



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA ADICIONANDO FIBRAS DE  
ACERO CON LA PROPIEDAD DE AUTO REPARACIÓN  
MEDIANTE INDUCCIÓN DE MICROONDAS EN LA CIUDAD DE  
PUNO-2021**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. JORGE LUIS ROMERO VALERO**

**Bach. JULIO CARLOS GONZALES QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2023**



## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA ADICIONANDO FIBRAS DE ACERO CON LA PROPIEDAD DE AUTO REPARACIÓN MEDIANTE INDUCCIÓN DE MICROONDAS EN LA CIUDAD DE PUNO-2021**

AUTOR

**JORGE LUIS ROMERO VALERO - JULIO CARLOS GONZALES QUISPE**

RECuento DE PALABRAS

**39453 Words**

RECuento DE CARACTERES

**200674 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**212 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.7MB**

FECHA DE ENTREGA

**Nov 28, 2023 9:57 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Nov 28, 2023 9:59 AM GMT-5**

### ● 11% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 10% Base de datos de Internet
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Firmado digitalmente por CASTILLO ARONI Emilio FAU 20145496170 hard  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 28.11.2023 10:09:19 -05:00



Firmado digitalmente por CASTILLO ARONI Emilio FAU 20145496170 hard  
Motivo: Doy V° B°  
Fecha: 28.11.2023 11:56:58 -05:00

Resumen



## DEDICATORIA

A mi padre Néstor Romero por su amor infinito a lo largo de toda mi vida.

**Jorge Luis Romero Valero**



## DEDICATORIA

A mis padres Adolfo y Victoria por su amor constante.

**Julio Carlos Gonzales Quispe**



## AGRADECIMIENTOS

A Dios por cuidarme, mantenerme con salud y ayudarme en los momentos donde mi fuerza desvanecía, a mi padre por sus consejos, a mi hermano por contagiarme su alegría y buen humor, a mi familia por darme su apoyo y tener palabras de aliento siempre.

A mis padres Adolfo y victoria y a mis hermanos, por las motivaciones que siempre tuve de ellos y apoyo incondicional.

**Jorge Luis Romero Valero**

**Julio Carlos Gonzales Quispe**



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ANEXOS**

**RESUMEN ..... 25**

**ABSTRACT ..... 26**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 27**

**1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 29**

1.2.1. Problema General..... 29

1.2.2. Problemas Específicos..... 29

**1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN..... 30**

1.3.1. Hipótesis general ..... 30

1.3.2. Hipótesis específicas ..... 30

**1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO ..... 31**

**1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 33**

1.5.1. Objetivo general ..... 33

1.5.2. Objetivos específicos..... 33

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. MARCO TEÓRICO ..... 35**



2.1.1. Mezclas asfálticas.....	35
2.1.1.1. Clasificación por temperatura del concreto asfáltico.....	35
2.1.1.2. Propiedades de las mezclas asfálticas.....	36
2.1.1.3. Composición de una mezcla asfáltica.....	39
2.1.1.4. Método de Diseño de Mezcla Asfáltica Marshall.....	39
2.1.2. El asfalto.....	40
2.1.2.1. Propiedades del asfalto .....	40
2.1.2.2. Cemento asfáltico .....	41
2.1.3. Los agregados minerales .....	41
2.1.3.1. Características de los agregados minerales.....	42
2.1.3.2. Clasificación de los agregados minerales.....	44
2.1.4. Fibras de acero .....	45
2.1.4.1. Descripción.....	45
2.1.4.2. Marco Normativo Actual.....	45
2.1.4.3. Estructura Química de las Fibras de Acero .....	45
2.1.4.4. Propiedades físicas de las fibras de acero.....	46
2.1.4.5. Clasificación de las fibras de acero. ....	47
2.1.4.6. Clasificación de fibras de acero Según el ASTM A 820-2006. .....	49
2.1.4.7. Aplicaciones .....	50
2.1.5. Microondas.....	50
2.1.5.1. Descripción.....	50
2.1.5.2. Como funciona .....	51
2.1.5.3. Utilización y Aplicaciones del microondas .....	51
2.1.5.4. Ventajas de horno microondas.....	52



2.1.5.5.	Ficha técnica .....	54
2.1.6.	Método Marshall para el diseño de concreto asfáltico .....	54
2.1.6.1.	Introducción .....	55
2.1.6.2.	Sistema de diseño Marshall de pavimentos .....	56
2.1.6.3.	Método del Instituto del Asfalto. ....	63
<b>2.2.</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>64</b>
2.2.1.	Fibras de acero .....	64
2.2.2.	Microondas .....	64
2.2.3.	Antecedentes .....	64
2.2.3.1.	Trabajos Previos Nacionales.....	64
2.2.3.2.	Trabajos Previos Internacionales.....	65
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>		
<b>3.1.</b>	<b>UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO .....</b>	<b>68</b>
3.1.1.	Ubicación del Laboratorio de Investigación .....	69
<b>3.2.</b>	<b>PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO .....</b>	<b>69</b>
<b>3.3.</b>	<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL .....</b>	<b>70</b>
3.3.1.	Ubicación de Cantera de los Agregados. ....	70
<b>3.4.</b>	<b>POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.....</b>	<b>71</b>
3.4.1.	Población.....	71
3.4.2.	Muestra.....	71
<b>3.5.</b>	<b>DISEÑO ESTADÍSTICO .....</b>	<b>71</b>
<b>3.6.</b>	<b>PROCEDIMIENTO.....</b>	<b>72</b>
<b>3.7.</b>	<b>PROCESO EXPERIMENTAL EN LABORATORIO .....</b>	<b>75</b>
<b>3.8.</b>	<b>VARIABLES .....</b>	<b>78</b>



3.8.1.	Tipos de variables.....	78
3.8.1.1.	Variable Independiente .....	78
3.8.1.2.	Variable Dependiente.....	78
3.8.1.3.	Variable Interviniente .....	78
<b>3.9.</b>	<b>MATERIALES.....</b>	<b>79</b>
3.9.1.	Agregados.....	79
3.9.2.	Asfalto .....	79
3.9.3.	Fibras de Acero .....	80
<b>3.10.</b>	<b>EQUIPOS DE LABORATORIO .....</b>	<b>82</b>
<b>3.11.</b>	<b>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>86</b>
3.11.1.	Control de estándares de los Agregados .....	87
3.11.2.	Control de Calidad del Asfalto.....	89
3.11.3.	Proporción de la mezcla del material pétreo .....	91
3.11.4.	Temperatura de Mezcla y Compactación.....	92
3.11.5.	Número de Golpes de Compactación.....	93
3.11.6.	Cálculo del Contenido de Asfalto Optimo .....	93
3.11.7.	Preparación de las Probetas.....	93
<b>3.12.</b>	<b>DISEÑO MARSHALL DEL CONCRETO ASFÁLTICO TRADICIONAL</b> <b>.....</b>	<b>96</b>
3.12.1.	Gravedad Específica bulk de la muestra compactada .....	96
3.12.2.	Gravedad específica teórica máxima (Rice).....	96
3.12.3.	Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados.....	97
3.12.4.	Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados .....	98
3.12.5.	Porcentaje de asfalto absorbido.....	98
3.12.6.	Porcentaje de Asfalto Efectivo.....	99



3.12.7. Porcentaje VMA en Mezcla Compactada .....	100
3.12.8. Vacíos de aire en la mezcla compactada .....	101
3.12.9. Vacíos Llenos con Asfalto. ....	102
3.12.10. Estabilidad Marshall .....	103
3.12.11. Flujo Marshal.....	104
3.12.12. Gráficas Marshall .....	104
3.12.13. Resumen del Diseño Marshall del Concreto Asfáltico Tradicional .	107
<b>3.13. DISEÑO MARSHALL DEL CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO</b> .....	<b>108</b>
3.13.1. Preparación de las probetas .....	109
3.13.2. Gravedad Específica Bulk de la Muestra Compactada .....	110
3.13.3. Gravedad específica teórica máxima (Rice).....	111
3.13.4. Gravedad específica neta de la combinación de agregados <b>Gsb</b> .....	112
3.13.5. Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados .....	112
3.13.6. Porcentaje de asfalto absorbido.....	113
3.13.7. Porcentaje de asfalto efectivo.....	114
3.13.8. Porcentaje VMA en mezcla compactada .....	114
3.13.9. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada .....	115
3.13.10. Vacíos llenos con asfalto .....	116
3.13.11. Estabilidad Marshall .....	117
3.13.12. Flujo Marshall.....	118
3.13.13. Gráficas Marshall.....	118
3.13.14. Resultados del diseño Marshall de concreto asfáltico modificado .....	119
<b>3.14. AUTO REPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO ASFALTICO</b> .....	<b>123</b>



3.14.1. Temperaturas de auto reparación en la superficie de los especímenes.	123
3.14.2. Ensayo de flexión con y sin fibras de acero .....	127
3.14.3. Auto reparación de especímenes por tiempo sometido a microondas. .	129
3.14.4. Auto reparación de especímenes por porcentaje de fibras de acero.....	131
3.14.5. Auto reparación de especímenes por ciclos .....	136
<b>3.15. METODOLOGÍA .....</b>	<b>139</b>
3.15.1. Tipo y nivel de investigación .....	139
3.15.2. Tipos de muestra .....	140
3.15.2.1. Muestras probabilísticas .....	140
3.15.2.2. Muestras no probabilísticas .....	140
<b>3.16. ESTADÍSTICA TEORÍA Y RESULTADOS .....</b>	<b>141</b>
3.16.1. Distribución estadística "T"1 .....	141
3.16.2. Pruebas de hipótesis estadísticas .....	142
3.16.2.1. Planteamiento de las hipótesis .....	142
3.16.2.2. Nivel de significancia .....	142
3.16.2.3. Determinación de la distribución.....	143
3.16.2.4. Cálculo estadístico de la prueba .....	143
3.16.2.5. Esquema de la prueba .....	143
3.16.2.6. Toma de decisión.....	144
3.16.3. Hipótesis general .....	144
3.16.3.1. Hipótesis para la variable auto reparación.....	144
3.16.3.2. Procesamiento de los datos de investigación variable auto reparación .....	145
3.16.3.3. Evaluación por ciclos.....	150
3.16.4. Hipótesis específica 1 .....	154



3.16.4.1. Hipótesis para la variable temperatura .....	154
3.16.4.2. Desarrollo de los datos de investigación variable temperatura .. .....	155
3.16.5. Hipótesis específica 2.....	161
3.16.5.1. Hipótesis para la variable estabilidad .....	161
3.16.5.2. Desarrollo de las variables estabilidad y flujo.....	161
3.16.6. El coeficiente de correlación de Pearson.....	164
3.16.6.1. Prueba de hipótesis para la correlación con coeficiente Pearson .....	166
3.16.6.2. Prueba de hipótesis .....	167
3.16.6.3. P-valor de una prueba de Hipótesis .....	168

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. AGREGADO GRUESO .....</b>	<b>170</b>
<b>4.2. AGREGADO FINO .....</b>	<b>171</b>
<b>4.3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS.....</b>	<b>171</b>
4.3.1. Dosificación de agregados para la mezcla convencional .....	171
4.3.2. Dosificación de agregados para la mezcla modificada .....	172
<b>4.4. RESULTADOS DE DISEÑO MARSHALL CONVENCIONAL .....</b>	<b>172</b>
4.4.1. Análisis de datos de diseño Marshall modificado con fibras de acero..	173
4.4.2. Comparativa de concreto asfáltico tradicional y modificada .....	175
4.4.3. Gráficas comparativas entre mezcla convencional y mezcla modificada ... .....	176
4.4.3.1. Análisis comparativo de parámetros Marshall entre diseño tradicional y modificada .....	179



<b>4.5. ANÁLISIS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL EN LOS ESPECÍMENES.</b>	<b>182</b>
.....	
4.5.1. Velocidad promedio de calentamiento en microondas .....	182
4.5.2. Comparativa entre la mezcla convencional y modificada con F.A. ....	182
4.5.3. Variación de temperatura respecto al tiempo en microondas .....	185
4.5.4. Variación de temperatura con respecto al porcentaje de F.A. ....	186
<b>4.6. RESISTENCIA A FLEXION EN MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADO.....</b>	<b>186</b>
<b>4.7. AUTO REPARACIÓN EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE 4% DE F.A.</b>	<b>187</b>
.....	
<b>4.8. AUTO REPARACIÓN EN FUNCIÓN AL TIEMPO EN MICROONDAS</b>	<b>187</b>
.....	
<b>4.9. CAPACIDAD DE AUTO REPARACIÓN EN FUNCIÓN A CICLOS .....</b>	<b>189</b>
4.9.1. Mezcla convencional.....	189
4.9.2. Mezcla modificada con 2% de F.A. ....	190
4.9.3. Mezcla modificada con 4% de F.A. ....	191
4.9.4. Mezcla modifica con 6% de F.A. ....	192
4.9.5. Mezcla modificada con 8% de F.A. ....	194
<b>4.10. ÓPTIMOS DE PORCENTAJE DE FA, TIEMPO Y CICLOS DE AUTO REPARACIÓN.....</b>	<b>195</b>
4.10.1. Análisis comparativo de auto reparación de la mezcla tradicional y modificada.....	195
<b>4.11. COMPONENTES ÓPTIMOS PARA EL DISEÑO MODIFICADO.....</b>	<b>196</b>
<b>4.12. DISCUSIÓN .....</b>	<b>196</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>199</b>



<b>VI. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>202</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>203</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>207</b>

**ÁREA:** Transportes

**TEMA:** Pavimentos auto reparables

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Transportes y gestión vial

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 30 de noviembre de 2023



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Tipos de fibras, con su respectiva sección transversal .....	48
<b>Figura 2</b>	Propiedades de FA según su morofologia.....	49
<b>Figura 3</b>	Microondas induciendo calor .....	53
<b>Figura 4</b>	Ubicación geográfica del lugar de estudio .....	69
<b>Figura 5</b>	Ubicación de la planta de asfalto.....	70
<b>Figura 6</b>	Corte de briquetas de concreto asfáltico por la mitad .....	74
<b>Figura 7</b>	Ensayo a flexión en la máquina de CBR.....	74
<b>Figura 8</b>	Dimensiones de los espécimenes .....	75
<b>Figura 9</b>	Ensayo a flexión de espécimen modificado semicilíndrico .....	76
<b>Figura 10</b>	Ciclo de reparación.....	77
<b>Figura 11</b>	Fibras de acero .....	81
<b>Figura 12</b>	Pedestal y moldes de compactación .....	83
<b>Figura 13</b>	Equipo Marshall .....	84
<b>Figura 14</b>	Prensa C.B.R. ....	86
<b>Figura 15</b>	Ensayo de partículas chatas y alargadas.....	88
<b>Figura 16</b>	Ensayo de Azul de metileno.....	89
<b>Figura 17</b>	Granulometría de la combinación de agregados .....	92
<b>Figura 18</b>	Calentado de la mezcla asfáltica .....	94
<b>Figura 19</b>	Especímenes de concreto asfáltico en laboratorio.....	95
<b>Figura 20</b>	Ensayos de estabilidad y flujo.....	95
<b>Figura 21</b>	Porcentaje de Asfalto vs Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada.....	105
<b>Figura 22</b>	Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Va).....	105
<b>Figura 23</b>	Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos de agregado mineral ....	106



<b>Figura 24</b>	Porcentajes (% de asfalto vs % de vacíos llenados con Asfalto) .....	106
<b>Figura 25</b>	Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad (Kgf) .....	107
<b>Figura 26</b>	Porcentaje de Asfalto vs Flujo .....	107
<b>Figura 27</b>	Baño María a 60°C a los especímenes .....	109
<b>Figura 28</b>	Ensayos a la muestra asfáltica modificada .....	110
<b>Figura 29</b>	Porcentaje de vacíos (Va) de la mezcla modificada.....	119
<b>Figura 30</b>	Gravedad específica de mezcla asfáltica compactada modificada.....	119
<b>Figura 31</b>	Porcentaje de vacíos de agregado mineral-mezcla modificada.....	120
<b>Figura 32</b>	Porcentaje de vacíos llenos con asfalto de la mezcla modificada .....	120
<b>Figura 33</b>	Estabilidad de mezcla asfáltica modificada.....	121
<b>Figura 34</b>	Flujo de la mezcla asfáltica modificada .....	121
<b>Figura 35</b>	Promedio de temperaturas superficiales para diferentes tiempos y % de F.A. de especímenes .....	126
<b>Figura 36</b>	Calentado de las muestras de concreto asfáltico en microondas.....	126
<b>Figura 37</b>	Toma de temperatura en especímenes de concreto asfáltico.....	127
<b>Figura 38</b>	Testigos sometidos a flexión con fibras de acero.....	128
<b>Figura 39</b>	Auto reparación de especímenes para 0.0% de F.A. en la mezcla.....	132
<b>Figura 40</b>	Auto reparación de especímenes para 2.0% de F.A. añadido a la mezcla .....	133
<b>Figura 41</b>	Auto reparación de especímenes para 4.0% de F.A. añadido a la mezcla .....	134
<b>Figura 42</b>	Auto reparación de especímenes para 6.0% de F.A. añadido a la mezcla .....	135
<b>Figura 43</b>	Auto reparación de especímenes para 8.0% de fibras de acero añadido a la mezcla. ....	136



<b>Figura 44</b>	Análisis comparativo de la Gmb de la mezcla asfáltica compactada...	176
<b>Figura 45</b>	Análisis comparativo del porcentaje de vacíos de aire de las mezclas	176
<b>Figura 46</b>	Análisis comparativo del porcentaje de vacíos de agregado mineral...	177
<b>Figura 47</b>	Análisis de resultados del VFA .....	177
<b>Figura 48</b>	Análisis comparativo del parámetro - Flujo.....	178
<b>Figura 49</b>	Análisis comparativo del parámetro – Estabilidad.....	178
<b>Figura 50</b>	Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, convencional y modificada.....	179
<b>Figura 51</b>	Vacíos de aire del concreto asfáltico convencional y modificado. ....	179
<b>Figura 52</b>	Análisis de resultados de VMA del concreto asfáltico tradicional y modificada.....	180
<b>Figura 53</b>	Análisis de VFA concreto asfáltico convencional y modificado .....	180
<b>Figura 54</b>	Flujo del concreto asfáltico convencional y modificado.....	181
<b>Figura 55</b>	Estabilidad del concreto asfáltico convencional y modificado .....	181
<b>Figura 56</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 2.0% F.A. ....	183
<b>Figura 57</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 4.0% F.A. ....	183
<b>Figura 58</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 6.0% F.A. ....	184
<b>Figura 59</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 8.0% F.A. ....	185
<b>Figura 60</b>	Resistencia a la carga máxima en ensayo a flexión.....	186
<b>Figura 61</b>	Porcentaje de auto reparación para 4.0% de fibra de acero .....	187
<b>Figura 62</b>	Auto reparación para 40 segundos de inducción en microondas - ciclos. ....	188
<b>Figura 63</b>	Auto reparación con 0% de fibras de acero para seis ciclos .....	189
<b>Figura 64</b>	Porcentaje de Auto reparación para 2% de fibras de acero - ciclos .....	191
<b>Figura 65</b>	Porcentaje de Auto reparación para 4% de fibras de acero - ciclos .....	192



<b>Figura 66</b>	Porcentaje de Auto reparación para 6% de fibras de acero - ciclos ..... 193
<b>Figura 67</b>	Porcentaje de Auto reparación para 8% de fibras de acero - ciclos ..... 194
<b>Figura 68</b>	Análisis por ciclos entre concreto asfáltico tradicional y modificado óptimo ..... 195



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Constitución química de las fibras de acero. ....	46
<b>Tabla 2</b>	Tipos de fibra según su contenido de carbono.....	46
<b>Tabla 3</b>	Propiedades mecánicas de diferentes fibras elaboradas por la empresa Maccaferri .....	47
<b>Tabla 4</b>	Propiedadesd de las fibras existentes.....	48
<b>Tabla 5</b>	Tipos de fibras según ASTM A 820-2006 (Dimensión/características)....	50
<b>Tabla 6</b>	Ficha técnica de hormo microondas .....	54
<b>Tabla 7</b>	Ensayos y requerimientos de agregados gruesos para altitudes mayores a 3000 msnm.....	56
<b>Tabla 8</b>	Evaluacion de los materiales finos para altitudes mayores a 3000 msnm	57
<b>Tabla 9</b>	Exigencias para la preparación del concreto asfáltico .....	62
<b>Tabla 10</b>	Vacíos mínimos en el agregado mineral.....	63
<b>Tabla 11</b>	Evaluacion de estandares de los agregados gruesos .....	87
<b>Tabla 12</b>	Evaluacion de estandares de los agregados Finos .....	88
<b>Tabla 13</b>	Evaluacion de estandares del cemento asfáltico .....	89
<b>Tabla 14</b>	Granulometría de la combinación de agregados, MAC 2.....	91
<b>Tabla 15</b>	Gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica convencional .....	96
<b>Tabla 16</b>	Resultados de Gmm del concreto asfáltico tradicional.....	97
<b>Tabla 17</b>	Resultados de Pbe del concreto asfáltico convencional.....	100
<b>Tabla 18</b>	Resultados de VMA del concreto asfáltico tradicional .....	101
<b>Tabla 19</b>	Vacíos de aire en la mezcla asfáltica tradicional .....	102
<b>Tabla 20</b>	Vacíos llenos con asfalto del concreto asfáltico tradicional .....	103
<b>Tabla 21</b>	Estabilidad Marshall del concreto asfáltico tradicional .....	104
<b>Tabla 22</b>	Flujo Marshall del concreto asfáltico tradicional .....	104



<b>Tabla 23</b>	Diseño Marshall de la mezcla asfáltica en caliente tradicional .....	108
<b>Tabla 24</b>	Resultados de Gmb del concreto asfáltico modificado.....	111
<b>Tabla 25</b>	Resultados Gmm de la mezcla asfáltica en caliente .....	112
<b>Tabla 26</b>	Resultados de Gsb adicionando fibras de acero.....	112
<b>Tabla 27</b>	Resultados de <i>VMA</i> del concreto asfáltico modificado.....	115
<b>Tabla 28</b>	Vacíos de Aire en la Mezcla del Concreto Asfáltico Modificado .....	116
<b>Tabla 29</b>	Valores obtenidos de <i>VFA</i> del asfalto Modificado .....	116
<b>Tabla 30</b>	Estabilidad Marshall del Concreto Asfáltico Modificado .....	117
<b>Tabla 31</b>	Flujo Marshall del Concreto Asfáltico Modificado .....	118
<b>Tabla 32</b>	Resumen de resultados de la mezcla modificada.....	122
<b>Tabla 33</b>	Temperaturas superficies en especímenes para 20 segundos en microondas .....	124
<b>Tabla 34</b>	Temperaturas superficies en especímenes para 40 segundos en microondas .....	124
<b>Tabla 35</b>	Temperaturas superficies en especímenes para 60 segundos en microondas .....	124
<b>Tabla 36</b>	Temperaturas superficies en especímenes para 80 segundos en microondas .....	125
<b>Tabla 37</b>	Promedio de temperaturas para diferentes tiempos y porcentajes .....	125
<b>Tabla 38</b>	Las cargas respecto a la cantidad de F.A. añadidos de 2%,4%,6% y 8% a la mezcla modificada .....	128
<b>Tabla 39</b>	Auto reparación de especímenes sometidos a microondas para 20s.....	129
<b>Tabla 40</b>	Auto reparación de especímenes sometido a microondas para un tiempo 40s .....	130



<b>Tabla 41</b>	Auto reparación de especímenes sometido a microondas para un tiempo de 60s .....	130
<b>Tabla 42</b>	Auto reparación de especímenes sometido a microondas para un tiempo de 80s .....	131
<b>Tabla 43</b>	Auto reparación de especímenes para 0.0% de F.A. en la mezcla.....	131
<b>Tabla 44</b>	Auto reparación de especímenes para 2.0% de F.A. añadido a la mezcla .....	132
<b>Tabla 45</b>	Auto reparación de especímenes para 4.0% de F.A. añadido a la mezcla .....	133
<b>Tabla 46</b>	Auto reparación de especímenes para 6.0% de F.A. añadido a la mezcla .....	134
<b>Tabla 47</b>	Auto reparación de especímenes para 8.0% de F.A. añadido a la mezcla .....	135
<b>Tabla 48</b>	Primer ciclo de auto reparación de especímenes .....	136
<b>Tabla 49</b>	Segundo ciclo de auto reparación de especímenes .....	137
<b>Tabla 50</b>	Tercer ciclo de auto reparación de especímenes.....	137
<b>Tabla 51</b>	Cuarto ciclo de auto reparación de especímenes .....	138
<b>Tabla 52</b>	Quinto ciclo de auto reparación de especímenes .....	138
<b>Tabla 53</b>	Sexto ciclo de auto reparación de especímenes .....	139
<b>Tabla 54</b>	Número de muestras para cada variable .....	142
<b>Tabla 55</b>	Auto reparación para 0% y 2% de fibra de acero .....	145
<b>Tabla 56</b>	Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 2%) F.A.....	145
<b>Tabla 57</b>	Auto reparación para 0% y 4% de fibra de acero .....	146
<b>Tabla 58</b>	Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 4%) F.A.....	147
<b>Tabla 59</b>	Auto reparación para 0% y 6% de fibra de acero .....	148



<b>Tabla 60</b>	Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 6%) F.A. ....	148
<b>Tabla 61</b>	Auto reparación para 0% y 8% de fibra de acero .....	149
<b>Tabla 62</b>	Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 8%) F.A. ....	149
<b>Tabla 63</b>	Auto reparación 1er ciclo para 0% y 4% de fibra de acero .....	150
<b>Tabla 64</b>	Evaluación estadístico, variable auto reparación 1er ciclo .....	151
<b>Tabla 65</b>	Auto reparación 2do ciclo para 0% y 4% de fibra de acero .....	151
<b>Tabla 66</b>	Evaluación estadístico, variable auto reparación 2do ciclo .....	152
<b>Tabla 67</b>	Auto reparación 3er ciclo para 0% y 4% de fibra de acero .....	153
<b>Tabla 68</b>	Evaluación estadístico, variable auto reparación 3er ciclo .....	153
<b>Tabla 69</b>	Temperatura para 0% y 2% de fibra de acero.....	155
<b>Tabla 70</b>	Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 2%) de F.A....	155
<b>Tabla 71</b>	Temperatura para 0% y 4% de fibra de acero.....	156
<b>Tabla 72</b>	Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 4%) de F.A....	157
<b>Tabla 73</b>	Temperatura para 0% y 6% de fibra de acero.....	158
<b>Tabla 74</b>	Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 6%) de F.A....	158
<b>Tabla 75</b>	Temperatura para 0% y 8% de fibra de acero.....	159
<b>Tabla 76</b>	Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 8%) de F.A....	160
<b>Tabla 77</b>	Estabilidad de 0% y 4% de F.A. ....	161
<b>Tabla 78</b>	Análisis estadístico para la variable estabilidad para 0% y 4% de F.A. .	162
<b>Tabla 79</b>	Análisis de la variable flujo de 0% y 4% de F.A. ....	163
<b>Tabla 80</b>	Análisis estadístico para la variable flujo .....	163
<b>Tabla 81</b>	Datos obtenidos de las roturas del concreto convencional y modificado	165
<b>Tabla 82</b>	Valores de rotura luego de la reparación del concreto convencional y modificado .....	165
<b>Tabla 83</b>	Análisis de resultados del agregado grueso .....	170



<b>Tabla 84</b>	Análisis de resultados de los materiales finos .....	171
<b>Tabla 85</b>	Dosificación del diseño óptimo con 5.86% de cemento asfáltico .....	171
<b>Tabla 86</b>	La dosificación para el diseño óptimo .....	172
<b>Tabla 87</b>	Resultados de diseño Marshall convencional .....	173
<b>Tabla 88</b>	Análisis de resultados de diseño Marshall modificado con fibras de acero .....	174
<b>Tabla 89</b>	Parámetros de la mezcla convencional y modificada con fibras de acero .....	175
<b>Tabla 90</b>	Estabilidad y flujo de mezcla convencional y modificada.....	175
<b>Tabla 91</b>	Velocidad promedio de calentamiento en microondas para 40 segundos .....	182
<b>Tabla 92</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 2.0% F.A.....	182
<b>Tabla 93</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 4.0% F.A.....	183
<b>Tabla 94</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 6.0% F.A.....	184
<b>Tabla 95</b>	Comparativa de temperaturas de 0.0% y 8.0% F.A.....	184
<b>Tabla 96</b>	Variación de temperatura induciendo microondas - tiempo.....	185
<b>Tabla 97</b>	Variación de temperatura induciendo microondas - fibras de acero.....	186
<b>Tabla 98</b>	Auto reparación mediante la inducción de microondas para seis ciclos.	187
<b>Tabla 99</b>	Auto reparación en función a ciclos y diferentes tiempos - 0% F.A. ....	189
<b>Tabla 100</b>	Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos - 2% F.A..	190
<b>Tabla 101</b>	Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos - 4% F.A.	191
<b>Tabla 102</b>	Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos - 6% FA...	193
<b>Tabla 103</b>	Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos – 8 % FA.	194
<b>Tabla 104</b>	Análisis comparativo entre concreto asfáltico convencional y modificado óptimo .....	195



<b>Tabla 105</b>	Componentes óptimos de la mezcla asfáltica modificada .....	196
------------------	---	-----



## RESUMEN

Con el objetivo de encontrar una opción para la reparación de pavimentos asfálticos en la capital de Puno, se propone la siguiente investigación que tiene como propósito principal diseñar una mezcla asfáltica modificada adicionando fibras de acero con la capacidad de auto repararse induciéndole calor a través de microondas. Para lo cual, se adquirió los insumos que conforman la mezcla asfáltica tales como, cemento asfáltico, agregados pétreos y fibras de acero, luego, se ejecutaron las pruebas de aseguramiento de la calidad de los materiales pétreos cumpliendo los límites exigidos por el MTC, la proporción de la mezcla y el diseño tradicional del concreto asfáltico fueron determinados mediante el método Marshall, con el porcentaje óptimo de bitumen se elaboró las probetas del concreto asfáltica modificada con fibras de acero (2%, 4%, 6% y 8%) por peso del ligante óptimo, se llevaron a cabo pruebas Marshall para cada porcentaje y se prepararon especímenes cilíndricos correspondientes, los cuales se cortaron por la mitad para obtener muestras semicirculares. Estas muestras se sometieron a cargas axiales para inducir fisuras, y luego se empleó la aplicación de microondas para facilitar su auto reparación. El estudio reveló que la inclusión de fibras de acero favorece una auto reparación más eficaz en comparación con la mezcla tradicionales, acelerando el aumento de las temperaturas superficiales bajo la exposición a microondas. Se observó que el 4% de fibras de acero, después de ser expuestas a microondas, generó los resultados más destacados en comparación con la mezcla tradicionales y otros porcentajes de fibras de acero. Este porcentaje contribuye significativamente a la auto reparación de las fisuras en el concreto asfáltico, superando en tres ciclos evaluados el 50% de reparación con respecto a la rotura inicial.

**Palabras clave:** Auto reparación, Fibras de acero, Microondas.



## ABSTRACT

With the objective of finding an option for the repair of asphalt pavements in the capital of Puno, the following research is proposed, whose main purpose is to design a modified asphalt mixture by adding steel fibers with the ability to self-repair by inducing heat through microwaves. For which, the inputs that make up the asphalt mixture were acquired, such as asphalt cement, stone aggregates and steel fibers, then, tests were carried out to ensure the quality of the stone materials, complying with the limits required by the MTC, the proportion of the mixture and the traditional design of the asphalt concrete were determined using the Marshall method, with the optimal percentage of bitumen, the asphalt concrete samples modified with steel fibers (2%, 4%, 6% and 8%) were prepared. by weight of the optimal binder, Marshall tests were carried out for each percentage and corresponding cylindrical specimens were prepared, which were cut in half to obtain semicircular samples. These samples were subjected to axial loads to induce cracks, and then the application of microwaves was used to facilitate their self-healing. The study revealed that the inclusion of steel fibers favors more effective self-repair compared to the traditional mixture, accelerating the increase in surface temperatures under microwave exposure. It was observed that 4% of steel fibers, after being exposed to microwaves, generated the most outstanding results compared to the traditional mixture and other percentages of steel fibers. This percentage contributes significantly to the self-repair of cracks in asphalt concrete, exceeding 50% repair with respect to the initial breakage in three evaluated cycles.

