

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

***Microwave heating technology (MHT)* en el diseño de mezclas asfálticas autorreparables optimizadas con procesos de compactación controlados, Huancayo, 2023**

Jorge Antonio Mauri Vasquez
Christian Dnaiel Villanueva Espnoza

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Huancayo, 2025

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : RANDO PORRAS OLARTE
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 26 de febrero de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

MICROWAVE HEATING TECHNOLOGY (MHT) EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS AUTORREPARABLES OPTIMIZADAS CON PROCESOS DE COMPACTACIÓN CONTROLADOS, HUANCAYO 2023.

Autores:

1. JORGE ANTONIO MAURI VASQUEZ – EAP. Ingeniería Civil
2. CHRISTIAN DANIEL VILLANUEVA ESPINOZA – EAP. Ingeniería Civil

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 16 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|---|--|-----------------------------|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☒ | NO ☐ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas: 15 | SI ☒ | NO ☐ |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☒ | NO ☐ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

ÍNDICE

PORTADA.....	1
AGRADECIMIENTOS	2
DEDICATORIA	3
ÍNDICE	4
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	15
1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.2. Formulación del Problema	16
1.2.1. Problema General.....	16
1.2.2. Problemas Específicos	16
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Justificación e importancia.....	17
1.4.1. Justificación práctica.....	17
1.4.2. Justificación teórica.....	18
1.4.3. Importancia	18
1.5. Limitaciones de la presente investigación.....	18
1.5.1. Limitación espacial	18
1.5.2. Limitación temporal	18
1.5.3. Limitación conceptual.....	19
1.6. Hipótesis y Variables	19

1.6.1. Hipótesis General.....	19
1.6.2. Hipótesis Específicas	19
1.6.3. Variables	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes del Problema	21
2.1.1. Antecedentes Nacionales	21
2.1.2. Antecedentes Internacionales.....	23
2.2. Bases Teóricas.....	25
2.2.1. Mezclas asfálticas	25
2.2.2. Autorreparación de mezclas asfálticas	26
2.2.3. Energía de compactación	29
2.3. Definición de términos básicos	31
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	33
3.1. Método, tipo o alcance de la investigación	33
3.1.1. Método de Investigación.....	33
3.1.2. Tipo	33
3.1.3. Nivel.....	33
3.1.4. Diseño de la investigación	34
3.2. Población y muestra	34
3.2.1. Población.....	34
3.2.2. Muestra.....	34
3.2.3. Muestreo.....	35
3.3. Técnicas de recolección de datos	35
3.4. Instrumento de análisis de datos	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1. Pruebas de selección y caracterización de materiales	36
4.2. Diseño de mezcla patrón MAC/02.....	46

