisis heterogénea	13
2.2.1 Fotocátalisis heterogénea.....	14
2.2.2 Semiconductores en el mecanismo de la fotocátalisis heterogénea..	15
2.2.3 Dióxido de titanio	16
2.3 Efecto antimicrobiano del TiO ₂	17
2.3.1 Estrés oxidativo por formación de especies reactivas de oxígeno	18
2.4 <i>Escherichia coli</i>	19

2.5	Materiales de construcción antibacteriales	20
Capítulo 3.	Materiales y Métodos	22
3.1	Revisión bibliográfica.....	23
3.2	Adquisición y caracterización de las partículas de TiO ₂ -1%Fe ⁺³	25
3.3	Elaboración de probetas de mortero.....	26
3.3.1	Elaboración de mortero y colado de probetas	26
3.3.2	Proporcionamiento y elaboración de recubrimiento con pasta de cemento	27
3.4	Esterilización de materiales, equipo y probetas.....	29
3.5	Toma de pH de las probetas	30
3.6	Obtención del Cultivo de <i>Escherichia coli</i>	31
3.7	Siembra de la cepa.....	32
3.8	Preparación de medio de cultivo Luria Bertani	32
3.9	Preparación de placas con medio LB y agar	33
3.10	Preparación del preinoculo e inoculación del recubrimiento de mortero.....	35
3.11	Muestreo.....	36
3.11.1	Valoración del inoculo	36
3.11.2	Muestreo	37
3.11.3	Recuento bacteriano	38
3.12	Pruebas cíclicas.....	39
Capítulo 4.	Resultados y Discusión.....	41
4.1	Caracterización de partículas de TiO ₂ – 1%Fe ⁺³	42
4.2	pH de las probetas.....	44
4.3	Observaciones generales del recubrimiento.....	44
4.4	Morfología macroscópica de la <i>E. coli</i>	45
4.5	Cinética microbiana	46
4.5.1	Efecto inhibitorio del mortero modificado con TiO ₂ -1%Fe ⁺³ contra la bacteria <i>Escherichia coli</i>	46
4.5.2	Ajuste al modelo de Malthus.....	48

4.5.3	Ajuste al modelo Logístico	49
4.5.4	Efecto inhibitorio del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria <i>Escherichia coli</i> en ensayos cíclicos.....	51
4.5.5	Efecto inhibitorio del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i>	55
4.6	Análisis de costos	56
4.6.1	Análisis de costo por m^2 de aplanado con mortero modificado con dióxido de titanio.	56
4.6.2	Análisis de costo por m^2 de superficie tratada con pintura antimicrobiana.....	58
Conclusiones		60
5.1	Conclusiones	61
5.2	Líneas futuras de investigación	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA		63
ANEXOS		66
ANEXO I.- Ficha técnica de la adquisición de cultivo de bacteria <i>Escherichia Coli</i> Top 10		66

INDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Esquema del mecanismo de fotocatalisis.....	14
Figura 2. Fases cristalinas del TiO ₂	17
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de revisión bibliográfica. Error! Marcador no definido.	
Figura 4. Estudio de la granulometría del material en el analizador de partículas.....	26
Figura 5. Cribado de arena por la malla No.20.....	27
Figura 6. Probetas coladas con mortero 3:1 cemento-arena.....	27
Figura 7. Aplicación del recubrimiento a las probetas.....	28
Figura 8. Probetas con el recubrimiento y envueltas.....	29
Figura 9. Esterilización con autoclave.....	29
Figura 10. Pulverización de probetas.....	30
Figura 11. Homogenización de la solución en agitador magnético.....	31
Figura 12. Lectura del pH de la solución con un equipo multiparamétrico.....	31
Figura 13. Medio de cultivo Luria Bertani deshidratado.....	33
Figura 14. Medio de cultivo LB hidratado.....	33
Figura 15. Agar bacteriológico.....	34
Figura 16. Distribución de medio LB y agar en cajas Petri.....	34
Figura 17. Preparación del preinoculo.....	35
Figura 18. Inoculación de probetas.....	36
Figura 19. Plaqueo de la dilución 1x10 ⁻⁵ del inoculo.....	36
Figura 20. Muestreo y preparación de las diluciones.....	37
Figura 21. Incubación de las probetas.....	38
Figura 22. Incubación de las muestras de los tiempos t ₁ , t ₂ , t ₃ , t ₄ y t ₅ de las probetas de mortero modificado y de control.....	38
Figura 23. Conteo en placa de UFC en muestra de probeta de mortero de control luego de incubación de 18 h.....	39
Figura 24. Diagrama de flujo del procedimiento de muestreo Error! Marcador no definido.	
Figura 25. Difractograma de Rayos X de las partículas de TiO ₂ dopado al 1% de hierro.....	42
Figura 26. Curva granulométrica de las partículas de TiO ₂ dopadas al 1% de hierro.....	43

Figura 27. Acabado de la superficie de mortero convencional (izquierda) y acabado con recubrimiento (derecha).	45
Figura 28. Medición del diámetro de las colonias.....	46
Figura 29. Actividad antibacterial del mortero modificado con TiO_2 - $1\%\text{Fe}^{+3}$ contra la bacteria <i>Escherichia coli</i>	47
Figura 30. Ajuste al modelo de Malthus de la actividad antibacterial del mortero modificado con TiO_2 - $1\%\text{Fe}^{+3}$ contra la bacteria <i>Escherichia coli</i>	49
Figura 31. Ajuste al modelo logístico de la actividad antibacterial del mortero modificado con TiO_2 - $1\%\text{Fe}^{+3}$ contra la bacteria <i>Escherichia coli</i>	50
Figura 32. Actividad antibacterial del mortero modificado con TiO_2 - $1\%\text{Fe}^{+3}$ contra la bacteria <i>Escherichia coli</i> en ensayos cíclicos.....	52
Figura 33. Plaqueo de muestra de probeta de mortero convencional a los 70 minutos de exposición a luz visible en ciclo número 4.	54
Figura 34. Plaqueo de muestra de probeta de mortero modificado con dióxido de titanio a los 70 minutos de exposición a luz visible en ciclo número 4	54
Figura 35. Actividad antibacterial del mortero modificado con TiO_2 - $1\%\text{Fe}^{+3}$ contra la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i>	55

Dirección General de Bibliotecas UAQ

INDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Grupos patógenos de la bacteria Escherichia coli.	20
Tabla 2. Proporcionamiento del recubrimiento.....	28
Tabla 3. Especificaciones físicas del $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$	43
Tabla 4. Morfología macroscópica de las colonias de E. coli.....	45
Tabla 5. Precio Unitario por m2 de aplanado de 1.5 cm de espesor, acabado fino en muros con mortero cemento-arena 1:3, modificado con TiO_2 proporción 10% cemento- TiO_2	57
Tabla 6. Total Precio Unitario por m2 de aplanado de 1.5 cm de espesor, acabado fino en muros con mortero cemento-arena 1:3.....	58
Tabla 7. Precio Unitario por m2 de pintura acrílica antibacterial, en muros con aplanado fino de mortero.	59

RESUMEN

Las enfermedades nosocomiales dentro de hospitales, así como en escuelas, centros de trabajo y lugares cerrados en general, son un peligro de salud pública y propicia un uso extensivo de antibióticos, cuyo uso no controlado genera lo que se llaman súper bacterias. La incorporación de agentes biocidas, como lo son las partículas de dióxido de titanio y su mecanismo de fotocatalisis heterogénea, a un material de un uso tan frecuente y generalizado en la industria de la construcción como lo es el cemento, crea una alternativa en el desarrollo de superficies antisépticas como medida de prevención de enfermedades infecciosas. Por lo antes mencionado, en el presente trabajo de investigación se realizaron pruebas de inhibición de crecimiento y desinfección de la bacteria de *Escherichia coli* Top 10, en superficies constituidas por mortero con relación cemento-arena 1:3 modificado con partículas de dióxido de titanio (TiO_2) dopadas con hierro al 1% ($1\% \text{Fe}^{3+}$), con una proporción másica cemento- TiO_2 - $1\% \text{Fe}^{3+}$ del 10%, expuestas a luz visible en diferentes intervalos de tiempo. Los resultados mostraron que el mortero modificado tiene propiedades antisépticas que inhiben el crecimiento e incluso eliminan la población de bacterias *Escherichia coli*, con una eficiencia del 100% a los 70 minutos de exposición a luz visible, colocando a este material como un efectivo tratamiento antibacterial para superficies.

Palabras clave: *Escherichia coli*, dióxido de titanio, mortero, fotocatalisis heterogénea.

SUMMARY

Nosocomial diseases within hospitals, as well as in schools, workplaces, and closed places in general, are a public health hazard and promote the extensive use of antibiotics, whose uncontrolled use generates what are called superbacteria. The incorporation of biocidal agents, such as titanium dioxide particles and their heterogeneous photocatalysis mechanism, to a material as frequent and widespread use in the construction industry as cement, creates an alternative in the development of antiseptics surfaces as a measure to prevent infectious diseases. Thus, in this research work, growth inhibition and disinfection test of *Escherichia coli* Top 10 bacteria were carried out in surfaces made of mortar with cement-sand ratio of 1:3, modified with titanium dioxide particles (TiO₂) doped at 1% iron (1% Fe⁺³), with a cement-TiO₂-1% Fe⁺³ mass ratio of 10%, exposed to visible light in different time intervals. The results showed that the modified mortar has antiseptic properties that inhibit growth and even eliminate the population of *Escherichia coli* bacteria, with an efficiency of 100% at 70 minutes of exposure to visible light, placing this material as an effective antibacterial treatment for surfaces.

Keywords: *Escherichia coli*, titanium dioxide, mortar, heterogeneous photocatalysis.

Introducción

Dirección General de Bibliotecas UAQ

La contaminación del aire en espacios cerrados es un serio problema de salud pública y representa una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en todo el mundo (Déoux, 2013). La presencia de poblaciones microbianas en ambientes interiores húmedos es de las principales causas de la degradación de la calidad del aire en espacios cerrados. En el año 2006, la Organización Mundial de la Salud, elaboró directrices para evaluar la calidad del aire en interiores y describió las tres causas de contaminación más relevantes para la salud pública:

- Contaminantes biológicos.
- Contaminantes químicos.
- Contaminantes debido a la combustión.

La mala calidad del aire debido a contaminantes biológicos, en hospitales y centros de salud provocan infecciones nosocomiales o infecciones intrahospitalarias que son un problema de salud global que aumenta los costos de atención médica y facilita la generación selectiva de microorganismos (Arias y Vargas, 2016). Debido a lo antes mencionado son necesarios nuevos agentes y materiales antibacteriales, que eviten la proliferación de microorganismos en ambientes cerrados. La aplicación de materiales nanoestructurados ofrece nuevas posibilidades en esta área.

La fotocatalisis heterogénea ha despertado considerable interés en la última década debido a sus aplicaciones en procesos de remediación ambiental (Park, et al., 2014). Muchos semiconductores sometidos a radiación UV se han utilizado para la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos contaminantes y la inactivación de bacterias y virus en diferentes tipos de ambientes (Dizaj, et al., 2014). Uno de los semiconductores más estudiados como fotocatalizador es el dióxido de titanio (TiO_2), que debido a sus propiedades fotocatalíticas puede lograr la degradación de diferentes compuestos orgánicos, tiene propiedades antibacteriales y superhidrofílicas fotoinducidas, haciendo de este compuesto un candidato ideal para muchas aplicaciones donde las superficies sean inaccesibles para la limpieza tradicional o deban inhibir el crecimiento de bacterias patógenas (Kühn y Chberny, 2003).

Entre las soluciones para enfrentar los retos de implementar superficies que contribuyan a mejorar la calidad del aire en entornos cerrados, destaca el uso del cemento por su versatilidad, ya que se puede combinar con una amplia gama de materiales, además de ser un material de alta disponibilidad en varias partes del mundo. Por lo tanto, la integración del dióxido de titanio en materiales a base de cemento, representa una opción prometedora en el desarrollo de superficies que impidan la reproducción de microorganismos.

Dicho lo anterior en el presente trabajo se desarrolló un mortero modificado a base de partículas de dióxido de titanio dopado con hierro, en el que fue probado su actividad antibacterial contra la bacteria *E. coli* a través de la inoculación del mismo y su posterior muestreo y conteo de Unidades Formadoras de Colonias (UFC).

En el **Capítulo I** de esta tesis se dará una pequeña introducción de manera general del trabajo, hipótesis, justificación y el objetivo general de la tesis.

En el **Capítulo II** se describirán los fundamentos y antecedentes teóricos más importantes, tomando en cuenta los de mayor relevancia para la realización de esta tesis.

El **Capítulo III** estará basado en la descripción de los materiales, reactivos y métodos que se utilizaron para la elaboración de probetas de mortero, recubrimiento de pasta de cemento, la preparación del inóculo y muestreo de las probetas. Además, de los análisis físico-químicos que fueron llevados a cabo al mortero y a las partículas de dióxido de titanio.

En el **Capítulo IV** se describirán los resultados y discusiones a partir del análisis comparativo entre los datos experimentales y modelos matemáticos.

El **Capítulo V** incluye conclusiones y perspectivas generadas a partir de los resultados obtenidos, además de posibles líneas futuras de investigación.

Por último, se mencionan la bibliografía consultada para la escritura y ejecución de este trabajo.

Capítulo 1

Antecedentes

Dirección General de Bibliotecas UAQ

1.1 Antecedentes

Las infecciones nosocomiales o infecciones intrahospitalarias son un problema de salud global que aumenta los costos de atención médica y facilita la generación selectiva de microorganismos resistentes a medicamentos. La prevención y el control de las infecciones nosocomiales requieren un censo del tipo de microorganismo presente en hospitales y unidades médicas que causan dichas infecciones intrahospitalarias.

A pesar de que en México no existe una estadística nacional oficial, investigadores como *Arias Flores et al. (2016)* han realizado estudios de los resultados positivos de los cultivos de las infecciones nosocomiales reportadas por el sistema de Vigilancia Epidemiológica Hospitalaria del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) durante el año 2013.

En esos estudios se reportaron los microorganismos más frecuentes y los de mayor relevancia epidemiológica, concluyendo con la identificación de las bacterias *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y a la *Pseudomonas aeruginosa* como los principales microorganismos que se deben combatir. Al ser el IMSS una institución que provee servicios médicos a casi la mitad de la población mexicana, se puede inferir que ese estudio se acerca a un comportamiento nacional de la etiología de las infecciones nosocomiales.