**Keywords:** Auto repair, Steel fibers, Microwave.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, una de las deficiencias principales presentes en la infraestructura vial de la ciudad de Puno, es la falta de innovación sobre tecnologías que propongan diseños de mezclas asfálticas en caliente modernos, que solucionen las deficiencias que presenta los pavimentos flexibles tradicionales cuando se trata de su uso y sobre todo en el aspecto de reparaciones al cual va enfocado el presente estudio.

La falta de inversión de recursos en el ámbito público para la investigación en ingeniería de materiales ha ocasionado la continuación en la adopción de diseños convencionales de pavimentos. Esto ha resultado en la carencia de investigaciones detalladas y literatura especializada que se dedique a ofrecer datos para la restauración y recuperación de áreas afectadas por problemas como grietas y fisuras, con el objetivo de prolongar la durabilidad de las vías.

Según el Ministerios de Transportes y Comunicaciones y la Asociación Automotriz del Perú- A.A.P. para el año 2022, en el departamento de Puno se contabilizaron 57,395 vehículos en circulación y del mismo modo en el periodo del 2012 a 2022, registró un aumento de 1 165 639 unidades vehiculares en todo el país, de la misma manera El INEI informo que el año 2022 cerró con un crecimiento de 5.5% en el Índice de Flujo Vehicular.

Con una tasa de crecimiento constante del parque automotor resulta en un aumento en la cantidad de vehículos en movimiento por las calles y carreteras Puneñas el



cual conlleva al deterioro gradual que experimenta una superficie pavimentada debido al uso, el clima y otros factores, esto lleva al deterioro anticipado, manifestándose en forma de fisuras, grietas, baches y deformaciones. Estas deficiencias estructurales generan problemas para los vehículos en circulación, resultando en la necesidad de realizar reparaciones, según indica el informe de la Asociación Automotriz del Perú y los datos que manejan los de la ONG Luz Ámbar, los costos asociados con las reparaciones de vehículos debido al deterioro de las carreteras oscilan entre S/.1,000 y S/.1,500. Estos gastos que recaen sobre el ciudadano común podrían disminuirse mediante un mantenimiento adecuado antes de que las vías presenten baches significativos.

Cuando se trata de realizar las labores de mantenimiento y reparación en los pavimentos tradicionales, se sigue un procedimiento que implica el cierre temporal de la vía o la desviación del tráfico durante las labores de reparación ya que estos desplazan una cantidad de personal y maquinarias pesadas. Estos métodos de reparación, que suelen ser prolongados, generan cierres viales extensos y congestiones vehiculares, lo que causa molestias a peatones y conductores.

La alternativa propuesta en la investigación es diseñar un pavimento flexible con la capacidad de auto reparar fisuras a través de la inducción de microondas y poder realizar varios ciclos de reparación en el pavimento dañado del mismo modo se busca brindar un diseño modificado con fibras de acero y dar nuevas propuestas en la conservación de la carpeta asfáltica y con el fin de establecer beneficios que no se consigue con los pavimentos flexibles convencionales tales como la facilidad que se requerirá en la ejecución de las reparaciones de las fallas, simplificación de tareas a la hora de ejecutar las reparaciones, no se requerían insumos adicionales a la hora de hacer el trabajo como lo hace el convencional que utiliza: selladores, asfalto, adhesivos,



morteros y otros , se requerirá menor cantidad de personal, lo cual conlleva a menores costos y la reducción del tiempo necesario para reparar fallas evitando mayores congestionamientos vehiculares y malestares de los usuarios a la hora que se efectúan las reparaciones en las vías públicas.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es la influencia de la incorporación de fibras de acero a una mezcla asfáltica diseñado por el método Marshall en la auto reparación de fisuras, mediante la inducción de calor a través de microondas en la ciudad de Puno, 2021?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuál es el porcentaje de fibras de acero que se debe añadir a la mezcla asfáltica convencional para que esta adquiera una mejor capacidad de auto reparación de fisuras induciéndole microondas en la ciudad de Puno,2021?
- ¿Cuál es el efecto al añadir diferentes porcentajes de fibras de acero al concreto asfáltico en las temperaturas superficiales de las muestras, induciendo calor a través de microondas en la ciudad de Puno,2021?
- ¿Cuál es el diseño óptimo de la mezcla asfáltica en caliente utilizando el método Marshall en la ciudad de Puno,2021?
- ¿Qué balance se tiene al diseñar la mezcla asfáltica en caliente modificada con fibra de acero, tomando como base la mezcla asfáltica convencional óptimo, utilizando el método Marshall en la ciudad de Puno,2021?



- ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos, requeridos para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente en la ciudad de Puno,2021?

### **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. Hipótesis general**

- Las fibras de acero influyen en mejorar la capacidad de auto reparación de fisuras del concreto asfáltico diseñado por el método Marshall mediante la inducción de calor a través de microondas en la ciudad de Puno,2021.

#### **1.3.2. Hipótesis específicas**

- El porcentaje óptimo de fibras de acero que se debe añadir es 4% a una mezcla asfáltica convencional la cual incrementa la capacidad de auto reparación de fisuras induciéndole microondas en la ciudad de Puno,2021.
- Las temperaturas superficiales de las muestras del concreto asfáltico modificado con diferentes porcentajes de fibras de acero incrementan gradualmente, después de ser sometidos a microondas en la ciudad de Puno,2021.
- El diseño óptimo de la mezcla asfáltica en caliente convencional utilizando el método Marshall se encuentra en el límite del 5% al 6% de cemento asfáltico en la ciudad de Puno,2021.
- La mezcla asfáltica en caliente modificada con fibra de acero óptimo no tiene una mejora significativa en las propiedades físicas y mecánicas en relación a la mezcla asfáltica convencional óptimo en la ciudad de Puno,2021.



- Las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos cumplen con los parámetros requeridos en el M.T.C. y son aptas para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente en la ciudad de Puno,2021

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

En naciones en vías de desarrollo, la necesidad de disponer de opciones alternativas para pavimentación es de máxima importancia. Las carreteras desempeñan un papel esencial en la competitividad de un país, promoviendo un crecimiento económico equilibrado, mejorando la inclusión social y facilitando la integración tanto a nivel interno como externo. La construcción de pavimentos sostenibles, respaldada por tecnologías innovadoras, se orienta hacia la resolución de desafíos tanto sociales como técnicos en el ámbito de la pavimentación. Uno de los inconvenientes que afecta las infraestructuras viales en la ciudad de Puno es la presencia de pavimentos que reciben poca supervisión por parte de expertos durante el proceso constructivo y sufren de insuficiente mantenimiento después de su construcción. Esto ocasiona la aparición prematura de diversas deficiencias, como grietas, hundimientos y deformaciones, generando molestias en el tráfico vehicular.

Según el Ministerios de Transportes y Comunicaciones y la Asociación Automotriz del Perú – A.A.P. a nivel nacional para el año 2022 se registró 3,303,476 automóviles y 57,395 solo para el departamento de Puno y según reporte del INEI para el año 2019 el Índice Nacional del Flujo Vehicular se elevó en 5,8 %.

El crecimiento del sector automotriz juntamente con las variaciones abruptas de las temperaturas naturales de la sierra Peruana, ocasiona el deterioro y daño acelerado del concreto asfáltico, lo que provoca problemas relacionados a la funcionalidad,



consecuentemente resultan en fallas estructurales como se presenta (por mencionar unas de las tantas existentes) en la av. la Torre, la circunvalación, el sol, la costanera, etc., que son vías principales de la ciudad de Puno y en las vías de otros departamentos del país, algunos de estos fueron diseñados para un flujo vehicular menor, sin embargo con el crecimiento poblacional y número de vehículos pesados en aumento estas vías exceden la capacidad, ocasionando con el paso del tiempo agrietamientos y deformaciones en el pavimento flexible, por estos motivos que se realizan reparaciones y mantenimientos de los pavimentos flexibles convencionales antes de su tiempo previsto; en tal sentido a la hora de hacer los mantenimientos con métodos tradicionales se tiene que cerrar una parte de la ruta o en su peor caso cerrar la vía completa, por el tiempo que requiera la reparación, este tipo de trabajos de mantenimientos son demorosos y tediosos ocasionando accidentes y malestar como congestionamientos vehiculares, principalmente para los que se desplazan en automóviles privados, transporte público y los transportistas de mercancías, ocasionando demoras y pérdidas.

Con la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero con capacidad de auto reparación induciendo microondas propuesta en la investigación, estos mantenimientos se realizarán en un menor tiempo dando soluciones rápidas, resolviendo el congestionamiento de las ciudades y problemas que conlleva este tipo de trabajos del mismo modo alargarán la vida útil de los pavimentos ya que la auto reparación de estas se podrá aplicar varias veces.

Según mecánicos y expertos en transporte consultados por diario El Comercio, anualmente un conductor podría incurrir en gastos que oscilan alrededor de S/.800 debido a las reparaciones causadas por los baches existente en las vías de las ciudades por donde transitan, Sin embargo, la Asociación Automotriz del Perú sostiene una estimación más



alta. Según su perspectiva, los costos de reparación de vehículos debido al mal estado de las carreteras pueden variar entre S/.1,000 y S/.1,500, estos costos que generan al ciudadano común se podrían reducir con un buen mantenimiento antes de que estas lleguen a tener baches considerables, en la investigación se propone a solucionar con la auto reparación a tiempo de las fisuras en el pavimento flexible dando mayor confort y reduciendo los gastos de los usuarios en el mantenimiento de sus vehículos.

De acuerdo a lo mencionado por del ingeniero de pavimentos Néstor Huamán Guerrero, miembro del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP), el costo promedio de reparar una carretera de 1 kilómetro de longitud y 7 metros de ancho es de aproximadamente 500,000 dólares (según un artículo de El Comercio en 2014), con la propuesta de la investigación se quiere reducir estos costos de mantenimiento ya que en el prototipo de sistema operativo propuesto se requerirá menor cantidad de personal, menor tiempo que las reparaciones tradicionales y una vida útil mayor de los pavimentos modificados con fibras de acero.

## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Objetivo general**

- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall adicionando fibras de acero, con la capacidad de auto reparación de fisuras induciéndole calor a través de microondas en la ciudad de Puno, 2021.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Establecer el porcentaje óptimo de fibras de acero para la mezcla asfáltica en caliente modificada con la capacidad de auto reparación de fisuras induciéndole microondas en la ciudad de Puno, 2021.



- Realizar el calentamiento a través de microondas las muestras de concreto asfáltico modificado en la ciudad de Puno, 2021.
- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente óptima con la dosificación adecuada de agregados y asfalto, usando el método Marshall en la ciudad de Puno,2021.
- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente modificada con fibra de acero, tomando como base la mezcla asfáltica convencional óptimo, a través del método Marshall en la ciudad de Puno,2021.
- Ejecutar ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos para la mezcla asfáltica en caliente en la ciudad de Puno,2021.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas están constituidas por un aglutinante bituminoso obtenido a partir del petróleo, así como por agregados minerales pétreos y material de relleno. Estas mezclas se emplean en los proyectos de vías, desempeñando funciones clave en las capas superficial, bases o sub bases. Su objetivo principal es ofrecer a los usuarios de las vías de comunicación una superficie de rodadura que sea a la vez económica, cómoda y segura, facilitando así el desplazamiento de vehículos de diversa índole; Además, las cargas generadas por el tráfico son transmitidas a las capas inferiores del terraplén por estas mezclas. Gracias a su función como sellador, se emplean en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales y en varias aplicaciones. (Padilla, 2004).

La Composición del Concreto asfáltico convencional está dada por el ligante asfáltico, agregado grueso, agregado fino y polvo mineral (filler).

##### 2.1.1.1. Clasificación por temperatura del concreto asfáltico

- Mezclas asfálticas en caliente. Es la combinación de agregados uniformemente gradados que cumple con una determinada granulometría y cubiertos por un ligante asfáltico. Se producen a altas temperaturas, específicamente en un intervalo que varía alrededor de los 150 °C, según la consistencia del aglutinante, se eleva la temperatura



de los materiales pétreos de manera que, al mezclarse con el betún asfáltico, conserven una temperatura superior que favorezca la aplicación y compactación eficaz de la mezcla.

- Mezclas asfálticas en frío. - En el contexto de estas mezclas asfálticas particulares, se produce un cambio en el aglutinante asfáltico, que deja de ser el cemento asfáltico para ser la emulsión asfáltica. Además, su aplicación se lleva a cabo a temperatura ambiente.

#### **2.1.1.2. Propiedades de las mezclas asfálticas**

- Estabilidad. - La resistencia de una mezcla asfáltica a deformaciones causadas por las cargas de tráfico se conoce como su capacidad de estabilidad. Esta propiedad suele depender de dos factores fundamentales: La resistencia al deslizamiento dentro de la mezcla se ve afectada por factores como la textura superficial, el tamaño de los agregados y la proporción de asfalto. En otro sentido, la habilidad de la combinación para conservar su unión, o coherencia, guarda una relación directa con la cantidad de alquitrán presente. A medida que la cantidad de asfalto incrementa, la cohesión también experimenta un incremento hasta llegar a un punto crucial, a partir del cual comienza a decrecer; Esto significa que la estabilidad de la mezcla mejora a medida que se aumenta la cantidad de asfalto hasta alcanzar un contenido óptimo, más allá del cual disminuirá. (Instituto del Asfalto, 1985)
- Durabilidad. - Característica de una mezcla asfáltica que demuestra la habilidad para soportar la desintegración causada por las tensiones



generadas por el tráfico y las condiciones climáticas. El deterioro producto del clima genera cambios en las características del cemento asfáltico tales como la volatilización y oxidación, que generan alteraciones tanto en los agregados como del asfalto. La durabilidad de la mezcla asfáltica depende de una adecuada granulometría cerrada, compactación, impermeabilidad y contenido de asfalto. Para una mayor duración de la mezcla asfáltica es determinante la medida del espesor de la película que cubre las partículas minerales, a mayor espesor de la película mayor durabilidad de la mezcla asfáltica. Otro argumento por el cual el aumento del asfalto es favorable para la mezcla es que a mayor contenido de asfalto menor contenido de vacíos y por ende reduce los poros interconectados, haciendo difícil la entrada de agua y de vacíos de aire. (Instituto del Asfalto, 1985).

- Flexibilidad. - Facultad que tiene la mezcla asfáltica para acomodarse a los asentamientos progresivos y movimientos en la sub base y en las bases en el terraplén. Es casi imposible obtener una densidad uniforme durante el proceso de construcción de la sub bases debido a que se asienta y se comprime producto del tránsito vehicular. Por este motivo, la estructura del pavimento debe ser capaz de resistir variaciones en el asentamiento sin experimentar fracturas. La flexibilidad es directamente proporcional al aumento de cemento asfáltico, a mayor porcentaje de asfalto mayor flexibilidad. (Instituto del Asfalto, 1985).



- Resistencia a la Fatiga. - Es la capacidad que tiene un concreto asfáltico para resistir flexiones continuas generadas por las ruedas de los vehículos. Los ensayos han demostrado que el porcentaje de concreto asfáltico tiene relación directa con la resistencia a la fatiga. Las pruebas dieron por resultados que a las gradaciones cerradas producen una mejor resistencia a la fatiga, se debe adicionar un agregado pétreo bien graduado que permitan un mayor contenido de asfalto sin causar exudación o afloramiento en el pavimento compactado. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Resistencia al Deslizamiento. - La idoneidad de la superficie de rodadura para prevenir el deslizamiento, especialmente en condiciones de humedad o mojado. Los principales factores para una adecuada resistencia al desplazamiento son principalmente dos, adecuado contenido de asfalto y agregados con textura superficial rugosa, además el agregado pétreo debe también ser resistente al pulimiento. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Impermeabilidad. - Es capacidad del pavimento asfáltico para resistir la penetración de aire y agua a través de su composición. La impermeabilidad de aire y de agua es extremadamente importante para la durabilidad de la mezcla compactada. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Trabajabilidad. – La sencillez con la que una mezcla puede ser manipulada, trabajada y compactada se logra con atención especial al diseño y el uso adecuado de maquinaria durante la colocación. De esta manera, la compactación de la mezcla no presentará inconvenientes. En muchos casos las propiedades de los agregados que aseguran una



elevada estabilidad pueden causar dificultad para distribuir y compactar la mezcla. (Instituto del Asfalto, 1985).

### **2.1.1.3. Composición de una mezcla asfáltica**

Una combinación tradicional de concreto asfáltico implica la mezcla:

El bitumen que generalmente se encuentra entre 4 % a 7 %, en las mezclas asfálticas. El asfalto trabaja como ligante o cementante en la mezcla asfáltica, además sirve como impermeabilizante. Es un hidrocarburo que es derivado del petróleo, es clasificado de acuerdo a su grado de penetración. (Instituto del Asfalto, 1985).

Agregado pétreo y filler que juntos alcanzan un porcentaje entre 93% a 96%, en las mezclas asfálticas. Los componentes pétreos son sustancias granulares comúnmente derivadas de la trituración de rocas. Su naturaleza y calidad son importantes, debido a que el comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por los mismos. (Instituto del Asfalto, 1985).

### **2.1.1.4. Método de Diseño de Mezcla Asfáltica Marshall**

Es el de mayor uso en estos tiempos, fue estudiado y elaborado por Bruce Marshall durante la segunda Guerra Mundial. Este diseño de mezcla puede ser utilizado en agregados de hasta una pulgada 1". Este método busca hallar una mezcla en caliente, por medio de un análisis y diferentes ensayos como el flujo, estabilidad, densidad y volumen de vacíos. Una de las virtudes de este método es la importancia que se le asigna a la densidad



/vacíos logrando englobar las características para hallar una mezcla durable, este método también puede ser utilizado para el control de mezclas de los pavimentos recién compactados. Una limitación está relacionada con la técnica empleada para compactar las muestras en el laboratorio, la cual no reproduce de manera precisa la verdadera compactación de la mezcla que tiene lugar bajo el tráfico en un pavimento real. Este ensayo ha sido normalizado por la norma ASTM D 1559. (Minaya y Ordoñez, 2001).

### **2.1.2. El asfalto**

El asfalto es un material ligante de color que va de marrón oscuro a negro, constituido principalmente de asfáltenos que pueden ser obtenidos de forma natural u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo. (Instituto del Asfalto, 1985).

#### **2.1.2.1. Propiedades del asfalto**

Para su estudio técnico y su construcción hay tres propiedades o características del asfalto más resaltantes: (Instituto del Asfalto, 1985).

- Pureza. - los cementos asfálticos al salir de la refinación están libres de agua o humedad, si hay agua en el cemento asfáltico puede causar espumas al asfalto cuando alcanza una temperatura superior a los 100°C.
- Consistencia. – se utiliza para indicar el nivel de fluidez del bitumen a una temperatura determinada.



- Seguridad. - las normas exigen que los cementos asfálticos no tengan espuma a temperaturas inferiores a 175°C, los cementos asfálticos cuando son calentados a temperaturas suficientemente elevadas despiden chispa o llamas, las temperaturas a la que ocurre estos es inferiores a las utilizadas durante la elaboración del concreto asfáltico, sin embargo, para garantizar un margen de seguridad adecuado, es esencial conocer el punto de fluencia del concreto.

#### **2.1.2.2. Cemento asfáltico**

Existen diferentes tipos, según a su grado de penetración se clasifican en cinco: PEN 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300, donde se sabe que PEN 40-50 es el más rígido y tiene un menor grado de penetración y PEN 200-300 es el más flexible, el que tiene un mayor grado de penetración. La clasificación más reciente, de base más científica es según su grado de viscosidad en poises a 60°C, según esta clasificación son cinco AC-2.5; AC-5; AC-10; AC-20; AC-40 (Instituto del Asfalto, 1985).

#### **2.1.3. Los agregados minerales**

Los elementos minerales se han caracterizado como cualquier sustancia inerte y resistente con partículas o fragmentos utilizados en la combinación asfáltica, abarcando elementos como arena, gravilla, fragmentos de piedra y polvo proveniente de rocas. Según la normativa ASTM, El agregado se describe como una sustancia granular formada por minerales, como arena, fragmentos de piedra y gravilla., empleado junto con un agente cementante para la creación de concretos



o morteros, o incluso de forma independiente como capas de terraplenes, balastos de ferrocarriles, entre otros. La proporción de agregado mineral en la mezcla varía entre el 75 y el 85% del contenido total de la mezcla asfáltica, y entre el 90% y el 95% del peso total de la misma. Estos agregados minerales desempeñan un papel crucial en la capacidad de carga de la mezcla, y sus propiedades como textura y granulometría impactan directamente en las características de la combinación asfáltica. (Instituto del Asfalto, 1985)

### **2.1.3.1. Características de los agregados minerales**

- Peso específico de un agregado. - Es el resultado entre el peso de un volumen unitario de material y el peso de igual volumen de agua a temperatura de agua a 25°C. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Tamaño de los agregados. - El tamaño de material pétreo se pueden dividir en 2 tipos, estos son:
- Tamaño máximo de un agregado. - Es el tamiz más reducido por el cual pasa todo el agregado mineral. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Tamaño máximo nominal. Se establece como el tamiz superior que sigue inmediatamente al primer tamiz que contiene el 10% del material durante el proceso de ensayo de granulometría. Asimismo, es de suma importancia pues será de gran utilidad a la hora de realizar ensayos para el control de calidad del mismo. (Minaya y Ordoñez, 2001).
- Granulometría. - La característica física fundamental de cada conjunto de partículas minerales que influye directamente en la solidez mecánica del armazón mineral. Se acostumbra utilizar distribuciones de tamaño continuo con el fin de obtener la compactación máxima del



conjunto; los análisis granulométricos se realizan mediante tamizado, el procedimiento es muy parecido al utilizado para la clasificación de suelos. (Padilla, 2004).

- Limpieza. - Característica que indica estar libre de material deletéreo o sustancias extrañas las cuales hacen que el material sea inadecuado para su uso en la mezcla asfáltica, a menos que la cantidad sea reducida y pueda cumplir con los mínimos permisibles establecidos por las normas. Los materiales objetables más comunes son, sustancias orgánicas, terrones y arcillas recubriendo las partículas minerales. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Resistencia al Desgaste. - La prueba de abrasión o desgaste los ángeles mide la resistencia al desgaste del material pétreo; el proceso se encuentra en las normas AASHTO T96 y ASTM C 131. El agregado pétreo está sujeto a una rotura adicional y a un desgaste por abrasión durante la compactación y elaboración de la mezcla asfáltica. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Textura Superficial. - La textura superficial influye en la resistencia y en la trabajabilidad de las mezclas asfálticas. Una textura superficial rugosa tiende a incrementar la resistencia de la mezcla. La trituración de los agregados produce partículas con superficies rugosas, la adherencia de la película de asfalto será más efectiva en las superficies rugosas.
- Forma de la Partícula. - Las partículas angulosas tales como la piedra partida y algunas gravas tienden a trabarse a la hora de la compactación y a resistir al desplazamiento en comparación con partículas de



superficies redondas. Las partículas angulosas tienen mejor estabilidad Marshall. Asimismo, la trabajabilidad en la pavimentación es altera según la forma de las partículas. (Instituto del Asfalto, 1985).

- Adherencia con el Asfalto. - esta característica es importante debido a que influirán directamente en la trabajabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica. De acuerdo con el instituto del asfalto, agregados pétreos con adherencia que no superen los valores mínimos establecidos no podrán ser utilizados en el diseño de mezclas asfálticas (Instituto del Asfalto, 1985).

### **2.1.3.2. Clasificación de los agregados minerales**

Los agregados pétreos pueden ser clasificados según diversos factores.

- Agregado grueso. - Se denomina así a los materiales retenidos en el tamiz N°4, que podrán provenir de fuentes naturales como de fuentes artificiales o combinación de ambas fuentes. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).
- Agregado fino. - Son agregados que pasan la malla N°4 y pueden ser de procedencia natural, artificial y escorias metálicas u otro producto que cumpla con las normas.
- Polvo Mineral (Filler). - Proviene de proceso de trituración de agregados minerales o podrá ser productos comerciales. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).



## **2.1.4. Fibras de acero**

### **2.1.4.1. Descripción**

Las fibras de acero constituyen un grupo de hilos metálicos adquiridos a través de la deformación de alambres de acero estirados en condiciones de baja temperatura. Como resultado de este proceso, conocido como traficación, se producen fibras con diámetros entre 0.6 y 1.0 mm, de formas rectas u onduladas con mejores formas de adherencia. (Cárdenas, 2015).

### **2.1.4.2. Marco Normativo Actual**

Las pautas para la materia prima y el alambre semiacabado abarcan las subsecuentes regulaciones:

- UNI 11037 Hilos metálicos de acero destinados para la elaboración de mezcla de cemento fortalecido.
- UNE EN 14889-1: Regulación de España para fibras utilizadas en concreto, sección 1: Definiciones, especificaciones y cumplimiento de fibras de acero.

### **2.1.4.3. Estructura Química de las Fibras de Acero**

La estructura química del material de origen puede ser diversa. Por esta razón, la norma UNI 11037 ha desarrollado un documento sobre la evaluación química de la materia prima, detallado en las tablas adjuntas:

**Tabla 1**

*Constitución química de las fibras de acero.*

Tipo de Acero	Carbono	Manganeso	Silicio	Azufre (máx.)	Fosforo (máx.)	Cromo	Níquel
A1-B1-C1	≤0.20	≤0.60	≤0.30	0.045	0.045	-	-
A2-B2-C2	≤0.20	≤0.80	≤0.30	0.06	0.05	-	-
A3-B3-C3	Según UNI En 10088-1						

Nota: en el estudio se ha utilizado fibras de alambre de bajo contenido de carbono el cual tiene una mayor capacidad de resistencia a la tracción compresión. Según la tabla siguiente la denominación de la fibra utilizada en la investigación es de tipo A1.

**Tabla 2**

*Tipos de fibra según su contenido de carbono*

A			B			C		
Fibras de alambre trefilado			Fibras de chapa cortada			Otras fabricaciones		
A1	A2	A3	B1	B2	A3	A1	A2	A3
Bajo contenido de carbono	Alto contenido de carbono	Inox.	Bajo contenido de carbono	Alto contenido de Carbono	Inox.	Bajo contenido de carbono	Alto contenido de carbono	Inox

Nota: recuperado de manual de Maccaferri

#### 2.1.4.4. Propiedades físicas de las fibras de acero

Se emplean fibras con bajos y medianos niveles de contenido de carbono, así como acero inoxidable y acero galvanizado, son de sección transversal circular, de característica geométrica rectilínea, con diámetro de 0.55 mm con una densidad 7180 (Kg/m<sup>3</sup>).

Además, se destaca que las propiedades mecánicas de las fibras de acero cambian según su geometría.

**Tabla 3**

*Propiedades mecánicas de diferentes fibras elaboradas por la empresa Maccaferri*

Fibras	Diámetro (µm)	Densidad (10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> )	Modulo elástico (kN/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tracción (kN/mm <sup>2</sup> )	Elongación en la rotura (%)
Acero	5 – 500	7.84	200	0.5 – 2	0.5 – 3.5
Vidrio	9 – 15	2.60	70 – 80	2 – 4	2 – 3.5
Amianto	0.02 – 0.04	3.00	180	3.30	2 – 3
Polipropileno	20 – 200	0.90	5 – 7	0.5 – 0.75	8
Nylon	-	1.10	4	0.90	13 -15
Polietileno	-	0.95	0.330	0.0007	10
Carbono	9	1.90	230	2.60	1
Kevlar	10	1.45	65 – 133	3.60	2.1 – 4
Acrílico	18	1.18	14 – 19.5	0.4 – 1	3

Nota: Recuperado de manual de Maccaferri

#### **2.1.4.5. Clasificación de las fibras de acero.**

a. En función del material

Proceden de diversas fuentes según el propósito y el material de fabricación:

- Metálicas: aceros de carbono y ligados, aluminio.
- Naturales: amianto (asbesto), celulosa, carbón.
- Sintéticas: nylon, polipropileno, poliacrílico nitrito, polivinil alcohol.

**Tabla 4**

*Propiedades de las fibras existentes*

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Tracción	Módulo de Young (Gpa)	Alargamiento de Rotura (%)
Vidrio	0.0050-0.15	2500	1000 - 2600	70 - 80	1.5 - 3.5
Polipropileno	0.02 - 1	900 - 950	200 - 760	3.5 - 15	5 - 25
Polietileno	0.025 - 1	960	200 - 300	5	2.56
Acero	0.15 - 1	7180	345 - 3000	200	4 - 10

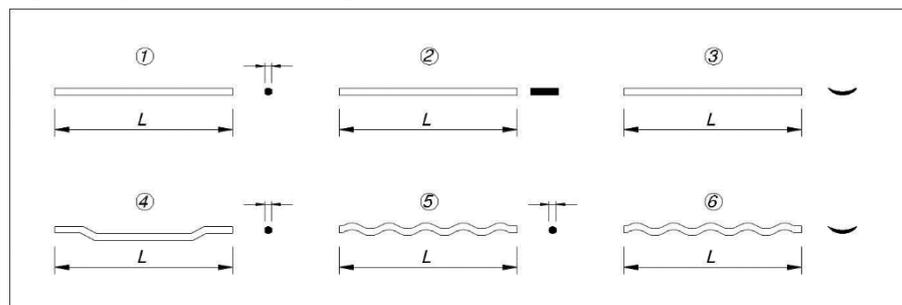
Nota. Extraído de ACI 544.5R-10

b. En función de la sección transversal.

Estas presentan diversas formas, como rectas, corrugadas, onduladas, dentadas y con extremos conformados. Además, la estructura del cuerpo puede ser muy variada, como cuadrada, circular, plana y rectangular, como se observa en la imagen.

**Figura 1**

*Tipos de fibras, con su respectiva sección transversal*



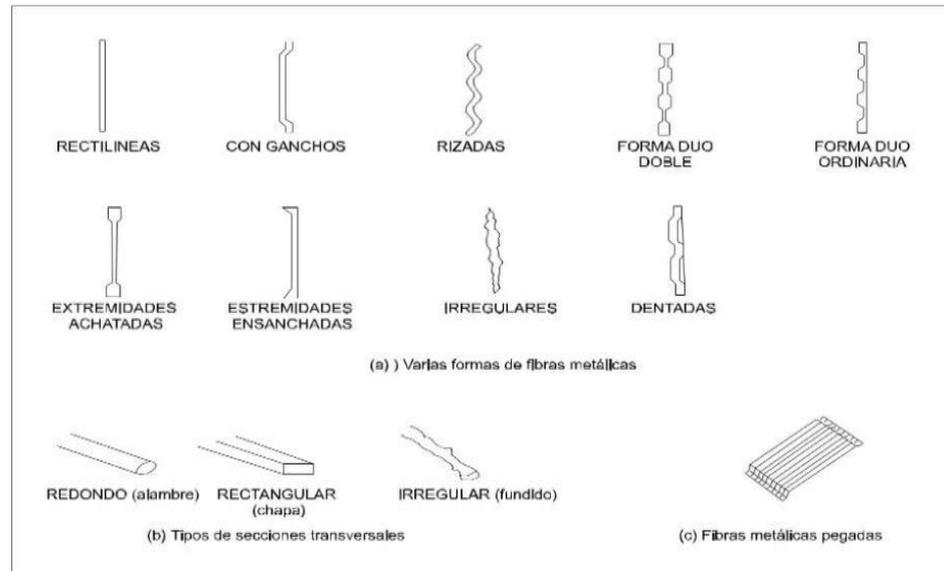
Nota. Recuperado de manual de fibras Maccaferri

Las fibras metálicas no deben presentar en su área superficial impurezas tales como (corrosión, lubricantes y sustancias perjudiciales). La longitud de las fibras está comúnmente entre 0.5 pulg hasta 2.5 pulg (63.5mm hasta 12.7mm) esta relación de aspecto debe ser la longitud dividido por el diámetro o el diámetro equivalente (en el caso de fibras con

sección no circular), deben estar en rango de 30 a 100mm. (ACI Committee 544. & American Concrete Institute., 2008)

## Figura 2

*Propiedades de FA según su morfología*



Nota: recuperado del manual de Fibras de Maccaferri.

