

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
MATERIALES**



**DESARROLLO DE UN CONCRETO AUTORREPARABLE A
BASE DE MICROORGANISMOS Y UN NUTRIENTE
PRECURSOR DE MINERALES**

Por:

JUAN ANDRÉS CUADROS PORTALES

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

Saltillo, Coahuila

Julio 2020

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
MATERIALES**



**DESARROLLO DE UN CONCRETO AUTORREPARABLE A BASE
DE MICROORGANISMOS Y UN NUTRIENTE PRECURSOR DE
MINERALES**

Por:

JUAN ANDRES CUADROS PORTALES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

Saltillo, Coahuila

Julio 2020



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
MATERIALES**



**DESARROLLO DE UN CONCRETO AUTORREPARABLE A BASE
DE MICROORGANISMOS Y UN NUTRIENTE PRECURSOR DE
MINERALES**

Por:

JUAN ANDRES CUADROS PORTALES

Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

Dirigida por:

Dra. Elia Martha Múzquiz Ramos
Directora

Dr. Gerardo de Jesús Sosa Santillán
Co-Director

Dr. Felipe Avalos Belmontes
Asesor

Saltillo, Coahuila

Julio 2020



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



**POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
MATERIALES**

**DESARROLLO DE UN CONCRETO AUTORREPARABLE A BASE
DE MICROORGANISMOS Y UN NUTRIENTE PRECURSOR DE
MINERALES**

Por:

JUAN ANDRES CUADROS PORTALES

Ha sido aceptada por el jurado examinador como requisito parcial para
obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE MATERIALES

En virtud de haber cumplido con el reglamento de tesis vigente

Dra. Adalí Oliva Castañeda Facio
Presidenta

Dra. Claudia Magdalena López
Badillo
Secretaria

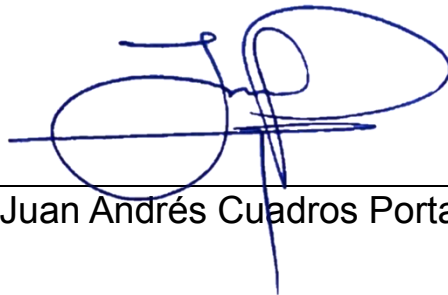
Dr. Leonardo Sepúlveda Torre
Vocal

Saltillo, Coahuila

Julio 2020

DECLARACIÓN

Declaro que la información contenida en la presente tesis, así como la Parte Experimental y Resultados que surgieron del presente trabajo de investigación, forma parte de las actividades de investigación desarrolladas por un servidor durante el periodo que realicé los estudios de maestría en el Posgrado en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila.



Juan Andrés Cuadros Portales

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad día a día.

A la Madre Tierra por proveerme de todo lo necesario para vivir ॐ.

A mis hijos Leonardo y Adrián que son la principal motivación de mi superación personal.

A la madre de mis hijos Jennifer por su apoyo.

A mis padres Gerardo y Liliana por estar siempre conmigo.

A mis hermanos Perla, Gaby y Martin por acompañarme siempre.

A toda mi familia por brindarme su apoyo.

A mis más grandes amigos Mario y Jesús, por su apoyo y animo en mis estudios.

A mi directora de tesis la Dra. Elia Martha Múzquiz Ramos, por confiar en mí y brindarme toda su experiencia.

A mis asesores el Dr. Gerardo de Jesús Sosa Santillán y el Dr. Felipe Avalos Belmontes, por aportarme sus conocimientos.

A la Dra. Marisol Gallardo Heredia por su apoyo en mi estancia en la Facultad de Ingeniería.

A mis compañeros de posgrado: Mónica, Gilberto, Adrián, Daniela, Víctor y Omar, por la excelente compañía y ayuda en mis estudios.

A todo el personal administrativo y técnico del posgrado por su apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para la realización de mis estudios.

A la Universidad Autónoma de Coahuila, la Facultad de Ciencias Químicas y la Facultad de Ingeniería por la facilitación de sus instalaciones para realizar mi investigación.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	IV
Resumen	1
CAPITULO 1	
Introducción.....	2
CAPITULO 2	
Antecedentes	5
2.1. Material de autorreparación	5
2.2. Agentes microbianos	6
2.3. Medios protectores de microorganismos	8
2.4. Biomineralización.....	11
2.5. Evolución de agentes microbianos en el bioconcreto	15
CAPITULO 3	
Justificación.....	17
Hipótesis	18
Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
CAPITULO 4	
Metodología	20
4.1 Clasificación y estudio de microorganismos así como de los nutrientes precursores de minerales.	20
4.2 Reactivación, cultivo y estudio de microorganismos experimental.	20
4.2.1 Evaluación de las endoesporas en el medio alcalino del concreto.	22
4.2.2 Encapsulación de las endoesporas de <i>Bacillus subtilis</i>	22
4.3 Evaluación sinérgica de microorganismos y nutrientes	23
4.4 Incorporación de microorganismos y nutrientes al vehículo de protección seleccionado.....	24

4.5 Pruebas preliminares para incorporación de microorganismos y nutrientes al concreto	26
4.6 Elaboración de cilindros y vigas de concreto	27
4.7 Autorreparación del concreto	28
4.8 Técnicas analíticas y procedimientos utilizados en los materiales	29
4.9 Análisis de costos	30
CAPITULO 5	
Resultados	31
5.1 Reactivación y cultivo de microorganismos	31
5.2 Endosporas de <i>Bacillus subtilis</i>	32
5.3 Producción de CaCO ₃ mediante microorganismos y nutrientes	34
5.4 Producción de CaCO ₃ dentro de matriz de alginato entrecruzada con CaO.....	39
5.5 Relación porosidad, densidad y absorción	42
5.6 Resistencia a compresión y tensión.....	45
5.7 Autorreparación del concreto.....	48
5.8 Análisis de costos	52
CAPITULO 6	
Conclusiones.....	55
CAPITULO 7	
Referencias.....	57
CAPITULO 8	
Apendice.....	65
ACI Committee 211. (1997). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight , and Mass Concrete.	