Fujishima y Honda (1967) descubrieron el fenómeno de la descomposición fotocatalítica cuando se expone un electrodo de dióxido de titanio (TiO_2) a una luz intensa, más tarde fue llamado el efecto Honda-Fujishima. Actualmente, el llamado proceso de fotocatalisis heterogénea ha abierto muchas áreas de investigación y ubica al TiO_2 como un material extensamente aplicado como alternativa en la remediación de calidad del aire y agua.

Ahmad y Sardar (2013) encontraron que las nanopartículas (NP) de TiO_2 suspendidas en el caldo o medio Luria-Bertani (LB) muestran efectos inhibitorios contra el crecimiento de la bacteria *E. Coli* luego de ser inoculados e incubados por

un periodo de 20 horas. Considerando así, al TiO_2 como un potente compuesto antibacteriano con aplicaciones industriales y médicas.

Si bien se ha estudiado los efectos de la actividad antibacterial en dilución de NP de TiO_2 con diferentes tipos de dopaje, muy pocos estudios se han realizado a superficies compuestas de la combinación de concreto y TiO_2 a fin de evaluar sus propiedades antisépticas.

Algunas de esas evaluaciones se llevaron a cabo por parte de Janus *et al.* (2019) encontrando que placas de concreto tratadas con TiO_2 con diferentes tipos y proporciones de dopaje, bajo radiación de luz visible, presentan propiedades antibacteriales contra la bacteria de *E. Coli*. Además, se concluyó que el proceso de inhibición de las bacterias se debe a la destrucción de la membrana celular lo cual es típico de la inactivación fotocatalítica de las células de los microorganismos. Identificando al concreto modificado con TiO_2 como una superficie que puede ser utilizado en lugares con altos niveles necesarios de esterilización como, hospitales, construcción de tanques de almacenamiento, escuelas, etc.

1.2 Planteamiento del problema

La presencia de microorganismos patógenos en lugares cerrados, como hospitales, centros de trabajo, escuelas, tanques de agua y clínicas de salud, causan enfermedades infecciosas que a su vez pueden transmitirse de manera directa o indirectamente a otras personas, siendo la bacteria *Escherichia coli* una de las bacterias más comunes en la etiología de enfermedades infecciosas en México.

El avance en la ciencia de los materiales en los últimos años ha llevado al desarrollo de la nanotecnología ofreciendo, con la aplicación de NP, soluciones en diversos campos como en el de la electrónica, química, óptica y medicina. Debido a sus características fisicoquímicas las NP tienen la capacidad de interactuar con sistemas biológicos, lo que en algunos casos se traduce en una actividad antimicrobiana.

Los materiales tratados con NP abren una alternativa en la búsqueda de nuevos agentes antibacteriales con nuevos mecanismos de acción que tienen el potencial de reducir la resistencia antibiótica y el uso extensivo de antibióticos.

En todo el mundo el cemento participa de manera significativa en diversos sectores y es la materia prima para la elaboración del concreto que, actualmente, es el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo con una producción mundial cercana a los 13,000 millones de m³/año (Ceballos Arana, 2016). De ahí el interés de añadir NP al cemento para combinar las propiedades mecánicas del producto destino, ya sea concreto o mortero, con las propiedades desinfectantes de las NP de óxidos metálicos, como el TiO₂, y evaluar la actividad antimicrobiana de esa combinación del cemento con partículas de óxidos metálicos.

1.3 Justificación

A la fecha se han utilizado NP para modificar el concreto y evaluar la capacidad que esta mezcla tiene para controlar el crecimiento de microorganismos causantes de enfermedades infecciosas (Janus et al., 2019). No obstante, su uso para la construcción de estructuras demandaría una gran cantidad de NP, lo que podría llegar a encarecer su fabricación.

El desarrollo de un recubrimiento típico, como lo es el mortero, con el potencial de inhibir el crecimiento e incluso eliminar una bacteria causante de enfermedades infecciosas, como lo es la *Escherichia coli*, representa una ventana de oportunidad para realizar estudios posteriores con diferentes tipos de microorganismos e incluso implementar el mortero modificado con TiO₂-1%Fe⁺³ en la construcción de superficies antisépticas que ayuden en la prevención de enfermedades infecciosas nosocomiales causadas por esta y otros tipos de bacterias, en centros de salud, escuelas, centros de trabajo y espacios cerrados en general.

1.4 Hipótesis

El mortero modificado con partículas de $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ tiene propiedades antisépticas que le permiten inhibir el crecimiento de la bacteria *E. coli*.

1.5 Objetivo general

Fabricar un mortero con tratamiento fotocatalítico mediante partículas de $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ para inhibir el crecimiento de la bacteria *Escherichia coli*, medido a través de su conteo en placa, después de un periodo de exposición a luz visible.

Capítulo 2

Fundamentación

Teórica

Dirección General de Bibliotecas UNQ

2.1 Generalidades del concreto, cemento y mortero

El concreto es un material estructural con agentes reforzadores constituidos por un medio aglutinante inmerso en agregado fino (típicamente arena) y en agregado grueso (típicamente grava). En el concreto fabricado con cemento hidráulico, el aglutinante es la pasta de cemento, es decir una mezcla de cemento hidráulico y agua; el cemento hidráulico que más se usa es el cemento Portland. (Mather y Ozyildirim, 2002).

El concreto es comúnmente utilizado en la elaboración de elementos estructurales, tales como columnas, vigas, muros, cimentaciones, dinteles, cerramientos, losas etc. El concreto debe tener la suficiente resistencia como para soportar las acciones a la que la estructura está expuesta, por lo tanto, las características del concreto dependerán de las solicitaciones del proyecto.

Sin embargo, las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño Y Construcción De Estructuras De Concreto 2017 (NTC-2017) establece que la resistencia mínima a la compresión a los 28 días no será inferior a 200 kg/cm^2 para elementos estructurales de concreto ni 150 kg/cm^2 en muros de concreto reforzado de vivienda de hasta dos niveles.

A diferencia del concreto, el mortero se compone de cemento Portland mezclado con arena y agua. Su aplicación del mortero va desde la elaboración de plantillas, acabados, aplanados, junteo de mampostería, firmes etc. Su resistencia mínima a la compresión a 28 días especificado por la norma mexicana NMX-C-061 es de 79 kg/cm^2 .

Las propiedades mecánicas y endurecimiento del concreto y del mortero, son causadas por un proceso químico, el cual tiene lugar cuando el cemento hidráulico se mezcla con el agua para formar una pasta, las fases del cemento reaccionan con el agua (hidratación) para formar una estructura cementante de desarrollo lento que se adhiere a las partículas finas y gruesas y las aglutina entre sí para formar un concreto endurecido. El producto de hidratación más importante es el hidrato de silicato de calcio. (Mather y Ozyildirim, 2002).

2.1.1 Cemento Portland

El cemento Portland es un producto obtenido mediante dos materiales principales: un material con alto contenido de carbonato de calcio, como puede ser piedra caliza, greda, conchas o margas, y un material con alto contenido de sílice y aluminato como lo es la arcilla, pizarra o escoria de fundición de alto horno. También se necesita una pequeña cantidad de hierro.

Los materiales básicos se muelen finamente, se mezclan perfectamente y se calientan hasta que empieza la fusión (a una temperatura cercana a los 1480 °C), generalmente en hornos rotatorios, que pueden llegar a alcanzar más de 210 m de longitud y 5 m de diámetro. El material parcialmente fundido que se extrae del horno constituye el Clinker de cemento portland.

El Clinker se enfría y se muele hasta formar un polvo muy fino, que es el cemento portland. Durante la molienda se agrega una pequeña cantidad (del orden del 2% al 5% en peso) de sulfato de calcio (yeso) para controlar las propiedades de fraguado. (Mather y Ozyildirim, 2002)

El cemento portland consta de cuatro fases primarias: silicato de calcio (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3Al) y ferroaluminato tetracálcico (C_4AlFe). La resistencia y las propiedades del concreto derivan fundamentalmente de la hidratación de los silicatos tricálcico y dicálcico. (Mather y Ozyildirim, 2002)

2.1.2 Mortero

El mortero es una mezcla de pasta de cemento con agregado fino y su utilización se limita al pegado de mampostería, recubrimiento de muros y detalles de albañilería. Es el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado que, al agregarle agua y arena, tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo. (IMCYC, 2011)

El material finamente pulverizado puede contener uno o más de los siguientes materiales: Clinker Portland, cualquier tipo de cemento especificado en la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE, piedra caliza, arcilla, puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y yeso.

A criterio del productor puede incorporarse, además, como auxiliar de la molienda o para impartir determinadas propiedades al mortero, otros materiales en proporción tal que no sean nocivos para el comportamiento posterior del producto. (IMCYC, 2011)

Las especificaciones físicas para caracterizar la calidad del mortero se establecen de acuerdo con la determinación de la sanidad, tiempo de fraguado inicial, tiempo de fraguado final, resistencia a la compresión a siete y 28 días, contenido de aire y retención de agua. (IMCYC, 2011)

- Sanidad: Es la ausencia de un cambio volumétrico excesivo después del fraguado, provocado por la reacción de hidratación (óxido de calcio libre y óxido de magnesio libre). La expansión o contracción se determina con especímenes elaborados de una pasta de cemento hidráulico y tratados en autoclave, a la diferencia entre la longitud de la probeta antes y después de tratamiento en la autoclave se le designa como expansión o contracción del cemento.
- Tiempo de fraguado inicial y final: El fraguado es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del mortero, producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos procedentes de la reacción química del agua con los óxidos metálicos presentes en el Clinker que compone el cemento. Esta prueba se debe de efectuar de acuerdo con la norma técnica mexicana NMX-C-059-ONNCCE, la cual establece los métodos de ensayo bajo el cual se efectúa la determinación del tiempo de fraguado de las pastas cementantes hidráulicos midiendo su resistencia a la penetración de la aguja del aparato de Vicat.

- Resistencia a la compresión a 7 días y 28 días: Esta prueba se debe efectuar de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE. Esta norma mexicana establece el método de ensayo bajo el cual se determina la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos, por medio de especímenes cúbicos de 50 mm o 2 in de longitud por lado. Esta norma mexicana aplica a todos los cementantes hidráulicos que se comercialicen en México. Las probetas deben permanecer en sus moldes durante 50 h \pm 2 h antes de desmoldarse; posteriormente se almacenan en el gabinete a cuarto húmedo por cinco días más hasta su ruptura para la prueba de resistencia a siete días; las probetas restantes se sumergen en agua, hasta la edad de prueba de 28 días (IMCYC, 2011).
- Contenido de agua: Esta prueba determina la capacidad del mortero elaborado con el cemento para albañilería para generar burbujas de aire dentro de la masa de mortero durante la operación de mezclado (IMCYC, 2011).
- Retención del agua: Esta prueba tiene como objeto determinar la capacidad que tiene el mortero para retener el agua de mezclado como parte integral de la masa cuando ésta es sometida a una fuerza de succión que trata de separarla del resto de los materiales (IMCYC, 2011).

2.2 Conceptos básicos del TiO_2 como catalizador en el proceso de fotocátalisis heterogénea

Las partículas de óxidos metálicos tienen un papel importante en la investigación de nuevos materiales y sus aplicaciones debido a sus propiedades fotocatalíticas. Para entender los mecanismos de desinfección se tiene que describir los conceptos básicos que participan en la fotocátalisis heterogénea.

2.2.1 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatalisis se puede definir como una reacción de oxidación que se produce cuando la radiación solar activa un catalizador en presencia de oxígeno. Este proceso propicia la descomposición y eliminación de los contaminantes y evita la acumulación de especies o partículas indeseables en el material (Faraldos, 2012). Véase la Figura 1.

La fotocatalisis heterogénea se genera a partir de la iluminación con un fotón de un catalizador semiconductor (óxidos o sulfuros). El fotón debe tener una energía $h\nu$, igual o superior al valor de la energía de banda prohibida (E_g) o “bandgap” (que es la energía mínima necesaria para convertir el material en un conductor) del fotocatalizador para que un electrón de su banda de valencia se promueva hacia la banda de conducción. La energía de banda prohibida es la diferencia energética entre la banda de valencia y la banda de conducción del fotocatalizador (Lisbona y Haurie, 2016).

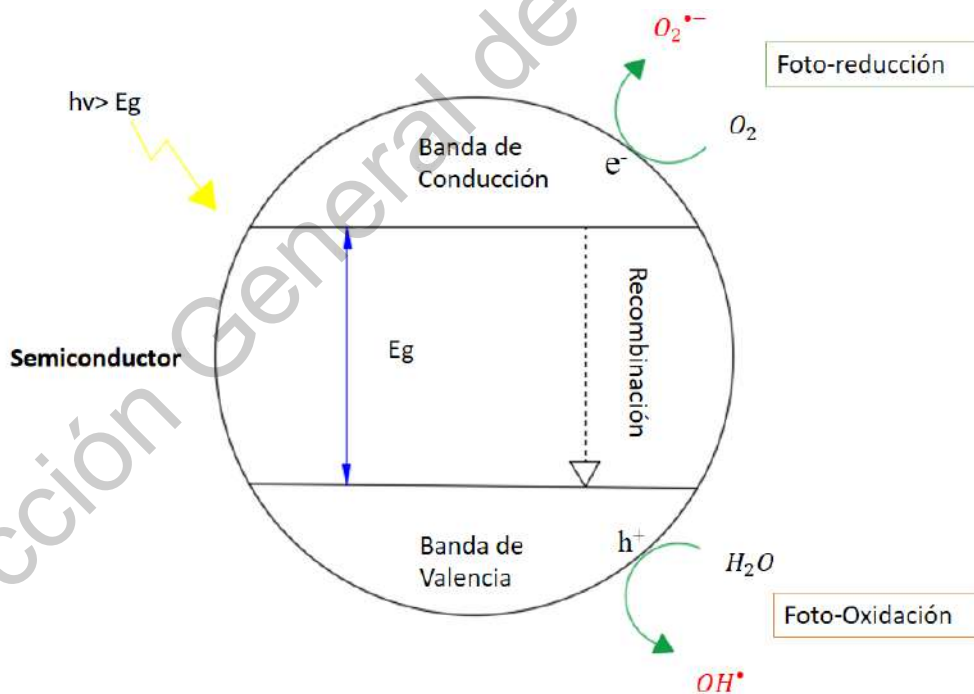
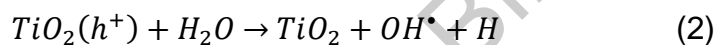
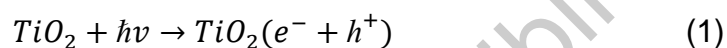


Figura 1. Esquema del mecanismo de fotocatalisis.