### 2.1.4.6. Clasificación de fibras de acero Según el ASTM A 820-2006.

Conforme al ASTM A 820-2006, las fibras metálicas son categorizadas en tres tipos las cuales se detallan en el siguiente cuadro; el tipo de fibra de acero que ha utilizado en la investigación es de tipo I debido a que las dimensiones utilizadas en el estudio están dentro de las características del tipo I.

**Tabla 5**

*Tipos de fibras según ASTM A 820-2006 (Dimensión/características)*

Según el ASTM A 820-2006		
TIPO	DIMENSIÓN (DIÁMETRO)	CARACTERÍSTICA
<b>Tipos I</b>	0.25mm a 1.00 mm	De fácil adquisición en el mercado. Secciones circulares generalmente.
<b>Tipos II</b>	0.15 mm a 0.64 mm y ancho .025mm a 2.00 mm	Son planas y rectas.
<b>Tipos III</b>	De sección transversal con aspecto de media luna.	Extraídas de la fundición las cuales se elaboran mediante una rueda rotación.

Nota: recuperado del manual de Maccaferri

#### **2.1.4.7. Aplicaciones**

Las fibras de acero en el sector construcción se usa como refuerzo de concreto, entre las que destacan: (Cárdenas, 2015)

- Losas de entrepisos, losas de pisos, túneles, estabilidad de taludes, pavimentos de concreto rígido, estructura hidráulica, puentes, obras de arte, pista de aeropuertos y otros. (Cárdenas, 2015)

#### **2.1.5. Microondas**

##### **2.1.5.1. Descripción**

Las microondas son radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda entre milímetros a metros y tienen un aproximado de 2.4 GHz en los hornos de microondas comerciales destinados al uso familiares, estas microondas generadas por el artefacto vienen siendo una energía electromagnética. (Wikipedia, 2023).

### **2.1.5.2. Como funciona**

(Wikipedia, 2023) Opera mediante la emisión de ondas de radio de alta frecuencia. El agua, lípidos y otras sustancias presentes en los alimentos absorben la energía generada por las microondas a través de un proceso conocido como calentamiento dieléctrico (también llamado calentamiento electrónico, calefacción de alta frecuencia). El proceso de los hornos de microondas se desarrolla de la siguiente manera: un dispositivo llamado magnetrón transforma la energía eléctrica en energía de microondas, la cual se transfiere posteriormente al alimento.

Las vibraciones de las moléculas bipolares presentes en el objeto, son inducidas por las ondas electromagnéticas, siendo este movimiento el elemento que incrementa la temperatura. Este fenómeno de excitación es un procedimiento físico, un desplazamiento simple de las moléculas al ritmo de la frecuencia, y no resulta en alteración alguna en la estructura química de los alimentos (excepto las derivadas del aumento de la temperatura)

### **2.1.5.3. Utilización y Aplicaciones del microondas**

Cuando la industria alimentaria reconoció las posibilidades y la flexibilidad de la innovación reciente, la incorporó en diversas aplicaciones, tales como el deshidratado de verduras, la tostación de café o frutos secos, la descongelación y cocción de carnes, la apertura de ostras, la pasteurización de leche, entre otros usos. Diversas áreas de la industria la incorporaron para el proceso de desecado de productos como corcho, cerámica, papel, cuero, tabaco, fibras textiles y otros. Además, se



utilizaron las microondas en el tratamiento de endurecimiento de materiales sintéticos como nailon, hule y uretano.

#### 2.1.5.4. Ventajas de horno microondas

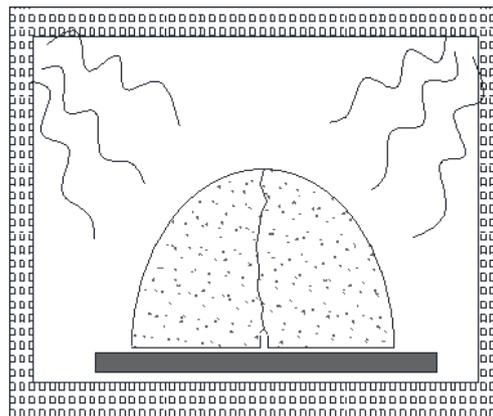
- **Tiempo de calentamiento:** Los hornos de microondas calientan las cosas mucho más rápido, ya que utilizan microondas para calentar directamente. Esto reduce significativamente el tiempo de preparación.
- **Costo:** Los hornos de microondas tienden a ser más eficientes en términos de energía y, en general, son más económicos de operar debido a su menor consumo de electricidad, especialmente para tareas de calentamiento rápido.
- **Consumo de electricidad:** Los hornos de microondas tienen una potencia más baja en comparación con los hornos eléctricos, lo que resulta en un menor consumo de electricidad por hora de funcionamiento.
- **Distribución de ondas:** Los hornos de microondas utilizan microondas electromagnéticas para calentar. Estas microondas son emitidas desde el magnetrón (un dispositivo en el interior del horno) calentándolos desde el interior hacia afuera.
- **Calor uniforme en el interior:** Los hornos de microondas calientan de manera uniforme en su totalidad, evitando puntos calientes y fríos. Esto resulta en una distribución más uniforme.
- En resumen, en términos de tiempo de calentamiento y costo, los hornos de microondas son más eficientes y económicos que los hornos

eléctricos. Calientan los alimentos más rápido y utilizan menos electricidad, lo que puede resultar en ahorros significativos a lo largo del tiempo. Sin embargo.

- La principal diferencia en la distribución de calor u ondas es que los hornos eléctricos utilizan calor radiante para cocinar desde el exterior hacia el interior, mientras que los hornos de microondas utilizan microondas para calentar de manera uniforme desde el interior hacia el exterior.

### Figura 3

#### *Microondas induciendo calor*



Nota: elaboración propia

### 2.1.5.5. Ficha técnica

Ficha técnica de horno microondas de marca Indurama de 20 litros de capacidad.

#### Tabla 6

*Ficha técnica de horno microondas*

Especificaciones Técnicas de Horno microondas	
Modelo	MWI-20CRP
Color	Croma
Voltaje	220v
Frecuencia	60Hz
Frecuencia Microondas	2450MHz
Potencia de entrada (Microonda):	1200w
Potencia de salida (Microonda)	700w
Frecuencia de operación	2450MHz
Capacidad del Horno	20 litros
Dimensiones de la cavidad del horno (alto * ancho* profundidad)	220mm*315mm*294mm
Dimensiones externas (alto * ancho* profundidad)	262mm*454mm*330mm
Uniformidad de cocción:	Sistema giratorio
Peso neto	Aprox. 10.5 Kg

Nota: Extraído del manual de microondas Indurama de 20l de capacidad.

### 2.1.6. Método Marshall para el diseño de concreto asfáltico

Este método está regido bajo la normatividad internacional ASTM-D1559 y la normativa peruana MTC E 504.



### 2.1.6.1. Introducción

Fue desarrollado por el ingeniero de carreteras de Mississippi, Bruce Marshall. A través de numerosos estudios y estudios de correlación del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos mejoró ciertos aspectos del Método Marshall y desarrolló criterios de diseño para mezclas asfálticas. (Instituto Mexicano del Transporte, 2004).

El método Marshall original de Bruce era aplicable solo a pavimentos de asfalto caliente con un tamaño máximo de partícula de 2,5 cm (1 pulgada) o menos. Un método modificado por un técnico de Mississippi requiere un tamaño máximo de 3,8 cm (1,5 pulgadas). Diseñado para planificación y control en laboratorio y obras para asfalto a alta temperatura. El método Marshall implica el uso de una muestra con dimensiones de 6,4 cm de altura (2,5 pulgadas) y 10,2 cm de diámetro (4 pulgadas). Estas muestras son creadas mediante un proceso de mezcla, calentamiento y compactación de acuerdo con las normativas de ASTM D1559. Los puntos clave involucran la evaluación de la densidad bajo vacío y las pruebas de estabilidad y fluidez de las muestras comprimidas. La estabilidad de la muestra es una prueba de resistencia máxima y se mide en N (libras) a una temperatura de 60°C. El rendimiento es la deformación total (en unidades de 0,25 mm) que se produce cuando se descarga una muestra para alcanzar la resistencia máxima en una prueba de estabilidad. (Instituto Mexicano del Transporte, 2004).

El propósito principal del método Marshall es encontrar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño de la mezcla. La

determinación del contenido óptimo generalmente requiere 15 tubos de ensayo de concreto asfáltico de varios grados de asfalto, con un grado de asfalto que varía de 0.5 a 1.0 en cada testigo. Prepare tres tubos de ensayo para cada porcentaje de cemento asfáltico. Se requieren aproximadamente 18,000 gramos de agregado y 1 galón de cemento asfáltico para encontrar la proporción óptima. (Instituto del Asfalto, 1985).

### 2.1.6.2. Sistema de diseño Marshall de pavimentos

#### a. Regulación de la calidad los agregados pétreos

Para iniciar la creación de un diseño de concreto asfáltico utilizando el método Marshall, es necesario hacer la verificación de calidad de los agregados minerales como paso inicial.

Los ensayos realizados para el control de calidad estrictamente elaborados y sus rangos permitidos a los agregados pétreos, se encuentran establecidos en las especificaciones generales (EG-2013) como se indica en las tablas N°7 Y N°8.

### Tabla 7

*Ensayos y requerimientos de agregados gruesos para altitudes mayores a 3000 msnm*

Lista de ensayos	Normativa Internacional	Normativa Nacional	Requerimiento Alt. >3000msnm
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	ASTM C 88 - AASHTO T 104	MTC E 209	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	ASTM C 131 AASHTO T 96	MTC E 207	35% máx.



Lista de ensayos	Normativa Internacional	Normativa Nacional	Requerimiento Alt. >3000msnm
Índice de Durabilidad	AASHTO T 210	MTC E 214	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	STM 4791		10% máx.
Caras fracturadas	ASTM D 5821 - AASHTO TP 61	MTC E 210	90/70
Sales Solubles Totales	AASHTO T290 - AASHTO 291	MTC E 219	0,5% máx.
Absorción*	ASTM C 127 - AASHTO T 85	MTC E 206	1,0% máx.

Nota: Extraído del MTC-2013. Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. (560), Lima, Perú.

### Tabla 8

*Evaluación de los materiales finos para altitudes mayores a 3000 msnm*

Ensayos	Normativa Internacional	Normativa Nacional	Requerimiento Alt. >3000msnm
Equivalente de Arena	ASTM D 2419 AASHTO T 176	MTC E 114	70
Azul de metileno	AASHTO TP 57		8 máx.
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	ASTM C 88 - AASHTO T 104	MTC E 209	18% máx.
Índice de Plasticidad	ASTM D 4318 - AASHTO T89	MTC E 111	NP
Sales Solubles Totales	ASHTO T290 - AASHTOT291	MTC E 219	0,5% máx.
Absorción* *	ASTM C 128 - AASHTO T 84	MTC E 205	0,5% máx.

Nota: Extraído de las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción

#### b. Regulación de calidad del bitumen

Minaya y Ordoñez (2001) afirman que, el control de calidad de concreto asfáltico es de vital importancia debido a que afecta directamente



al comportamiento de la mezcla asfáltica, la EG 2013 establece rangos permitidos para el control de calidad del cemento asfáltico. Asimismo, establece una serie de ensayos el cual encontraremos en el anexo N°10 para el control de calidad según sea su clasificación, por penetración o por viscosidad, en la investigación realizada el control de calidad, se realizó por penetración.

En la investigación se ha utilizado un cemento asfáltico con un grado de penetración de 120 – 150 el cual está especificado en la norma del MTC 2013, denominado especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración en la tabla 415-002 dicho cuadro se encuentra en el anexo N° 10.

c. Cuantificación de la combinación de agregados pétreos

Se presentan dos situaciones:

- La primera es que nuestro agregado cumpla con la granulometría que exige la norma EG-2013, lo cual por lo general no se encuentra.
- El segundo caso es la de combinar agregados y para ello se debe realizar el ensayo de granulometría para cada agregado que se combinara, luego se procede a determinar las proporciones para cada agregado, al juntar debe cumplir con el MAC (Instituto del Asfalto, 1985).

Para el diseño de mezclas asfálticas existen 3 tipos de gradaciones, el cual se encuentra en los anexos N° 09. Las especificaciones de los



tamaños de grano requeridos por la normativa dependerán de varios factores, siendo algunos de los más significativos:

- El espesor de la capa de asfalto.
- El TMN del agregado.

Para la presente investigación se utilizó el tipo de gradación MAC-2 el cual se ajusta para el tipo de agregado mineral utilizado.

d. Preparación de los especímenes de ensayo

Tras analizar y dar el visto bueno tanto a los componentes adicionales como al betún asfáltico, y establecer las proporciones de mezcla de los componentes, junto con las temperaturas requeridas para la compactación, se lleva a cabo la elaboración de la mezcla y su compactación correspondiente, siguiendo los protocolos que se describen a continuación.

- Secar los agregados en horno hasta que estos lleguen a un peso constante a 105°C, los cuales serán tamizados por vía seca en divisiones deseadas.
- Preparar el molde y pisón de compactación, ser calentados a una temperatura entre 90 y 150°C en un baño termostático o en una plancha caliente.
- Utilizar recipientes para cada muestra, que será aproximadamente 1200gr de agregado, este agregado cumple con los parámetros establecidos por el MAC-2.



- Asegurar un ajuste adecuado del molde para prevenir accidentes y pérdida de material de la mezcla. Colocar papel filtro en la parte baja del molde para evitar que la mezcla se pegue al molde. Verter el concreto asfáltico en el molde y, una vez hecho esto, Administrar 15 impactos en el contorno y 10 golpes en la parte central de la combinación de agregados. Colocar papel filtro en la parte superior de la mezcla.
  - Colocar el pisón en posición vertical sobre la muestra y administrar impactos predefinidos (30, 50, 75) en ambas caras de la probeta de asfalto y concreto.
  - Finalmente dejar al aire libre la probeta y esperar que enfrié, extraer la muestra con el equipo de extracción con sumo cuidado (Instituto del Asfalto, 1985).
- e. Ejecución de ensayos al espécimen de concreto asfáltico.

Después de extraídas las muestras es recomendable realizarles los ensayos después de 12 a 24 horas para hallar las propiedades de los mismos. Estos ensayos son de sumas importancia para hallar un diseño de mezclas optimo.

- Ensayo de peso específico bruto. - Se debe realizar el ensayo cuando la mezcla este a temperatura de ambiente. La secuencia del ensayo se halla en la normativa del ASTM D1188.
- Ensayo de estabilidad y fluencia. - Inmediatamente después que las probetas hayan sido ensayadas para determinar su peso específico bruto, se sumergen en agua durante media hora a 65°C, es secada



y trasladada a la maquina Marshall donde se halla la estabilidad y fluencia conforme a lo establecido en la norma, luego de ser ensayada este espécimen ya no se podrá utilizar en ningún otro ensayo. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

f. Secuencia de evaluación de mezclas compactadas

Después de someter las muestras a compresión y realizar las pruebas adecuadas, se inicia el procedimiento de cálculo con el fin de obtener todas las características relacionadas con el volumen, así como los datos de resistencia a la deformación y la estabilidad según el método Marshall. Estos datos son cruciales para calcular el contenido óptimo de asfalto. Minaya y Ordoñez (2006) establecen el siguiente procedimiento para llegar a obtener dichas propiedades:

Luego de haber compactado las muestras y realizado sus respectivos ensayos se procede a calcular sus propiedades volumétricas, así como también la estabilidad y fluencia Marshall todos estos datos nos servirán para hallar el porcentaje de asfalto optimo.

Minaya y Ordoñez (2006) establece el siguiente procedimiento para llegar a obtener dichas propiedades:

- De acuerdo a la normativa ASTM C 127 y ASTM C 128, evaluar la gravedad específica bulk de los agregados grueso y fino respectivamente.
- De acuerdo a las ASTM D 70 y ASTM D 854, cuantificar la gravedad específica del bitumen y filler respectivamente.



- Determinar la gravedad específica bulk de la combinación de agregados para la combinación de agregados.
  - Determinar la Gmm en el laboratorio de pavimentos.
  - Determinar los cálculos del ensayo de Gmb.
  - Posteriormente establecer la gravedad específica del agregado.
  - Establecer el %, Pba.
  - Establecer el contenido de, Pbe.
  - Establecer el VMA.
  - Establecer el % de vacíos de aire en la mezcla compactada, Va.
- g. Cálculo del contenido óptimo de asfalto

Compactados los testigos, realizados los ensayos y su respectivo análisis, se halló el contenido de asfalto el cual cumplirá con los parámetros mínimos de la normativa peruana, especificaciones Técnicas Generales (EG-2013).

### Tabla 9

*Exigencias para la preparación del concreto asfáltico*

Factores	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8.15KN	5.44KN	4.53KN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5

Nota: recuperado del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)

**Tabla 10**

*Vacíos mínimos en el agregado mineral*

<b>Tamices</b>	<b>VMA (%) (Marshall)</b>
(N° 8)	21
(N° 4)	18
(3/8")	16
(1/2")	15
(3/4")	14
(1")	13
(1 1/2")	12
(2")	11

Nota: Recuperado del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

### **2.1.6.3. Método del Instituto del Asfalto.**

Es esencial hallar el punto ideal de bitumen que maximiza la estabilidad, el nivel de asfalto que resulta en la densidad máxima, y la cantidad de asfalto necesaria para lograr un 4% de vacíos de aire. Una vez obtenidos estos valores, se procede al cálculo de su promedio aritmético, abarcando la estabilidad, el flujo, el contenido de vacíos, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos de asfalto. En última instancia, se evaluará si los resultados cumplen con las especificaciones de diseño; en caso afirmativo, el contenido de asfalto determinado será considerado como el óptimo. (Instituto del Asfalto, 1985).



## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1. Fibras de acero**

Según el American Concrete Institute (ACI 544.1R, 1996 como lo citó Maccaferri, 2016), las fibras de acero pueden describirse como longitudes discretas de acero con un factor de forma lo suficientemente grande como para dispersarse aleatoriamente y mezclarse con el concreto fresco de forma convencional. Los principales objetivos de añadir fibra de acero al concreto son: mejorar el control de las grietas del concreto, e incrementar la resistividad al impacto, a la fatiga y a la flexión (Maccaferri, 2016).

### **2.2.2. Microondas**

Las microondas son ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, es decir, muchas oscilaciones por segundo. Tienen la propiedad de excitar las moléculas de agua, por lo que se utilizan en los hornos microondas para calentar alimentos que contengan este líquido. (Espinoza, 2005).

### **2.2.3. Antecedentes**

#### **2.2.3.1. Trabajos Previos Nacionales**

En esta tesis de Torres y Quispe diseñan un concreto asfáltico auto-reparable mediante la aplicación de calor para reparar fallas exteriores. Describen la problemática del mantenimiento de las vías en la ciudad de Lima, debido al incremento de la cantidad de vehículos se ocasiona caos y tráfico vehicular. Esta tesis busca la solución a esta problemática, proponiendo el diseño de una mezcla asfáltica que tenga la propiedad de



auto repararse, Su punto de partida es el diseño de mezclas asfálticas convencionales que incorporan polímeros y fibras de lana de acero para mejorar el comportamiento físico y mecánico, encontrar capacidades de recuperación, controlar el agrietamiento térmico y prolongar la vida útil. (Torres & Quispe, 2020)

### **2.2.3.2. Trabajos Previos Internacionales**

Norambuena, en su tesis de maestría sobre mezclas asfálticas auto reparables evalúa el efecto de las fibras de lana de acero sobre los atributos mecánicas y físicas de nuevas mezclas asfálticas reforzadas con fibra. Para ello, se investigaron cinco diseños diferentes de mezcla asfáltica semidensa utilizando la misma ley y contenido de cemento asfáltico en la mezcla, pero con cinco porcentajes de fibra diferentes. Por lo tanto, las propiedades mecánicas de las mezclas se evaluaron mediante pruebas de resistencia a la abrasión y sus propiedades físicas se evaluaron mediante pruebas de calentamiento por microondas en especímenes agrietados. Finalmente, en esta publicación se presentan los principales resultados y análisis de este estudio, asfalto autorreparable mediante calentamiento por microondas con materiales reciclados. (Norambuena et al., 2017)

La técnica de reparación automática de pavimentos mediante calentamiento por microondas es una opción viable para el mantenimiento de mezclas asfálticas. La característica fundamental de estos compuestos reside en la existencia cuantificada de pequeños elementos de metal tales como las fibras metálicas que confieren la capacidad de remediar grietas cuando se someten a microondas. Los resultados indican que, después de



5 ciclos de fisuración/repación, la capacidad de repación de las mezclas asfálticas suele rondar aproximadamente el 50% de su resistencia inicial, y el uso de RAP disminuye dicho nivel de repación. Además, se notó que la inclusión de agregados metálicos mejoró el grado de repación de la mezcla, siendo los resultados obtenidos con VM significativamente superiores. Aplicando los resultados de laboratorio al campo, podemos concluir que la aplicación de esta tecnología puede extender la vida útil de los pavimentos de asfalto en varios órdenes de magnitud mientras se minimiza el daño al pavimento.(Gonzales et al., 2018).

Segura, A. (2016) investigó sobre la conducta físico y mecánico de mezclas asfálticas con escoria de acero. Mediante la elaboración de diversas muestras, logró obtener una muestra con un 5,5% de contenido de asfalto para llevar a cabo los diseños y evaluar la conducta de la mezcla asfáltica. llevó a cabo la caracterización tanto de la escoria como del agregado, utilizando la mezcla con un 100% de agregado convencional como punto de referencia para identificar las disparidades entre las mezclas que incorporan escoria y aquellas que utilizan agregados convencionales. Para el diseño de mezclas se utilizó el método Marshall (INV. E-748-13), la mezcla que presentó mejor comportamiento fue la que combina agregados tradicionales con escoria.(Fiallos & Unda, 2018).

Alvarado, M (2016) Evaluación del comportamiento termo físico de mezclas asfálticas reforzadas con residuos metálicos. Se sabe que las fibras en los compuestos mejoran sus propiedades mecánicas. Sin embargo, las fibras (en el caso de los metales) también se pueden utilizar



para desarrollar nuevos pavimentos con fines energéticos y de autor reparación de grietas mediante técnicas de calentamiento. En consecuencia, el propósito central de esta investigación fue analizar los impactos que tienen el contenido y la naturaleza de los desechos metálicos en las características volumétricas y termofísicas de las mezclas asfálticas. Con este fin, se investigaron en el laboratorio nueve diseños diferentes de mezcla asfáltica que contenían dos tipos diferentes de chatarra metálica (material de torneado y fibra de acero) utilizando el mismo grado y contenido de cemento asfáltico. Por lo tanto, la distribución de residuos metálicos dentro de la mezcla se evaluó mediante pruebas ultrasónicas. Además, la distribución de los residuos metálicos se correlaciona con las propiedades termo físicas de la mezcla, como la resistividad eléctrica y la conductividad térmica. Finalmente, este informe presenta los principales hallazgos y conclusiones de este estudio.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

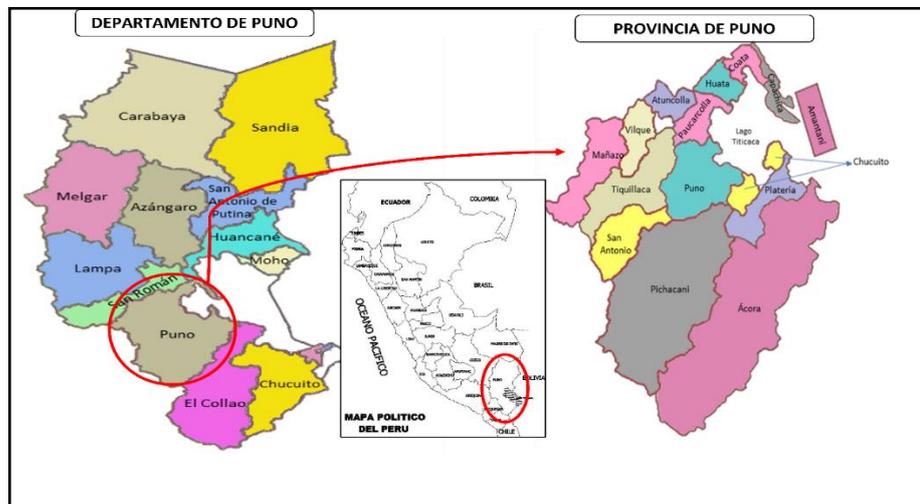
#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

El estudio se realizó en la provincia de Puno, más precisamente en la ciudad principal del área, Puno, que se ubica a una elevación de 3852m.s.n.m., caracterizada por un clima frío y seco. En los registros climáticos, se documentaron temperaturas que abarcaron desde los  $-7.2^{\circ}\text{C}$  como mínimo y  $22.8^{\circ}\text{C}$  como máximo según los datos meteorológicos proporcionados por SENAMHI, debido a su ubicación en los andes del sur peruano la región se cataloga como fría en cuanto a su temperatura, por tal motivo la investigación en el transcurso de su desarrollo tomo como uno de los ítems la altitud y la variación de temperatura que se manifiesta en lugares mayores a los 3000 m.s.n.m.

El material pétreo se obtuvo de la planta de asfalto de la empresa CASA ubicado a 12.8 km aproximadamente desde la ciudad universitaria (Universidad Nacional del Altiplano-Puno) y cuya procedencia de los agregados pétreos extraídos de la cantera Cabanillas situada en la región Puno sobre la vía principal Juliaca-Arequipa.

**Figura 4**

*Ubicación geográfica del lugar de estudio*



Nota: recuperado de Google

### 3.1.1. Ubicación del Laboratorio de Investigación

La investigación detalla las pruebas realizadas en el laboratorio, incluyendo el monitoreo de estas, las cuantificaciones para diversas combinaciones de mezclas asfálticas (convencionales y modificadas con fibras de acero), y la obtención de resultados de varios ensayos necesarios. Estas actividades se llevaron a cabo en los laboratorios de mecánica de suelos y transporte, pertenecientes a la facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura de la UNAP.

### 3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO

Desde enero de 2021 hasta marzo de 2023, se ejecutó esta investigación, en la que se recopilaban datos, se efectuó una revisión bibliográfica, se realizaron pruebas en el laboratorio, se procesaron los resultados y se redactó la tesis.

### 3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL

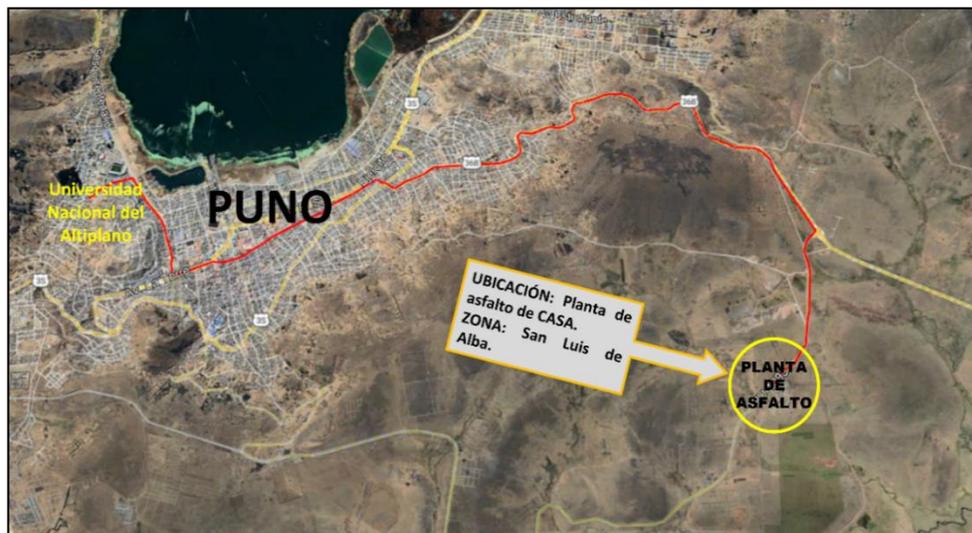
#### 3.3.1. Ubicación de Cantera de los Agregados.

La materia prima para el diseño Marshall fue obtenida de la planta de asfalto de la empresa CASA, esta empresa que realiza la ejecución de la Construcción del Tramo Vial N.º 5 del Corredor Vial Interoceánico Sur Perú – Brasil – IIRSA SUR, el agregado pétreo fue extraído de la cantera de Cabanillas, provincias de Lampa; proporcionó agregados necesarios para la investigación de este tipo de diseño con capacidad de auto reparación.

La planta está ubicada en la carretera PU-1093 con las siguientes coordenadas: latitud  $15^{\circ}53'33.59''S$  y longitud  $70^{\circ} 2'20.84''O$ , a 12.8 km de distancias desde la Universidad Nacional del Altiplano a la zona conocida con la denominación “San Luis de Alba” en el distrito de Puno, departamento Puno.

#### Figura 5

*Ubicación de la planta de asfalto*



Nota: recuperado de Google Maps.



### **3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO**

#### **3.4.1. Población**

En el 2012 Arias sostiene “la población [...] es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”

La presente investigación, está conformada su población por el concreto asfáltico modificado con la incorporación de la fibra de acero en las diferentes proporciones, los cuales fueron elaborados con los agregados de la planta de asfaltos de la empresa CASA de la cantera Cabanillas y con cemento asfáltico PEN 120-150 que fue proveída por la empresa PETRO PERÚ, utilizando para el diseño con la metodología Marshall.

#### **3.4.2. Muestra**

Para el estudio se elaboraron 90 muestras entre las cuales 15 especímenes cilíndricos se utilizaron para el diseño de mezcla asfáltica convencional, 15 especímenes cilíndricos para el diseño de mezcla asfáltica modificada con varios porcentajes de fibra de acero (0.00% ,2.00%, 4.00%, 6.00% y 8.00%) y 60 unidades semicilíndricas para las pruebas de auto reparación de las fallas mecánicas para el ensayo de tres puntos, aplicados en seis ciclos de reparación.

### **3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO**

El procesamiento de datos en este estudio fue adaptado según la naturaleza y el nivel de la investigación, empleando un método estadístico. En el marco de una



investigación experimental correlacional, se aplicaron diversos métodos para analizar los datos, donde se manipula la variable independiente para evaluar su influencia en la variable dependiente y establecer correlaciones entre ambas. En investigaciones que se basan en planteamientos e hipótesis relacionadas con variables, se realizaron pruebas de correlación, por ejemplo. La elección de la prueba o coeficiente de correlación apropiado se determina según la escala de medición de las variables involucradas.(Hernández, 2014).

En la investigación desarrollada se utilizó el método de T de student debido a que este método relaciona una variable independiente y su influencia en la variable dependiente, siendo este método de uso adecuado para esta investigación, ya que se trata de relacionar la mezcla tradicional y la modificada con fibras de acero.

### **3.6. PROCEDIMIENTO**

- Para la investigación se extrajo agregado mineral de la cantera Cabanillas y su centro de acopio se localiza en San Luis de Alba a 10km aproximadamente de la ciudad de Puno, a este material pétreo se les realizó diferentes ensayos tanto al agregado grueso, al agregado fino y arena natural ensayos que se encuentran en las tablas N° 11 y N° 12.