4.2.1. Mezcla teórica de agregados	46
4.2.2. Mezcla patrón – Óptimo contenido de asfalto	51
4.3. OE1 - Resistencia a la flexión por variación asfáltica	56
4.4. OE2 – Nivel de reparación por número de ciclos	58
4.5. OE3 – Nivel de reparación por energía de compactación.....	59
4.6. OG – Nivel de reparación ante procesos de compactación.....	66
4.7. Discusión de resultados.....	69
4.7.1. Hipótesis 1 – OE1	69
4.7.2. Hipótesis 2 – OE2	69
4.7.3. Hipótesis 3 – OE3	69
4.7.4. Hipótesis 4 - OG	70
4.8. Análisis estadístico.....	71
4.8.1. Resistencia a la flexión	71
4.8.2. Nivel de reparación	73
4.8.3. Proceso de compactación del 1° ciclo.....	76
4.8.4. Proceso de compactación del 2° ciclo.....	78
4.8.5. Proceso de compactación del 3° ciclo.....	81
4.8.6. Proceso de compactación del 4° ciclo.....	84
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
ANEXOS	93
ANEXO 1: Panel fotográfico.....	94
ANEXO 2: Certificados de ensayo	135
ANEXO 3: Certificados de calibración equipos.....	148
ANEXO 4: Matriz de consistencia	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Dispositivos de calentamiento: (a) calentamiento por microondas; (b) calentamiento por inducción	28
Figura 2: Ubicación de planta chancadora de agregados en Pilcomayo	37
Figura 3: Curva granulométrica resultante del análisis a la Piedra ½” - Pilcomayo ...	39
Figura 4: Curva granulométrica resultante del análisis a la arena zarandeada - Pilcomayo	41
Figura 5: Curva granulométrica resultante del análisis a la arena chancada - Pilcomayo	43
Figura 6: Curva granulométrica resultante del análisis al filler – Cal hidratada	45
Figura 7: Curva granulométrica en mezcla teórica de agregados – MAC/02.....	49
Figura 8: Gráfica de puntos de Estabilidad – Variación en contenido asfáltico.....	52
Figura 9: Gráfica de puntos sobre Flujo – Variación en contenido asfáltico.....	53
Figura 10: Gráfica de puntos sobre Peso Unitario – Variación en contenido asfáltico	53
Figura 11: Gráfica de puntos sobre VMA – Variación en contenido asfáltico.....	54
Figura 12: Gráfica de puntos sobre VLLCA – Variación en contenido asfáltico.....	54
Figura 13: Gráfica de puntos sobre Vacíos – Variación en contenido asfáltico.....	55
Figura 14: Resultados del ensayo de flexión probetas semi circulares.....	57
Figura 15: Resultados del ensayo de flexión probetas semi circulares – Ciclos reparación.....	59
Figura 16: Gráfica del proceso de compactado controlado – 1º Ciclo reparación.....	61
Figura 17: Gráfica del proceso de compactado controlado – 2º Ciclo reparación.....	62
Figura 18: Gráfica del proceso de compactado controlado – 3º Ciclo reparación.....	64
Figura 19: Gráfica del proceso de compactado controlado – 4º Ciclo reparación.....	66
Figura 20: Gráfica resumen del proceso de compactado controlado – Ciclo reparación	67
Figura 21: Resumen general Nivel de Reparación (Ir) – Número de ciclos.....	68
Figura 22: Resumen general Nivel de Reparación (Ir) – Proceso de compactación ...	69
Figura 23: Histograma - Lecturas de flexión ante variación de cemento asfáltico.....	72
Figura 24: Diagrama de dispersión - Lecturas de flexión ante variación de cemento asfáltico	73
Figura 25: Histograma - Nivel de reparación ante distintos ciclos.....	74
Figura 26: Diagrama de dispersión - Nivel de reparación ante distintos ciclos.....	75

Figura 27: Histograma - Nivel de reparación (1° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación.....	77
Figura 28: Diagrama de dispersión - Nivel de reparación (1° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	78
Figura 29: Histograma - Nivel de reparación (2° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación.....	79
Figura 30: Diagrama de dispersión - Nivel de reparación (2° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	81
Figura 31: Histograma - Nivel de reparación (3° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación.....	82
Figura 32: Diagrama de dispersión - Nivel de reparación (3° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	83
Figura 33: Histograma - Nivel de reparación (4° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación.....	85
Figura 34: Diagrama de dispersión - Nivel de reparación (4° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de operacionalización.....	20
Tabla 2: Selección y caracterización granular de Piedra ½” - Pilcomayo	38
Tabla 3: Selección y caracterización granular de la arena zarandeada - Pilcomayo ...	40
Tabla 4: Selección y caracterización granular de la arena chancada - Pilcomayo.....	42
Tabla 5: Selección y caracterización granular del filler- Cal hidratada.....	44
Tabla 6: Selección y caracterización materiales – Asfalto PEN 85/100.....	45
Tabla 7: Mezcla de agregados MAC/02 – Porcentajes de agregados	47
Tabla 8: Mezcla de agregados MAC/02 – Especificaciones normativas.....	48
Tabla 9: Pesos de mezcla teórica – MAC/02	50
Tabla 10: Propiedades mecánicas y volumétricas por porcentaje de variación asfáltica	51
Tabla 11: Propiedades del óptimo contenido de asfalto	55
Tabla 12: Resultados del ensayo de flexión probetas semicirculares	56
Tabla 13: Resultados del ensayo de flexión ciclos de reparación – Nivel de reparación	58
Tabla 14: Resultados del proceso de compactado controlado – 1º Ciclo reparación ..	60
Tabla 15: Resultados del proceso de compactado controlado – 2º Ciclo reparación ..	61
Tabla 16: Resultados del proceso de compactado controlado – 3º Ciclo reparación ..	63
Tabla 17: Resultados del proceso de compactado controlado – 4º Ciclo reparación ..	64
Tabla 18: Análisis de normalidad – Lecturas de flexión ante variación de cemento asfáltico	71
Tabla 19: Análisis de correlación - Lecturas de flexión ante variación de cemento asfáltico	72
Tabla 20: Análisis de normalidad – Nivel de reparación ante distintos ciclos	73
Tabla 21: Análisis de correlación - Nivel de reparación ante distintos ciclos	75
Tabla 22: Análisis de normalidad – Nivel de reparación (1º ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	76
Tabla 23: Análisis de correlación - Nivel de reparación (1º ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	77
Tabla 24: Análisis de normalidad – Nivel de reparación (2º ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	79