Fuente: Elaboración propia.

Este hecho conlleva a la formación de dos portadores de carga: electrones en la banda de conducción y un electrón vacío positivo en la banda de valencia conocido como “hueco”. Es decir, cuando un electrón deja la capa de valencia y se convierte en un electrón libre, se crea un “hueco”. Este fenómeno se conoce como par electrón-hueco (Lisbona y Haurie, 2016).

Los huecos electrónicos (h^+) reaccionan con moléculas de agua para crear los radicales hidroxilos (OH^\bullet) que son altamente reactivos (Zamudio, 2014). El oxígeno por su parte se comporta como receptor de electrones, al reaccionar con los electrones y crear aniones radicales superoxidantes ($O_2^{\bullet-}$) (Zamudio, 2014). Las siguientes ecuaciones corresponden a las reacciones mencionadas de generación de especies reactivas, las cuales toman a las partículas de TiO_2 como catalizador:



Ambos radicales, hidroxilos y los aniones radicales superoxidantes, se generan sobre la superficie del material, degradando todo tipo de microorganismos y contaminantes orgánicos además de algunos compuestos inorgánicos (Melo y Triches, 2011).

2.2.2 Semiconductores en el mecanismo de la fotocatalisis heterogénea

Los semiconductores son materiales que poseen una conductividad eléctrica variable en función de la temperatura. De igual forma, los semiconductores presentan propiedades eléctricas intermedias entre los conductores y los aislantes eléctricos, lo que posibilita la implementación de éstos. (Cohen, 2015)

Las características de los semiconductores se deben principalmente a la estructura de bandas de energía que éstos presentan (Cohen, 2015). Una banda de energía se puede definir como el solapamiento de orbitales atómicos de una red de átomos en la cual se permite el tránsito de electrones. Existen dos bandas energéticas de

interés para los semiconductores que son la banda de valencia (BV) y la banda de conducción (BC).

Ambas bandas surgen del solapamiento de los niveles atómicos de los electrones de valencia, y según su grado de ocupación, contienen los niveles ocupados más altos y los niveles desocupados más bajos. Por otra parte, existen intervalos de energía donde no están permitidos estados electrónicos. Dichos intervalos se denominan banda de energía prohibida (E_g) (gap en inglés), siendo esta la diferencia de energía entre el punto más bajo de la banda de conducción y el más elevado de la banda de valencia. (Cohen, 2015)

2.2.3 Dióxido de titanio

El dióxido de titanio (TiO_2) es un mineral natural también conocido como titania. Este elemento es de gran importancia y es muy utilizado en varios sectores por sus propiedades de dispersión, su estabilidad biológica y química, su no toxicidad, su costo reducido y por ser apto para trabajar en un amplio rango de pH. De hecho, es el pigmento inorgánico más importante en términos de producción mundial. Además, también es utilizado como bloqueador solar (en cosmética), como material de relleno en comprimidos vitamínicos, etc. (Lisbona y Haurie, 2016)

El TiO_2 se presenta en tres formas cristalinas (Figura 2): anatasa (estructura octaédrica), rutilo (estructura tetragonal) y broquita (estructura ortorrómbica), siendo las dos primeras las más comunes y la anatasa la más abierta y efectiva en el proceso de fotocatalisis para el tratamiento de aire contaminado (Lisbona y Haurie, 2016). La distancia energética entre bandas es de aproximadamente 3.2 eV para la anatasa y de 3.0 eV para el rutilo.

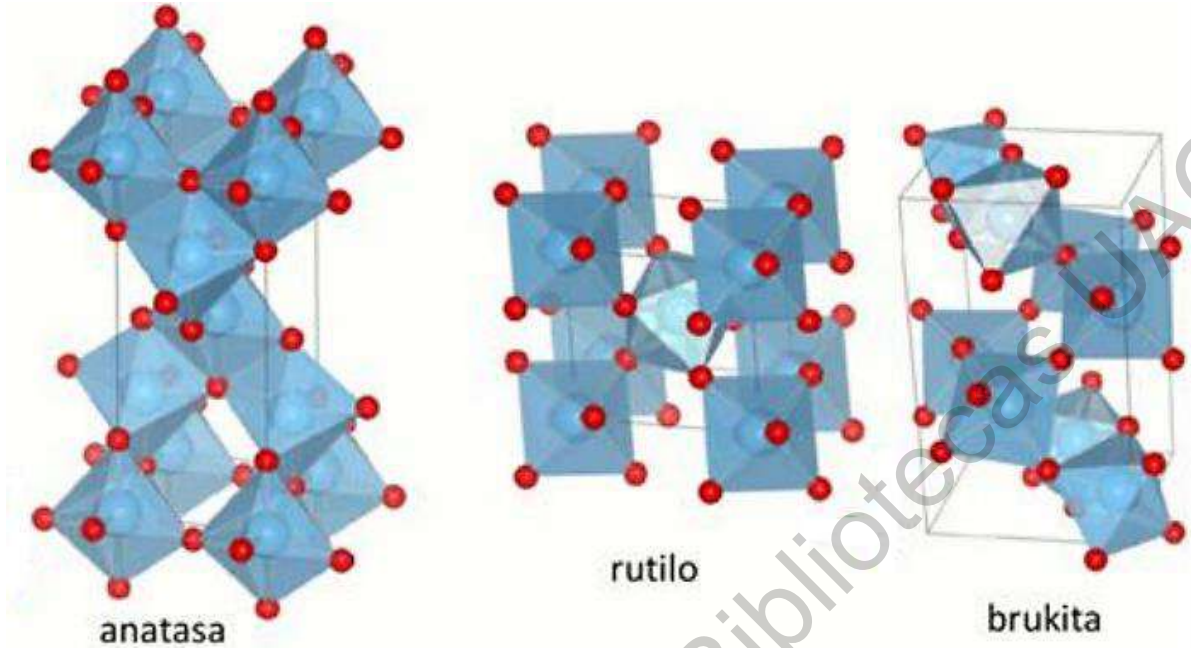


Figura 2. Fases cristalinas del TiO_2 .

Fuente: Tomada de

http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/inorganica/profes/asp/apuntes/estruct_crist.pdf

El rutilo es la estructura más común y densa, la cual refleja muy bien la luz y se utiliza como pigmento y la brukita es extremadamente rara e inestable, por lo que no se utiliza comercialmente (Lisbona y Haurie, 2016). La anatasa es termodinámicamente menos estable que el rutilo, pero su formación se ve cinéticamente favorecida a temperaturas más bajas (Lisbona y Haurie, 2016).

2.3 Efecto antimicrobiano del TiO_2

Las partículas del TiO_2 y los óxidos metálicos en general, poseen propiedades físicas y químicas que permiten su interacción con sistemas biológicos, por lo que se han convertido en una alternativa para combatir bacterias resistentes a la acción de antibióticos. Se han informado sobre diversas teorías acerca del efecto bactericida de los óxidos metálicos. El estrés oxidativo que actúa como mecanismo

antiséptico debido a la generación de radicales hidroxilos libres (OH^\cdot) y superóxido (O_2^\cdot) durante el proceso de fotocatalisis heterogénea del TiO_2 .

2.3.1 Estrés oxidativo por formación de especies reactivas de oxígeno

Las especies reactivas de oxígeno (ERO) o radicales libres son aquellas moléculas que tienen un electrón desapareado en su orbital más externo. Esto les confiere una capacidad de reacción muy elevada, por lo que son capaces de actuar en los sistemas biológicos produciendo cambios en la composición química o en la estructura de los elementos celulares que los hace incompatibles con la vida (Vázquez et al., 2018).

Los óxidos metálicos son capaces de producir distintas especies reactivas de oxígeno y pueden participar en distintos tipos de reacciones en las que pueden sufrir procesos de oxidación o reducción (Vázquez et al., 2018).

El OH^\cdot es el radical más reactivo que se conoce en química. Puede interactuar con las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y alterar la información genética de las células o estimular la peroxidación lipídica, en la que el OH^\cdot ataca a los ácidos grasos poliinsaturados, convirtiéndolos a su vez en oxidantes (Paredes y Roca, 2002), siendo los ácidos grasos un componente fundamental en la elaboración de bloques de fosfolípidos que componen la membrana celular bacteriana.

La alteración del balance en los mecanismos de producción y eliminación de las ERO, en favor de la producción, origina el estado de estrés oxidativo en la célula (Vázquez et al., 2018).

Un sólo radical OH^\cdot puede transformar cientos de moléculas de ácidos grasos en hidroperóxidos, que al descomponerse producen aldehídos, auténticos venenos para las membranas celulares (Paredes y Roca, 2002). Siendo el mecanismo de fotocatalisis el proveedor de especies reactivas de oxígeno se identifica al semiconductor TiO_2 como un agente inhibitorio en el crecimiento de microorganismos.

2.4 *Escherichia coli*

La *Escherichia coli* o *E. coli* fue descrita por primera vez por Theodor Escherich, en el siglo XIX, es la especie bacteriana más común del microbiota intestinal; se presenta como un comensal del intestino humano a pocas horas después del nacimiento (Molina y Eslava, 2015). La *Escherichia coli* y otras bacterias son necesarias para el funcionamiento correcto del proceso digestivo, además de ser responsables de producir vitaminas B y K. El tamaño promedio de los bacilos es de 0.5 μm de ancho por 3 μm de largo.

La *E. coli* es una bacteria gramnegativa lo que significa que cuando se utiliza la tinción de Gram se tiñen de rojo (Molina y Eslava, 2015). Se sabe que la mayoría de las cepas de *E. coli* son capaces de crecer a temperaturas de entre 7 °C y 46 °C siendo la escala de crecimiento óptimo 35 °C – 40 °C (Agantagelo y Mora, 2007). Además de la temperatura, el pH es un factor importante en el desarrollo de la bacteria, deteniendo su crecimiento en límites inferiores de 3.8 y superiores a 9.5, siendo 7.1 a 7.2 sus valores óptimos de proliferación.

Por lo general, son comensales inofensivos, que constituyen el 1% de la población microbiana del tracto gastrointestinal; pero algunas *E. coli* son patógenas y pueden contaminar los alimentos, el agua y el medioambiente. Diferentes cepas de *E. coli* patógenas que causan enfermedades humanas, se clasifican según el tipo de síntomas que producen (Anaya et al., 2013), algunas de las cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Grupos patógenos de la bacteria *Escherichia coli*.

Síndromes clínicos	<i>Escherichia coli</i> patógenas
Enteritis/ enfermedad diarreica	<i>E. coli</i> enteropatogénica- EPEC
	<i>E. coli</i> enterohemorrágica- EHEC
	<i>E. coli</i> enterotoxigénica- ETEC
	<i>E. coli</i> enteroagregativa- EAEC
	<i>E. coli</i> enteroinvasiva- EAEC
	<i>E. coli</i> adherente difusa-DAEC2
Infecciones del tracto urinario	<i>E. coli</i> uropatogénica- UPEC
Sepsis/meningitis	MNEC

Fuente: Anaya et al. (2013)

Dentro de las infecciones causadas por cepas patógenas de *E. coli*, la enfermedad diarreica aguda (EDA) es una de las causas más importantes de morbilidad en países en vía de desarrollo y países desarrollados (Gómez, 2014). Las cepas causantes de infecciones entéricas son nombradas *E. coli* diarreogénicas (ECD), un grupo que incluye patógenos emergentes de importancia en salud pública a nivel mundial (Nataro y Kaper, 1998).

En base a sus factores de virulencia específicos y 6 características fenotípicas, las cepas de *E. coli* causantes de diarrea se clasifican en seis grupos: enterotoxigénica (ETEC), enterohemorrágica, también conocidas como productoras de toxina Vero o toxina semejante a Shiga (EHEC o VTEC o STEC), enteroinvasiva (EIEC), enteropatógena (EPEC), enteroagregativa (EAEC) y de adherencia difusa (DAEC) (Torres y Kaper, 2005).

2.5 Materiales de construcción antibacteriales

Históricamente se ha usado la cal como acabado por sus propiedades fungicidas y desinfectantes, al ser la cal una sustancia sumamente alcalina, le dota de una buena efectividad contra los microorganismos, afectando a las paredes exteriores de las bacterias. Sin embargo, sus propiedades mecánicas y de solubilidad, la hacen ser

incompatible con los procesos de limpieza y desinfección que se realizan en cualquier superficie (De la Peña y García, 2016).

Actualmente existen numerosos tipos de superficies que ofrecen características antibacteriales y antifúngicas, estos materiales utilizan diversos mecanismos y compuestos químicos entre los cuales destacan, el ion plata, metales en estado puro y el grafeno. Algunas de estas superficies son los acabados elaborados a partir de metales, vidrio, pinturas, plástico, cerámica, superficies a base de cemento etc.

Dentro de las superficies de concreto o mortero se han sugerido ciertos materiales como aditivos para añadir propiedades fungicidas, germicidas e insecticidas. El propósito principal de estos aditivos es inhibir y controlar el crecimiento de bacterias y hongos en pisos y paredes de concreto. Los materiales que han resultado más eficaces son los fenoles polihalogenados, emulsión de dieldrín y compuestos de cobre. Las tasas de adición varían de 0,1 a 10% en masa de cemento, dependiendo de la concentración y composición de la sustancia química. (ACI 212.3R-16).

Dirección General de Bibliotecas UNQ

Capítulo 3

Materiales y Métodos

Dirección General de Bibliotecas UNQ

3.1 Revisión bibliográfica

Se buscó información acerca de la situación actual de México en cuanto a las enfermedades infecciosas en lugares cerrados. Dentro de la literatura, se buscó artículos científicos que detallaran la etiología de las enfermedades nosocomiales dentro de hospitales en México, encontrando que la bacteria *Escherichia Coli* es la principal causante de ellas. Posteriormente se realizó la búsqueda de información en libros, artículos científicos y proyectos de investigación, acerca de las características, condiciones óptimas para la reproducción y supervivencia, manejo y manipulación de la bacteria *E.coli* así como la identificación de una sepa representativa y segura para la experimentación.