El material pétreo satisfizo todas las requisitos y criterios mínimos establecidos por la norma EG 2013. Una vez completados los análisis del material pétreo y cumplidos todos sus criterios, iniciamos el proceso de formulación de mezcla en caliente utilizando el enfoque Marshall. En este método, se identificaron distintos parámetros y se realizaron pruebas en la muestra compactada. Esto englobó la determinación de la densidad específica del espécimen compactada, la determinación de la densidad específica teórica máxima (Rice), determinación de la densidad específica de la combinación de agregados,



estimación de la densidad específica efectiva de la combinación de agregados, la determinación del porcentaje de asfalto absorbido, determinación del porcentaje de asfalto efectivo (*Pbe*), estimación del porcentaje de huecos en mezcla compactada (*Vma*), y la evaluación de los espacios llenos con asfalto. Asimismo, se realizó el cálculo de la estabilidad Marshall, el cálculo del flujo Marshall y la elaboración de gráficos Marshall. Estos cálculos se llevaron a cabo para distintos porcentajes de contenido de asfalto, como el 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% de asfalto tipo pen 120-150. Se concluyó que el porcentaje óptimo de asfalto es del 5.86% de la investigación. Realizado los cálculos y encontrado el contenido óptimo de asfalto procedemos a realizar un reajuste de la proporción de agregado esta vez adicionando fibras de acero, ajustando todo se procedió a hallar el porcentaje óptimo de fibras de acero que pueda mejorar las capacidades mecánicas de la mezcla y mejorar la auto reparación del concreto asfáltico modificado, para lo cual se realizó especímenes de concreto asfáltico incorporando fibras de acero en diferentes porcentajes como: 0%, 2%, 4%, 6% y 8% del peso del cemento asfáltico, realizando exámenes rigurosos se estableció el porcentaje más adecuado a la mezcla asfáltica es de 4% de fibras de acero. Una vez hallado el porcentaje óptimo de acero en la mezcla modificada realizamos nuevos testigos para calcular el tiempo óptimo de inducción de microondas, para lo cual se realizó el corte de las briquetas por la mitad, se muestra la evidencia en la figura N°6.

## Figura 6

*Corte de briquetas de concreto asfáltico por la mitad*



Nota: el espécimen se cortó en la cierra de albañilería

Realizado el corte de los testigos modificados por la mitad, estos son sometidos al ensayo a flexión en el equipo de CBR y ensayados hasta que fallan como se puede observar en la figura N° 06.

## Figura 7

*Ensayo a flexión en la máquina de CBR*



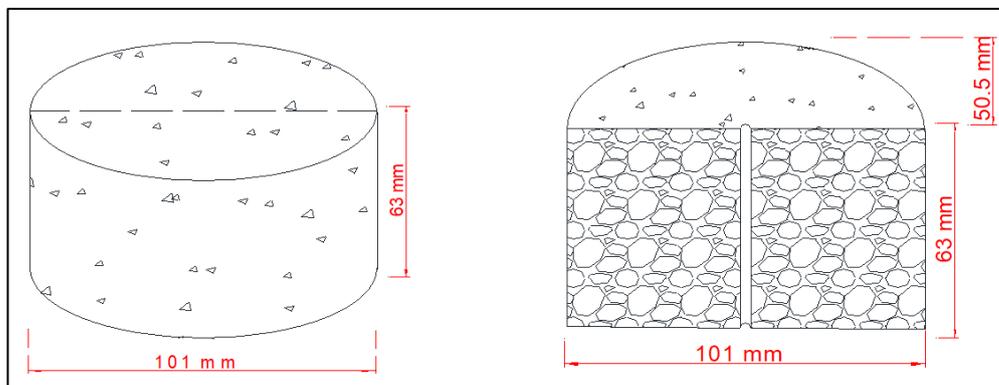
Nota: espécimen modificado con 4% de fibra de acero, generando fisuras arbitrarias

### 3.7. PROCESO EXPERIMENTAL EN LABORATORIO

Las medidas del espécimen fueron tomadas del manual de ensayos de materiales norma MTC E 504. Se muestra las medidas con los que se trabajó en la investigación, a la izquierda, de molde entero (muestra circular) y a la derecha (muestra semicircular) partida por la mitad con una sierra albañilería, creando una fisura en la muestra semicircular en el medio de 3mm de ancho paralelo al espesor.

#### Figura 8

##### *Dimensiones de los especímenes*



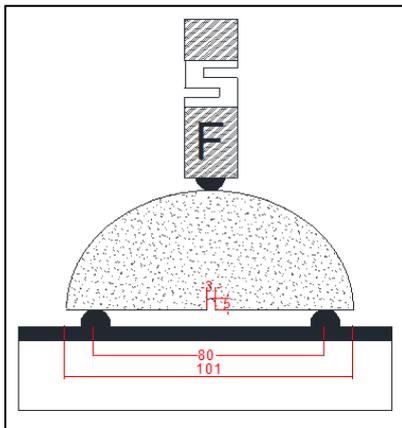
Nota: características de forma de los especímenes después de ser sometidos a corte

##### Especificaciones de rotura

- Ensayo: Ensayo de resistencia a la flexión (Prensa C.B.R.)
- Velocidad de rotura: 0.5mm/min
- Unidades de medida: Carga; kilo Newton y deformación; Milímetros.
- Medidas del espécimen de prueba:
  - Tipo: semicircular.
  - Especímen: 101mm de diámetro y 63mm de altura.
  - Grieta: 3mm de ancho y 5mm de profundidad

## Figura 9

### *Ensayo a flexión de espécimen modificado semicilíndrico*



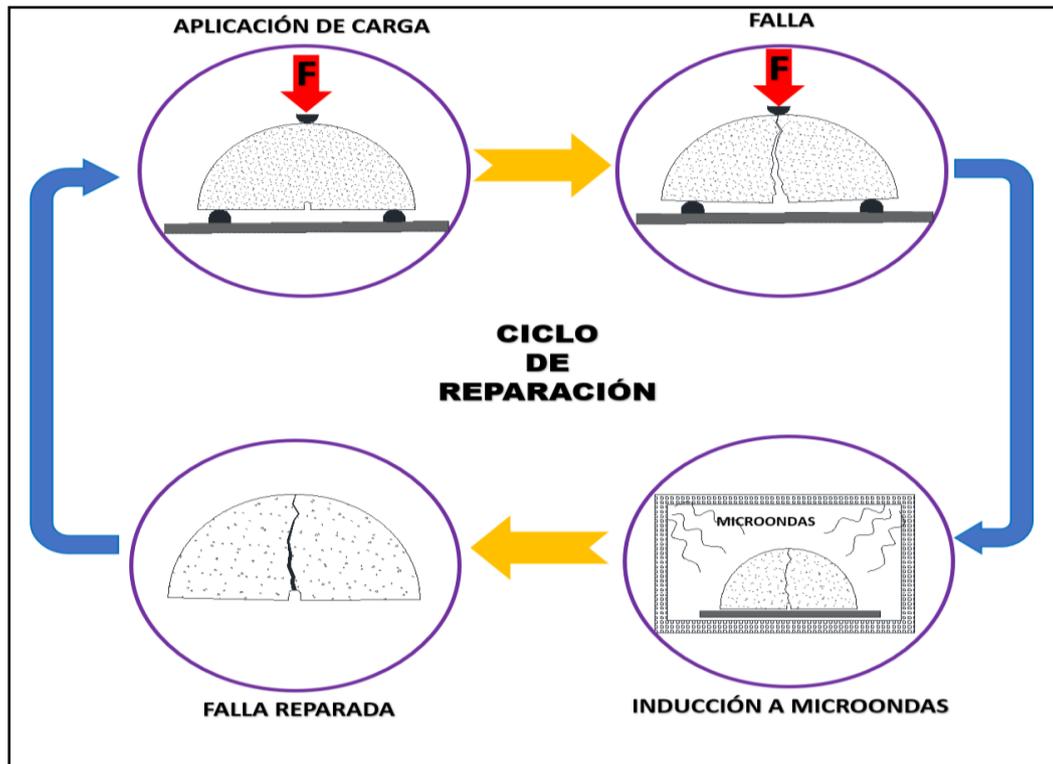
Nota: modelo de espécimen que será evaluado en la posición mostradas

- Aplicación de carga, la carga se indujo a través de un equipo de CBR ensayo de tres puntos de compresión indirecta.
- Falla inducida: En los especímenes de prueba, a través de una cierra de albañilería se realizó una grieta de 3mm ancho y 5mm de profundidad, el cual es aprovechada para inducir una fisura en una zona arbitraria conveniente para el estudio ya que la carga aplicada será con dirección a la grieta; luego de aplicar la carga en su totalidad las fisuras aparecieron atravesando la longitud iniciando de la grieta y terminando en la parte semi circular del espécimen.
- Inducción a microondas: terminada la aplicación de la carga hasta la falla requerida, la muestra semi circulares es llevada al horno microondas con capacidad de 700w de potencia, de manera cuidadosa en un plato de cristal, donde al espécimen modificado con fibras de acero se induce microondas a un determinado tiempo (20s ,40s,60s y 80s) de acuerdo a la conveniencia del estudio.
- Auto reparación: Inducida las microondas a los especímenes de prueba estas alcanzan temperaturas altas en las cuales se debe de trabajar con precaución y la seguridad requerida; al retirar las muestras del horno microondas estas se llevan

al molde donde se elaboraron inicialmente antes de ser cortadas por la mitad; los cuales pasan 24 horas en reposos en un ambiente donde enfrían a la temperatura promedio del entorno.

**Figura 10**

*Ciclo de reparación*



Nota: proceso de un ciclo de ensayo de auto reparación de cada espécimen evaluado

Estos resultados son anotados según su deformación respecto al tiempo y así poder obtener la comparación de resultados cuando son sometidos a la auto reparación mediante la inducción de calor. Para este análisis se realizaron seis ciclos de auto reparación para los diferentes porcentajes de fibras de acero, adicionalmente se ensayaron las muestras induciendo microondas para hallar las temperaturas superficiales de los especímenes en los siguientes tiempos: 20 segundos, 40 segundos, 60 segundos y 80 segundos.



## **3.8. VARIABLES**

### **3.8.1. Tipos de variables**

Según (Bernal 2010) Identifica tres tipos de variables: intervinientes, independientes y dependientes. Este tipo de variables pueden presentarse en hipótesis correlacionales cuando se aclara la correlación.

#### **3.8.1.1. Variable Independiente**

La variable independiente se refiere a cualquier aspecto, hecho, situación o característica que se percibe como la "causa" en una relación entre variables. En la investigación llevada a cabo, la fibra de acero se identifica como la variable independiente.(Hernández, 2014)

#### **3.8.1.2. Variable Dependiente**

Identifica como variable dependiente al "resultado" o "efecto" generado por la influencia de la variable independiente. En este estudio, la reparación de fisuras y los parámetros Marshall constituyen la variable dependiente.(Hernández, 2014)

#### **3.8.1.3. Variable Interviniente**

Las variables intervinientes abarcan todos los elementos, eventos y condiciones del entorno, las particularidades del sujeto/objeto de estudio, el enfoque de investigación, entre otros, que están actualmente presentes o ejercen una "intervención" (positiva o negativa) en la dinámica de la relación entre las variables independiente y dependiente.(Hernández, 2014)



Las variables identificadas en la presente investigación son el tiempo de calentado y calor alcanzado de la muestra.

### **3.9. MATERIALES**

#### **3.9.1. Agregados**

Para llevar a cabo el diseño y la fabricación de los especímenes, tanto las tradicionales como las modificadas, se emplearon tres categorías de agregados identificadas como sigue: Piedra Chancada con un TMN de 3/4", Gravilla con un TMN de 3/8", y Arena Natural con un tamaño máximo nominal N°4. Además, se utilizó cemento Portland tipo IP como material de relleno. Estos agregados fueron suministrados por la empresa CASA, la cual obtiene su materia prima de la cantera Cabanillas. Posteriormente, los materiales fueron transportados a la planta de asfalto donde fueron triturados para su procesamiento.

Todos los agregados empleados en este estudio cumplen con las especificaciones establecidas por la EG-2013. Al realizar los ensayos de control de calidad respectivos para cada uno de ellos, se notó que los resultados de dichas pruebas cumplen con los límites establecidos por la normativa correspondiente.

#### **3.9.2. Asfalto**

Se empleó el asfalto PEN 120-150 en la fabricación de todas las muestras de concreto asfáltico, ya que este tipo de asfalto es la elección óptima para la región y cumple con los requisitos estipulados por las regulaciones peruanas. El asfalto empleado provino de la empresa PETRO PERÚ, la cual produce este material en su refinería ubicada en Conchan, en el kilómetro 26,5 de la Panamericana Sur, en la localidad de Lurín, en el departamento de Lima, Perú.



### 3.9.3. Fibras de Acero

Las fibras utilizadas en la investigación para la incorporación a la mezcla asfáltica modificada son de corta longitud y de pequeña sección con un diámetro aproximado 0.55mm y una longitud aproximada de 8.00 mm, añadidas con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas.

En teoría para pavimento rígidos las fibras que no proporciona una función estructural suponen una mejora ante determinadas propiedades por ejemplo el control de fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros. Por ende, en el estudio se incorpora como parte de los materiales a utilizar las fibras de acero para pavimentos flexibles, por lo cual se espera similares propiedades que mejoran el desempeño del pavimento modificado con fibras de acero.

Las fibras de acero utilizadas en la investigación son parte de una gama de alambres y mallas de acero que produce la empresa Maccaferri.

Las fibras se utilizan en aplicaciones estructurales con el objetivo de obtener beneficios adicionales, como la reducción de la mano de obra y el aumento de la durabilidad.

Se emplean fibras con bajos y medianos niveles de contenido de carbono, fabricadas en acero inoxidable y acero galvanizado. De esta manera, su inclusión en el concreto no tiene impactos negativos en la calidad, en la presente investigación, son de sección transversal circular, de característica geométrica rectilínea, con diámetro de 0.55 mm con una densidad 7180 (Kg/m<sup>3</sup>).

- Denominación del producto: Alambre de acero de bajo contenido de carbono trefilado en frío.
- Características de las fibras de acero Maccaferri
  - Módulo de Young: 210 000Mpa
  - Resistencia a la tracción: 1300Mpa
  - Deformación a la rotura: 0.50 – 0.35%
  - Relación de Aspecto (L/d): 30
  - Densidad: 7180 (Kg/m<sup>3</sup>)
- Composición química: Carbono, Manganeso, Sílice, Fosforo y Potasio.

Las fibras de acero tienen la siguiente denominación: A1 – 0,55 x 12 – Circular

Donde:

A = indica las fibras metálicas rectilíneas;

1 = indica el bajo contenido de carbono;

0,55 = indica el diámetro de la fibra (mm);

12 = indica la longitud entre las extremidades de la fibra (mm);

Circular = La sección transversal de la fibra

## Figura 11

### *Fibras de acero*



Nota: cuantificación de las fibras de acero para la incorporación en la mezcla



### 3.10. EQUIPOS DE LABORATORIO

Como fue mencionado anteriormente, todos los análisis requeridos para alcanzar los propósitos de este estudio se ejecutaron en el laboratorio de Mecánica de Suelos, Materiales y Pavimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano. Este centro cuenta con todos los aparatos y medios fundamentales para realizar una investigación científica.

Se emplearon los equipos necesarios para realizar el control de calidad de los agregados los cuales se observan en las tablas N°11 y N° 12.

- Molde de compactación. Este dispositivo se compone de una base plana, un molde y un collar cilíndrico de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4 pulgadas) y una altura de aproximadamente 76.2 mm (3 pulgadas), y tanto la base plana como el collar son intercambiables entre sí. De tal manera que los testigos tienen una dimensión final de (4”) de diámetro y una altura final de (2.5”) aproximadamente.

## Figura 12

### *Pedestal y moldes de compactación*



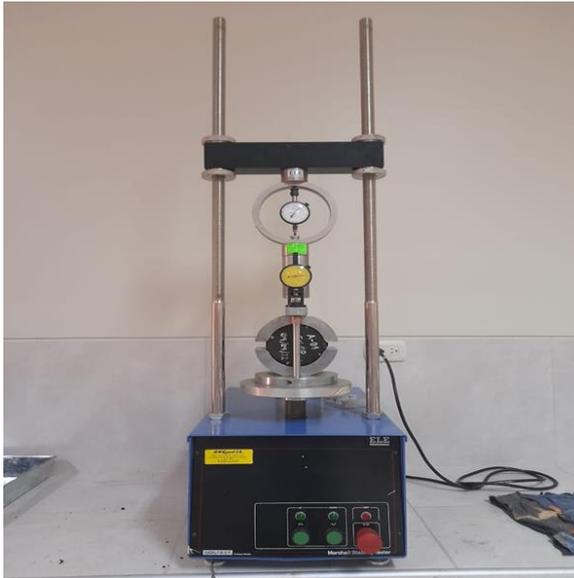
Nota: Elaboración propia

- Martillo Manual de compactación. Debe contar con una superficie circular de apisonado de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro en su base, equipada con un pistón de peso total de 4.54 kg (10 lb.) y una altura de caída de 457.2 mm (18"), estas características se encuentran en la NTP.
- Pedestal de compactación. El componente se basa en un poste de madera con dimensiones aproximadas de 20,32 cm por 20,32 cm y una longitud de alrededor de 45,7 cm. Este poste está revestido con una placa de acero que mide aproximadamente 30,48 cm por 30,48 cm y tiene un grosor de 2,54 cm. El tipo de madera utilizado puede ser roble, pino amarillo u otra variedad con una densidad promedio en el rango de 670 a 770 kg/m<sup>3</sup>. El poste de madera se asegurará al bloque de concreto mediante pernos en cuatro puntos, y la placa de acero se fijará de forma segura al poste. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).
- Compresión Marshall. Llamado también como máquina de carga, es un dispositivo eléctrico en el que se aplica una fuerza de compresión a la muestra mediante

mordazas semicirculares, a una velocidad de 5,1 cm /min. La intensidad de la fuerza se registra en un indicador que se ajusta a un anillo calibrado de carga. (Instituto del Asfalto, 1985).

### Figura 13

#### *Equipo Marshall*



Nota: Elaboración propia

- Extractor de especímenes de asfalto. Se emplea para liberar la muestra compacta del molde; el equipo debe ser de acero, tomando la forma de un disco con un diámetro de 10,0 cm y un grosor de 1,27 cm.
- Sostén de molde para espécimen. Es un mecanismo instalado en la plataforma de compactación, diseñado para mantener de manera inmóvil el molde, el collar y la placa base.
- Medidor de estabilidad. Para evaluar la resistencia del espécimen en el ensayo, se empleará un anillo dinamométrico vinculado a la prensa, con una capacidad de (2,039 kg-f). Este anillo presenta una sensibilidad de 5 kg-f en el rango de 510 kg-f y 10 kg-f en el rango de 20 kN. Las deformaciones del anillo serán registradas mediante un deformímetro graduado con una precisión de 0.001mm.



- Medidor de deformación. Para cuantificar la deformación, se emplea un dispositivo de medición llamado deformímetro, que cuenta con una escala graduada en centésimas de milímetro con una posición final inmóvil. Este deformímetro se encuentra sujeto de manera segura al segmento superior, y su vástago se apoyará en una palanca regulable conectada a la parte baja durante la ejecución del ensayo.
- Equipo C.B.R. La Máquina de Compresión CBR se emplea para promover la penetración del pistón en una muestra compactada de CBR. La fuerza se aplica mediante un gato mecánico de dos velocidades con dos manivelas, proporcionando al operador lecturas directas y exactas. Este equipo posee una celda de carga tipo S de 5 toneladas de capacidad, gata manual de dos velocidades, Marco de cuatro columnas de acero y viga tipo U, piso de penetración según lo establece la norma, Dial de penetración de sensibilidad de 0.001”.

## Figura 14

### *Prensa C.B.R.*



Nota: Elaboración propia

### 3.11. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con el propósito de lograr las metas establecidas en este estudio, se llevó a cabo el siguiente procedimiento. En una etapa inicial, se realizaron evaluaciones de calidad en los componentes para validar su inclusión en la formulación del concreto asfáltico. Posteriormente, se procedió a la dosificación de la mezcla de componentes con el fin de cumplir con las normas de distribución granulométrica establecidas por la EG-2013 para los elementos constituyentes del concreto asfáltico.

Luego, se procedió con la formulación y creación de muestras de asfalto tradicional utilizando cinco niveles diferentes de contenido asfáltico: 5.00%, 5.50%, 6.00%, 6.50%, y 7.00%. Después de esto, se avanzó con la producción y diseño Marshall de las muestras de asfalto modificado, incorporando fibras de acero. Se empleó un método similar al enfoque Marshall, manteniendo constante la proporción de asfalto y variando

el porcentaje de fibras de acero añadidas. Estos porcentajes fueron: 0.00%, 2.00%, 4.00%, 6.00%, y 8.00%, en relación al peso total del asfalto.

### 3.11.1. Control de estándares de los Agregados

Como se detalló en la sección de materiales, los elementos utilizados en este estudio incluyen piedra triturada con un tamaño máximo nominal de 3/4", grava con un tamaño máximo nominal de 3/8" y arena natural con un tamaño máximo nominal N°4. Con el propósito de simplificar la evaluación de calidad de estos componentes, se clasificó la piedra triturada de 3/4" como material grueso, mientras que la grava de 3/8" y la arena natural fueron designadas como agregados finos. Luego, se llevaron a cabo las pruebas de calidad y los datos fueron registrados en las tablas N° 11 y N° 12.

**Tabla 11**

*Evaluación de estándares de los agregados gruesos*

ENSAYOS	REQUERIMIENTO ALT. >3000MSNM	RESULTADO	CONDICIÓN
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	15% máximo	<b>1.80%</b>	Satisface
Abrasión Los Ángeles	35% máximo	<b>16.75%</b>	Satisface
Partículas chatas y alargadas	10% máximo	<b>2.49%</b>	Satisface
Caras fracturadas	90/70	<b>94/85</b>	Satisface
Sales Solubles Totales	0,5% máximo.	<b>0.03%</b>	Satisface
Absorción	1,0% máximo.	<b>0.87%</b>	Satisface

Nota: cumpliendo la normativa MTC E 504, se evalúa los parámetros proporcionados con los obtenidos en los ensayos

**Figura 15**

*Ensayo de partículas chatas y alargadas*



Nota: Elaboración propia

**Tabla 12**

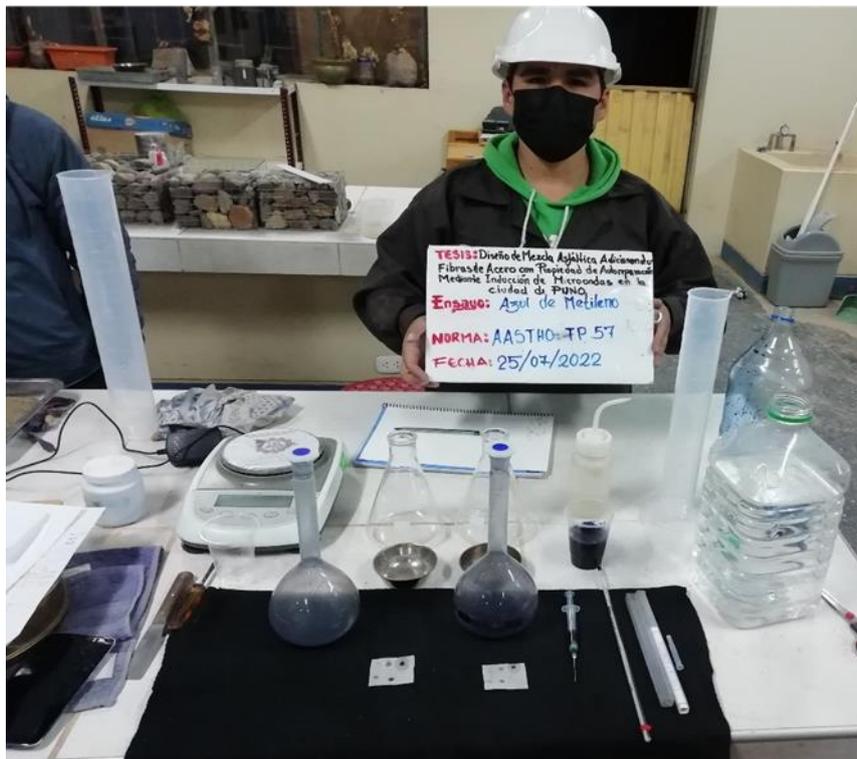
*Evaluación de estándares de los agregados Finos*

Ensayos	Requerimiento Alt. >3000msnm	ARENA CHANCADA DE 1/4"		ARENA NATURAL	
		Resultado	Condición	Resultado	Condición
Equivalente de Arena	70	<b>85</b>	Cumple	<b>75</b>	Satisface
Azul de metileno	8 máx.	<b>2.5</b>	Cumple	<b>3.5</b>	Satisface
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	18% máx.	<b>4.25</b>	Cumple	<b>5.03</b>	Satisface
Índice de Plasticidad	NP	<b>NP</b>	Cumple	<b>NP</b>	Satisface
Sales Solubles Totales	0,5% máx.	<b>0.04%</b>	Cumple	<b>0.12%</b>	Satisface
Absorción	0,5% máx.	<b>0.51%</b>	Cumple	<b>0.48%</b>	Satisface

Nota: elaboración propia

**Figura 16**

*Ensayo de Azul de metileno*



Nota: Elaboración propia

### 3.11.2. Control de Calidad del Asfalto

No fue necesario llevar a cabo pruebas de calidad para el asfalto con PEN 120-150, ya que estos análisis se realizaron en la refinería de Petro Perú. En su lugar, se procedió a la verificación de los parámetros del asfalto para confirmar que cumplieran con los requisitos establecidos en la EG-2013.

**Tabla 13**

*Evaluación de estándares del cemento asfáltico*

ENSAYOS	NORMAS	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	CONDICIÓN
		MIN.	MAX.		
<b>PENETRACIÓN</b>					
a 25°C, 100 gr, 5s. 1/10 mm	ASTM D5	120	150	<b>128</b>	Cumple



ENSAYOS	NORMAS	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	CONDICIÓN
		MIN.	MAX.		
ASTM D5DM-20					
DUCTILIDAD					
a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D113-17	100		>150	Cumple
FLUIDEZ					
- Viscosidad Cinemática a 100°C, cSt	ASTM D2170		Reportar	2055	Cumple
	ASTM D2170M-18				
- Viscosidad Cinemática a 135°C, cSt	ASTM D2170	140		210.6	Cumple
	ASTM D2170M-18				
SOLUBILIDAD					
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	ASTM D 2042-20	99		99.7	Cumple
VOLATILIDAD					
Punto de Inflamación, C.O.C., °C	ASTM D92-18	218		270	Cumple
DENSIDAD					
Gravedad API a 60°F, °API	ASTM D 70-18a		Reportar	7.9	Cumple
Gravedad Especifica a 60/60°F	ASTM D 70-18a		Reportar	1.025	Cumple
SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA					
Punto de Ablandamiento, °C	ASTM D36-14e1		Reportar	43.0	Cumple
Índice de Penetración		-1	+1	-0.6	Cumple
Efecto de Calor y Aire (Película Fina):	ASTM D1754-09				
• Pérdida por calentamiento, % masa			1.3	0.18	Cumple
• Penetración Retenida. % del Original	ASTM D5	42+		61	Cumple

ENSAYOS	NORMAS	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	CONDICIÓN
		MIN.	MAX.		
ASTM D5M-20					
• Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D113-17	100		>150	Cumple

Nota. Resultados del cemento asfáltico sólido 120/150 Pen de la empresa PETRO PERÚ, Anexo N°12.

### 3.11.3. Proporción de la mezcla del material pétreo

Después de la aprobación tanto de los cuatro tipos de agregados como del asfalto, se procedió a la fase de mezcla de los agregados. Para ello, se siguió la gradación MAC-2, tomando como referencia el tamaño máximo nominal de la piedra triturada de tamaño intermedio, según lo establecido en la EG-2013. La combinación de los agregados se inició con análisis granulométricos individuales de cada agregado y el filler, realizando tres ensayos de granulometría para cada tipo de agregado. Luego, se promediaron las granulometrías obtenidas para cada agregado, y se consideró este promedio como la granulometría definitiva para ese tipo de agregado.

**Tabla 14**

*Granulometría de la combinación de agregados, MAC 2*

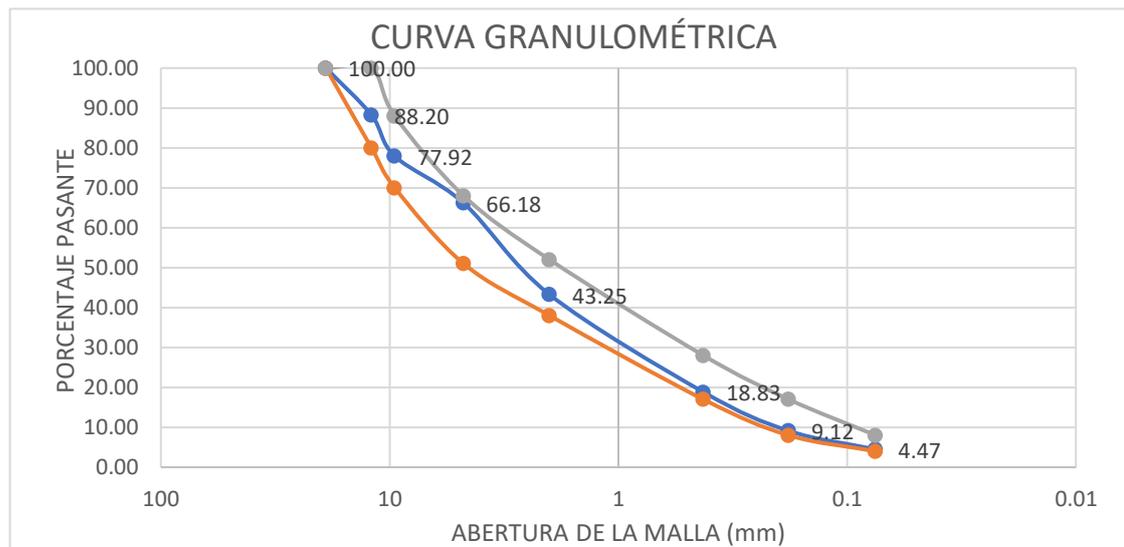
TAMICES ASTM	Abertura mm	% Que pasa, tamaño máximo nominal 3/4"	% Que Pasa, tamaño máximo nominal N°4	% Que Pasa Arena Natural	% Que Pasa Filler - Cemento	% Que Pasa Total	Especificación
1 1/2"	37.5	100	100	100	100	<b>100</b>	-
1"	25	100	100	100	100	<b>100</b>	-
3/4"	19	100	100	100	100	<b>100</b>	100 - 100
1/2"	12.5	57.87	100	100	100	<b>88.2</b>	80 - 100
3/8"	9.5	21.16	100	100	100	<b>77.92</b>	70 - 88
N° 4	4.75	0.13	86.06	100	100	<b>66.18</b>	51 - 68
N° 10	2	0	42.71	81.98	100	<b>43.25</b>	38 - 52

TAMICES ASTM	Abertura mm	% Que pasa, tamaño máximo nominal 3/4"	% Que Pasa, tamaño máximo nominal N°4	% Que Pasa Arena Natural	% Que Pasa Filler - Cemento	% Que Pasa Total	Especificación
N° 20	0.84	0	25.57	65.45	100	<b>31.76</b>	
N° 40	0.425	0	5.53	48.1	100	<b>18.83</b>	17 - 28
N° 80	0.18	0	1.49	17.28	100	<b>9.12</b>	8 - 17
N° 100	0.15	0	0.94	8.55	100	<b>4.82</b>	
N° 200	0.075	0	0.32	1.63	98	<b>4.47</b>	4 - 8
<b>Porcentaje a Utilizar</b>		<b>28.00%</b>	<b>42.00%</b>	<b>26.00%</b>	<b>4.00%</b>		

Nota: granulometría de los agregados combinados, huso aceptable para MAC-2

**Figura 17**

*Granulometría de la combinación de agregados*



Nota: granulometría de los agregados combinados, huso aceptable para MAC-2

### 3.11.4. Temperatura de Mezcla y Compactación

Para determinar este ítem, utilizamos la información de la carta de viscosidad proporcionada por Petro Perú. Con base en esta carta, se estableció que la temperatura de mezcla es de 142°C y la de compactación de 129°C.