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
	CAPITULO 2. ANTECEDENTES	
Figura 1.	Partes de la endoespora bacteriana y sus funciones	7
Figura 2.	Diagrama esquemático de biomineralización	11
Figura 3.	Escenario de curación de grietas por bacterias inmovilizadas en concreto	13
	CAPITULO 4. PARTE EXPERIMENTAL	
Figura 4.	Esquema de las escarificaciones realizadas en las muestras	29
	CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	
Figura 5.	a) Progreso del aislamiento de la cepa, b) Endoesporas de <i>Bacillus subtilis</i> vistas desde microscopio óptico	31
Figura 6.	Conteo de endoesporas por mililitro	32
Figura 7.	Microfotografía de endoesporas del <i>Bacillus subtilis</i> , dentro de la matriz de alginato de sodio	34
Figura 8.	Residuo final recolectado de medios de cultivo acuosos para producir CaCO ₃	35
Figura 9.	Espectros infrarrojos de muestras resultantes de medios acuosos así como de nutrientes utilizados para los mismos	36
Figura 10.	DRX de los medios BiocCa1, Bioca2 y Bioca3, y cartas patrón de calcita, aragonita y vaterita	38
Figura 11.	Encapsulación de nutrientes y endoesporas descritos en la Tabla 5	40
Figura 12.	Microfotografías de las muestras después de incubación	41
Figura 13.	Grafica de relación de Absorción, Porosidad y Densidad con agente reparador desde 1 hasta el 25%	43
Figura 14.	Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días, con porcentajes de agente reparador del 2, 4, 9, 10, y 18%	46
Figura 15.	Resistencia a tensión a 7, 14 y 28 días, con porcentajes de agente reparador del 2, 4, 9, 10, y 18%	47
Figura. 16.	a) Crecimiento de CaCO ₃ en la superficie de muestras con un porcentaje mayor al 9% de agente reparador, b) La muestra control no muestra crecimiento de CaCO ₃ en la superficie	49
Figura 17.	a) Escarificación A, muestra control, b) Escarificación A, muestra con 4% agente reparador, c) Escarificación B, muestra con 9% agente reparador, d) Escarificación B, muestra con 18% agente reparador, e) Escarificación C, muestra con 10% agente reparador, f) Escarificación C, muestra con 18% agente reparador	50
Figura. 18.	Diferencia del costo de concreto autorreparable con un 10% de agente reparador en comparación con un concreto convencional, para resistencias iguales	53

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	
Tabla 1. Descripción general de los microorganismos y nutrientes que se han utilizado para producir carbonato de calcio en el cuerpo de concreto	16
CAPITULO 4. PARTE EXPERIMENTAL	
Tabla 2. Medios de cultivo para formar endoesporas	21
Tabla 3. Medios de cultivo acuosos para producir CaCO_3	23
Tabla 4. Mezclas de entrecruzamiento de alginato con CaO	24
Tabla 5. Encapsulación de nutrientes y endoesporas	25
Tabla 6. Relaciones de absorción, porosidad y densidad, de acuerdo al porcentaje de agente reparador	27
CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	
Tabla 7. Relaciones de absorción, porosidad y densidad, de muestras obtenidas de cilindros y vigas de concreto	45
Tabla 8. Porcentaje de regeneración de las escarificaciones realizadas en muestras descritas en la Figura. 4	51

Resumen

La investigación para el desarrollo de concreto autorreparable a base de microorganismos se ha mantenido constante en la última década, pero la aplicación de este nuevo tipo de concretos no ha tenido un impacto significativo a nivel industrial. Esto puede deberse a que tanto las bacterias como los nutrientes para las mismas que ayudan a producir el CaCO_3 que sellará las grietas, deben representar un costo relativamente bajo que pueda emparejarse con el costo de mantenimiento que generan los agrietamientos que se reparan en el concreto.

Por lo cual en esta investigación se desarrolló un concreto autorreparable a base del microorganismo *Bacillus subtilis* ya que se comprobó que sus endoesporas resisten la alta alcalinidad del concreto al momento de su mezclado, sumado a que no es una bacteria patógena para el ser humano. De la misma manera se utilizaron los nutrientes: nitrato de calcio, urea y extracto de levadura, así que endoesporas y nutrientes se inmovilizaron por separado en una matriz de alginato 20 g/L entrecruzada con CaO 400 g/L, para adicionarlos al concreto.

Gracias a esta mezcla del microorganismo y los nutrientes, se pudo obtener un concreto autorreparable funcional, que al ser libre de mantenimiento logra sellar agrietamientos desde 0 mm hasta 1 mm de ancho por un largo indefinido, además que logra reducir el uso del cemento en la mezcla un 58 %, mejorando su resistencia a compresión y tensión un 70 %, sin dejar de lado su valor agregado. Esto se logró elevando su costo por 1 m³ un 0.5 % en comparación con el concreto convencional, lo que podría llegar a ser más llamativo para el sector industrial el uso de concretos autorreparables y libres de mantenimiento, para darle un impulso y poder competir más en el mercado de la construcción.