Al mismo tiempo se investigaron las propiedades que tenían algunas NP de óxidos metálicos, dentro de las cuales destacan características antisépticas que tiene la titania debido al efecto de fotocatalisis que estas provocan. De manera general, dentro de la literatura, el uso de la titania como agente biocida contra microorganismo se limitaban en añadir el TiO_2 a películas delgadas de vidrio, por lo que fue necesario investigar proyectos más específicos en los que se hubieran combinado partículas de TiO_2 con materiales comunes para la construcción, que de manera particular se eligió al mortero ya que se utiliza regularmente en aplanados de muros, pisos, pega de mampostería etc.

Se encontró con la revisión de diferentes artículos, que el proceso de fotocatalisis en el dióxido de titanio no se llevaba a cabo en entornos de luz visible, solo funcionaba en el espectro de luz ultravioleta a menos que se dopara con algún otro elemento para reducir su ancho de la banda de energía gap. Con la anterior condicionante se encontró que las partículas de TiO_2 -Fe son capaces de producir el fenómeno de fotocatalisis en entornos de luz artificial, como habitaciones alumbradas por focos, lámparas etc. De esta manera se comenzó a investigar la síntesis y dopaje de las partículas, además de proveedores locales que pudieran elaborarlas con las especificaciones que se requerían.

Una vez establecidas las distintas técnicas, mecanismos y materiales que se utilizan para obtener superficies antibacteriales a base de cemento Portland, así como el proporcionamiento con el dióxido de titanio con el cementante en cuestión, se investigaron en manuales y normas mexicanas la metodología para realizar las pruebas de inhibición de la cepa de *Escherichia Coli Top10* en superficies conformadas por el mortero modificado. En la figura 3 se ilustra el proceso de revisión de la literatura, que fue necesario para la elaboración del proyecto de investigación.

3.2 Adquisición y caracterización de las partículas de $\text{TiO}_2\text{-}1\%\text{Fe}^{+3}$

Las partículas de $\text{TiO}_2\text{-}1\%\text{Fe}^{+3}$, se obtuvieron mediante el acercamiento al CINVESTAV campus Juriquilla – Querétaro, las partículas fueron sintetizadas en su Laboratorio Nacional de Proyección Térmica (CENAPROT). Así mismo, el CENAPROT extendió un certificado de calidad del material, en donde se realizó la caracterización fisicoquímica del material por medio de difracción de rayos X (XRD) de $20^\circ < 2\theta < 60^\circ$ para determinar su estructura cristalina, además de una granulometría para determinar la distribución de tamaño del material en un analizador de partículas de polvos finos con dispersor y alimentador vibratorio. El equipo utilizado se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Estudio de la granulometría del material en el analizador de partículas.

3.3 Elaboración de probetas de mortero

3.3.1 Elaboración de mortero y colado de probetas

Para la realización del mortero 3:1 cemento-arena, se usó cemento Portland, agua a una proporción de 250 l/m³ y arena de material de banco, que a su vez fue cribada en la malla No. 20 (Figura 5), desechando el material retenido, esto con el fin de obtener una superficie menos rugosa de lo que obtendríamos con el cribado convencional de la arena con la malla No.4. Se colaron 2 probetas por ensayo, de dimensiones de 9 cm de diámetro simulando las dimensiones de una caja de Petri utilizadas en la literatura, en frascos de vidrio de boca ancha (Figura 6).



Figura 5. Cribado de arena por la malla No.20.



Figura 6. Probetas coladas con mortero 3:1 cemento-arena.

3.3.2 Proporcionamiento y elaboración de recubrimiento con pasta de cemento

Luego de 28 días de curado de las probetas, se realizaron dos mezclas de pasta cemento a base de agua, cemento Portland y partículas de TiO_2 -1%Fe, en tubos de Eppendorf de 1.5 ml con el proporcionamiento correspondiente (Tabla 2), cabe mencionar que se utilizó la proporción másica máxima (10% aditivo-cemento) que

se indica en la norma ACI 212.3R16 para aditivos antisépticos y antifungicidas. Luego se agitaron ambas mezclas durante 15 segundos en un agitador vortex a 2500 rpm.

Tabla 2. *Proporcionamiento del recubrimiento.*

Mezcla	Agua (ml)	Cemento Portland (g)	TiO ₂ -1%Fe (g)
Control: Mortero	1	0.6	0
Modificada: Mortero + TiO ₂ -1%Fe	1	0.6	0.06

Se vertieron las mezclas de mortero en su respectiva probeta, para posteriormente agitar en círculos cada probeta con el fin de esparcir homogéneamente la mezcla sobre la superficie (figura 7). Luego se envolvió cada probeta con papel aluminio para evitar el proceso de fotocatalisis por el contacto con la luz (figura 8).



Figura 7. Aplicación del recubrimiento a las probetas.



Figura 8. Probetas con el recubrimiento y envueltas.

3.4 Esterilización de materiales, equipo y probetas

El agua destilada, el agar bacteriológico, el medio de cultivo LB, las probetas, así como los instrumentos que se utilizaron de manera directa en el experimento, fueron esterilizados en autoclave de calor húmedo a 15 psi de presión (figura 9) y a una temperatura de 121 °C durante 15 minutos.



Figura 9. Esterilización con autoclave.

3.5 Toma de pH de las probetas

Para la toma de pH, luego de la experimentación anterior y de esterilizarlas, se tomó cada probeta junto con su recubrimiento y se pulverizó (figura 10). Del mismo polvo se extrajeron 2 muestras de 10 g cada una, se vertieron en 75 ml de agua desionizada, se homogenizó la solución mediante agitación continua 5 minutos y se dejó reposar durante otros 5 minutos (figura 11), repitiendo este procedimiento 3 veces por cada probeta. Con ayuda de un electrodo de pH se procedió a tomar las lecturas por triplicado de cada muestra extraída de cada una de las probetas (figura 12) y se realizó el registro de los resultados.

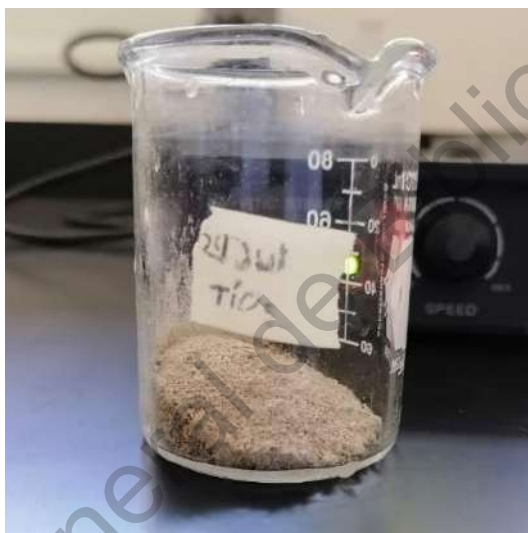


Figura 10. Pulverización de probetas.

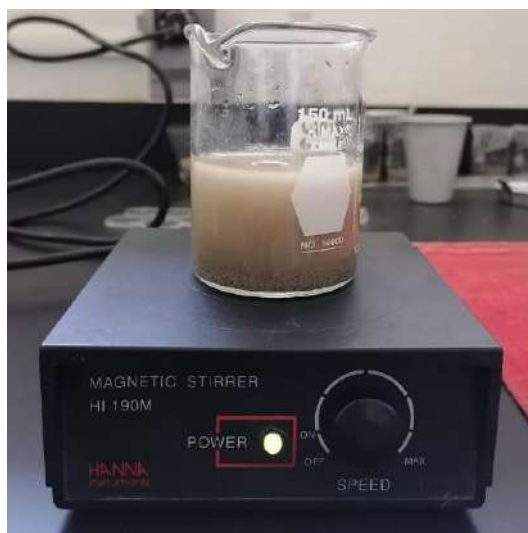


Figura 11. Homogenización de la solución en agitador magnético.



Figura 12. Lectura del pH de la solución con un equipo multiparamétrico.

3.6 Obtención del Cultivo de *Escherichia coli*

Con ayuda de la Facultad de Ciencias Naturales y la ATCC (por las siglas en inglés de American Type Culture Collection) como proveedor, se adquirió un cultivo de la bacteria *Escherichia coli* top 10, que se identifica como no patógena por la ATCC. En el anexo 1 se presenta la ficha técnica proporcionada por la ATCC, en la que se indica que esta bacteria tiene un nivel de bioseguridad de 1, en la escala de 1 a 4,

lo que significa que es un microorganismo del que se sabe que no provoca enfermedades en adultos sanos y que presenta un mínimo riesgo para el personal de laboratorio y para el ambiente en general.

3.7 Siembra de la cepa

Con el fin de aislar una porción de la cepa adquirida de *Escherichia coli* Top 10 para su desarrollo y multiplicación, se utilizó la técnica de siembra por estría, la cual consistió en cargar un ansa con la muestra de bacterias y a manera de líneas las estrías se extendieron sobre un área pequeña de la superficie de la placa con agar. Se retiró el ansa, se quemó a la llama, y luego se dejó enfriar, se hicieron nuevas estrías por otra zona tocando ligeramente la muestra sembrada anteriormente. Se repitió este proceso sucesivamente, flameando y enfriando el ansa al comienzo de las sucesivas siembras en estría. Tras una incubación de 18h a 37° C se obtuvieron las colonias aisladas en algunas regiones de la placa.

3.8 Preparación de medio de cultivo Luria Bertani

Se elaboró un medio de cultivo llamado Luria Bertani o medio LB, el cual sirve para aportar los nutrientes necesarios para el desarrollo de la bacteria *Escherichia coli*. Se obtuvo un medio deshidratado (figura 13) con la siguiente proporción de compuestos por litro de agua destilada:

- 5 g de cloruro de sodio.
- 5 g de extracto de levadura.
- 10 g de peptona caseína.

Se rehidrató 20 g del medio por cada litro de agua destilada, se dejó reposar 15 minutos, se distribuyó en frascos de vidrio (figura 14) para posteriormente esterilizar en la autoclave a una temperatura de 121° C y a 15 psi de presión durante 15 minutos.

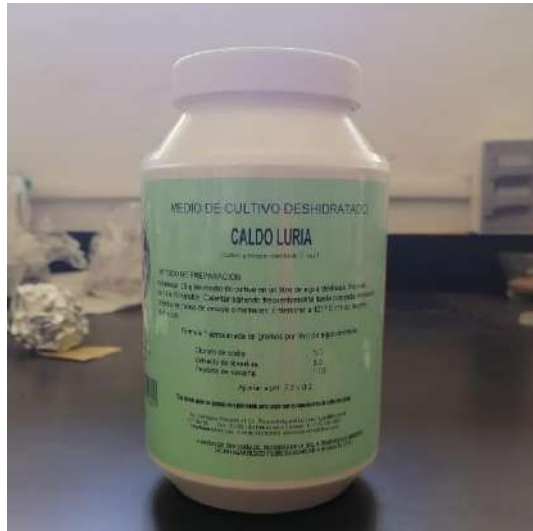


Figura 13. Medio de cultivo Luria Bertani deshidratado.



Figura 14. Medio de cultivo LB hidratado.

3.9 Preparación de placas con medio LB y agar

Para la elaboración de placas, se rehidrato medio de cultivo LB, a una proporción de 20 gramos por litro de agua destilada y se le añadió agar bacteriológico (figura 15) con una misma proporción que el medio LB. Se distribuyó en frascos de vidrio para posteriormente esterilizar en la autoclave a una temperatura de 121° C y a 15 psi de presión durante 15 minutos. Una vez estéril y aún en forma líquida, se vertió

en cajas de Petri estériles (figura 16), se dejaron enfriar y se sellaron con plástico adherible para utilizarlas posteriormente en el plaqueo de las muestras.



Figura 15. Agar bacteriológico.

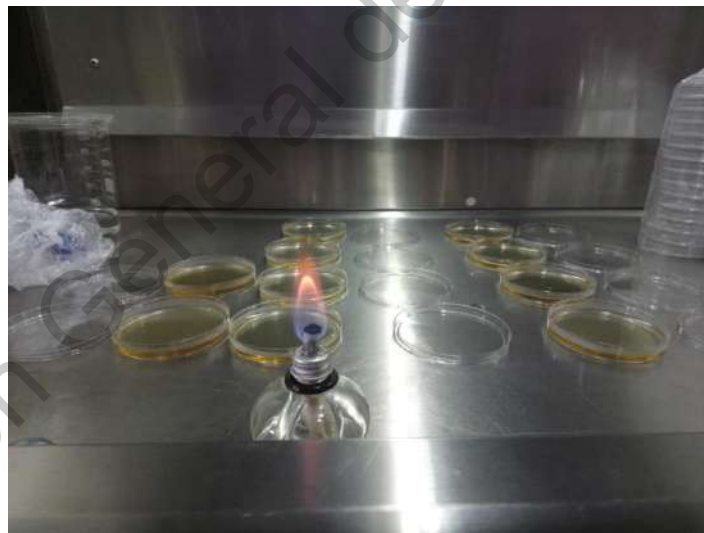


Figura 16. Distribución de medio LB y agar en cajas Petri.

3.10 Preparación del preinoculo e inoculación del recubrimiento de mortero

Se picó una colonia de *Escherichia coli* top 10 del cultivo previamente aislado (figura 17), con un palillo de madera, se introdujo dentro de un tubo centrifuga con 15 ml de medio LB y se incubo durante 1 hora y 30 minutos a una temperatura de 37 °C sin agitación.



Figura 17. Preparación del preinoculo.

A cada probeta de concreto con recubrimiento de mortero, estándar o modificado, se le añadió 20 ml de medio LB, para luego ser inoculadas con 100 µl de inóculo previamente agitado (figura 18).



Figura 18. Inoculación de probetas.

3.11 Muestreo

3.11.1 Valoración del inculo

Del inculo se extrajo 100 μl para hacer una dilución 1×10^{-5} con agua destilada estéril, después se plaqueo 100 μl de la dilución (Figura 19) y se incubó a 37 °C por 18 h. Después se realizó el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) para determinar el número de células viables presentes en el inculo.