### **3.11.5. Número de Golpes de Compactación**

Se llevó a cabo un estudio acerca de los niveles de tráfico más severos considerados en la planificación de pavimentos en la localidad de Puno. Dado que la ciudad de Puno está experimentando un crecimiento constante y un aumento en el parque automotor, lo que se traduce en un mayor número de equivalentes de eje (ESAL) en las distintas vías, se optó por considerar un tránsito pesado. Como resultado de esta elección, se determinó que la cantidad de impactos necesarios será de 75.

### **3.11.6. Cálculo del Contenido de Asfalto Optimo**

Puede ser determinado a partir de diversas fuentes, ya sea a través de la experiencia acumulada o estudios anteriores para el diseño Marshall. Para estimar el contenido de asfalto de diseño deseado, expresado como un porcentaje del peso total de la mezcla. (Instituto del Asfalto, 2014).

### **3.11.7. Preparación de las Probetas**

Una vez finalizados los análisis de los agregados destinados a la mezcla, se llevó a cabo la dosificación de esta combinación y se determinaron las temperaturas para el proceso de mezclado y compactación, junto con el número de golpes necesario para compactar. En este punto, se inició la preparación de las muestras de concreto asfáltico. En cuanto al concreto asfáltico estándar, se propusieron cinco niveles de contenido de asfalto: el óptimo calculado previamente, dos porcentajes superiores en 0.50% y 1.00%, y dos porcentajes inferiores en 0.50% y 1.00%.

Estos porcentajes abarcaron desde 5.00% hasta 7.00%. Se procedió a compactar tres muestras de concreto asfáltico para cada contenido de asfalto, generando así un total de 15 muestras de concreto asfáltico convencional. La compactación de estas muestras se llevó a cabo siguiendo las pautas establecidas en el método Marshall, y se realizaron las pruebas requeridas según el mismo método. Mas adelante, se efectuaron cálculos utilizando los valores obtenidos en estos ensayos. Es importante destacar que se incorporaron fibras de acero en el proceso de dosificación.

### **Figura 18**

#### *Calentado de la mezcla asfáltica*



Nota: Elaboración propia

### Figura 19

#### *Especímenes de concreto asfáltico en laboratorio*



Nota: muestras de concreto asfáltico que serán ensayadas en el laboratorio de pavimentos de la UNAP.

### Figura 20

#### *Ensayos de estabilidad y flujo*



Nota: testigos de concreto asfáltico ensayadas en el equipo Marshall para hallar estabilidad y flujo

### 3.12. DISEÑO MARSHALL DEL CONCRETO ASFÁLTICO TRADICIONAL

#### 3.12.1. Gravedad Específica bulk de la muestra compactada

Para hallar esta característica del espécimen en estudio, utilizaremos la ecuación:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{sumergido}}$$

Donde:

$G_{mb}$  = Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

$W_D$  = Peso al aire del espécimen seco

$W_{SSD}$  = Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco

$W_{sumergido}$  = Peso del espécimen sumergido en el agua

**Tabla 15**

*Gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica convencional*

% de Asfalto	Gravedad Específica Bulk (gr/cm <sup>3</sup> )			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00	2.248	2.247	2.257	2.251
5.50	2.279	2.267	2.265	2.27
6.00	2.32	2.304	2.294	2.306
6.50	2.337	2.311	2.317	2.322
7.00	2.311	2.317	2.309	2.313

Nota: elaboración propia

#### 3.12.2. Gravedad específica teórica máxima (Rice)

Para el cálculo se empleó la ecuación:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - C}$$



Donde:

$G_{mm}$  = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

$A$  = Masa del espécimen seco en aire, g

$C$  = Peso del espécimen sumergido en agua

**Tabla 16**

*Resultados de  $G_{mm}$  del concreto asfáltico tradicional*

<b>Gravedad Específica Teórica Máxima (gr/cm<sup>3</sup>)</b>			
<b>% de Asfalto</b>	<b>M-1</b>	<b>M-2</b>	<b>Promedio</b>
5.00	2.409	2.408	2.409
5.50	2.391	2.390	2.391
6.00	2.386	2.387	2.387
6.50	2.367	2.368	2.368
7.00	2.336	2.337	2.337

Nota: elaboración propia

### 3.12.3. Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados

Ya que se ha realizado la combinación de los agregados y, hasta ese momento, se contaba únicamente con las densidades específicas individuales de los agregados que forman la mezcla, fue necesario llevar a cabo la determinación de la  $G_{sb}$ . Para lo cual empleamos la ecuación:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk de la combinación de agregados



$G_1, G_2, \dots, G_n$  = Valores de las gravedades específicas por fracción 1, 2, n

$P_1, P_2, \dots, P_n$  = Porcentajes en peso de cada agregado

Luego de procesar los datos resulta para la gravedad específica bulk de la combinación de agregados pétreos  $G_{sb} = 2.520 \text{ kg/cm}^3$

#### 3.12.4. Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

Se utiliza la ecuación siguiente:

$$G_{se} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

$G_{se}$  = Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

$P_b$  = Contenido de asfalto, en porcentaje del peso total de la mezcla

$G_b$  = Gravedad específica del cemento asfáltico

$G_{mm}$  = Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico

La densidad específica efectiva de la combinación de agregados se mantuvo constante, incluso al incrementar la proporción de asfalto, debido a la utilización de una única distribución granulométrica de los agregados. El cálculo arrojó el siguiente resultado:  $G_{se}=2.603 \text{ gr/cm}^3$ .

#### 3.12.5. Porcentaje de asfalto absorbido

Para llevar a cabo la estimación del porcentaje de asfalto absorbido en el concreto asfáltico, aplicamos la ecuación:



$$P_{ba} = \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b * 100$$

Donde:

$P_{ba}$  = Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado.

$G_b$  = Gravedad Específica del cemento asfáltico.

$G_{se}$  = Gravedad Específica efectiva del agregado.

$G_{sb}$  = Gravedad Específica bulk del agregado.

Después emplear la ecuación con los datos, se obtiene el resultado:  $P_{ba} = 1.30\%$ .

### 3.12.6. Porcentaje de Asfalto Efectivo

Se utilizó la ecuación mostrada para la obtención de resultados en los dos tipos de mezclas:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} * P_s}{100}$$

Donde:

$P_{be}$  = Contenido de asfalto efectivo

$P_b$  = Contenido de asfalto

$P_s$  = Contenido de agregado

$P_{ba}$  = Asfalto absorbido, porcentaje por peso del agregado

Los datos para  $P_{be}$ ,  $P_b$  y  $P_s$  son respecto al porcentaje por peso total de la mezcla, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla N°17.

**Tabla 17**

*Resultados de Pbe del concreto asfáltico convencional*

Porcentaje de asfalto efectivo (%)	
% de Asfalto	Promedio
5.0%	3.90
5.5%	4.44
6.0%	4.47
6.5%	5.25
7.0%	6.06

Nota: elaboración propia

### 3.12.7. Porcentaje VMA en Mezcla Compactada.

Calcular el porcentaje VMA es una tarea crucial, ya que este factor desempeña un papel fundamental en el diseño de las mezclas. Para obtener estos valores, utilizamos la fórmula que se indica a continuación:

$$VMA = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb} * (1 - P_b)}{G_{sb}}\right)$$

Donde:

$VMA$  = Vacíos en el material pétreo

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk del agregado

$G_{mb}$  = Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

$P_b$  = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

**Tabla 18**

*resultados de VMA del concreto asfáltico tradicional*

Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla (%)	
% de Asfalto	Promedio
5.00%	15.15
5.50%	14.86
6.00%	13.92
6.50%	13.85
7.00%	14.65

Nota: elaboración propia

### 3.12.8. Vacíos de aire en la mezcla compactada

Para encontrar ( $V_a$ ) se utilizó la ecuación matemática:

$$V_a = 100 * \left( \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

Donde:

$V_a$  = Vacíos de aire en la mezcla compactada

$G_{mb}$  = Gravedad Específica bulk del espécimen compactado

$G_{mm}$  = Gravedad Específica teórica máxima de la mezcla

Hallando los resultados exhibidos en la tabla N° 19

**Tabla 19**

*Vacíos de aire en la mezcla asfáltica tradicional*

Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla (%)	
% de Asfalto	Promedio
5.00%	6.580
5.50%	5.030
6.00%	3.390
6.50%	1.970
7.00%	1.060

Nota: elaboración propia

### 3.12.9. Vacíos Llenos con Asfalto.

Los espacios ocupados por el asfalto se determinan con la ecuación matemática a continuación:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} * 100$$

Donde:

$VFA$  = Vacíos llenos con asfalto

$VMA$  = Vacíos en el agregado mineral

$Va$  o  $VTM$  = Vacíos de aire en la mezcla compactada

Obteniendo los cálculos que se muestran en la tabla N°20

**Tabla 20**

*Vacíos llenos con asfalto del concreto asfáltico tradicional*

<b>Vacíos llenos de Asfalto (%)</b>	
<b>% de Asfalto</b>	<b>Promedio</b>
5.00%	<b>56.54</b>
5.50%	<b>66.13</b>
6.00%	<b>75.78</b>
6.50%	<b>85.76</b>
7.00%	<b>92.76</b>

Nota: elaboración propia

### **3.12.10. Estabilidad Marshall**

Para obtener este dato, se ejecutó la fractura de muestras de concreto asfáltico de acuerdo a las indicaciones establecidas en la normativa ASTM D 1559. Seguidamente, luego se registra la lectura del indicador de estabilidad. Obtenida esta medida, se llevó a cabo el cálculo de la estabilidad mediante una fórmula de conversión. A pesar de haber formulado la fórmula tras ajustar el equipo, la estabilidad lograda en esta fase no constituye la estabilidad definitiva que se busca alcanzar. Para obtener la estabilidad real, es necesario multiplicar la estabilidad inicial por un factor correctivo, cuyo cálculo depende de la dimensión o volumen de la muestra de concreto asfáltico. Tras culminar el procedimiento, se obtiene los datos mostrados detalladamente en la tabla N°21.

**Tabla 21**

*Estabilidad Marshall del concreto asfáltico tradicional*

% de Asfalto	Estabilidad Marshall (kgf)			
	Muestra-1	Muestra-2	Muestra-3	Promedio
5.00%	816.30	748.90	697.50	754.23
5.50%	1140.44	1067.19	931.69	1049.44
6.00%	1150.43	1230.22	1209.74	1196.80
6.50%	1407.24	1389.61	1280.08	1358.98
7.00%	1150.43	1307.10	1210.30	1222.61

Nota: elaboración propia

### 3.12.11. Flujo Marshal

Se registró la lectura del dial que mide la deformación del testigo, los resultados se muestran a continuación en la tabla N°22.

**Tabla 22**

*Flujo Marshall del concreto asfáltico tradicional*

% de Asfalto	Flujo Marshall (0.25mm)			
	Muestra-1	Muestra-2	Muestra-3	Promedio
5.00%	10	10.8	9.6	<b>10.13</b>
5.50%	12.8	13.6	11.2	<b>12.53</b>
6.00%	14.4	12.4	14	<b>13.6</b>
6.50%	14	16	17.2	<b>15.73</b>
7.00%	15.6	16.4	18	<b>16.67</b>

Nota: elaboración propia

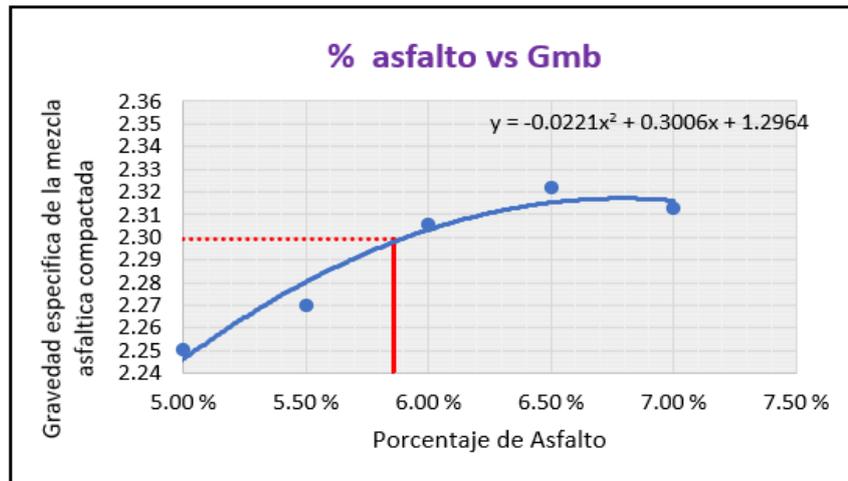
### 3.12.12. Gráficas Marshall

Se generaron representaciones visuales siguiendo las directrices del Procedimiento Marshall, indicando que se plasmó el contenido de asfalto en el eje de las abscisas, para todas las ilustraciones. En el eje de las ordenadas de cada

gráfico, se analizaron distintos aspectos, tales como la densidad específica volumétrica de la muestra compactada, la resistencia Marshall, la consistencia Marshall, así como la proporción de espacios vacíos de aire y la proporción de huecos en el material pétreo.

**Figura 21**

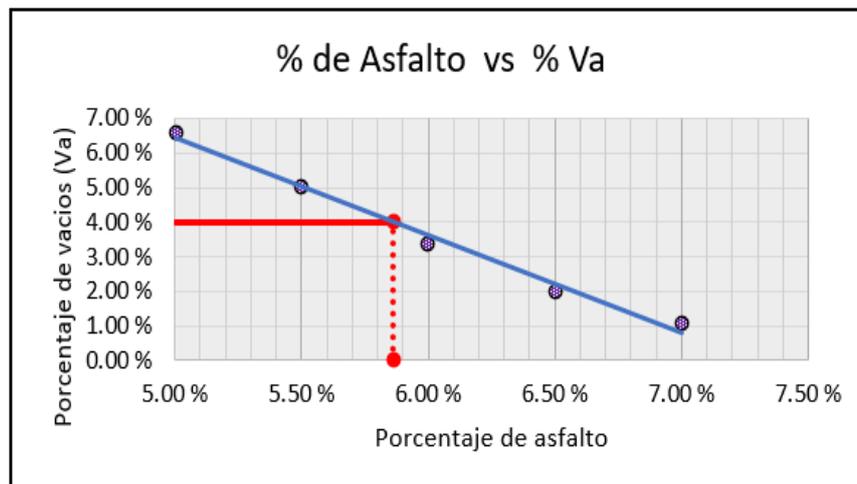
*Porcentaje de Asfalto vs Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada*



Nota: elaboración propia

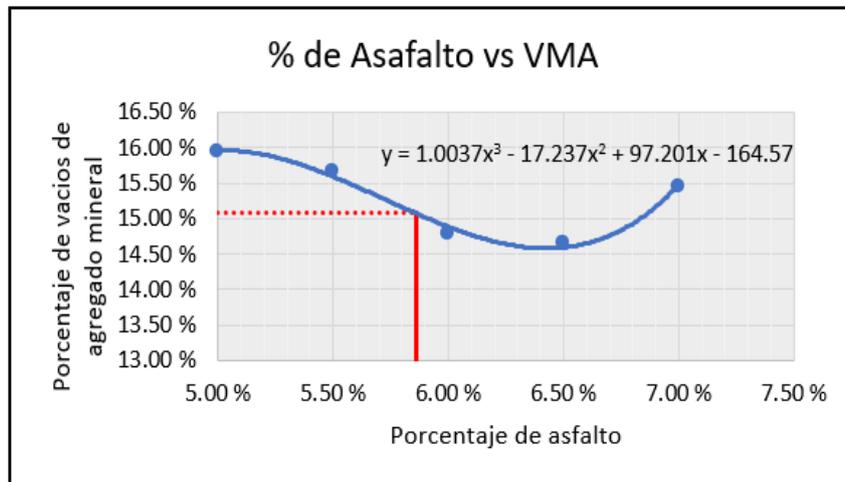
**Figura 22**

*Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos (Va)*



Nota: elaboración propia

**Figura 23**

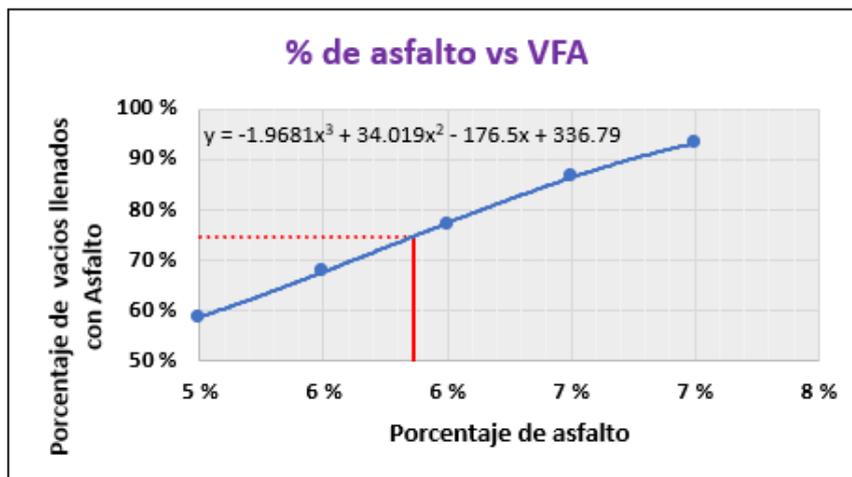


*Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos de agregado mineral*

Nota: elaboración propia

**Figura 24**

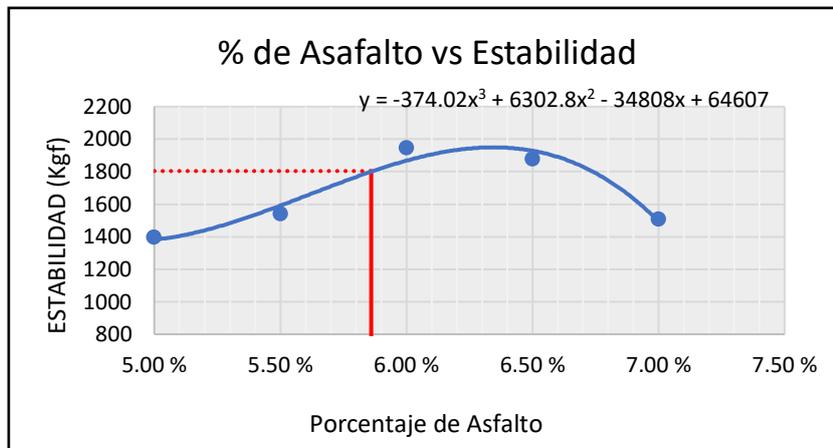
*Porcentajes (% de asfalto vs % de vacíos llenados con Asfalto)*



Nota: elaboración propia

**Figura 25**

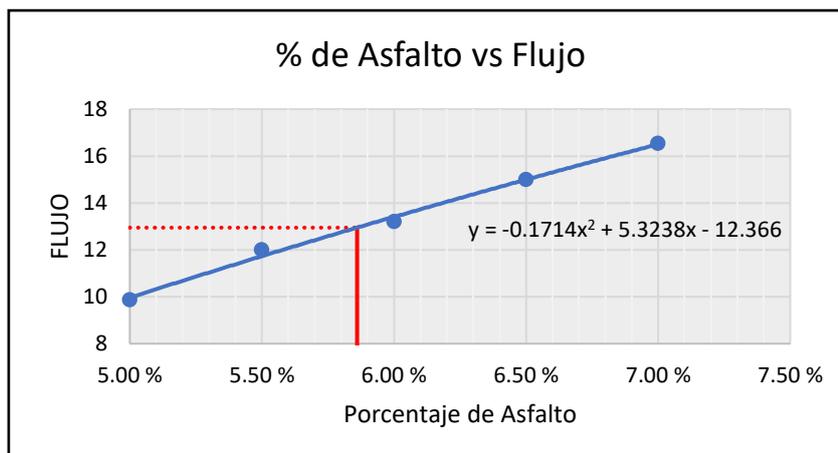
*Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad (Kgf)*



Nota: elaboración propia

**Figura 26**

*Porcentaje de Asfalto vs Flujo*



Nota: elaboración propia

### 3.12.13. Resumen del Diseño Marshall del Concreto Asfáltico Tradicional

En la siguiente tabla se detalla un resumen de las características que posee la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 23***Diseño Marshall de la mezcla asfáltica en caliente tradicional*

<b>Cuantificación de la combinación de agregados pétreos</b>	
Agregados	% de Peso
Piedra Chancada de 1/2"	28%
Gravilla de 1/4"	42.00%
Arena Natural	26.00%
Filler	4.00%
<b>Mezcla asfáltica</b>	
Tipo de Asfalto	PEN 120-150
Óptimo de Asfalto	5.86%
Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> )	1.0254
Características Físico Mecánicas	Diseño
N° de Golpes de Compactación	75
Temp. de Mezcla (°C)	142
Temp. de Compactación (°C)	129
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	2.299
Estabilidad (Kg)	1184.6
Fluencia (0.25mm)	13.54
% de Vacíos de Aire	4.00
% de VMA	14.29
% de VFA	73.26

Nota: elaboración propia

### 3.13. DISEÑO MARSHALL DEL CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO

El diseño en esta etapa será modificado con fibras de acero y se seguirá los mismos procedimientos que en el diseño de mezclas asfálticas convencionales.

### 3.13.1. Preparación de las probetas

Luego de finalizar la formulación Marshall para el asfalto tradicional, se pasó al diseño Marshall del asfalto modificado con fibras de acero, empleando el contenido de asfalto óptimo identificado en la formulación previa del asfalto tradicional. Se añadieron fibras de acero al asfalto modificado en cuatro proporciones distintas: 2.00%, 4.00%, 6.00%, 8.00%, respecto al peso del asfalto.

Es fundamental resaltar que se conservaron invariables la distribución granulométrica del agregado, la variedad de asfalto, la cantidad de golpes, así como las temperaturas de mezclado y compactación, tanto en las instancias de concreto asfáltico convencional como en las de concreto asfáltico modificado con fibras de acero. Después de establecer todos estos criterios, se procedió a la preparación y compactación de las muestras de concreto asfáltico modificado.

#### Figura 27

*Baño María a 60°C a los especímenes*



Nota: elaboración propia

## Figura 28

### *Ensayos a la muestra asfáltica modificada*



Nota: elaboración propia

Se llevó a cabo el análisis y diseño del concreto asfáltico modificado utilizando la metodología Marshall, y los pasos de este proceso se describen a continuación.

### **3.13.2. Gravedad Específica Bulk de la Muestra Compactada**

Con el fin de obtener los datos de la Gravedad Específica Bulk empleamos la ecuación matemática:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{sumergido}}$$

Donde:

$G_{mb}$  = Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

$W_D$  = Peso al aire de la muestra seco

$W_{SSD}$  = Peso al aire de la muestra saturada superficialmente seco

$W_{sumergido}$  = Peso de la muestra sumergido en el agua

**Tabla 24**

*Resultados de  $G_{mb}$  del concreto asfáltico modificado*

<b>Gravedad Específica Bulk (gr/cm<sup>3</sup>)</b>				
<b>% de fibras de acero</b>	<b>M-1</b>	<b>M-2</b>	<b>M-3</b>	<b>Promedio</b>
0.00%	2.274	2.293	2.303	<b>2.290</b>
2.00%	2.284	2.299	2.276	<b>2.286</b>
4.00%	2.295	2.269	2.291	<b>2.285</b>
6.00%	2.294	2.278	2.289	<b>2.287</b>
8.00%	2.273	2.271	2.304	<b>2.283</b>

Nota: elaboración propia

### **3.13.3. Gravedad específica teórica máxima (Rice)**

Con el fin de llevar a cabo los cálculos se utiliza la Ecuación:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

$G_{mm}$  = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

$A$  = Masa del espécimen seco en aire, g

$D$  = Masa de tapa y tazón con agua 25°C, g

$E$  = Masa de tapa, tazón, espécimen y agua a 25°C, g

Se obtuvo los valores mostrados en la tabla 25.

**Tabla 25**

*Resultados  $G_{mm}$  de la mezcla asfáltica en caliente*

<b>Gravedad Específica Teórica Máxima (gr/cm<sup>3</sup>)</b>			
<b>% de fibras de acero</b>	<b>M-1</b>	<b>M-2</b>	<b>Promedio</b>
0.00%	2.385	2.385	<b>2.385</b>
2.00%	2.38	2.38	<b>2.38</b>
4.00%	2.385	2.389	<b>2.387</b>
6.00%	2.391	2.391	<b>2.391</b>
8.00%	2.288	2.388	<b>2.388</b>

Nota: elaboración propia

### 3.13.4. Gravedad específica neta de la combinación de agregados $G_{sb}$

**Tabla 26**

*Resultados de  $G_{sb}$  adicionando fibras de acero*

<b>Gravedad Específica efectiva de la combinación de agregados incluidos fibras de acero(gr/cm<sup>3</sup>)</b>	
<b>% de fibras de acero</b>	<b>Promedio</b>
0.00%	<b>2.520</b>
2.00%	<b>2.522</b>
4.00%	<b>2.524</b>
6.00%	<b>2.526</b>
8.00%	<b>2.527</b>

Nota: elaboración propia

### 3.13.5. Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

Con el fin de calcular  $G_{se}$  utilizamos la  $G_{mm}$ , al cual se le modifico con la adición de FA del 4% en relación al peso del bitumen, utilizamos la ecuación:



$$G_{se} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

$G_{se}$  = Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

$P_b$  = Contenido de asfalto, en porcentaje del peso total de la mezcla

$G_b$  = Gravedad específica del cemento asfáltico

$G_{mm}$  = Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico

Para el diseño Marshall modificado, obtendremos un solo valor de gravedad específica efectiva.  $G_{se}=2.603 \text{ gr/cm}^3$ .

### 3.13.6. Porcentaje de asfalto absorbido

Con el fin de calcular el  $P_{ba}$ , aplicamos la ecuación matemática:

$$P_{ba} = \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b * 100$$

Donde:

$P_{ba}$  = Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado

$G_b$  = Gravedad Específica del cemento asfáltico

$G_{se}$  = Gravedad Específica efectiva del agregado

$G_{sb}$  = Gravedad Específica bulk del agregado

Después de emplear la fórmula y evaluar los resultados de las anteriores ecuaciones, se derivó un resultado del 1.23% para  $P_{ba}$ .



### 3.13.7. Porcentaje de asfalto efectivo

Con el propósito de calcular la proporción de asfalto efectivo en el concreto asfáltico modificado con fibras de acero, se aplicó la misma fórmula utilizada para determinar este factor en el concreto asfáltico convencional. Por lo tanto, dado que en el diseño Marshall modificado se emplea solo un contenido de asfalto, la proporción de asfalto efectivo permanece invariable en cada diseño, y se obtuvo el resultado:  $Pbe = 4.70\%$ .

### 3.13.8. Porcentaje VMA en mezcla compactada

Para el cálculo de VMA se tuvo especial cuidado ya que es un dato muy importante en el diseño Marshall, para hallarlo se utilizó la siguiente Ecuación:

$$VMA = 100 * \left( 1 - \frac{G_{mb} * (1 - P_b)}{G_{sb}} \right)$$

Donde:

$VMA$  = Vacíos en el agregado mineral

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk del agregado

$G_{mb}$  = Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

$P_b$  = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla



**Tabla 27**

*Resultados de VMA del concreto asfáltico modificado*

***Cálculo del porcentaje VMA en mezcla compactada***

<b>% de fibras de acero</b>	<b>Promedio</b>
0.00%	14.44
2.00%	14.59
4.00%	14.62
6.00%	14.55
8.00%	14.71

Nota: elaboración propia

**3.13.9. Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada**

Con el fin de obtener el valor se aplica la Ecuación matemática:

$$V_a = 100 * \left( \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

Donde:

$V_a$  = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

$G_{mb}$  = Gravedad Específica bulk del espécimen compactado

$G_{mm}$  = Gravedad Específica teórica máxima de la mezcla

**Tabla 28**

*Vacíos de Aire en la Mezcla del Concreto Asfáltico Modificado*

Porcentajes de Vacíos de Aire (%)	
% de fibras de acero	Promedio
0.00%	3.96
2.00%	3.96
4.00%	4.25
6.00%	4.32
8.00%	4.39

Nota: elaboración propia

**3.13.10. Vacíos llenos con asfalto**

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} * 100$$

Se empleó la fórmula siguiente para determinar los espacios ocupados por el asfalto:

Donde:

$VFA$  = Vacíos llenos con asfalto

$VMA$  = Vacíos en el agregado mineral

$Va$  ó  $VTM$  = Vacíos de aire en la mezcla compactada

**Tabla 29**

*Valores obtenidos de VFA del asfalto Modificado*

Porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto (%)	
% de F.A.	Promedio
0.00%	72.57
2.00%	72.90



Porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto (%)	
4.00%	70.92
6.00%	70.30
8.00%	70.16

Nota: elaboración propia

### 3.13.11. Estabilidad Marshall

Para obtener este dato, se procedió a fracturar las muestras de concreto asfáltico, siguiendo las pautas establecidas por la norma ASTM D 1559. Luego, se registró la lectura en el dial de estabilidad. Tras obtener esta lectura, se llevó a cabo el cálculo de la estabilidad utilizando una fórmula de conversión, la cual fue desarrollada después de calibrar el equipo. Es relevante destacar que la estabilidad inicial obtenida no representa el valor definitivo que estamos persiguiendo. Para lograr la estabilidad verdadera, es imperativo multiplicar la estabilidad preliminar por un factor de ajuste, cuyo cálculo depende de la altura de la muestra de concreto asfáltico. Al llevar a cabo estas etapas, se recopilieron los datos consignados en la tabla N°30.

#### Tabla 30

*Estabilidad Marshall del Concreto Asfáltico Modificado*

Estabilidad Marshall (Kgf)				
% de fibras de acero	M-1	M-2	M-3	Promedio
0.00%	1196.98	1147.1	1219.32	1187.8
2.00%	1203.37	1200.17	1165.08	1189.54
4.00%	1127.13	1206.83	1246.86	1193.61
6.00%	1177.84	1187.02	1217.21	1194.02
8.00%	1223.6	1203.37	1153.75	1193.57

Nota: elaboración propia

### 3.13.12. Flujo Marshall

El procedimiento para la obtención de datos del flujo Marshall fue la lectura del dial que mide la deformación del espécimen, datos observables en la tabla N°24.

#### Tabla 31

##### *Flujo Marshall del Concreto Asfáltico Modificado*

<b>Flujo (0.25mm)</b>				
<b>% de fibras de acero</b>	<b>M-1</b>	<b>M-2</b>	<b>M-3</b>	<b>Promedio</b>
0.00%	12.4	14.0	13.6	13.3
2.00%	13.6	14.0	13.4	13.7
4.00%	13.2	14.4	14.0	13.9
6.00%	13.6	14.8	14.2	14.2
8.00%	14.0	14.4	15.2	14.5

Nota: elaboración propia

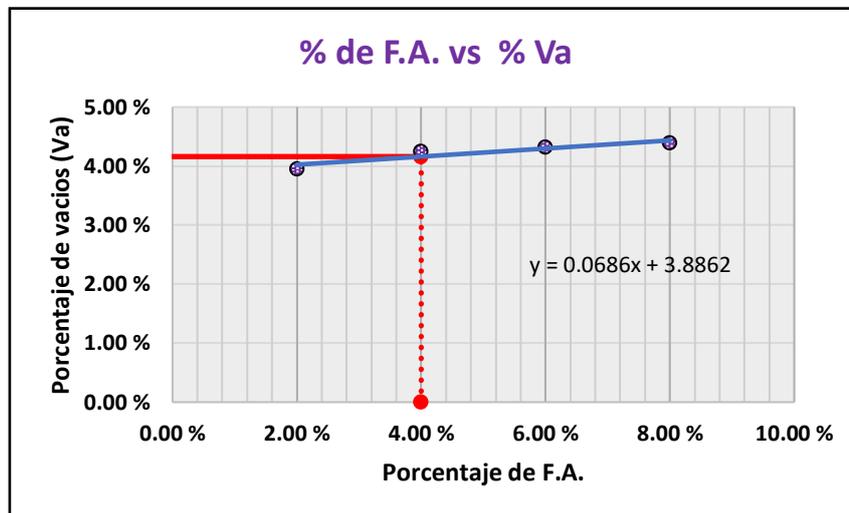
### 3.13.13. Gráficas Marshall

Se confeccionaron representaciones visuales siguiendo las indicaciones del Procedimiento Marshall, indicando que se representó el contenido de asfalto en el eje de las abscisas de todas las gráficas. En el eje de las ordenadas de cada representación gráfica, se evaluaron diferentes factores, tales como la densidad específica volumétrica de la muestra compactada, la resistencia Marshall, la consistencia Marshall, así como la proporción de espacios vacíos de aire y la proporción de huecos en el agregado mineral.