Tabla 25: Análisis de correlación - Nivel de reparación (2° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	80
Tabla 26: Análisis de normalidad – Nivel de reparación (3° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	81
Tabla 27: Análisis de correlación - Nivel de reparación (3° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	83
Tabla 28: Análisis de normalidad – Nivel de reparación (4° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	84
Tabla 29: Análisis de correlación - Nivel de reparación (4° ciclo) ante distintos golpes en proceso de compactación	85
Tabla 30: Matriz de consistencia	154

RESUMEN

El avance tecnológico en el área de rehabilitación de pavimentos presenta un creciente interés en establecer técnicas que permitan cuidar el tiempo de serviciabilidad de las mezclas asfálticas. Proponiendo de esta forma la autorreparación de mezclas asfálticas mediante el calentamiento por microondas, siendo un campo de investigación muy amplio, se plantea por objetivo principal en el presente estudio analizar la influencia del Microwave Heating Technology (MHT) en el diseño de mezclas asfálticas autorreparables optimizadas con procesos de compactación controlados.

El proceso de autorreparación de mezclas asfálticas mediante el calentamiento por microondas establece ciertos parámetros que pueden llegar a ser útiles para conseguir cumplir con los objetivos planteados, mediante una metodología de carácter científico se establece un orden establecido para el adecuado desarrollo del estudio. Contemplando en una primera instancia, evaluar la resistencia a flexión que presenta el diseño de mezcla patrón en función a los distintos porcentajes de ligante asfáltico establecido por la metodología de diseño Marshall. Teniendo como punto de comparación la resistencia a flexión original, se plantea un análisis correlacional de acuerdo a distintos ciclos de reparación (4 ciclos) y también se establecen procesos controlados de compactación que permitan establecer un coeficiente de relación en función a distintas energías de compactación (20 golpes). El nivel de reparación se establece a través de un análisis comparativo, estadísticamente validado, que permite llegar a un proceso adecuado en la comparativa de autorreparación bajo procesos de compactado controlados.

Los diferenciales encontrados en función a la capacidad de autorreparación por los distintos procesos de compactación ejecutados se presentan en niveles de reparación (%), llegando a concluir que los procesos de compactación efectivamente permiten mejorar el proceso de autorreparación en las mezclas asfálticas. Obteniendo que hasta un 3º ciclo se presenta una mejora representativa en el nivel de autorreparación de las muestras, además se consiguió que en un 1º ciclo de autorreparación una mejora de hasta 59.30% sobre la resistencia a la flexión evaluada.

PALABRAS CLAVE: Autorreparación, mezclas asfálticas, resistencia a flexión, procesos de compactación, ciclos de reparación

ABSTRACT

Technological progress around pavement rehabilitation presents a growing interest in establishing techniques that allow taking care of the service life of asphalt mixtures. Proposing in this way the self-healing of asphalt mixtures through microwave heating, being a very broad field of research, the main objective of this study is to analyze the influence of Microwave Heating Technology (MHT) in the design of optimized self-healing asphalt mixtures. with controlled compaction processes.

The process of self-repair of asphalt mixtures through microwave heating establishes certain parameters that can be useful to achieve the objectives set. Through a scientific methodology, an established order is established for the proper development of the study. Contemplating in a first instance, evaluating the flexural resistance presented by the master mix design based on the different percentages of asphalt binder established by the Marshall design methodology. Taking the original flexural strength as a point of comparison, a correlational analysis is proposed according to different repair cycles (4 cycles) and controlled compaction processes are also established that allow establishing a relationship coefficient based on different compaction energies (20 strokes). The level of repair is established through a comparative, statistically validated analysis, which allows reaching an adequate process in the comparison of self-repair under controlled compaction processes.

The differentials found based on the self-healing capacity of the different compaction processes carried out are presented in repair levels (%), concluding that the compaction processes effectively allow the self-healing process to be improved in asphalt mixtures. Obtaining that up to a 3rd cycle there is a representative improvement in the level of self-repair of the samples, in addition it was achieved that in a 1st cycle of self-repair an improvement of up to 59.30% on the evaluated bending resistance.

KEYWORDS: Self-healing, asphalt mixtures, flexural resistance, compaction processes, repair cycles