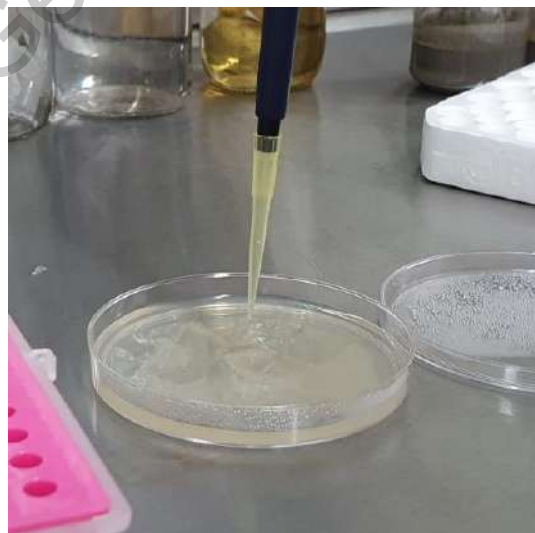


Figura 19. Plaqueo de la dilución 1×10^{-5} del inculo.

3.11.2 Muestreo

Una vez inoculadas las probetas, estas se dejaron incubando a una temperatura de 37 °C sin agitación y expuestas a la fuente de luz visible, producida por un foco Led convencional de 9 W de luz blanca usado regularmente para alumbrar espacios cerrados reducidos, durante los tiempos $t_1= 10$ min, $t_2= 30$ min, $t_3= 50$ min, $t_4= 70$ min y $t_4= 90$ min (tiempos de incubación y exposición a la luz).

El muestreo consistió en la toma de 100 μ l de cada probeta en los tiempos t_1 , t_2 , t_3 , t_4 y t_5 formando las diluciones $D_1= 1 \times 10^{-1}$ y $D_2= 1 \times 10^{-2}$ con agua destilada estéril (figura 20); de cada dilución se plaqueó 100 μ l en cajas Petri con agar bacteriológico y medio LB (previamente preparadas) esparciendo homogéneamente la dilución en toda la placa con ayuda de un esparcidor de células.



Figura 20. Muestreo y preparación de las diluciones.



Figura 21. Incubación de las probetas.

3.11.3 Recuento bacteriano

Realizado el plaqueo de las muestras y del inóculo, las muestras se dejaron en incubación a 37 °C durante 18 h (figura 22), luego de esto, se realizó el conteo y registro del número de UFC que presentó cada una de las muestras después de la incubación conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1, Bienes y Servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa (Figura 23).



Figura 22. Incubación de las muestras de los tiempos t_1 , t_2 , t_3 , t_4 y t_5 de las probetas de mortero modificado y de control.

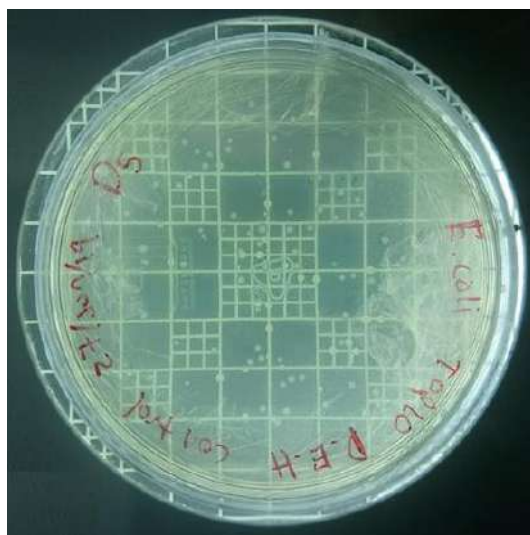


Figura 23. Conteo en placa de UFC en muestra de probeta de mortero de control luego de incubación de 18 h.

3.12 Pruebas cíclicas

Con el fin de verificar la eficacia del tratamiento fotocatalítico a través del tiempo con exposiciones repetitivas a la bacteria en cuestión, se realizaron 4 ensayos cíclicos que consistieron en la repetición del procedimiento descrito en la sección 3.11, con la diferencia de que se utilizaron las mismas probetas terminado el primer ensayo y sin residuos de medio LB. Las probetas fueron expuestas y ensayadas a 4 ciclos de inoculación sin haber sido esterilizadas entre ciclos.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4.1 Caracterización de partículas de $\text{TiO}_2 - 1\%\text{Fe}^{+3}$

En la Figura 25 se presentan los resultados de la difracción de rayos X de las partículas de dióxido de titanio dopadas con hierro, se pueden observar picos que se asignaron a la fase rutilo y anatasa según las difracciones observadas en el intervalo 2θ de 20° a 60°

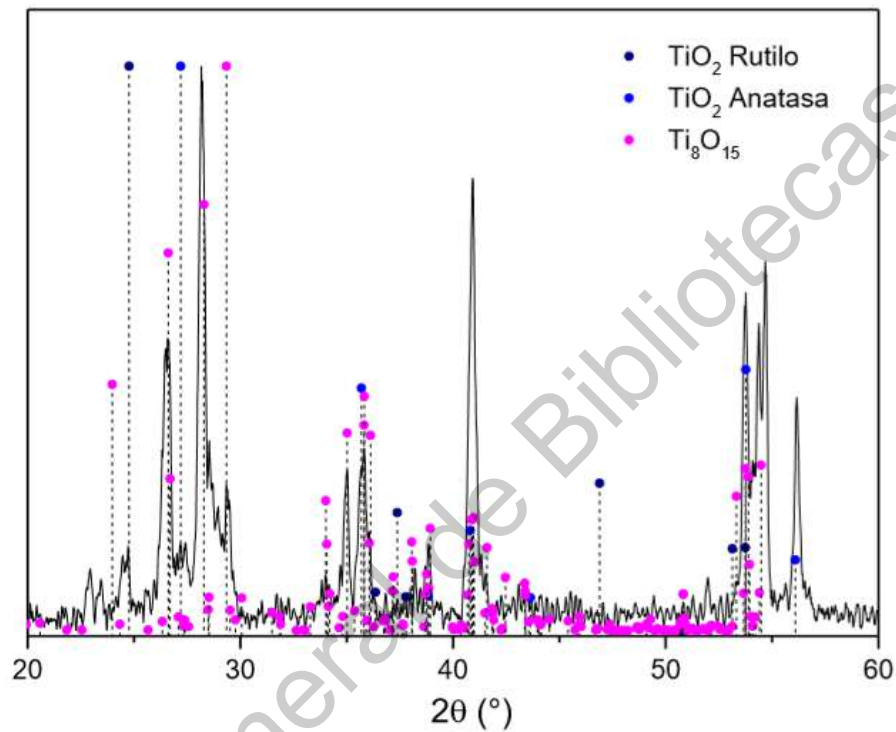


Figura 25. Difractograma de Rayos X de las partículas de TiO_2 dopado al 1% de hierro.

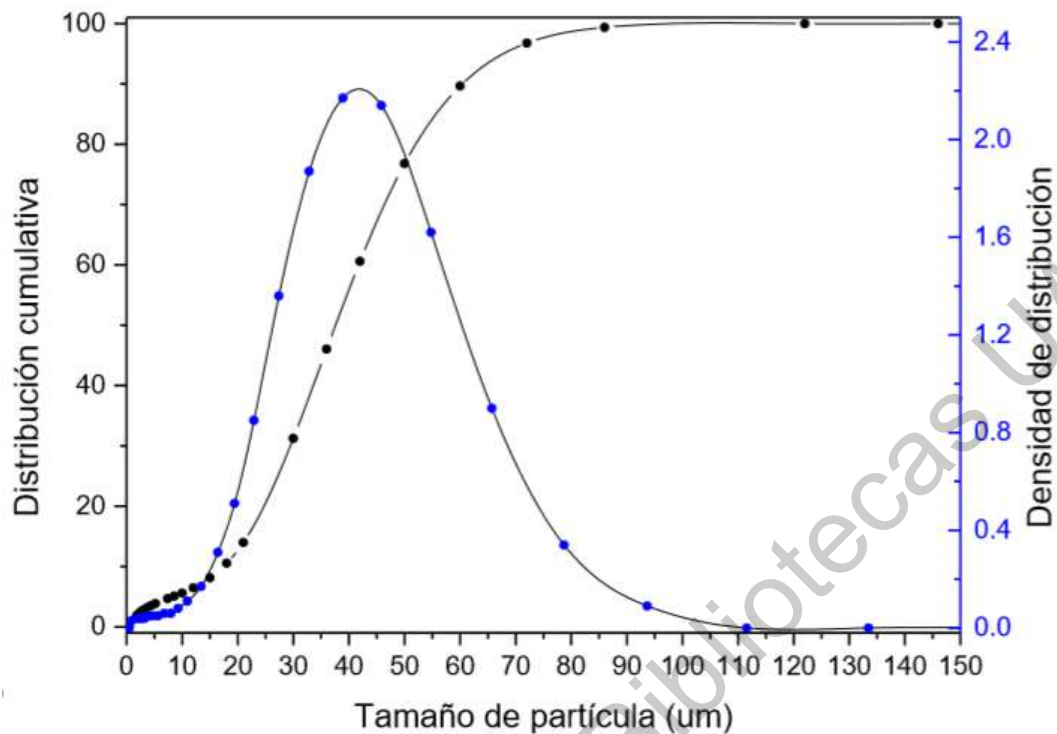


Figura 26. Curva granulométrica de las partículas de TiO_2 dopadas al 1% de hierro.

La Figura 26 constituye el estudio granulométrico del tamaño de partículas del dióxido de titanio, donde se muestra la curva de función distribución de frecuencia, así como su curva acumulativa. Encontrando que el valor medio del diámetro de las partículas de la muestra es de $37.4 \mu\text{m}$.

Tabla 3. Especificaciones físicas del $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$

Especificación	Resultado
Compuesto	$\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$
Presentación	Polvo color obscuro
Estructura	Rutilo/Anatasa/Magneli
Pureza del reactivo	99.99%
Granulometría	$37.4 \mu\text{m}$
Temperatura de fusión	$1843 \text{ }^\circ\text{C}$

A manera de resumen la Tabla 3 muestra las especificaciones fisicoquímicas de las partículas de $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ que se utilizaron durante la experimentación,

especificaciones que extiende el CENAPROT en el certificado de calidad de la adquisición del compuesto.

4.2 pH de las probetas

La toma de pH de las probetas pulverizadas, resultaron en lecturas altamente alcalinas, los valores que se presentan a continuación son el promedio de las mediciones del potencial de hidrógeno de las probetas utilizadas durante el experimento luego de ser esterilizadas:

- Mortero convencional= 12.58 ± 0.14 .
- Mortero modificado= 12.57 ± 0.04 .

Con los datos anteriores podemos acreditar que el mortero convencional inhibió el crecimiento de la bacteria debido a sus altos niveles de pH en su composición, los cuales resultan perjudiciales a la reproducción de la bacteria *E. coli* que detiene su desarrollo a pH extremos (inferior a 3.8 y superior 9.5).

4.3 Observaciones generales del recubrimiento

Durante el desarrollo de la experimentación se pudieron hacer anotaciones cualitativas generales acerca de algunas características del recubrimiento compuesto por la pasta de cemento y partículas de dióxido de titanio, de las cuales se destaca que el proceso de fraguado se vio sustancialmente acelerado alrededor de 10 minutos, una consistencia más espesa en comparación con el recubrimiento de cemento-agua. Además, debido a la coloración negra de las partículas de TiO_2 - $1\% \text{Fe}^{+3}$, la mezcla se tornó a un color gris mucho más oscuro. Por último, durante la pulverización de las probetas de mortero, se pudo constatar que el recubrimiento tubo una alta adherencia a la superficie de mortero (figura 27).



Figura 27. Acabado de la superficie de mortero convencional (izquierda) y acabado con recubrimiento (derecha).

4.4 Morfología macroscópica de la *E. coli*

La descripción morfológica de las colonias de *E. coli* aisladas en agar con medio LB se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Morfología macroscópica de las colonias de *E. coli*.

Característica	Resultado
Forma	Circular
Tamaño	1 mm a 1.6 mm
Color	Blanco
Superficie	Brillosa
Densidad	Opaca
Elevación	Convexa

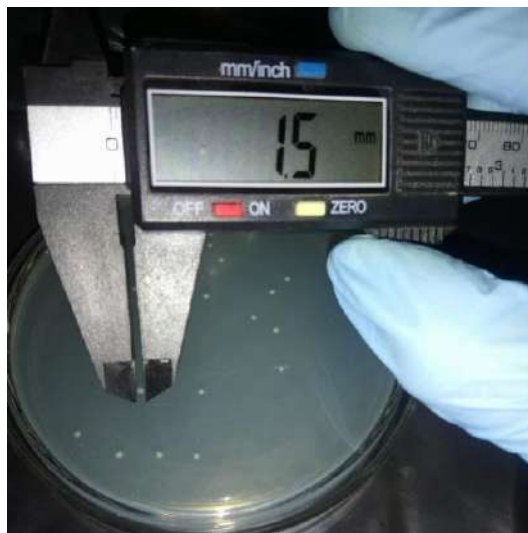


Figura 28. Medición del diámetro de las colonias.

4.5 Cinética microbiana

4.5.1 Efecto inhibitorio del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Escherichia coli*

Después de realizar el conteo de las UFC para las muestras obtenidas por triplicado de mortero modificado con dióxido de titanio y la muestra de control con mortero convencional, en la Figura 29 se muestra el resultado del promedio del número de células por mililitro presentes en cada muestra respecto al tiempo de exposición a luz visible, que fue de 0 a 90 minutos. La concentración de bacterias por ml del inóculo tuvo un valor estimado de 1×10^7 células/ml, dado que cada probeta se inoculó con $100 \mu\text{l}$ se puede estimar que la población inicial de bacterias en el tiempo $t = 0 \text{ min}$ fue de 5×10^4 células/ml. Es preciso señalar que las placas que presentaron un crecimiento de más de 250 UFC se consideraron como una población incontable. Con base en los resultados se puede afirmar que el mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ exhibe un comportamiento inhibitorio mayor sobre la población de la bacteria *Escherichia coli* respecto al mortero sin el tratamiento. Sin embargo, el mortero por sí solo presenta una importante actividad inhibitoria en el crecimiento de la bacteria.