### 3.13.14. Resultados del diseño Marshall de concreto asfáltico modificado

**Figura 29**

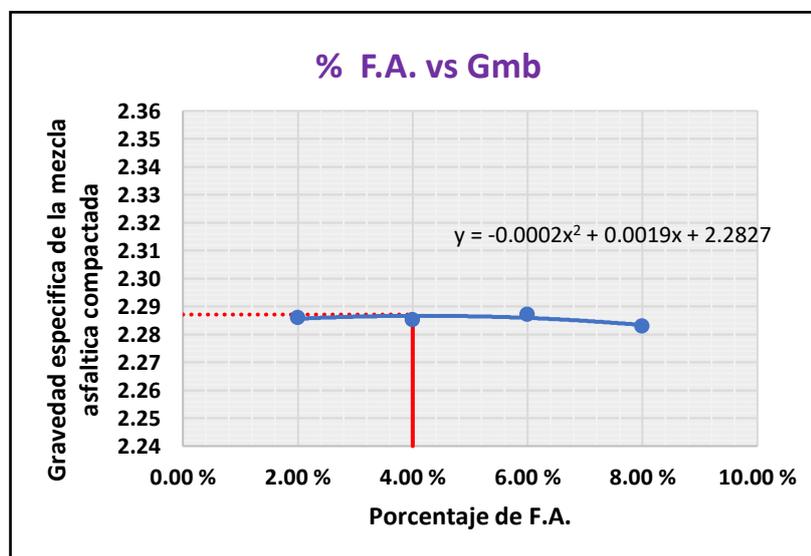
*Porcentaje de vacíos (Va) de la mezcla modificada*



Nota: porcentaje de vacíos para 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de acero

**Figura 30**

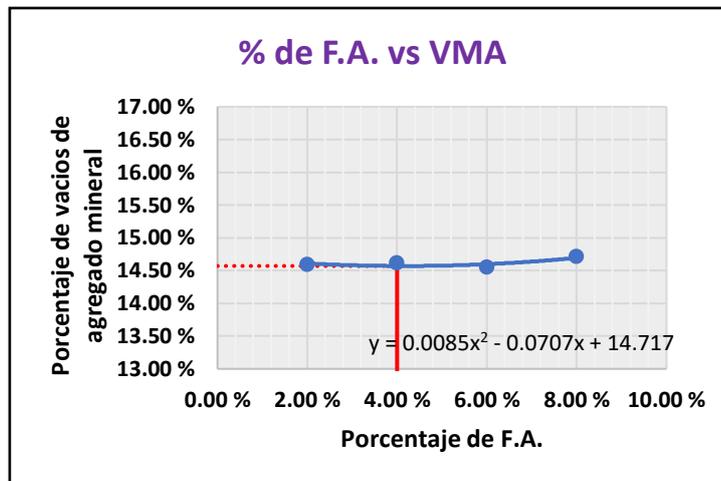
*Gravedad específica de mezcla asfáltica compactada modificada*



Nota: gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada para 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de acero

**Figura 31**

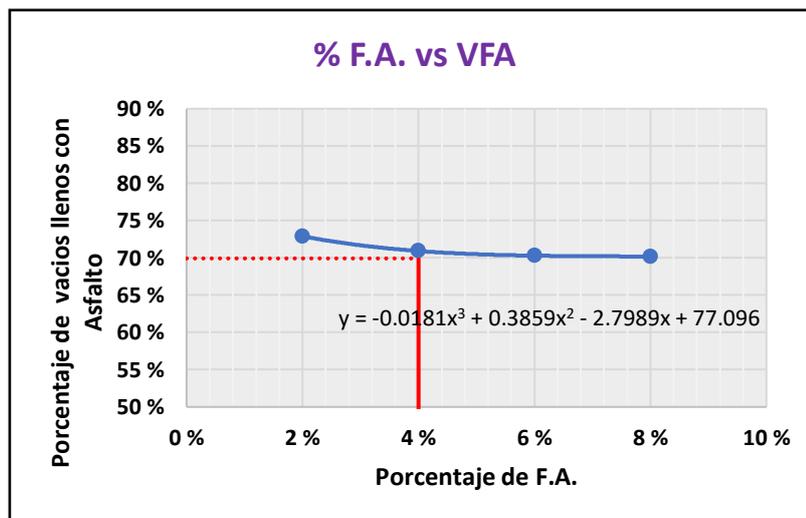
*Porcentaje de vacíos de agregado mineral-mezcla modificada*



Nota: porcentaje de vacíos de agregado mineral para 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de acero

**Figura 32**

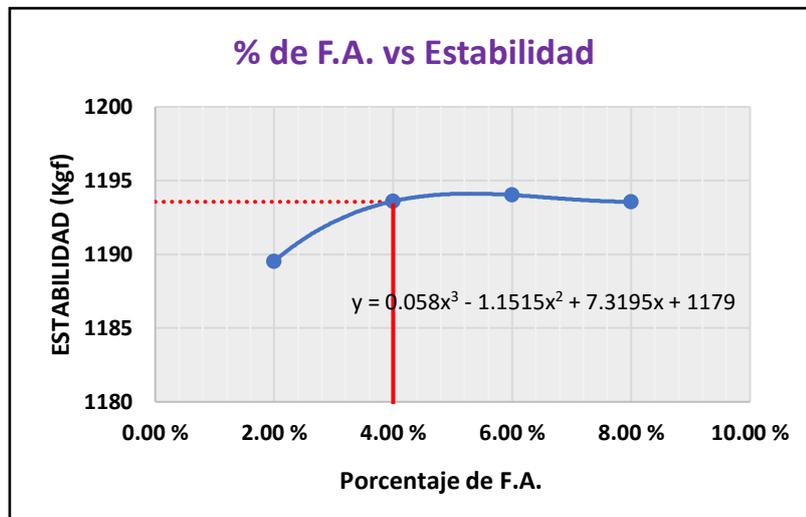
*Porcentaje de vacíos llenos con asfalto de la mezcla modificada*



Nota: porcentaje de vacíos llenos con asfalto para 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de acero

**Figura 33**

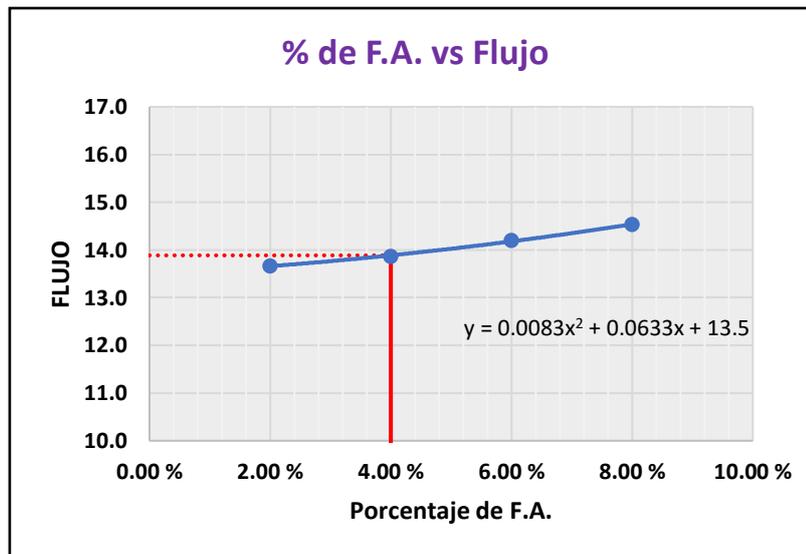
*Estabilidad de mezcla asfáltica modificada*



Nota: estabilidad de mezcla asfáltica modificada para 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de acero

**Figura 34**

*Flujo de la mezcla asfáltica modificada*



Nota: flujo de diseño de mezcla modificada para 2%, 4%, 6% y 8% de fibras de acero

**Tabla 32***Resumen de resultados de la mezcla modificada*

<b>Dosificación de la Combinación de Agregados</b>	
Agregado	% de Peso
Agregado grueso de TMN de 1/2"	26.29%
Gravilla de TMN de 1/4"	39.44%
Arena Natural	24.42%
Filler	3.76%
Cemento Asfáltico	5.86%
Fibras de Acero	0.23%

<b>Mezcla Asfáltica</b>	
Tipo de Asfalto	PEN 120/150
Contenido Óptimo de Asfalto	5.86%
Contenido óptimo de fibras de acero	4.00%
Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> )	1.0254
Propiedades Físicas y Mecánicas	Diseño
% de Bitumen	5.86%
N° de Golpes de Compactación	75
Temp. de Mezcla (°C)	142
Temp. de Compactación (°C)	129
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	2.285
Estabilidad (Kg)	1193.6
Fluencia (0.25mm)	13.89
% de Vacíos de Aire	4.16
% de VMA	14.57
% de VFA	69.92

Nota: diseño Marshall final del concreto asfáltico modificado con fibras de acero



### **3.14. AUTO REPARACIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO ASFALTICO**

La investigación tiene como uno de los propósitos encontrar el tiempo optimo y la cantidad de fibras que se debe utilizar en el diseño de la mezcla asfáltica cumpliendo con los parámetros requeridos en el diseño Marshall. Para ello se añadió a los especímenes diferentes porcentajes de fibras de acero (2%,4%,6% y 8%) y se sometió a diferentes tiempos (20seg, 40seg, 60seg y 80seg) en microondas para su respectiva inducción de calor con la cual se logra la auto reparación de las fallas ocurridas en la rotura que fueron aplicadas al inicio.

#### **3.14.1. Temperaturas de auto reparación en la superficie de los especímenes.**

En el proceso de conocer las temperaturas alcanzadas en la superficie de la muestra sólida después de someter microondas se ha utilizado un Pirómetro Infrarrojo Laser Digital Termómetro sin Contacto que tiene rango de lectura de temperatura -50 a 380°C.

En la investigación se ha denominado las cuatro superficies existentes de los especímenes de la siguiente manera: superficie superior, superficie inferior, superficie corte y superficie semicircular, tal manera que se hizo 10 lecturas por superficie haciendo un total de 40 lecturas por espécimen.

**Tabla 33***Temperaturas superficies en especímenes para 20 segundos en microondas*

CONDICIÓN		SUPERFICIE			
TIEMPO	% F.A.	Superior	Inferior	Corte	Semicircular
<b>20 segundos</b>	0.0 %	32.0 °C	35.5 °C	32.5 °C	32.8 °C
	2.0 %	31.1 °C	36.7 °C	33.7 °C	32.5 °C
	4.0 %	34.9 °C	37.4 °C	36.2 °C	34.2 °C
	6.0 %	35.0 °C	36.5 °C	40.4 °C	34.1 °C
	8.0 %	32.9 °C	45.3 °C	36.1 °C	33.8 °C

Nota: elaboración propia

**Tabla 34***Temperaturas superficies en especímenes para 40 segundos en microondas*

CONDICIÓN		SUPERFICIE			
TIEMPO	% F.A.	Superior	Inferior	Corte	Semicircular
<b>40 segundos</b>	0.0 %	52.6 °C	50.2 °C	53.0 °C	52.0 °C
	2.0 %	60.2 °C	55.8 °C	58.3 °C	56.9 °C
	4.0 %	57.9 °C	69.3 °C	67.0 °C	56.4 °C
	6.0 %	53.4 °C	71.9 °C	68.4 °C	61.2 °C
	8.0 %	55.5 °C	63.1 °C	64.5 °C	62.4 °C

Nota: elaboración propia

**Tabla 35***Temperaturas superficies en especímenes para 60 segundos en microondas*

CONDICIÓN		SUPERFICIE			
TIEMPO	% F.A.	Superior	Inferior	Corte	Semicircular
<b>60 segundos</b>	0.0 %	58.8 °C	68.5 °C	63.9 °C	57.2 °C
	2.0 %	66.7 °C	64.7 °C	66.4 °C	57.2 °C
	4.0 %	72.4 °C	71.1 °C	74.9 °C	62.2 °C

CONDICIÓN		SUPERFICIE			
TIEMPO	% F.A.	Superior	Inferior	Corte	Semicircular
	6.0 %	62.4 °C	79.5 °C	75.7 °C	66.9 °C
	8.0 %	63.8 °C	78.2 °C	72.6 °C	67.8 °C

Nota: elaboración propia

**Tabla 36**

*Temperaturas superficies en especímenes para 80 segundos en microondas*

CONDICIÓN		SUPERFICIE			
TIEMPO	% F.A.	Superior	Inferior	Corte	Semicircular
<b>80 segundos</b>	0.0 %	76.0 °C	83.2 °C	80.6 °C	64.1 °C
	2.0 %	80.3 °C	80.5 °C	76.9 °C	69.9 °C
	4.0 %	87.5 °C	81.8 °C	82.6 °C	81.5 °C
	6.0 %	80.0 °C	93.5 °C	88.8 °C	85.6 °C
	8.0 %	79.0 °C	91.1 °C	86.4 °C	84.7 °C

Nota: elaboración propia

**Tabla 37**

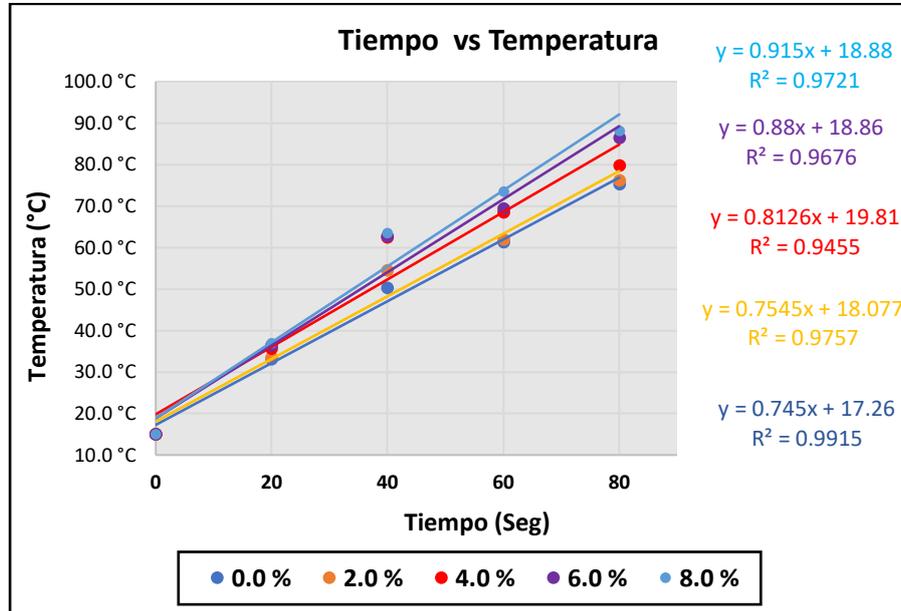
*Promedio de temperaturas para diferentes tiempos y porcentajes*

TEMPERATURA SUPERFICIAL						
Especímen	Tiempo	0.0 %	2.0 %	4.0 %	6.0 %	8.0 %
	(Segundos)					
M-AB2	20	33.2 °C	33.5 °C	35.7 °C	36.5 °C	37.0 °C
M-AB4	40	50.3 °C	54.6 °C	62.5 °C	62.8 °C	63.6 °C
M-AB6	60	61.4 °C	62.0 °C	68.6 °C	69.5 °C	73.6 °C
M-AB8	80	75.4 °C	76.2 °C	79.8 °C	86.5 °C	88.2 °C

Nota: elaboración propia

**Figura 35**

*Promedio de temperaturas superficiales para diferentes tiempos y % de F.A. de especímenes*



Nota: Promedio de temperaturas superficiales de los especímenes para los diferentes tiempos sometidos a microondas con respecto al porcentaje de fibras de acero añadidos a la mezcla

**Figura 36**

*Calentado de las muestras de concreto asfáltico en microondas*



Nota: elaboración propia

### Figura 37

*Toma de temperatura en especímenes de concreto asfáltico*



Nota: elaboración propia

#### 3.14.2. Ensayo de flexión con y sin fibras de acero

Para obtener los resultados de resistencia a la carga sometida en la máquina de compresión indirecta de tres puntos se aplicó a 12 especímenes por porcentaje (0%,2%,4%,6% y 8%) en total la cantidad es de 60 unidades.

Estas unidades fueron condicionadas para que al aplicar la carga falle en un determinado punto donde se hizo un corte de 3mm de espesor y una profundidad de 5mm, este procedimiento con la intención de generar la falla en el punto deseado.

Las cargas con respecto a la cantidad de fibras de acero añadidos de 2%,4%,6% y 8% a la mezcla asfáltica no varía significativamente dando como resultado 1.44 KN,1.45KN,1.45 KN y 1.40 KN respectivamente, y para la mezcla convencional 1.43 KN.

**Tabla 38**

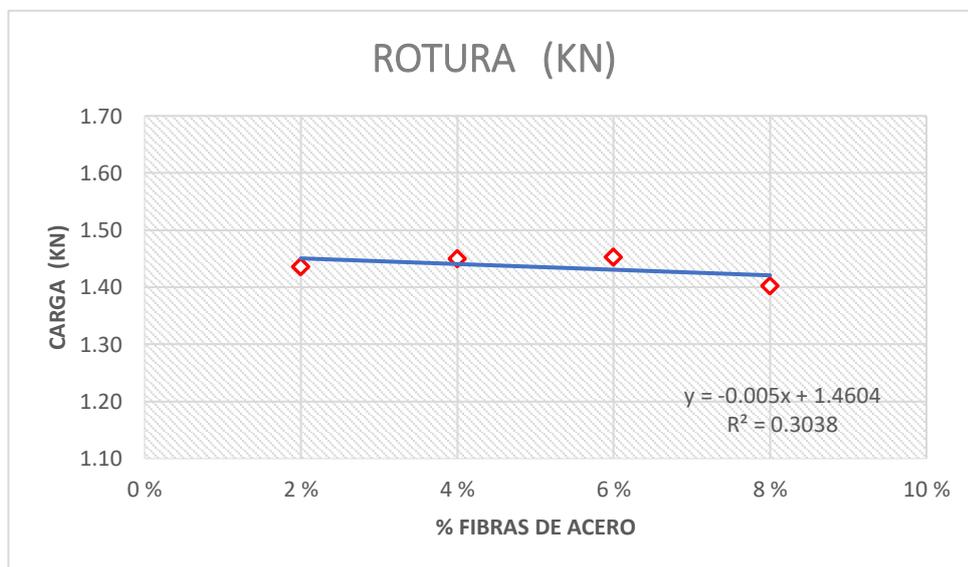
*Las cargas respecto a la cantidad de F.A. añadidos de 2%,4%,6% y 8% a la mezcla modificada*

CARGA (KN) VS % FIBRAS DE ACERO					CARGA (KN)
% FA	MUESTRAS				
	PM1	PM2	PM3	PM4	
0 %	1.35	1.30	1.52	1.56	<b>1.43</b>
2 %	1.53	1.41	1.33	1.48	<b>1.44</b>
4 %	1.35	1.45	1.50	1.49	<b>1.45</b>
6 %	1.46	1.61	1.40	1.35	<b>1.45</b>
8 %	1.41	1.33	1.52	1.35	<b>1.40</b>

Nota: testigos sometidos a flexión con y sin fibras de acero

**Figura 38**

*Testigos sometidos a flexión con fibras de acero*



Nota: elaboración propia

### 3.14.3. Auto reparación de especímenes por tiempo sometido a microondas.

La realización del proceso de auto reparación se realizó de la siguiente manera:

Un ciclo está comprendido desde la rotura primaria del espécimen, este espécimen ya con la falla es sometida a electromagnetismo en un microondas de acuerdo al tiempo deseado, estas variaciones de tiempo son de 20s, 40s, 60s y 80 segundos, luego son llevadas al molde durante 5 minutos aproximadamente estas son guardadas después del desmolde a reposar durante 24 horas a temperatura ambiente, pasadas las 24 horas es sometida nuevamente a la rotura para generar otra vez la falla y se repete el ciclo una tras otra, en esta investigación se hizo 6 ciclos.

Auto reparación de especímenes sometidos a microondas para 20 segundos.

**Tabla 39**

*Auto reparación de especímenes sometidos a microondas para 20s*

Porcentaje de Fibras de Acero (%)	TIEMPO						
	20 segundos						
	R	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
0.0	1.35	0.45	0.41	0.35	0.25	0.18	0.17
2.0	1.53	0.56	0.48	0.43	0.42	0.23	0.22
4.0	1.35	0.61	0.56	0.52	0.31	0.22	0.16
6.0	1.46	0.62	0.68	0.55	0.28	0.21	0.15
8.0	1.41	0.65	0.62	0.61	0.40	0.27	0.19

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

**Tabla 40***Auto reparación de especímenes sometido a microondas para un tiempo 40s*

Porcentaje de Fibras de Acero  (%)	T I E M P O						
	40 segundos						
	R	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
0.0	1.30	0.65	0.61	0.56	0.44	0.34	0.23
2.0	1.41	0.75	0.71	0.61	0.55	0.40	0.26
4.0	1.45	0.92	0.86	0.78	0.69	0.52	0.32
6.0	1.61	0.99	0.94	0.88	0.72	0.62	0.37
8.0	1.33	0.82	0.77	0.66	0.62	0.34	0.27

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

**Tabla 41***Auto reparación de especímenes sometido a microondas para un tiempo de 60s*

Porcentaje de Fibras de Acero  (%)	T I E M P O						
	60 segundos						
	R	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
0.0	1.52	0.86	0.77	0.59	0.47	0.43	0.27
2.0	1.33	0.79	0.72	0.60	0.52	0.43	0.31
4.0	1.50	0.93	0.87	0.82	0.57	0.42	0.27
6.0	1.40	0.88	0.79	0.68	0.43	0.47	0.21
8.0	1.52	0.88	0.83	0.60	0.54	0.43	0.32

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

**Tabla 42***Auto reparación de especímenes sometido a microondas para un tiempo de 80s*

Porcentaje de Fibras de Acero (%)	TIEMPO						
	80 segundos						
	R	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
0.0	1.56	0.95	0.88	0.49	0.54	0.38	0.27
2.0	1.48	0.91	0.87	0.67	0.41	0.48	0.34
4.0	1.49	0.87	0.71	0.58	0.51	0.36	0.20
6.0	1.35	0.73	0.67	0.42	0.36	0.35	0.25
8.0	1.35	0.75	0.62	0.43	0.49	0.24	0.21

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

#### 3.14.4. Auto reparación de especímenes por porcentaje de fibras de acero.

Los porcentajes añadidos en las mezclas son de 2%, 4%, 6% y 8% de fibra de acero respecto al peso del cemento asfáltico, estas fueron añadidos a la hora de mezclar los agregados pétreos con el bitumen, tiene la función de incrementar la temperatura interna en menor tiempo en los especímenes de manera homogénea.

Auto reparación de especímenes por porcentaje de fibras de acero para 0.0 % de fibras de acero (diseño convencional).

**Tabla 43***Auto reparación de especímenes para 0.0% de F.A. en la mezcla*

% Fibra de Acero	TIEMPO (Segundos)	CARGAS MÁXIMAS (KN)						
		ROTURA	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
0 %	20	1.35	0.45	0.41	0.35	0.25	0.18	0.17
	40	1.30	0.65	0.61	0.56	0.44	0.34	0.23

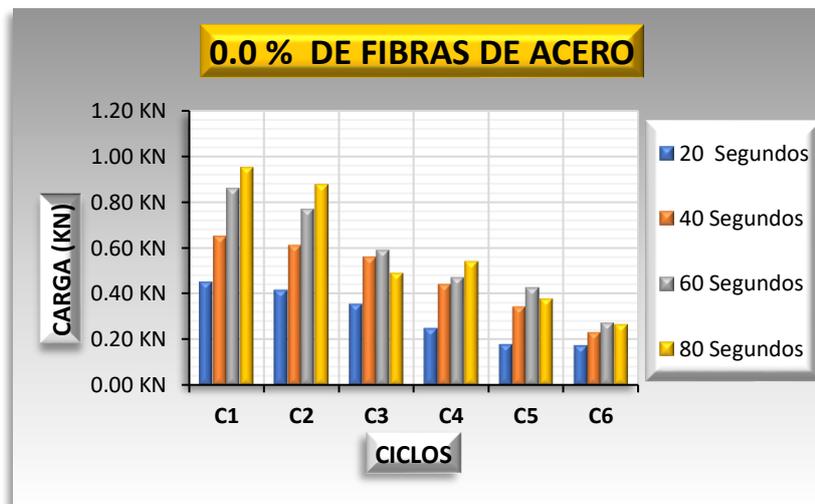
**CARGAS MÁXIMAS (KN)**

% Fibra de Acero	TIEMPO (Segundos)	ROTURA	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
	60	1.52	0.86	0.77	0.59	0.47	0.43	0.27
	80	1.56	0.95	0.88	0.49	0.54	0.38	0.27

Nota: elaboración propia

**Figura 39**

*Auto reparación de especímenes para 0.0% de F.A. en la mezcla*



Nota: elaboración propia

**Tabla 44**

*Auto reparación de especímenes para 2.0% de F.A. añadido a la mezcla*

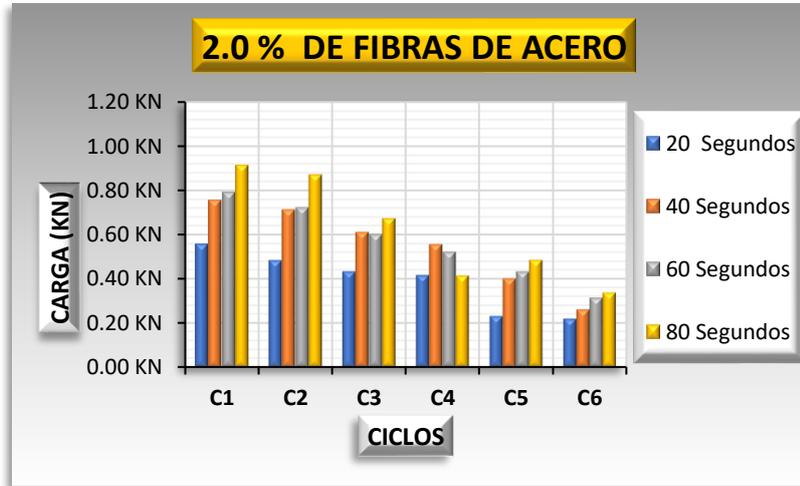
**CARGAS MÁXIMAS (KN)**

% Fibra de Acero	TIEMPO (Segundos)	ROTURA	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
<b>2 %</b>	<b>20</b>	<b>1.53</b>	0.56	0.48	0.43	0.42	0.23	0.22
	<b>40</b>	<b>1.41</b>	0.75	0.71	0.61	0.55	0.40	0.26
	<b>60</b>	<b>1.33</b>	0.79	0.72	0.60	0.52	0.43	0.31
	<b>80</b>	<b>1.48</b>	0.91	0.87	0.67	0.41	0.48	0.34

Nota: elaboración propia

**Figura 40**

*Auto reparación de especímenes para 2.0% de F.A. añadido a la mezcla*



Nota: elaboración propia

**Tabla 45**

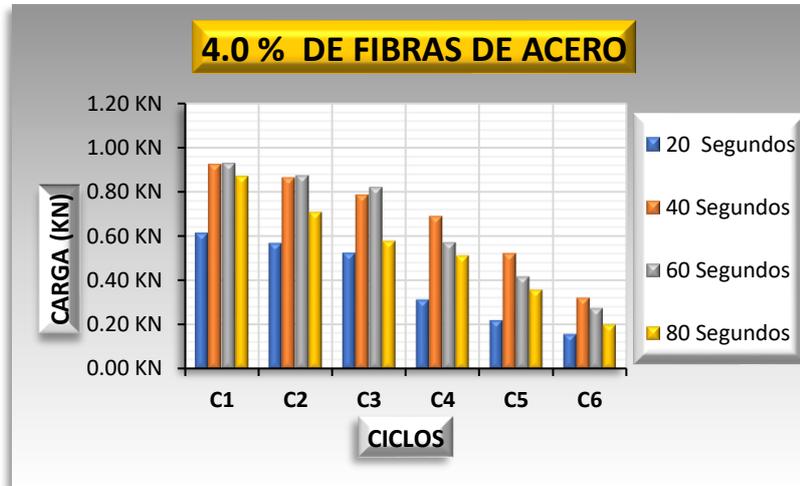
*Auto reparación de especímenes para 4.0% de F.A. añadido a la mezcla*

CARGAS MÁXIMAS (KN)								
% Fibra de Acero	TIEMPO (Segundos)	ROTURA	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
4 %	20	1.35	0.61	0.56	0.52	0.31	0.22	0.16
	40	1.45	0.92	0.86	0.78	0.69	0.52	0.32
	60	1.50	0.93	0.87	0.82	0.57	0.42	0.27
	80	1.49	0.87	0.71	0.58	0.51	0.36	0.20

Nota: elaboración propia

**Figura 41**

*Auto reparación de especímenes para 4.0% de F.A. añadido a la mezcla*



Nota: elaboración propia

**Tabla 46**

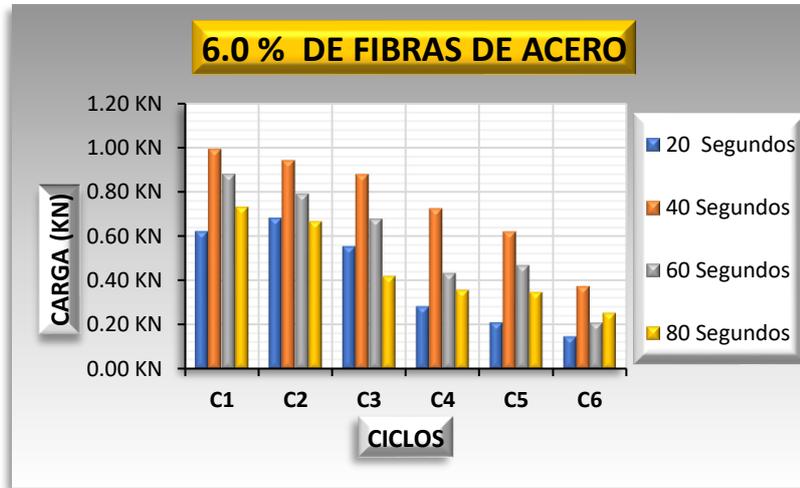
*Auto reparación de especímenes para 6.0% de F.A. añadido a la mezcla*

CARGAS MÁXIMAS (KN)								
% Fibra de Acero	TIEMPO (Segundos)	ROTURA	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
<b>6 %</b>	<b>20</b>	<b>1.46</b>	0.62	0.68	0.55	0.28	0.21	0.15
	<b>40</b>	<b>1.61</b>	0.99	0.94	0.88	0.72	0.62	0.37
	<b>60</b>	<b>1.40</b>	0.88	0.79	0.68	0.43	0.47	0.21
	<b>80</b>	<b>1.35</b>	0.73	0.67	0.42	0.36	0.35	0.25