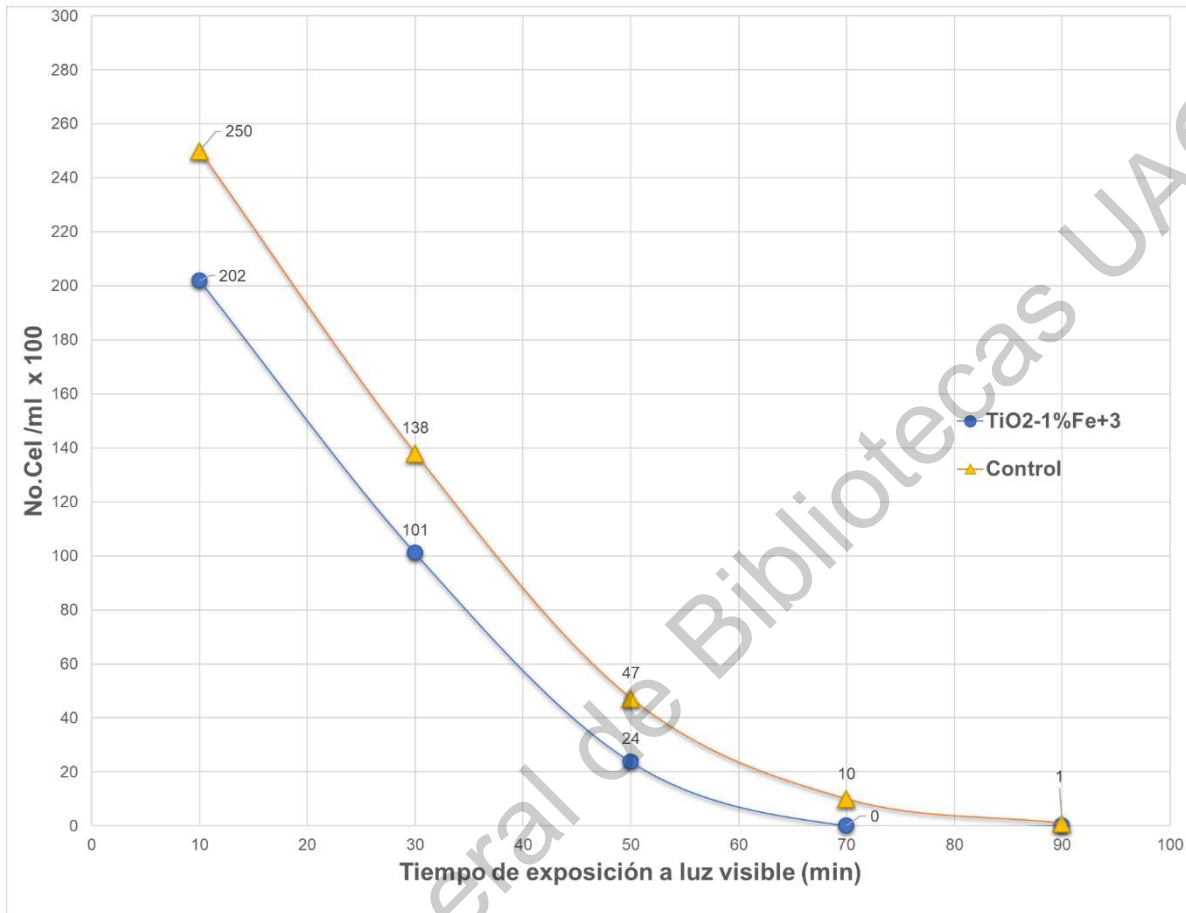


Figura 29. Actividad antibacteriana del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Escherichia coli*.

Se puede observar que la diferencia del número de células entre una muestra y otra es evidente desde los primeros 10 minutos de exposición a luz visible, continuando con el mismo comportamiento de ambas muestras, hasta llegar a una población de 0 células/ml a los 70 minutos en el mortero modificado y una población de 100 células/ml a los 90 min en el mortero de control.

4.5.2 Ajuste al modelo de Malthus

De los resultados anteriores, se realizó un ajuste de ellos al modelo matemático de Malthus, que permite representar el crecimiento de una población de organismos que habitan en un ambiente ilimitado y favorable, cuya variable independiente es el tiempo. Es importante mencionar que el modelo se ajustó a un comportamiento de disminución de la población de la bacteria de *Escherichia coli* como resultado de una tasa intrínseca de crecimiento negativa. Dado que el modelo de Malthus resulta del ajuste de los datos experimentales en un gráfico con curvas exponenciales y tasas de decrecimiento constante durante todo el tiempo "t", es posible estimar el número de células/ml presentes para tiempos inferiores de $t=10\text{min}$ y posteriores a $t=90\text{ min}$. En la figura 26 se puede apreciar que la tasa de decrecimiento para las muestras obtenidas del mortero modificado es mayor que el de las muestras obtenidas de la probeta de control, para los primeros 5 minutos transcurridos luego de la inoculación de cada probeta, se estima con el modelo de Malthus que hay un 29.7% más células/ml en el mortero de control que en la de mortero modificado con una diferencia de 17,865 células/ml. La población de la bacteria *Escherichia coli* de acuerdo con el modelo de Malthus es igual a 0 células/ml a los 85 minutos para el mortero modificado y a los 100 minutos para el mortero convencional.

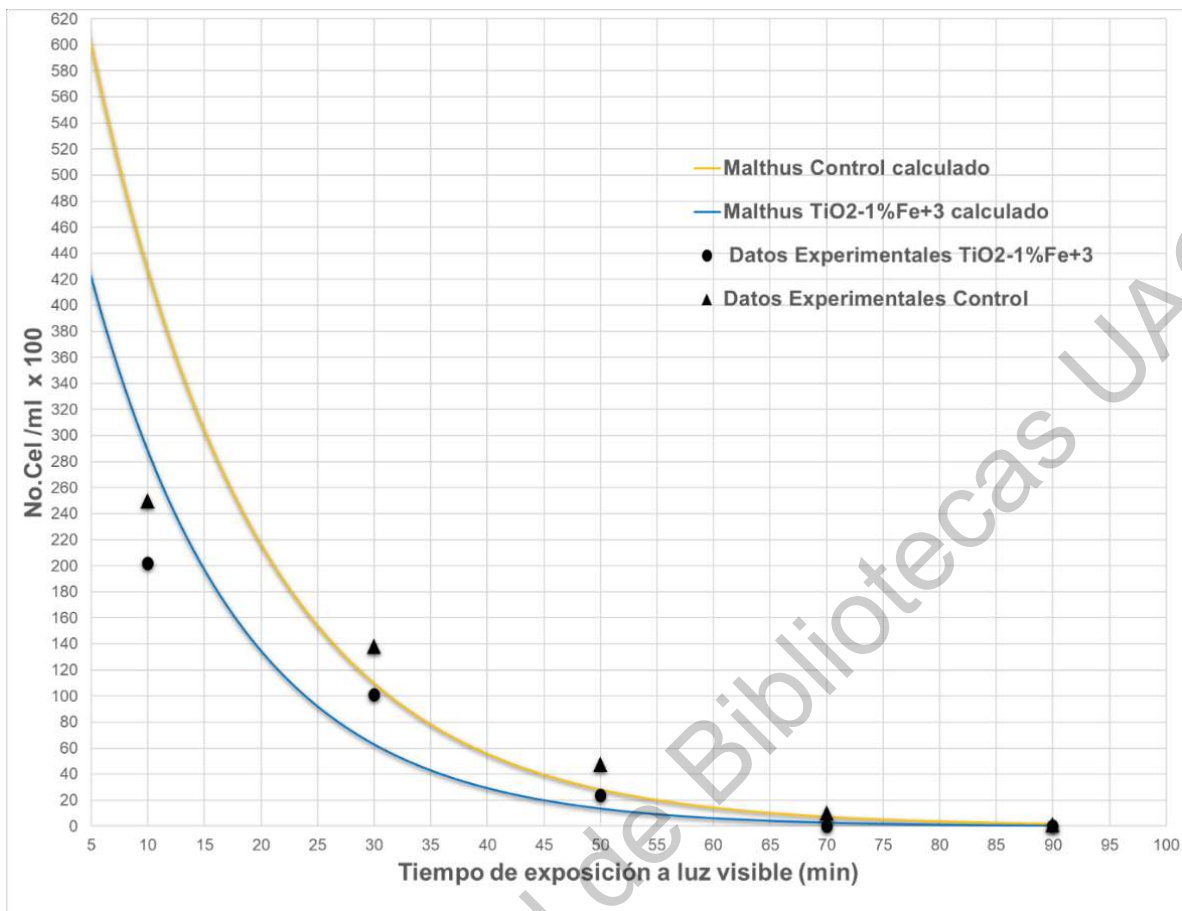


Figura 30. Ajuste al modelo de Malthus de la actividad antibacterial del mortero modificado con $\text{TiO}_2-1\%\text{Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Escherichia coli*.

4.5.3 Ajuste al modelo Logístico

De igual manera se realizó un ajuste de los datos experimentales al modelo matemático logístico, que en general es una modificación del modelo de Malthus, dando como resultado la información presentada en la Figura 31.

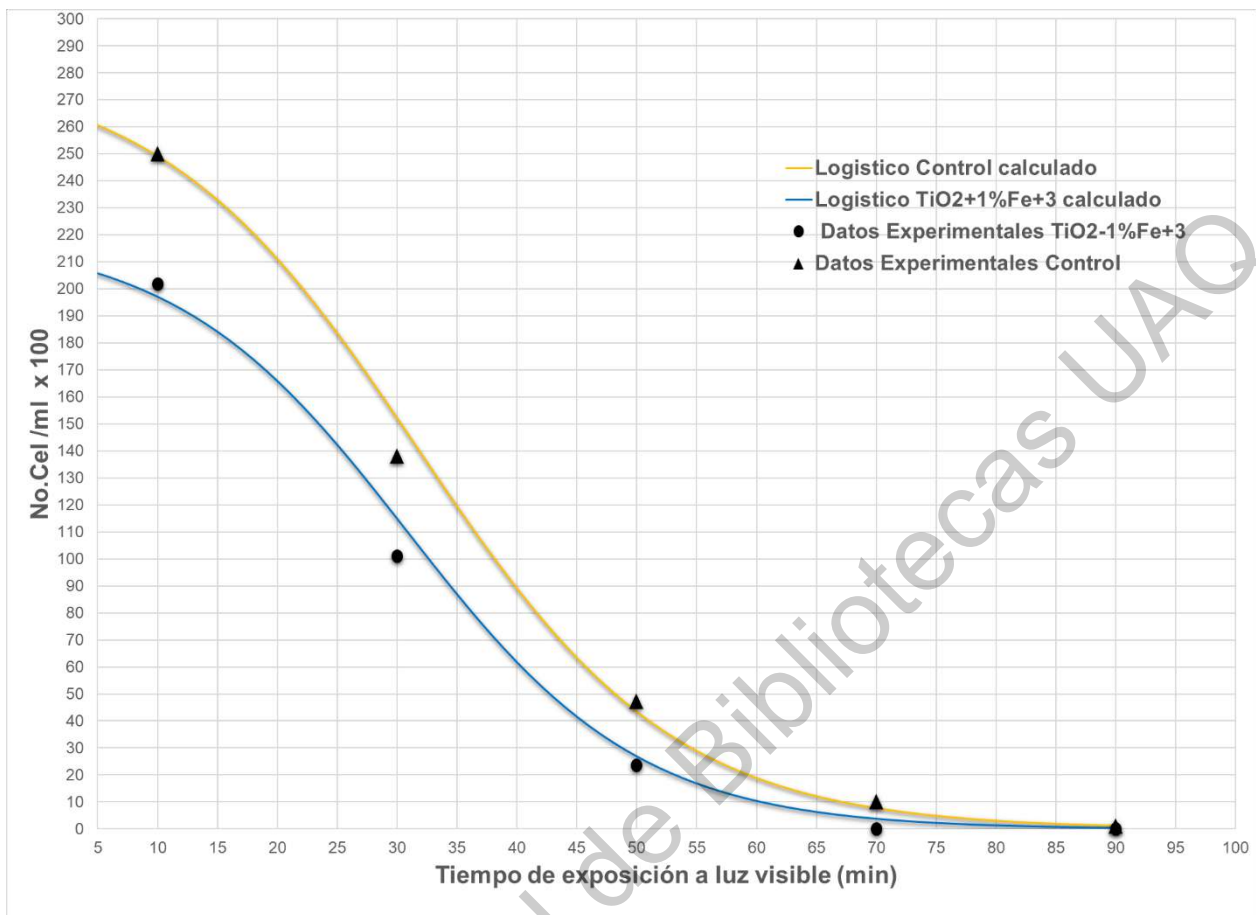


Figura 31. Ajuste al modelo logístico de la actividad antibacteriana del mortero modificado con $\text{TiO}_2 - 1\% \text{Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Escherichia coli*.

Las curvas del modelo logístico describen mejor la representación matemática de los datos experimentales debido a que, a diferencia del modelo de Malthus, el modelo logístico supone que la tasa intrínseca de crecimiento o en este caso decrecimiento, está en función de la densidad de población de células en un tiempo "t", de tal forma que, a medida que la densidad poblacional de bacterias disminuye, la tasa de crecimiento disminuye de igual manera, resultando así una curva en forma de "S" invertida.

La ecuación 1 es la representación matemática de la cinética de la población de células por mililitro presentes en la muestra de control de acuerdo con el modelo logístico.

$$N_{(t)} = \frac{282.33}{1+e^{(-2.945+0.093(t))}} \quad (1)$$

Asimismo, la ecuación 2 es la expresión matemática en la que se ajustan los datos experimentales de las muestras de mortero modificado con dióxido de titanio dopado con hierro, en la cual el coeficiente de correlación de los datos calculados, respecto a los datos experimentales, es de $r^2 = 96.5\%$.

$$N_{(t)} = \frac{220}{1+e^{(-3.177+0.103(t))}} \quad (2)$$

La representación de los datos experimentales al modelo logístico nos ayuda a estimar el número de células por mililitro presentes en las muestras para diferentes tiempos de exposición a luz visible. De acuerdo con la Figura 31 y a la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 podemos estimar los efectos del tratamiento fotocatalítico en el mortero modificado desde los primeros 5 minutos, en los cuales la población de bacterias *E. coli* es 21% mayor en el mortero de control que en el modificado, mismo comportamiento se sigue acentuando hasta llegar a un 57% antes de que el mortero modificado llegue a una población de 0 células/ml a los 84 minutos aproximadamente.