Nota: elaboración propia

**Figura 42**

*Auto reparación de especímenes para 6.0% de F.A. añadido a la mezcla*



Nota: elaboración propia

**Tabla 47**

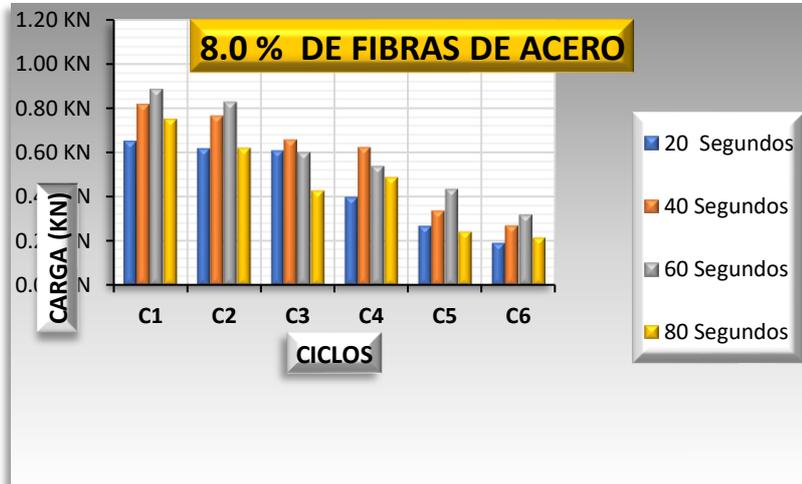
*Auto reparación de especímenes para 8.0% de F.A. añadido a la mezcla*

CARGAS MÁXIMAS (KN)								
% Fibra de Acero	TIEMPO (Segundos)	ROTURA	RC-01	RC-02	RC-03	RC-04	RC-05	RC-06
8 %	20	1.41	0.65	0.62	0.61	0.40	0.27	0.19
	40	1.33	0.82	0.77	0.66	0.62	0.34	0.27
	60	1.52	0.88	0.83	0.60	0.54	0.43	0.32
	80	1.35	0.75	0.62	0.43	0.49	0.24	0.21

Nota: elaboración propia

**Figura 43**

*Auto reparación de especímenes para 8.0% de fibras de acero añadido a la mezcla.*



Nota: elaboración propia

### 3.14.5. Auto reparación de especímenes por ciclos

De acuerdo a los ensayos que se realizó para hallar las veces que un espécimen podía auto repararse la resistencia con respecto a la rotura inicial, en estas pruebas se ha realizado 6 ciclos a cada espécimen. Los 6 ciclos de auto reparación fueron realizados de manera idéntica y en condiciones similares para cada espécimen. A continuación, se muestran los ciclos de reparación:

**Tabla 48**

*Primer ciclo de auto reparación de especímenes*

Ciclo 01				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
0 %	0.45	0.65	0.86	0.95
2 %	0.56	0.75	0.79	0.91



<b>Ciclo 01</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>4 %</b>	0.61	0.92	0.93	0.87
<b>6 %</b>	0.62	0.99	0.88	0.73
<b>8 %</b>	0.65	0.82	0.88	0.75

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

**Tabla 49**

*Segundo ciclo de auto reparación de especímenes*

<b>Ciclo 02</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>0 %</b>	0.41	0.61	0.77	0.88
<b>2 %</b>	0.48	0.71	0.72	0.87
<b>4 %</b>	0.56	0.86	0.87	0.71
<b>6 %</b>	0.68	0.94	0.79	0.67
<b>8 %</b>	0.62	0.77	0.83	0.62

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

**Tabla 50**

*Tercer ciclo de auto reparación de especímenes*

<b>Ciclo 03</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>0 %</b>	0.35	0.56	0.59	0.49
<b>2 %</b>	0.43	0.61	0.60	0.67
<b>4 %</b>	0.52	0.78	0.82	0.58



<b>Ciclo 03</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>6 %</b>	0.55	0.88	0.68	0.42
<b>8 %</b>	0.61	0.66	0.60	0.43

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

### Tabla 51

*Cuarto ciclo de auto reparación de especímenes*

<b>Ciclo 04</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>0 %</b>	0.25	0.44	0.47	0.54
<b>2 %</b>	0.42	0.55	0.52	0.41
<b>4 %</b>	0.31	0.69	0.57	0.51
<b>6 %</b>	0.28	0.72	0.43	0.36
<b>8 %</b>	0.40	0.62	0.54	0.49

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

### Tabla 52

*Quinto ciclo de auto reparación de especímenes*

<b>Ciclo 05</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>0 %</b>	0.18	0.34	0.43	0.38
<b>2 %</b>	0.23	0.40	0.43	0.48
<b>4 %</b>	0.22	0.52	0.42	0.36
<b>6 %</b>	0.21	0.62	0.47	0.35

<b>Ciclo 05</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>8 %</b>	0.27	0.34	0.43	0.24

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

### **Tabla 53**

*Sexto ciclo de auto reparación de especímenes*

<b>Ciclo 06</b>				
% Fibras de Acero	TIEMPO			
	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
<b>0 %</b>	0.17	0.23	0.27	0.27
<b>2 %</b>	0.22	0.26	0.31	0.34
<b>4 %</b>	0.16	0.32	0.27	0.20
<b>6 %</b>	0.15	0.37	0.21	0.25
<b>8 %</b>	0.19	0.27	0.32	0.21

Nota: los resultados del cuadro tienen como unidad KN

## **3.15. METODOLOGÍA**

### **3.15.1. Tipo y nivel de investigación**

El presente trabajo de investigación tiene carácter experimental, dado que se ha manipulado la variable independiente de manera intencional para visualizar y obtener los resultados para luego en gabinete dar su interpretación y experimentar los efectos directos que tiene en la variable dependiente (Hernández y Torres, 2018).

El proceso experimental de la investigación hasta obtener resultados satisfactorios acorde a los objetivos propuesto se desarrolló en el laboratorio de



mecánica de suelos y de transportes, ambas de la facultad de Ingeniería civil y arquitectura de la UNAP.

### **3.15.2. Tipos de muestra**

Las muestras se dividen en dos amplias categorías: aquellas que no siguen un criterio de probabilidad y las que se seleccionan de manera probabilística.

#### **3.15.2.1. Muestras probabilísticas**

(Hernández, 2014) Todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidos para una muestra representativa y se obtienen definiendo las características de la población y el tamaño de la muestra, y por medio de una selección aleatoria o mecánica de sus unidades.

Muestra elegida de la población de manera aleatoria, donde cada elemento tiene la misma probabilidad de ser seleccionado.

#### **3.15.2.2. Muestras no probabilísticas**

(Hernández, 2014) La elección de las muestras no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador, Aquí el procedimiento no es mecánico ni se basa en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o de un grupo de investigadores y desde luego, las muestras seleccionadas obedecen a otros criterios de investigación.

De acuerdo a las anteriores definiciones sobre los tipos de muestreo, esta investigación es de tipo no probabilística, debido a que las



muestras se tomaron de manera arbitraria según los propósitos de los investigadores y características de la investigación.

### **3.16. ESTADÍSTICA TEORÍA Y RESULTADOS**

#### **3.16.1. Distribución estadística "T"**

En el estudio desarrollamos la prueba estadística T de student. Esta prueba puede ser empleada para muestras pequeñas 30 muestras o menos.

- La distribución "t" es más extensa y menos afilada en el centro en contraste con la distribución normal estándar.
- Existe una familia de distribuciones "t", cada una con diferentes desviaciones estándar
- Los valores críticos de dos colas para un nivel de significación mostrado en la distribución "t" son mayores en magnitud que los valores críticos correspondientes en la distribución "Z".
- Para realizar este ensayo se requiere contar con un grupo de control y un experimental con fines de análisis de los datos.
- Denominamos como grupo de control a la mezcla asfáltica tradicional que servirá como grupo de referencia para la evaluación de los otros grupos intervenidos, estos grupos serán conocidos como mezcla asfáltica modificada.



**Tabla 54**

*Número de muestras para cada variable*

VARIABLES	GRUPO DE CONTROL	GRUPO EXPERIMENTAL
	Convencional	
COMPRESIÓN INDIRECTA	n: 3	Modifica con F.A. n:48
	Convencional	
TEMPERATURA	n: 8	Modifica con F.A. n:32
	Convencional	
ESTABILIDAD	n: 3	Modifica con F.A. n:12
	Convencional	
FLUJO	n: 3	Modifica con F.A. n:12

Nota: elaboración propia

### **3.16.2. Pruebas de hipótesis estadísticas**

#### **3.16.2.1. Planteamiento de las hipótesis**

Considerando la hipótesis principal, se expone la presentación de las hipótesis a continuación.

Donde:

Ho: Hipótesis Nula

Ha: Hipótesis Alternativa

#### **3.16.2.2. Nivel de significancia**

El p-valor en una prueba se define como el mínimo nivel de significancia con el que podríamos refutar la Ho en favor de la hipótesis alternativa. Usualmente, se opta por un nivel de significancia máximo de  $\alpha = 0.05$ . La regla de decisión en una prueba con este nivel de significancia



es la siguiente: si  $p=0.05$ , no podemos desechar la  $H_0$  en favor de la hipótesis propuesta con al menos un 95% de certeza. En resumen, el valor de  $p$  nos permite ajustarnos a cualquier otro nivel de significancia. En términos más generales, al considerar un nivel de significancia  $\alpha$ , rechazamos la  $H_0$  y aceptamos la  $H_a$  con al menos un  $(1 - \alpha) \%$  de confianza si  $p < \alpha$ . Por el contrario, si  $p \geq \alpha$ , no podemos desechar la  $H_0$  en favor de la hipótesis propuesta con al menos un  $(1 - \alpha) \%$  de confianza.

En este estudio, se adopta el nivel de significancia de 0.05 como margen de error (0.05, equivalente al 5%).

#### **3.16.2.3. Determinación de la distribución**

Se utiliza la prueba  $t$  de Student porque se aplica en situaciones donde hay un número de muestras inferior a 30 observaciones.

#### **3.16.2.4. Cálculo estadístico de la prueba**

Para este propósito, consideramos los datos: luego, se aplicó la fórmula de la prueba de la  $t$  de Student:

$$Tt = \frac{(X1 - X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}}$$

#### **3.16.2.5. Esquema de la prueba**

En el campo de la estadística, los grados de libertad representan una medida que estima la cantidad de categorías o elementos independientes que pueden variar en un experimento o prueba estadística particular.

### 3.16.2.6. Toma de decisión

La etapa final en el proceso de prueba de hipótesis implica tomar una decisión sobre la aceptación o el rechazo de la hipótesis nula. En el contexto de la prueba de distribución t, se aplica la siguiente norma:

- Si el valor calculado de la prueba estadística  $T_t$  es mayor que el valor crítico  $T_c$ , entonces se acepta la  $H_0$  y se rechaza la  $H_a$ .
- Si la condición mencionada no se satisface, se descarta la  $H_0$  y se acepta la  $H_a$ .
- Hipótesis estadística:  $H_0$ , Hipótesis nula:  $\mu_1 = \mu_2$  vs  $H_a$ , hipótesis alterna:  $\mu_1 \neq \mu_2$ ,  $NC = 95\%$  Nivel de confianza,  $NS = 5\%$  nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

### 3.16.3. Hipótesis general

“Las fibras de acero influyen en mejorar la capacidad de auto reparación de fisuras del concreto asfáltico diseñado por el método Marshall mediante la inducción de calor a través de microondas en la ciudad de Puno - 2021.”

#### 3.16.3.1. Hipótesis para la variable auto reparación

- $H_0$ : No influye Las fibras de acero en mejorar la capacidad de auto reparación de fisuras del concreto asfáltico diseñado por el método Marshall mediante la inducción de calor a través de microondas en la ciudad de Puno,2021.
- $H_a$ : Influye las fibras de acero influyen en mejorar la capacidad de auto reparación de fisuras del concreto asfáltico diseñado por el

método Marshall mediante la inducción de calor a través de microondas en la ciudad de Puno,2021.

Donde:

Ho: Hipótesis Nula

Ha: Hipótesis Alterna

### 3.16.3.2. Procesamiento de los datos de investigación variable auto reparación

**Tabla 55**

*Auto reparación para 0% y 2% de fibra de acero*

Variable	0% DE F. A.	2% DE F. A.
	44.0	49.6
Auto reparación	51.8	53.4
	53.5	57.2

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(49.76-53.4)}{\sqrt{\frac{2.208^2}{3} + \frac{1.949^2}{3}}} = -0.9937$$

**Tabla 56**

*Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 2%) F.A.*

	0% DE F. A	2% DE F. A
Media	49.76	53.4
Varianza	25.66	14.44
Observaciones	3	3



	0% DE F. A	2% DE F. A
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0.993746551	
P(T<=t) dos colas	0.37659413	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– **Decisión**

Precisión numérica:  $Tt_{-0.993746551} < Tc_{2.776445105}$  Se acepta la  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.37659413 > \alpha (0.05)$ ; en consecuencia, se acepta la  $H_0$  y se rechaza la  $H_a$ , por lo tanto, Se deduce que el 2% de fibra de acero no tiene impacto en la capacidad de autor reparación de defectos en comparación con la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 57**

*Auto reparación para 0% y 4% de fibra de acero*

VARIABLE	0% DE F. A	4% DE F. A
	44.0	68.5
Auto reparación	51.8	56.3
	53.5	65.5

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(49.77-63.43)}{\sqrt{\frac{2.25^2}{3} + \frac{2.521^2}{3}}} = -2.912$$

**Tabla 58**

*Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 4%) F.A.*

	0% DE F. A	4% DE F. A
Media	49.76	63.43
Varianza	25.66	40.41
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2.912052271	
P(T<=t) dos colas	0.043588533	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-2.912052271} > Tc_{2.776445105}$  Se rechaza la  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.043588533 > \alpha (0.05)$ ; por lo tanto, concluimos que se rechaza la ( $H_0$ ) y se acepta la ( $H_a$ ), por lo tanto, se establece que si influye el 4% de fibra de acero en la propiedad de auto reparación de fallas con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 59***Auto reparación para 0% y 6% de fibra de acero*

VARIABLE	0% DE F. A	6% DE F. A
	44.0	70.6
Auto reparación	51.8	60.9
	53.5	54.2

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(49.77-61.9)}{\sqrt{\frac{2.250^2}{3} + \frac{2.871^2}{3}}} = -2.171$$

**Tabla 60***Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 6%) F.A.*

	0% DE F. A	6% DE F. A
Media	49.76	61.9
Varianza	25.66	67.99
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2.171596518	
P(T<=t) dos colas	0.095639102	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– **Decisión**

Precisión numérica:  $Tt_{-2.171596518} < Tc_{3.18244630505}$  Se acepta la  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.118278512 > \alpha (0.05)$ ; en consecuencia, se acepta la  $H_0$  y se descarta la  $H_a$ , por lo tanto, se establece que no tiene una influencia considerable el

6% de fibra de acero en la propiedad de auto reparación de fallas en relación a la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 61**

*Auto reparación para 0% y 8% de fibra de acero*

Variable	0% DE F. A	8% DE F. A
	44.0	52
Auto reparación	51.8	67.9
	53.5	64.7

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(49.766-61.233)}{\sqrt{\frac{2.250^2}{3} + \frac{2.871^2}{3}}} = -2.075$$

**Tabla 62**

*Análisis estadístico, variable auto reparación (0% - 8%) F.A*

	0% DE F. A	8% DE F. A
Media	49.76	61.53
Varianza	25.66	70.72
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2.075896025	
P(T<=t) dos colas	0.106516556	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-2.075896025} < Tc_{3.182446305}$  Se acepta la  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.129509593 > \alpha (0.05)$ ; por lo tanto, se toma la decisión de que se acepta la  $(H_0)$  y se rechaza la  $(H_a)$ , en consecuencia, se concluye que no ejerce influencia considerable el 8% de fibra de acero en la propiedad de auto reparación de fallas con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

### 3.16.3.3. Evaluación por ciclos

**Tabla 63**

*Auto reparación 1er ciclo para 0% y 4% de fibra de acero*

1er CICLO		
Variable	0% DE F. A	4% DE F. A
	44.0	68.5
Auto reparación	51.8	56.3
	53.5	65.5

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1 - X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(49.77 - 63.43)}{\sqrt{\frac{2.25^2}{3} + \frac{2.521^2}{3}}} = -2.912$$

**Tabla 64**

*Evaluación estadístico, variable auto reparación 1er ciclo*

<b>1er CICLO</b>		
	<i>0% DE F. A</i>	<i>4% DE F. A</i>
Media	49.76	63.43
Varianza	25.66	40.41
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2.912052271	
P(T<=t) dos colas	0.043588533	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-2.912052271} > Tc_{2.776445105}$  Se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.043588533 > \alpha (0.05)$ ; como resultado, se rechaza la ( $H_0$ ) y se acepta la ( $H_a$ ), por consecuencia, se establece que si influye el 4% de fibra de acero en el 1er. Ciclos de rotura en la propiedad de auto reparación de fallas con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 65**

*Auto reparación 2do ciclo para 0% y 4% de fibra de acero*

<b>2do CICLO</b>		
Variable	<i>0% DE F. A</i>	<i>4% DE F. A</i>
Auto reparación	44.0	61.6
	50.4	61.6

**2do CICLO**

Variable	0% DE F. A	4% DE F. A
	45.7	54

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(46.70-59.3066)}{\sqrt{\frac{1.820^2}{3} + \frac{2.094^2}{3}}} = -3.894$$

**Tabla 66**

*Evaluación estadístico, variable auto reparación 2do ciclo*

<b>2do CICLO</b>		
	0% DE F. A	4% DE F. A
Media	46.7	59.06
Varianza	10.99	19.25
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-3.894919213	
P(T<=t) dos colas	0.017617055	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-3.894919213} > Tc_{2.776445105}$  Se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.017617055 > \alpha (0.05)$ ; a continuación, se rechaza la  $h (H_0)$  y se acepta la  $(H_a)$ , por lo tanto, se establece que si influye el 4% de fibra de acero en el

2do. Ciclos de rotura en la propiedad de auto reparación de fallas en relación a la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 67**

*Auto reparación 3er ciclo para 0% y 4% de fibra de acero*

3er CICLO		
Variable	0% DE F. A	4% DE F. A
	53.6	54.8
Auto reparación	38.1	44.4
	37.8	63.3

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(43.17-54.1667)}{\sqrt{\frac{3.006^2}{3} + \frac{3.094^2}{3}}} = -1.455$$

**Tabla 68**

*Evaluación estadístico, variable auto reparación 3er ciclo*

3er CICLO		
	0% DE F. A	4% DE F. A
Media	43.16	54.16
Varianza	81.66	89.60
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-1.455850869	
P(T<=t) dos colas	0.219141801	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-1.455850869} < Tc_{2.776445105}$  Se acepta la  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.219141801 > \alpha (0.05)$ ; a consecuencia de resultados, se acepta la ( $H_0$ ) y se rechaza la ( $H_a$ ), por lo tanto, se establece que no tiene una influencia considerable el 4% de fibra de acero en el 2do. Ciclos de rotura en la propiedad de auto reparación de fallas en relación a la mezcla asfáltica tradicional.

### 3.16.4. Hipótesis específica 1

“Las temperaturas superficiales de las muestras del concreto asfáltico modificado con diferentes porcentajes de fibras de acero incrementan gradualmente, después de ser sometidos a microondas.”

#### 3.16.4.1. Hipótesis para la variable temperatura

- $H_0$ : No incrementa las temperaturas superficiales de las muestras de concreto asfáltico modificado con fibras de acero después de ser sometidos a microondas.
- $H_a$ : Incrementa las temperaturas superficiales de las muestras de concreto asfáltico modificado con fibras de acero después de ser sometidos a microondas.

Donde:

$H_0$ : Hipótesis Nula

$H_a$ : Hipótesis Alternativa

### 3.16.4.2. Desarrollo de los datos de investigación variable

#### temperatura

**Tabla 69**

*Temperatura para 0% y 2% de fibra de acero*

VARIABLE	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 2% DE FIBRAS DE ACERO
	57.2	55.8
	47.2	55.1
	55.0	54.2
TEMPERATURA	49.2	56.8
	49.4	57.4
	45.3	53.3
	51.8	52.2
	47.2	52.0

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(50.300-54.600)}{\sqrt{\frac{2.032^2}{8} + \frac{1.424^2}{8}}} = -2.644$$

**Tabla 70**

*Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 2%) de F.A.*

	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 2% DE FIBRAS DE ACERO
Media	50.30	54.6
Varianza	17.04	4.10
Observaciones	8	8

---

	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 2% DE FIBRAS DE ACERO
Grados de libertad		14
Estadístico t	-2.644341627	
P(T<=t) dos colas	0.019240491	
VC de t (dos colas)	2.144786688	

---

Nota: elaboración propia

– Decisión:

Precisión numérica:  $Tt_{-2.644341627} < Tc_{-2.228138852}$ , se rechaza la hipótesis nula,  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.02455034 > \alpha (0.05)$ ; por lo tanto, se rechaza la ( $H_0$ ) y se acepta la ( $H_a$ ), por lo tanto, se establece que si incrementan las temperaturas superficiales en las muestras de concreto asfáltico al añadir 2% de fibras de acero en su composición con relación a la mezcla asfáltica tradicional.

### Tabla 71

*Temperatura para 0% y 4% de fibra de acero*

---

VARIABLE	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 4% DE FIBRAS DE ACERO
	57.2	62.9
	47.2	58.4
	55.0	64.3
	49.2	61.7
TEMPERATURA	49.4	64.7
	45.3	61.2
	51.8	66.4
	47.2	60.4

---

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(50.300-62.500)}{\sqrt{\frac{2.779^2}{8} + \frac{2.199^2}{8}}} = -7.085$$

**Tabla 72**

*Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 4%) de F.A.*

	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 4% DE FIBRAS DE ACERO
Media	50.30	62.5
Varianza	17.04	6.67
Observaciones	8	8
Grados de libertad	14	
Estadístico t	-7.085258334	
P(T<=t) dos colas	5.46198E-06	
VC de t (dos colas)	2.144786688	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt -7.085258334 < Tc_{-2.17881283}$  Se rechaza la hipótesis nula,  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $1.27351E-05 > \alpha (0.05)$ ; a consecuencia del análisis, se rechaza la ( $H_0$ ) y se acepta la ( $H_a$ ), por lo tanto, se establece que si incrementan las temperaturas superficiales en las muestras de concreto asfáltico al añadir 4% de fibras de acero en su composición con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 73**

*Temperatura para 0% y 6% de fibra de acero*

VARIABLE	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 6% DE FIBRAS DE ACERO
	57.2	51.2
	47.2	77.4
	55.0	67.6
TEMPERATURA	49.2	52.4
	49.4	51.8
	45.3	78.3
	51.8	69.3
	47.2	54.4

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(50.300-62.800)}{\sqrt{\frac{2.032^2}{8} + \frac{3.415^2}{8}}} = -2.858$$

**Tabla 74**

*Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 6%) de F.A.*

	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 6% DE FIBRAS DE ACERO
Media	50.30	62.8
Varianza	17.04	136.02
Observaciones	8	8
Grados de libertad	14	
Estadístico t	-2.857510101	
P(T<=t) dos colas	0.012660956	

	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 6% DE FIBRAS DE ACERO
VC de t (dos colas)	2.144786688	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-2.857510101} > Tc_{2.262157163}$  Se rechaza la hipótesis nula,  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $0.018856799 > \alpha (0.05)$ ; a consecuencia del análisis, rechazamos la ( $H_0$ ) y aceptamos la ( $H_a$ ), por lo tanto, se establece que si incrementan las temperaturas superficiales en las muestras de concreto asfáltico al añadir 6% de fibras de acero en su composición en relación a la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 75**

*Temperatura para 0% y 8% de fibra de acero*

VARIABLE	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 8% DE FIBRAS DE ACERO
	57.2	55.0
	47.2	65.5
	55.0	67.5
TEMPERATURA	49.2	67.9
	49.4	55.0
	45.3	65.5
	51.8	67.5
	47.2	67.9

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(50.300-63.9625)}{\sqrt{\frac{2.032^2}{8} + \frac{3.415^2}{8}}} = -5.540$$

**Tabla 76**

*Evaluación estadística, variable temperatura para (0% y 8%) de F.A.*

	TEMPERATURA PARA 0% DE FIBRAS DE ACERO	TEMPERATURA PARA 8% DE FIBRAS DE ACERO
Media	50.30	63.96
Varianza	17.04	31.60
Observaciones	8	8
Grados de libertad	14	
Estadístico t	-5.540013858	
P(T<=t) dos colas	7.28358E-05	
VC de t (dos colas)	2.144786688	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-5.540013858} < Tc_{-2.160368656}$  Se rechaza la hipótesis nula,  $H_0$ . Considerando la probabilidad,  $p$  está comprendido entre  $9.54463E-05 > \alpha$  (0.05); como consecuencia del análisis rechazamos la ( $H_0$ ) y aceptamos la ( $H_a$ ), por lo tanto, se establece que si incrementan las temperaturas superficiales en las muestras de concreto asfáltico al añadir 8% de fibras de acero en su composición en relación a la mezcla asfáltica tradicional.

### 3.16.5. Hipótesis específica 2

“La mezcla asfáltica en caliente modificada con fibra de acero óptimo no tiene una mejora significativa en las propiedades físicas (estabilidad y flujo) en relación a la mezcla asfáltica convencional óptimo”

#### 3.16.5.1. Hipótesis para la variable estabilidad

- Ho: Sí se tiene una mejora significativa en las propiedades físicas (estabilidad y flujo) de la mezcla asfáltica modificada con fibra de acero óptimo en relación a la mezcla asfáltica tradicional.
- Ha: No se tiene una mejora significativa las propiedades físicas (estabilidad y flujo) de la mezcla asfáltica modificada con fibra de acero óptimo en relación a la mezcla asfáltica tradicional.

Donde:

Ho: Hipótesis Nula

Ha: Hipótesis Alterna

#### 3.16.5.2. Desarrollo de las variables estabilidad y flujo

**Tabla 77**

*Estabilidad de 0% y 4% de F.A.*

Variable	0% DE F. A	4% DE F. A
	1196.980	1127.130
ESTABILIDAD	1147.100	1206.826
	1219.315	1246.860

Nota: elaboración propia

- Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(1187.798-1193.6054)}{\sqrt{\frac{6.081^2}{3} + \frac{7.807^2}{3}}} = -0.141$$

**Tabla 78**

*Análisis estadístico para la variable estabilidad para 0% y 4% de F.A.*

	0% DE F. A	4% DE F. A
Media	1187.79	1193.60
Varianza	1366.98	3714.91
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-0.141092673	
P(T<=t) dos colas	0.894617082	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-0.141092673} > Tc_{-2.776445105}$  La hipótesis nula,  $H_0$ , es aceptada. Al examinar la probabilidad, se observa que p se encuentra en el intervalo de 0.896738149, superior a  $\alpha$  (0.05); por ende, se respalda la  $H_0$  y se descarta la  $H_a$ . En resumen, la mezcla asfáltica en caliente modificada con la cantidad óptima de fibra de acero se observa una mejora en la estabilidad Marshall en relación con la mezcla asfáltica tradicional.

**Tabla 79**

*Análisis de la variable flujo de 0% y 4% de F.A.*

Variable	0% DE F. A.	4% DE F. A.
	12.4	13.2
FLUJO	14	14.4
	13.6	14

Nota: elaboración propia

– Prueba estadística:

$$Tt = \frac{(X1-X2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(13.333-13.866)}{\sqrt{\frac{0.913^2}{3} + \frac{0.782^2}{3}}} = -0.8944$$

**Tabla 80**

*Análisis estadístico para la variable flujo*

	0% DE F. A	4% DE F. A
Media	13.33	13.86
Varianza	0.6933	0.37
Observaciones	3	3
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-0.894427191	
P(T<=t) dos colas	0.421648255	
VC de t (dos colas)	2.776445105	

Nota: elaboración propia

– Decisión

Precisión numérica:  $Tt_{-0.894427191} > Tc_{-2.776445105}$  La hipótesis nula,  $H_0$ , es aceptada. Al examinar la probabilidad, se observa que p se encuentra en el rango de 0.421648255, superior a  $\alpha$  (0.05); por lo tanto, se respalda la  $H_0$  y se descarta la  $H_a$ . En consecuencia, se infiere que existe

una mejora en el flujo Marshall en concreto asfáltico modificada con la cantidad óptima de fibra de acero en comparación con la mezcla asfáltica tradicional.

### 3.16.6. El coeficiente de correlación de Pearson

Es una herramienta estadística utilizada para analizar la conexión entre dos variables que se registran en una escala de intervalo o razón. Su propósito principal es analizar y determinar el nivel de asociación entre dos variables cuantitativas que sigan una distribución normal. (Hernández, 2014).

La fórmula que define el coeficiente de correlación de Pearson es:

$$r = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{\sqrt{[n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

Al desarrollar el método de Pearson y reemplazar en la fórmula encontramos el coeficiente de correlación (r) y se podrá encontrar su significado en la tabla mostrada a en el anexo de estadística N°15.

Donde:

Dato X: Valor alcanzado en el ensayo de resistencia a la flexión, por la mezcla convencional.

Dato Y: Valor alcanzado en el ensayo de resistencia a flexión, por la mezcla modificada con fibras de acero.

**Tabla 81**

*Datos obtenidos de las roturas del concreto convencional y modificado*

X	38.30	26.15	34.59	44.00	51.80	53.54	59.42	45.86	64.20	60.81	49.69	62.78
Y	41.09	37.04	56.34	68.49	56.29	65.47	67.88	60.37	57.72	67.33	52.47	54.41

Nota: elaboración propia

Análisis de datos estadístico de los valores de rotura luego de la reparación mediante la inducción de microondas para el concreto convencional y modificado

**Tabla 82**

*Valores de rotura luego de la reparación del concreto convencional y modificado*

N° de Datos	x	y	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	XY
1	38.298	41.085	1466.727	1688.000	1573.478
2	26.154	37.037	684.024	1371.742	968.661
3	34.586	56.338	1196.224	3173.973	1948.533
4	44.000	68.493	1936.000	4691.312	3013.699
5	51.799	56.291	2683.091	3168.721	2915.813
6	53.543	65.468	2866.886	4286.010	3505.353
7	59.420	67.883	3530.771	4608.130	4033.640
8	45.860	60.366	2103.128	3644.036	2768.370
9	64.198	57.718	4121.323	3331.381	3705.361
10	60.811	67.333	3697.955	4533.778	4094.595
11	49.689	52.469	2469.041	2753.010	2607.162
12	62.785	54.412	3941.932	2960.640	3416.232
<b>Sumatoria</b>	591.143	684.894	30697.100	40210.734	34550.898

Nota: elaboración propia

Fórmula para hallar el coeficiente de correlación de Pearson:

$$r = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{\sqrt{[n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

$$r = 0.61$$

La elección de utilizar el método estadístico del coeficiente de correlación de Pearson se basa en la premisa de que la distribución conjunta de las variables (X, Y) debe ser bivariado y normal. Para confirmar esta premisa, es esencial verificar que cada variable siga una distribución normal. Para aceptar esta suposición, es necesario verificar que cada variable siga una distribución normal. Si alguna de las variables no cumple con esta condición, la distribución conjunta tampoco será normal. Además, es esencial que exista una relación lineal entre las variables (X, Y).

### 3.16.6.1. Prueba de hipótesis para la correlación con coeficiente

#### Pearson

El primer paso es establecer tanto la hipótesis alternativa como la hipótesis nula. La hipótesis alternativa indica la presencia de una correlación directa entre las variables, mientras que la  $H_0$  sugiere que no existe correlación entre las variables. A continuación, se debe escoger el nivel de significancia:  $\alpha$ , luego proceder con las operaciones matemáticas de los datos experimentales  $r^2$ ,  $gl$ ,  $t$ ,  $p$  empleando las ecuaciones algebraicas.

$$t = \frac{r-p}{s_r} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

$$S_r = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}$$

Después de obtener estos resultados, se lleva a cabo la interpretación correspondiente. Si el p-valor supera el nivel de significancia  $\alpha$ , se respalda la hipótesis estadística planteada en el estudio y se descarta la hipótesis nula ( $H_0$ ). En cambio, si el p-valor es inferior a  $\alpha$ , se realiza el proceso contrario: se respalda la hipótesis nula y se descarta la hipótesis formulada.