4.5.4 Efecto inhibitorio del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Escherichia coli* en ensayos cíclicos

En la Figura 32 se muestran los resultados de los ensayos cíclicos, en la cual se puede observar que en el ciclo 1 el mortero modificado tiene una remoción completa de la bacteria en 70 minutos, y el mortero de control tiene el mismo efecto a los 90 minutos. En el ciclo 2 cambia el sentido del punto de inflexión de la curva de crecimiento, además, el mortero modificado sigue eliminando en su totalidad las células de la bacteria, a diferencia del mortero convencional que a los 90 min presenta una concentración de 1200 células/ml. En el ciclo 3 observamos que el mortero modificado casi elimina en su totalidad la concentración de células de la

bacteria dejando una concentración de 100 células/ml a los 90 min, por otra parte, la probeta de control presenta una concentración de 6000 células/ml a los 90 min.

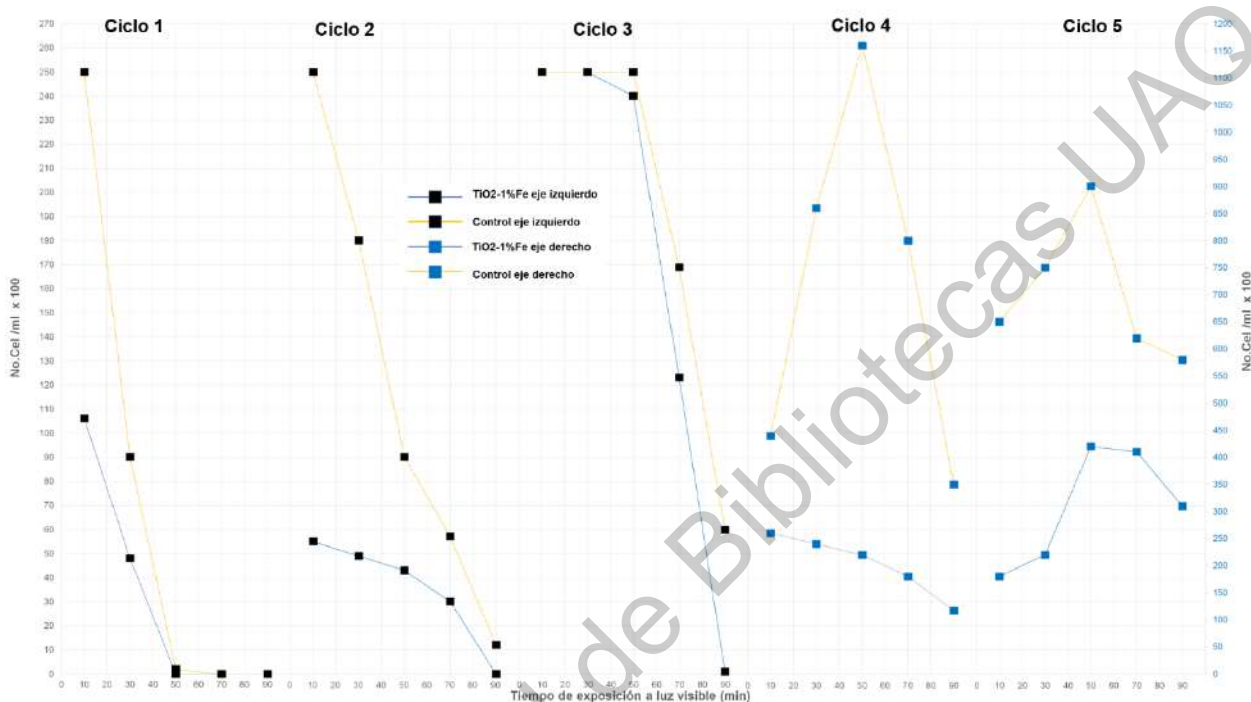


Figura 32. Actividad antibacteriana del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Escherichia coli* en ensayos cíclicos.

Para el ciclo 4 observamos un crecimiento en la población en el mortero de control, que va desde los 0 minutos hasta los 50 minutos con un máximo de 116000 células/ml para luego disminuir hasta 35000 células/ml para el minuto 90, este comportamiento se debe a la acumulación de bacterias provenientes de los ciclos anteriores. En el mortero modificado la alta concentración de bacterias en el ciclo 4, no permite su remoción total. Sin embargo, presenta una alta tendencia a inhibir el crecimiento de la *Escherichia coli*.

En el último ciclo el mortero modificado presenta un crecimiento en la población de células/ml en los primeros 50 min hasta llegar a una población pico de 42000 células/ml, a partir de ahí su población va decreciendo en las muestras siguientes

hasta tener una población final a los 90 min de 31000 células/ml. Un comportamiento muy similar ocurrió con el mortero de control, la población creció en los primeros 50 minutos para luego disminuir su población hasta llegar a una concentración final de 58000 células/ml a los 90 min.

Con los resultados mostrados en la Figura 32, es posible observar que la probeta de control, a partir del ciclo número 3, no logra inhibir el crecimiento de bacterias de manera inmediata como sucedía en ciclos previos. Más aun, para los ciclos número 4 y 5 se registró un incremento en el número de células por mililitro, para luego disminuir, muy probablemente debido al agotamiento de los nutrientes presentes en el medio.

Para el mortero con tratamiento fotocatalítico observamos la tendencia a disminuir la población de *E. coli* de manera constante dentro de los primeros 4 ciclos, para el último ciclo debido a la acumulación de bacterias, se observó un crecimiento y una disminución posterior de la población, lo cual no significa que no tenga propiedades antisépticas importantes, si comparamos la concentración de células/ml del mortero modificado con el de control a los 90 minutos del último ciclo, encontramos que el mortero modificado disminuye en un 53.4% la presencia de *Escherichia coli* en su superficie.



Figura 33. Plaqueo de muestra de probeta de mortero convencional a los 70 minutos de exposición a luz visible en ciclo número 4.



Figura 34. Plaqueo de muestra de probeta de mortero modificado con dióxido de titanio a los 70 minutos de exposición a luz visible en ciclo número 4

A manera de evidencia, las Figuras 33 y 34 son fotografías del crecimiento en placa de la bacteria *E. coli* luego de ser muestreadas las diluciones correspondientes a los 70 minutos transcurridos del inicio del experimento en el cuarto ciclo de las probetas de mortero convencional y el mortero con tratamiento fotocatalítico. Como

se puede apreciar a simple vista, la placa correspondiente al mortero convencional (Figura 33) presentó un crecimiento visiblemente mayor de unidades formadoras de colonias de *Escherichia coli* respecto al de la placa de mortero modificado (Figura 34).

4.5.5 Efecto inhibitorio del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Staphylococcus aureus*

Adicionalmente se probó la eficacia del recubrimiento contra la bacteria *Staphylococcus aureus* mediante el método de muestreo por raspado con hisopo, el cual consistió en inocular la superficie de las probetas con un inóculo de *S. aureus*, para luego raspar la superficie de la probeta con un hisopo en diferentes intervalos de tiempo de exposición a luz visible. Para estos ensayos se obtuvieron los siguientes resultados.

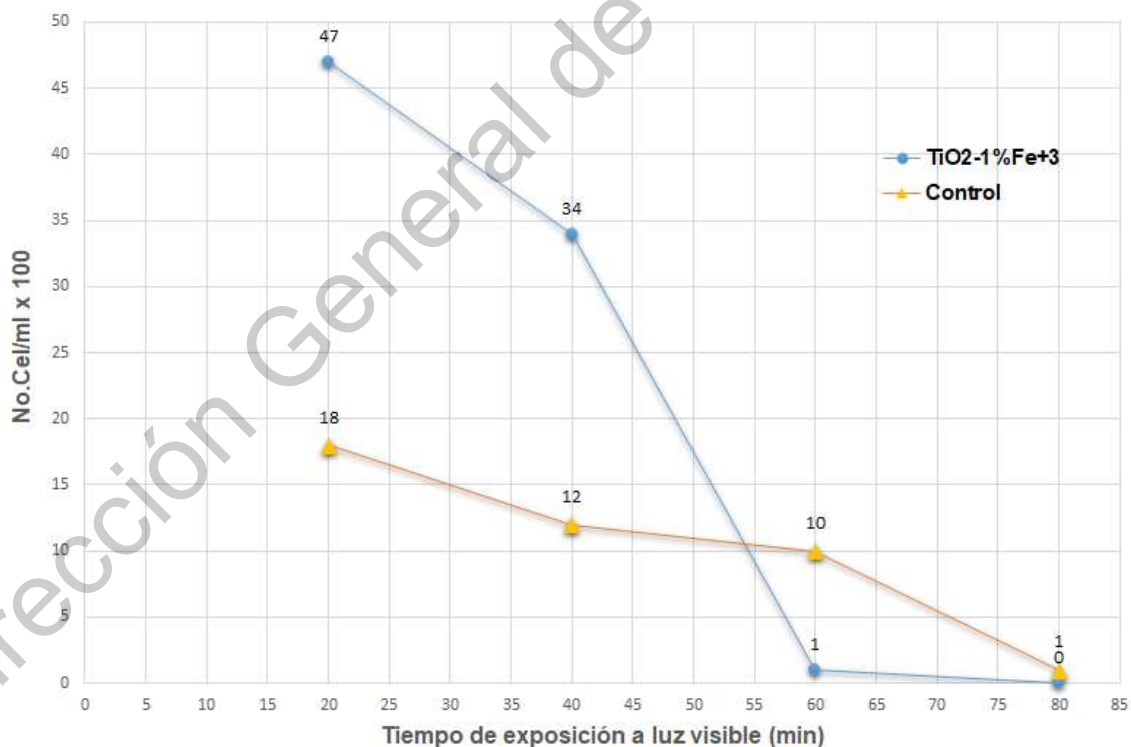


Figura 35. Actividad antibacteriana del mortero modificado con $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ contra la bacteria *Staphylococcus aureus*

En la Figura 35 se muestra que el mortero modificado al igual que con la bacteria *E. coli* tiene un efecto inhibitorio en el crecimiento de la bacteria *S. aureus*, eliminando la presencia de esta dentro de los primeros 60 a 80 minutos de exposición a luz visible. En el mortero de control se encontró a los 80 minutos una población de 100 células/ml presentes en la superficie de estudio. Tomando en cuenta que la bacteria *S. aureus* fue inoculada directamente sobre la superficie de mortero y no en un medio nutritivo, es de destacar que la población de bacterias de *S. aureus* haya sido de mayor de 0 células/ml hasta tiempos similares a los de la bacteria de *E. coli* inoculadas sobre un medio nutritivo en contacto con el mortero (60 a 80 min), lo que sugiere que la bacteria de *S. aureus* presenta una mayor resistencia al mortero convencional y modificado y a un medio más limitado de nutrientes.

4.6 Análisis de costos

4.6.1 Análisis de costo por m² de aplanado con mortero modificado con dióxido de titanio.

En las Tablas 5 y 6 se muestra el análisis de los costos para construir un m² de aplanado con espesor de 1.5 cm con mortero cemento-arena con una proporción 3:1 modificado al 10% cemento- TiO₂ y también mortero sin TiO₂. Los precios de los materiales y mano de obra corresponden a un estudio de mercado local en la ciudad de Querétaro, México, para el año en curso.

Para las partículas de dióxido de titanio se consideró el precio de la titania degussa P25 utilizado como materia prima en la síntesis de dióxido de titanio dopado con hierro utilizado durante el experimento, cuyo precio promedio fue de \$376.00 MXN por kilogramo.

Tabla 5. Precio Unitario por m2 de aplanado de 1.5 cm de espesor, acabado fino en muros con mortero cemento-arena 1:3, modificado con TiO2 proporción 10% cemento-TiO2.

1.-MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Agua de Toma municipal	m3	0.0038	23	0.09
Arena	m3	0.0165	330	5.45
Cemento Portland gris en saco	kg	6.8100	3.4	23.15
Partículas de TiO2	kg	0.6810	376	256.06
Total materiales				\$ 284.74
2.- MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Oficial albañil	jor	0.1	398	39.8
Ayudante de oficial	jor	0.1	249	24.9
Total mano de obra				\$ 64.70
3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Herramienta menor			5%	3.24
Total equipo, maquinaria y herramientas				\$ 3.24
Total Precio Unitario por m2 de aplanado de 1.5 cm de espesor, acabado fino en muros con mortero cemento-arena 1:3, modificado con TiO2 proporción 10% cemento-TiO2, incluye: preparación de la superficie, elaboración de mezcla de mortero y aplicación.				\$ 352.68

Tabla 6. Total Precio Unitario por m² de aplanado de 1.5 cm de espesor, acabado fino en muros con mortero cemento-arena 1:3.

1.-MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Agua de Toma municipal	m3	0.0038	23	0.09
Arena	m3	0.0165	330	5.45
Cemento Portland gris en saco	kg	6.8100	3.4	23.15
Total materiales				\$ 28.69
2. MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Oficial albañil	jor	0.1	398	39.8
Ayudante de oficial	jor	0.1	249	24.9
Total mano de obra				\$ 64.70
3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Herramienta menor			5%	3.24
Total equipo, maquinaria y herramientas				\$ 3.24
Total Precio Unitario por m² de aplanado de 1.5 cm de espesor, acabado fino en muros con mortero cemento-arena 1:3. Incluye: preparación de la superficie, elaboración de mezcla de mortero y aplicación.				\$ 96.62

El costo total por m² de los materiales para aplanado con mortero modificado indicado en la tabla 6 fue \$352.68 MXN lo cual es un costo 3.6 veces mayor en comparación al costo mostrado en la tabla 5 de un aplanado con mortero convencional que fue de \$96.62 MXN.

4.6.2 Análisis de costo por m² de superficie tratada con pintura antimicrobiana

En la tabla 7 se presenta el análisis de costos necesarios para cubrir un m² de muro con pintura antibacterial disponible en el mercado. En el análisis se considera dos manos de sellador vinil-acrílico previo a la aplicación de dos manos de pintura antibacterial. Se consideró un rendimiento del sellador de 9 m² por litro (diluido 3 a

1) y un rendimiento de 6 m² por litro de la pintura antibacterial. Los precios que se muestran corresponden al año en curso.

Tabla 7. Precio Unitario por m² de pintura acrílica antibacterial, en muros con aplanado con acabado fino de mortero.

1.-MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Agua de Toma municipal	m3	0.0007	23	0.02
Sellador vinil-acrílico	lt	0.2222	62	13.78
Pintura Antibacterial	lt	0.3330	160	53.28
Total materiales				\$ 67.07
2.- MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Oficial pintor	jor	0.05	355	17.75
Ayudante de oficial	jor	0.05	249	12.45
Total mano de obra				\$ 30.20
3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Herramienta menor			5%	1.51
Total equipo, maquinaria y herramientas				\$ 1.51
Total Precio Unitario por m² de pintura acrílica antibacterial, en muros con acabado fino de aplanado fino de mortero. Incluye: dos manos de sellador y dos manos de pintura.				\$ 98.78

Cabe mencionar que la pintura conserva sus propiedades antibacteriales hasta 1 año luego de su aplicación, según datos del fabricante, por lo que el costo total para cubrir un m² de muro con pintura antibacterial es de \$ 98.78 MXN anuales.

Es evidente que el costo de los materiales para darle tratamiento fotocatalítico a 1 m² de muro mediante la pintura durante 3.5 años, es prácticamente el mismo que el costo generado por la aplicación única de aplanado con mortero modificado con dióxido de titanio, que, dicho sea de paso, un aplanado con mortero puede conservarse en óptimas condiciones por más de esos 3.5 años. Sin mencionar los costos adicionales que implica la mano de obra y herramienta necesarios para la remoción de la capa de pintura anterior.

Conclusiones

Dirección General de Bibliotecas UAQ

5.1 Conclusiones

El objetivo de este proyecto de investigación es fabricar un mortero con tratamiento fotocatalítico mediante partículas de $\text{TiO}_2\text{-1\%Fe}^{+3}$ que sirva como superficie que inhiba el crecimiento de la bacteria *Escherichia coli*, medido a través de su conteo en placa, después de un periodo de exposición a luz visible. Además de comparar la cinética microbiana en superficies compuestas por el mortero modificado y el mortero convencional.

Dentro de los hallazgos más destacados fue que debido al pH altamente alcalino (12.58 ± 0.14) de las pastillas de mortero de control, el crecimiento de la bacteria *Escherichia coli* se vio inhibido. Sin embargo, esa condición no tiene el mismo efecto para altas concentraciones ni tiempos prolongados de exposición al contaminante.

Por otra parte, el efecto de fotocatalisis que confiere el dióxido de titanio dopado con hierro como tratamiento de superficies, dota al mortero modificado la capacidad de inhibir el crecimiento e incluso eliminar la bacteria *Escherichia coli* presente en el ambiente que está en contacto directo con la superficie del recubrimiento, aun cuando solo está expuesto a luz visible, información que concuerda con la literatura acerca de la eliminación de microorganismos por estrés oxidativo.

De igual manera la eficiencia del efecto antibacterial del mortero modificado fue comprobado durante periodos largos de tiempo y a una exposición continua al contaminante obteniendo resultados muy aventajados respecto al mortero sin tratamiento.

Asimismo, el ajuste del modelo logístico a los datos experimentales representa una herramienta muy útil para hacer proyecciones de la eficiencia antibacterial en superficies con tratamientos y contaminantes similares.

Otro aspecto importante que podemos concluir, es que el análisis de costos mostro que es económicamente viable la aplicación del mortero modificado con dióxido de titanio en comparación con las pinturas antibacteriales disponibles en el mercado, debido a que la pintura hay que cambiarla cada año para que conserve sus características antisépticas y estéticas.

5.2 Líneas futuras de investigación

El presente trabajo, da pie a diversas investigaciones futuras en la adición de óxidos metálicos y elementos nanoestructurados en materiales de construcción.

Uno de los factores más importantes a señalar, fue que no se pudo tener un estricto control de la concentración del inóculo durante el desarrollo del experimento, lo que derivó en variaciones de la población inicial de células presentes en el tiempo $t=0$ minutos durante los ensayos.

Además, se considera de gran relevancia realizar muestreos para tiempos inferiores a los 10 min (t_1), porque debido al tiempo que se tardó en realizar cada uno con la metodología descrita, el tiempo mínimo entre muestreos es de 10 min para tener periodos consistentes entre ensayos. Por lo anterior, se recomienda mejorar los tiempos de muestreos y utilizar una metodología que permita un mejor y más riguroso control de concentración del inóculo.

Para tener un estudio más completo de la eficacia antibacterial del recubrimiento en cuestión, es importante que se realicen estudios con diferentes microorganismos, además de la *E. coli*, tales como hongos, algas y otras bacterias, ya que cada uno cuenta con particularidades biológicas complejas que pueden derivar en resultados diferentes respecto a los encontrados en esta investigación, la cual se limitó solo al estudio específico de la bacteria *E. coli* y *S.aureus* por razones de bioseguridad.

Otra línea de investigación importante a considerar es la utilización de NP de TiO_2 como recubrimiento de otros materiales de construcción, como pueden ser, losetas, pintura, concretos, barnices entre otros; Inclusive probar el mismo recubrimiento utilizado en esta investigación, pero añadiendo pintura, para estudiar si conserva sus propiedades antisépticas.

Por último, un análisis de monetización y costo-beneficio que pudiera tener la aplicación de esta tecnología como recubrimiento, sería una investigación fundamental para la aplicación comercial de este material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

1. Agatangelo, E., Mora, M. y Quinto E. (2007). Estudio del Comportamiento Cinético de Microorganismos de Interés en Seguridad Alimentaria con Modelos Matemáticos (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma de Barcelona, Facultad de Veterinaria, Barcelona, España.
2. Ahmad, R. Sardar, M. (2013). TiO₂ nanoparticles as an antibacterial agent against *E. coli*. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2 (8).
3. Anaya, P., Ramírez, L., Orozco, M. y López, L. (2013). Determinación de *Escherichia coli* e identificación del serotipo O157:H7 en carne de cerdo comercializada en los principales supermercados de la ciudad de Cartagena. *Revista Lasallista de Investigación*, 10 (1), 91-100.
4. Arias, R. Rosado, U., Vargas, A. Grajales, C. (2016). Los microorganismos causantes de infecciones nosocomiales en el Instituto Mexicano del Seguro Social. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 54 (1), 20-4.
5. Ceballos, M. (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. *Revista del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*.
6. Cohen, J. (2015). Evaluación de propiedades fotocatalíticas de cemento adicionado con nanopartículas de TiO_{2-x}N_x (Oxinitruro de Titanio) (Tesis de Posgrado). *Universidad Nacional de Colombia*.
7. De la Peña, P. y García, A. (2016). Diseño nanotecnológico de superficies con propiedades antibacteriales: el grafeno. *Revista Ingeniería de Construcción*.
8. Déoux, S. Les Enjeux Sanitaires de la Qualité de l'air Intérieur; Cité des Sciences et de l'industrie: Paris, France, 2013.
9. Dizaj, S. M. Lotfipour, F. Barzegar-Jalali, M. Zarrintan, M. H. & Adibkia, K. (2014) Antimicrobial activity of the metals and metal oxides nanoparticles. *Materials Science & Engineering C*. 44: 278-284.
10. Faraldos, M. (2012). Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas. *Congreso Nacional del Medio Ambiente 2012*.

11. IMCYC (2011). Cemento para Albañilería (Mortero)/ Especificaciones y métodos de prueba. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. *Revista Problemas, Causas y Soluciones*, 41 (1), 67-71.
12. Janus, M. Kusiak, E. Rokicka, P. Markowska, A. Zajac, K. y Morawski, A. (2019). Bacterial Inactivation on Concrete Plates Loaded with Modified TiO₂ Photocatalysts under Visible Light Irradiation. *Revista Molecules*.
13. K.P. Kühn, I.F. Chaberny, K. Massholder, M. Stickler, V.W. Benz, H.-G. Sonntag, L. Erdinger, Disinfection of surfaces by photocatalytic oxidation with titanium dioxide and UV-A light, *Chemosphere* 53 (2003) 71–77.
14. Lisbona, L. y Haurie, L. (2016). Trabajo final de Master. Materiales Fotocatalíticos y sus aplicaciones en la construcción. *Universidad Politécnica de Cataluña*.
15. Mather, B. y Ozyildirim, C. (2002). Cartilla del Concreto. México: *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*.
16. Melo, J.V.S.D, Triches, G. (2011). Evaluation of the influence on Environmental Conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of Nitrogen Oxides (NO_x). *Building and Environment*, vol, 1o.1016, p 8, 2011.
17. Molina, J. y Eslava, C. (2015). UNAM Facultad de Medicina, departamento de salud pública: *Escherichia Coli* Diarrogénica. México. Recuperado de <http://www.facmed.unam.mx/deptos/microbiologia/bacteriologia/escherichia-coli.html>
18. Nataro, J. P., & Kaper, J. B. (1998). Diarrheagenic *Escherichia coli*. *Clinical microbiology reviews*, 11(1), 142-201.
19. O.Gómez (2014). Enfermedad diarreica aguda por *Escherichia coli* patógenas en Colombia. *Revista chilena infectol*, 21(5),577-586.
20. Paredes, F. y Roca, J. (2002). Influencia de los radicales libres en el envejecimiento celular. *Offarm*. 21(7).
21. Park, E. J. Jeong, B. Jeong, M. G. & Kim Y. D. (2014). Synergetic effects of hydrophilic surface modification and N-doping for visible light response on photocatalytic activity of TiO₂. *Current Applied Physics*. 14: 300-305.
22. Torres, A. G., Zhou, X., & Kaper, J. B. (2005). Adherence of diarrheagenic *Escherichia coli* strains to epithelial cells. *Infection and immunity*, 73(1), 18-29.

23. Vázquez, A., Vega, A. y Paz, D. (2018). Mecanosíntesis y efecto antimicrobiano de óxidos metálicos nanoestructurados. *Mundo nano UNAM*, 11(21),29-44.
24. Zamudio, A. (2014). Desarrollo de Superficies Autolimpiables Para la Industria De La Construcción a Base de TiO₂ Dopado con Fe y S Mediante el Método Sol-Gel Asistido por Microondas (Tesis de Licenciatura). *Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería*. Querétaro, México.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ANEXO I.- Ficha técnica de la adquisición de cultivo de bacteria
Escherichia Coli Top 10

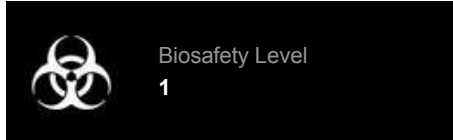
Dirección General de Bibliotecas UAQ



Product Sheet

***E. coli* strain TOP10
(Invitrogen)
pHuLUC3/TOP10
(PTA-10989)**

Please read this **FIRST**



Intended Use

This product is intended for research use only. It is not intended for any animal or human therapeutic or diagnostic use.

Patent Depository

ATCC is an International Depository Authority (IDA) for patent deposits. ATCC is required to complete viability testing only at time of initial deposit of patent material. Patent deposits are made available on behalf of the depositor when the pertinent U.S. or international patent is issued, but material may not be used to infringe the patent claims.

This material was deposited with the ATCC Patent Depository to fulfill U.S. or international patent requirements. This material may not have been produced or characterized by ATCC.

U.S. Patent Number:
7,842,293

Technical Information

ATCC Technical Services does not have technical information on patent deposits that are not produced or characterized by ATCC. Additional information can be found on the international or [U.S. patent office](#) websites.

Product Description

Designation: *E. coli* strain TOP10 (Invitrogen) pHuLUC3/TOP10

Batch-Specific Information

Refer to the Certificate of Analysis for batch-specific test results.

SAFETY PRECAUTION

ATCC highly recommends that protective gloves and clothing always be used and a full face mask always be worn when handling frozen vials. It is important to note that some vials leak when submersed in liquid nitrogen and will slowly fill with liquid nitrogen. Upon thawing, the conversion of the liquid nitrogen back to its gas phase may result in the vessel exploding or blowing off its cap with dangerous force creating flying debris.

Unpacking & Storage Instructions

1. Check all containers for leakage or breakage.
2. Remove the frozen cells from the dry ice packaging and immediately place the cells at a temperature below -130°C, preferably in liquid nitrogen vapor, until ready for use.

Propagation

References

References and other information relating to this product are available online at www.atcc.org.

Biosafety Level: 1

Appropriate safety procedures should always be used with this material. Laboratory safety is discussed in the current publication of the *Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories* from the U.S. Department of Health and Human Services Centers for Disease Control and Prevention and National Institutes for Health.

ATCC Warranty

Patent Deposits not produced or characterized by ATCC are warranted for viability only. If you believe the culture you have received is nonviable, contact Technical Services by phone at 800-638-6597 or 703-365-2700 or by e-mail at tech@atcc.org. Or you may contact your local distributor.

Disclaimers

This product is intended for laboratory research purposes only. It is not intended for use in humans.

American Type Culture Collection
PO Box 1549
Manassas, VA 20108 USA
www.atcc.org

800.638.6597 or 703.365.2700
Fax: 703.365.2750
Email: Tech@atcc.org

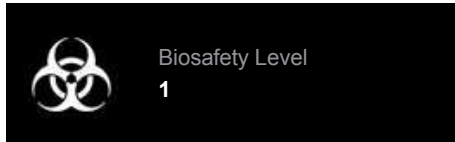
Or contact your local distributor



Product Sheet

E. coli strain TOP10
(Invitrogen)
pHuLUC3/TOP10
(PTA-10989)

Please read this **FIRST**



Intended Use

This product is intended for research use only. It is not intended for any animal or human therapeutic or diagnostic use.

While ATCC uses reasonable efforts to include accurate and up-to-date information on this product sheet, ATCC makes no warranties or representations as to its accuracy. Citations from scientific literature and patents are provided for informational purposes only. ATCC does not warrant that such information has been confirmed to be accurate.

This product is sent with the condition that you are responsible for its safe storage, handling, and use. ATCC is not liable for any damages or injuries arising from receipt and/or use of this product. While reasonable effort is made to insure authenticity and reliability of strains on deposit, ATCC is not liable for damages arising from the misidentification or misrepresentation of cultures.

Please see the enclosed Material Transfer Agreement (MTA) for further details regarding the use of this product. The MTA is also available on our Website at www.atcc.org

Disclosure

This material is cited in a US or other Patent and may not be used to infringe the claims. Depending on the wishes of the Depositor, ATCC may be required to inform the Patent Depositor of the party to which the material was furnished.

Additional information on this culture may be available on the ATCC web site at www.atcc.org.

© ATCC 2018. All rights reserved. ATCC is a registered trademark of the American Type Culture Collection. [09/12]

American Type Culture Collection
PO Box 1549
Manassas, VA 20108 USA
www.atcc.org

800.638.6597 or 703.365.2700
Fax: 703.365.2750
Email: Tech@atcc.org

Or contact your local distributor