### 3.16.6.2. Prueba de hipótesis

Luego de haber hallado el coeficiente de correlación de Pearson procedemos a calcular la prueba de hipótesis de la presente investigación.

- Paso 1: Coeficiente de correlación de Pearson

$r = 0.6107$  coeficiente de correlación de Pearson

$H_0 = 0$  Hipótesis nula (No existe correlación entre las variables)

$H_i \neq 0$  Hipótesis alternativa (Existe correlación entre las variables)

- Paso 2 Prueba para la correlación
- Paso 3: Establecer el nivel de confianza y significancia

$N_C = 95\%$  Nivel de confianza

$N_S = 5\%$  Nivel de significancia

- Paso 4: Calcular el coeficiente de correlación: ( $r$ ) lo hallamos anteriormente
- Paso 5: Calcular el valor estadístico “T”

$$T = \frac{r - H_r}{\sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}}$$

Donde:

r: Coeficiente de correlación

$H_r$ : Valor de Hipótesis

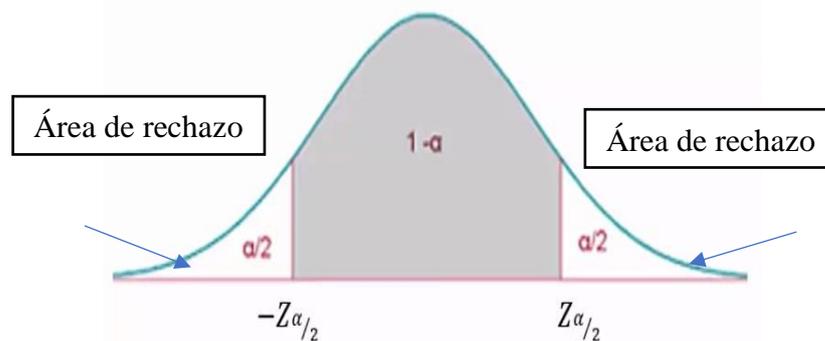
N: Numero de pares

Reemplazando tenemos:  $T=2.438$

### 3.16.6.3. P-valor de una prueba de Hipótesis

**Figura 23**

*Región de Rechazo de una Prueba de Hipótesis General*



- Paso 6: Cálculo del valor crítico

Probabilidad de aceptación está comprendida entre  $1 - \alpha/2$  y  $1 + \alpha/2$

Para un nivel de significancia: 5%

Para un nivel de confianza: 95%

$$P(-Z_{\alpha/2} \leq Z \leq Z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha$$

$$P(Z \leq Z_{\alpha/2}) = \frac{1 + (1 - \alpha)}{2}$$



$$P(Z \leq Z_{\alpha/2}) = \frac{1+0.95}{2} = 0.975$$

El valor 0.975 se ubica en el anexo N° 15, en el cual se encuentra el valor crítico

$$Z_{\alpha/2} = 1.96$$

- Paso 8: como conclusión 1 se tiene que el coeficiente de correlación de Pearson nos da como resultado  $r = 0.6107$ , dato hallado e interpretado según la tabla de interpretación del coeficiente de correlación que se encuentra en el anexo N°15, resulta como una correlación positiva media. La cual indica que el porcentaje de FA si influye en la auto reparación de fisuras de concreto asfáltico luego de ser sometido a microondas. Conclusión 2, con una confianza del 95% resulta el valor crítico ( $V_c = 1.96$ ) menor al T valor ( $T = 2.438$ ), lo cual indica que rechazamos la  $H_0$  y aceptamos la  $H_a$ .

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el capítulo de resultados se presenta los diferentes valores que se obtuvo en la investigación, para mejor desarrollo del tema se da a conocer tablas, gráficos y figuras relacionados con los aspectos del diseño óptimo del concreto asfáltico modificado con fibras de acero con capacidad de auto reparación.

Análisis de datos obtenidos de los ensayos de control de calidad del material pétreo:

#### 4.1. AGREGADO GRUESO

**Tabla 83**

*Análisis de resultados del agregado grueso*

ENSAYOS	REQUERIMIENTO ALT. >3000MSNM	RESULTADO	CONDICIÓN
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	15% máx.	<b>1.38%</b>	Satisface
Abrasión Los Ángeles	35% máx.	<b>14.98%</b>	Satisface
Partículas chatas y alargadas	10% máx.	<b>2.31%</b>	Satisface
Caras fracturadas	90/70	<b>94/85</b>	Satisface
Sales Solubles Totales	0,5% máx.	<b>0.03%</b>	Satisface
Absorción	1,0% máx.	<b>0.87%</b>	Satisface

Nota: elaboración propia

## 4.2. AGREGADO FINO

**Tabla 84**

*Análisis de resultados de los materiales finos*

Lista de ensayos	Requerimiento Alt. >3000msnm	ARENA CHANCADA DE 1/4"		ARENA NATURAL	
		Resultado	Condición	Resultado	Condición
Equivalente de Arena	70	85	Cumple	75	Cumple
Azul de metileno	8 máx.	2.5	Cumple	3.5	Cumple
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	18% máx.	4.25	Cumple	5.03	Cumple
Índice de Plasticidad	NP	NP	Cumple	NP	Cumple
Sales Solubles Totales	0,5% máx.	0.04%	Cumple	0.12%	Cumple
Absorción	0,5% máx.	0.51%	Cumple	0.48%	Cumple

Nota: elaboración propia

## 4.3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS

La dosificación para tráfico pesado cumple con los parámetros de la curva del MAC-2, las dosificaciones para la mezcla convencional fueron realizada de acuerdo al porcentaje de bitumen agregado a la mezcla y para la el diseño modificado la dosificación fue variada de acuerdo al porcentaje de fibras de acero añadido a la mezcla.

### 4.3.1. Dosificación de agregados para la mezcla convencional

**Tabla 85**

*Dosificación del diseño óptimo con 5.86% de cemento asfáltico*

ESPECIFICACIÓN	Unid.	Material	% Total	Peso Total
MEZCLA DE AGREGADOS	1200.0 g.	Agregado Grueso	26.36	316.3 g.
		Agregado Fino	39.54	474.5 g.
% DE ASFALTO	5.86 %	Arena Natural	24.48	293.7 g.



ESPECIFICACIÓN	Unid.	Material	% Total	Peso Total
PESO DEL ASFALTO	70.3 g.	Filler	3.77	45.2 g.
		Cemento asfáltico	5.86	70.3 g.
		Total	1.00	1200.0 g.

Nota: elaboración propia

#### 4.3.2. Dosificación de agregados para la mezcla modificada

**Tabla 86**

*La dosificación para el diseño óptimo*

ESPECIFICACIÓN	Cantidad	Material	% Total	Peso Total
MEZCLA DE AGREGADOS	1200.00g.	Agregado Grueso	26.29	315.5 g.
% DE ASFALTO	5.86	Agregado Fino	39.44	473.3 g.
PESO DEL ASFALTO	70.32g.	Arena Natural	24.42	293.0 g.
		Filler	3.76	45.1 g.
% DE FIBRA DE ACERO	4.00	Cemento asfáltico	5.86	70.3 g.
		Fibras de acero	0.234	2.8 g.
PESO DE FIBRA DE ACERO	2.83 g.	Total	100.000	1200.0 g.

Nota: elaboración propia

#### 4.4. RESULTADOS DE DISEÑO MARSHALL CONVENCIONAL

Los resultados del diseño de la mezcla convencional cumplen con todos los parámetros requeridos en el diseño Marshall teniendo como porcentaje óptimo de cemento asfáltico 5.86% de PEN 120-150 con el cual fueron diseñados los especímenes modificados.



**Tabla 87**

*Resultados de diseño Marshall convencional*

<b>CARGA DE TRÁFICO:</b>		<b>TRÁFICO PESADO</b>		
<b>TAMAÑO NOMINAL MAX:</b>		<b>3/4"</b>		
<b>VERIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE MEZCLAS</b>	<b>PARÁMETROS DE DISEÑO</b>		<b>RESULTADOS</b>	<b>CONDICIÓN</b>
	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>		
Número de golpes	75		75	Satisface
Estabilidad mínima (kg)	800		1184.55	Satisface
Flujo, 0.25mm (1/100")	8	14	13.54	Satisface
Porcentaje de vacíos (Va)	3	5	4	Satisface
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)	65	75	73.26	Satisface
Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)	tabla de mínimo VMA	Valor Mínimo 14	14.29%	Satisface
Estabilidad/Flujo	1700	4000	3500.31	Satisface

Nota: elaboración propia

#### **4.4.1. Análisis de datos de diseño Marshall modificado con fibras de acero**

Los resultados del diseño de la mezcla modificado cumplen con todos los parámetros requeridos de un diseño Marshall teniendo como porcentaje óptimo de cemento asfáltico un 5.86 y 4.0 % de fibras de acero con el cual fueron diseñados los especímenes modificados.

**Tabla 88***Análisis de resultados de diseño Marshall modificado con fibras de acero*

<b>CARGA DE TRÁFICO:</b>	<b>TRÁFICO PESADO</b>			
<b>TAMAÑO NOMINAL MAX:</b>	<b>3/4"</b>			
<b>VERIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE MEZCLAS</b>	<b>PARÁMETROS DE DISEÑO</b>		<b>RESULTADOS</b>	<b>CONDICIÓN</b>
	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>		
Porcentaje de cemento Asfáltico	5.86%		5.86%	Satisface
Porcentaje de fibras de acero	4.00%		4.00%	Satisface
Número de golpes en especímenes	75		75	Satisface
Estabilidad mínima (kg)	800		1193.57	Satisface
Flujo,0.25mm (1/100")	8	14	13.89	Satisface
Porcentaje de vacíos (Va)	3	5	4.16	Satisface
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)	65	75	69.92	Satisface
Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)	Tabla de mínimo VMA	Valor Mínimo 13	14.57%	Satisface
Estabilidad/Flujo	1700	4000	3438.19	Satisface

Nota: elaboración propia



#### 4.4.2. Comparativa de concreto asfáltico tradicional y modificada

**Tabla 89**

*Parámetros de la mezcla convencional y modificada con fibras de acero*

% C.A.	% F.A.	Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada		% de Vacíos de Aire		% de vacíos de agregado mineral		% de vacíos llenados con asfalto	
		Gmb		Va		VMA		VFA	
		SIN FA	CON FA	SIN FA	CON FA	SIN FA	CON FA	SIN FA	CON FA
5.86%	2%		2.286		3.96%		14.59%		72.90%
	4%	2.29	2.285	3.96%	4.25%	14.438	14.62%	72.57	70.92%
	6%		2.287		4.32%		14.55%		70.30%
	8%		2.283		4.39%		14.71%		70.16%

Nota: elaboración propia

**Tabla 90**

*Estabilidad y flujo de mezcla convencional y modificada*

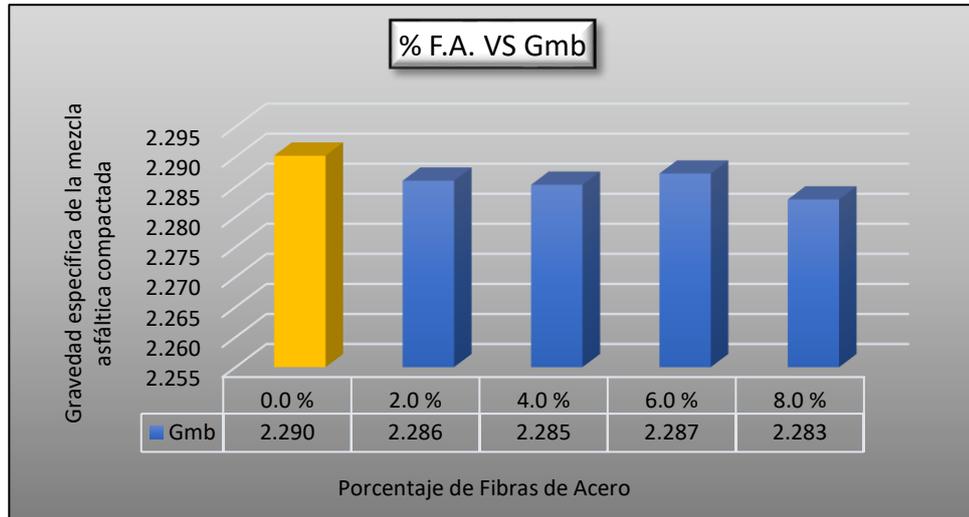
% C.A.	% F.A.	FLUJO		ESTABILIDAD	
		SIN FIBRAS	CON FIBRAS	SIN FIBRAS	SIN FIBRAS
5.86%	2%		13.67		1189.54
	4%	13.3	13.87	1187.8	1193.61
	6%		14.2		1194.02
	8%		14.53		1193.57

Nota: elaboración propia

#### 4.4.3. Gráficas comparativas entre mezcla convencional y mezcla modificada

**Figura 44**

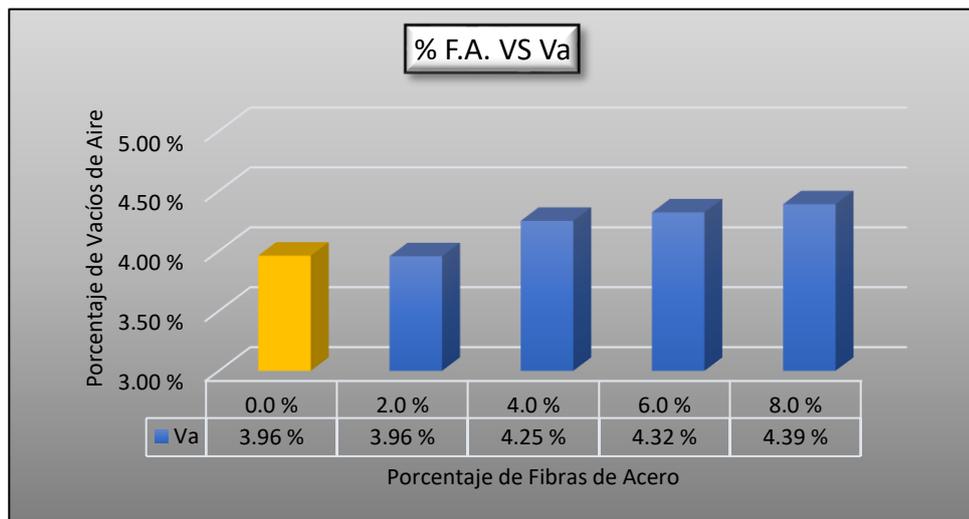
*Análisis comparativo de la Gmb de la mezcla asfáltica compactada*



**Nota:** Comparativa entre mezcla convencional y mezcla modificada con 2%,4%,6% y 8% de fibras de acero para los parámetros de gravedad específica de la mezcla asfáltica vs porcentaje de fibras de acero

**Figura 45**

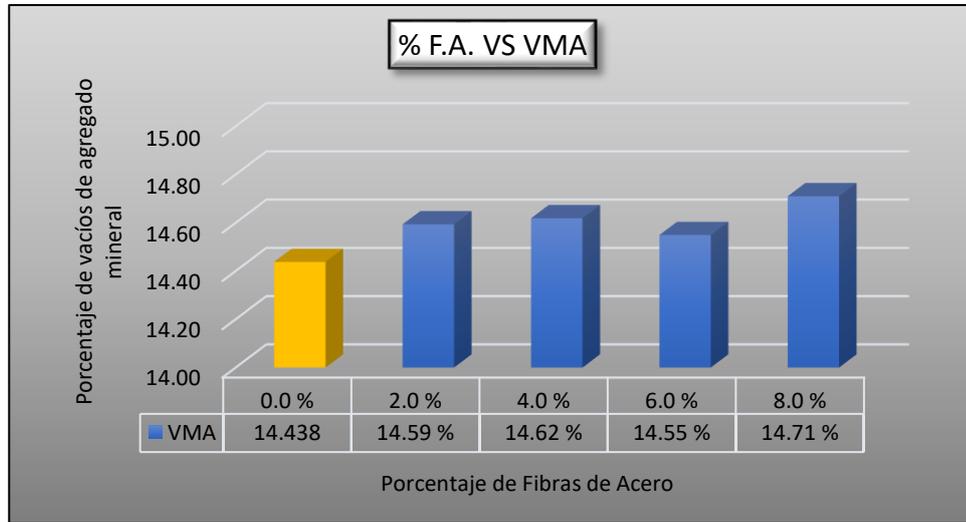
*Análisis comparativo del porcentaje de vacíos de aire de las mezclas*



**Nota:** comparativa entre mezcla convencional y modificada con 2%,4%,6% y 8% de fibras de acero para el factor vacíos de aire de la mezcla asfáltica

**Figura 46**

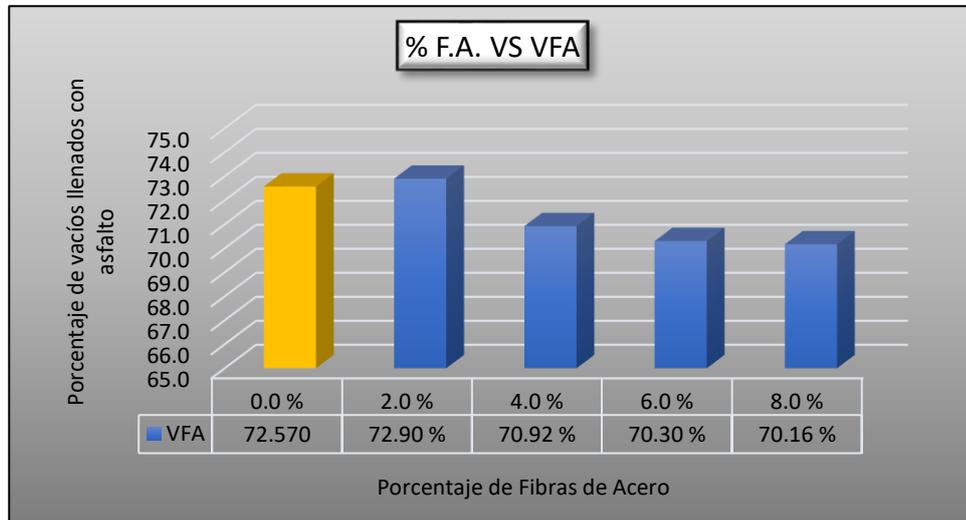
*Análisis comparativo del porcentaje de vacíos de agregado mineral*



Nota: Comparativa entre mezcla convencional y modificada con 2%,4%,6% y 8% de fibras de acero para los parámetros de Porcentaje de vacíos de agregado mineral vs porcentaje de fibras de acero

**Figura 47**

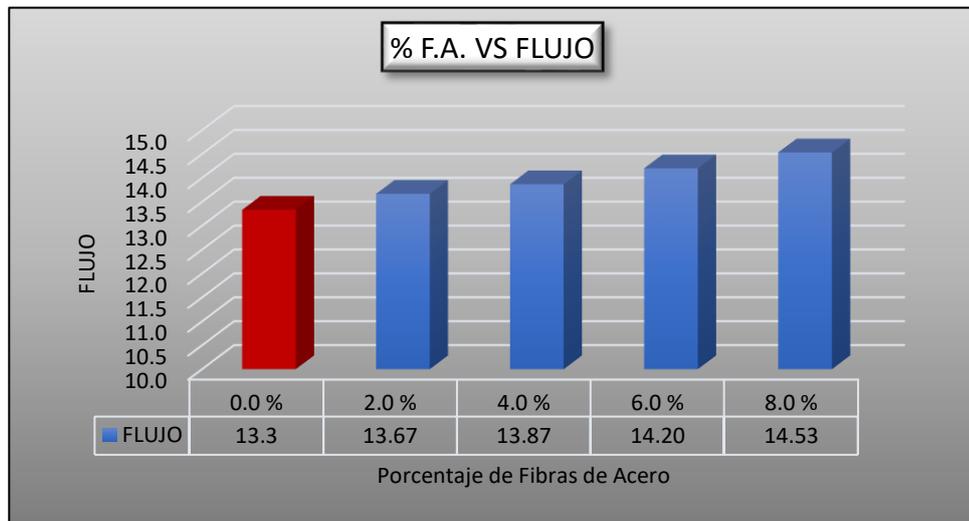
*Análisis de resultados del VFA*



Nota: comparativas entre mezcla convencional y mezcla modificada con 2%,4%,6% y 8% de fibras de acero para los parámetros de porcentaje de vacíos llenos con asfalto vs porcentaje de fibras de acero.

**Figura 48**

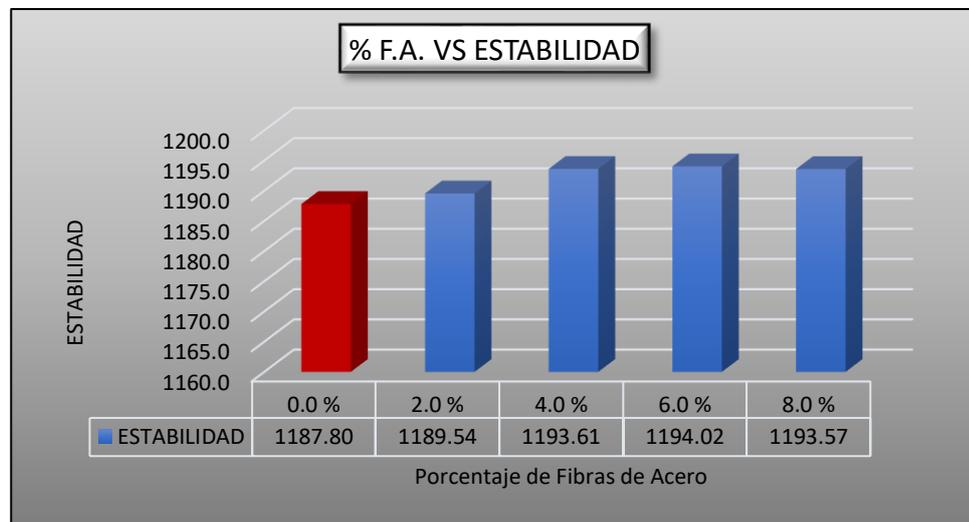
*Análisis comparativo del parámetro - Flujo*



Nota: Comparativas entre mezcla convencional y mezcla modificada con 2%,4%,6% y 8% de fibras de acero para los parámetros de Flujo vs porcentaje de fibras de acero.

**Figura 49**

*Análisis comparativo del parámetro – Estabilidad*

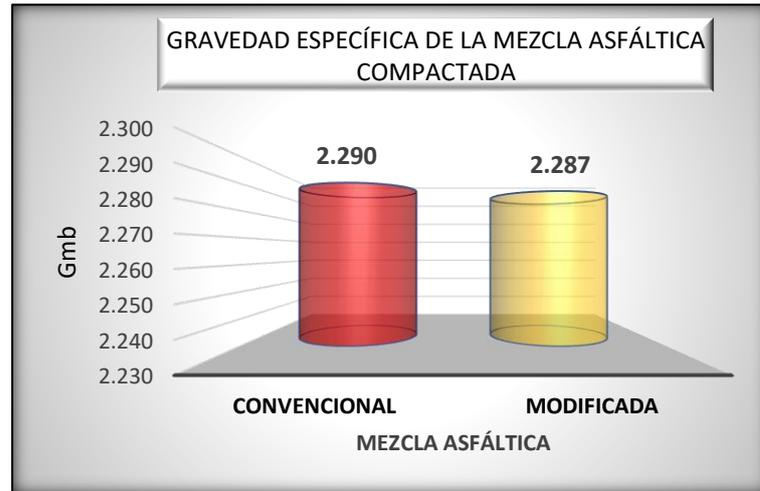


Nota: Comparativas entre mezcla convencional y mezcla modificada con 2%,4%,6% y 8% de fibras de acero para los parámetros de Estabilidad vs porcentaje de fibras de acero.

#### 4.4.3.1. Análisis comparativo de parámetros Marshall entre diseño tradicional y modificada

**Figura 50**

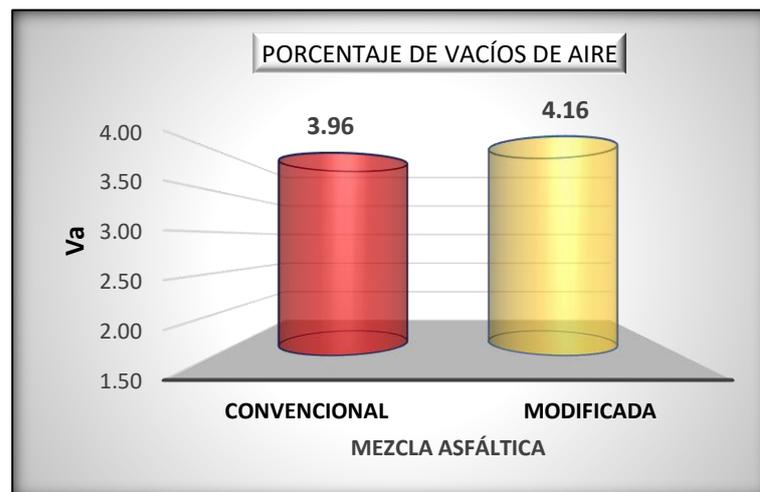
*Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, convencional y modificada*



Nota: Comparativa entre Gravedad específica de la concreto asfáltico compactada convencional vs concreto asfáltico modificado con fibras de acero.

**Figura 51**

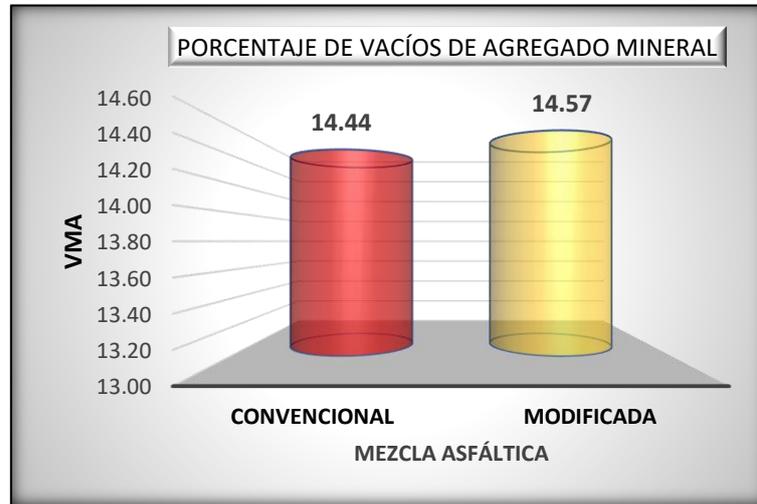
*Vacíos de aire del concreto asfáltico convencional y modificado.*



Nota: Comparativa entre Va del concreto asfáltico convencional vs concreto asfáltico modificado con fibras de acero.

**Figura 52**

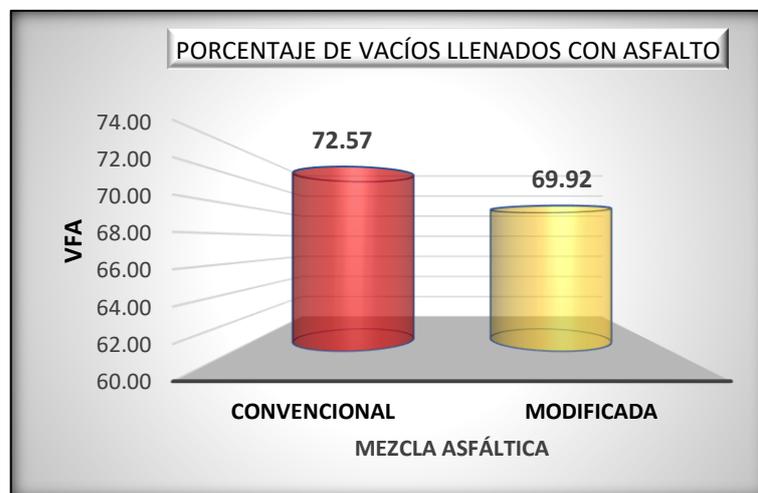
*Análisis de resultados de VMA del concreto asfáltico tradicional y modificada*



Nota: Comparativa entre el VMA del concreto asfáltico convencional vs concreto asfáltico modificado con fibras de acero

**Figura 53**

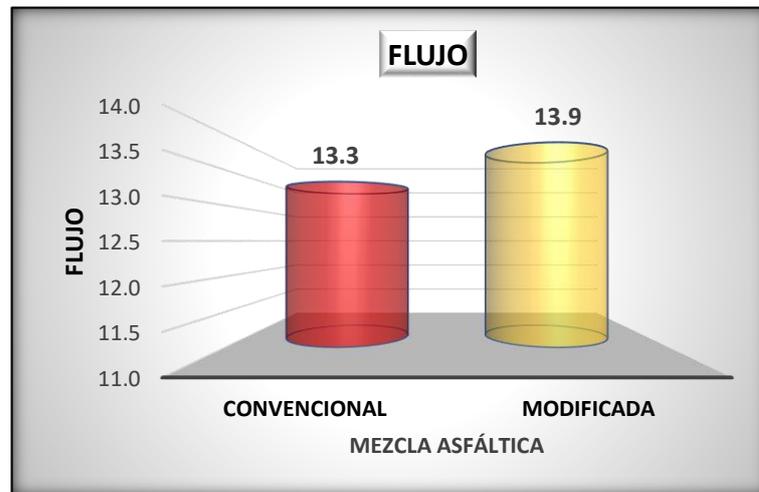
*Análisis de VFA concreto asfáltico convencional y modificado*



Nota: Comparativa entre el Porcentaje de vacíos llenos con asfalto del concreto asfáltico convencional vs concreto asfáltico modificado con fibras de acero.

**Figura 54**

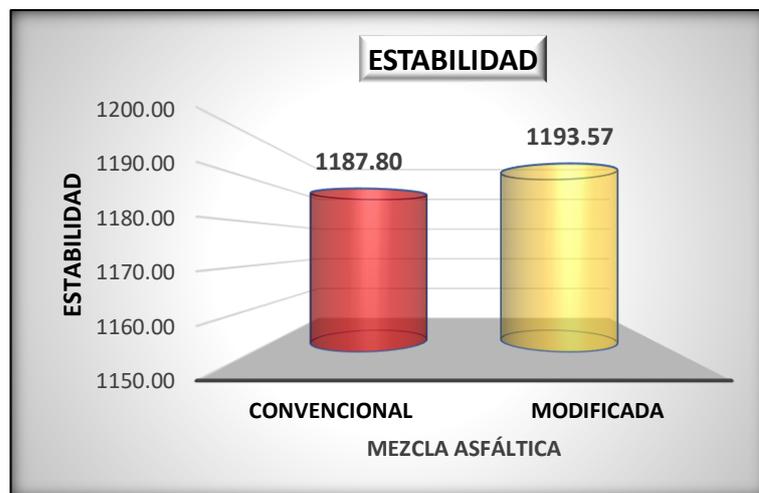
*Flujo del concreto asfáltico convencional y modificado*



Nota: Comparativa entre el Flujo del concreto asfáltico convencional vs concreto asfáltico modificado con 4% fibras de acero

**Figura 55**

*Estabilidad del concreto asfáltico convencional y modificado*



Nota: comparativa entre la Estabilidad del concreto asfáltico convencional vs concreto asfáltico modificado con 4% F.A.

#### 4.5. ANÁLISIS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL EN LOS ESPECÍMENES.

##### 4.5.1. Velocidad promedio de calentamiento en microondas

**Tabla 91**

*Velocidad promedio de calentamiento en microondas para 40 segundos*

Cantidad de fibras de acero	de Temperatura los 40 s. (°C)	Velocidad a promedio de calentamiento (°C/s.)	Coefficiente de determinación del ajuste lineal (R <sup>2</sup> )
0.0 %	50.3 °C	<b>0.81</b>	0.9915
2.0 %	54.6 °C	<b>0.84</b>	0.9757
4.0 %	62.5 °C	<b>0.94</b>	0.9455
6.0 %	62.8 °C	<b>0.99</b>	0.9676
8.0 %	63.6 °C	<b>1.02</b>	0.9721

Nota: elaboración propia

##### 4.5.2. Comparativa entre la mezcla convencional y modificada con F.A.

**Tabla 92**

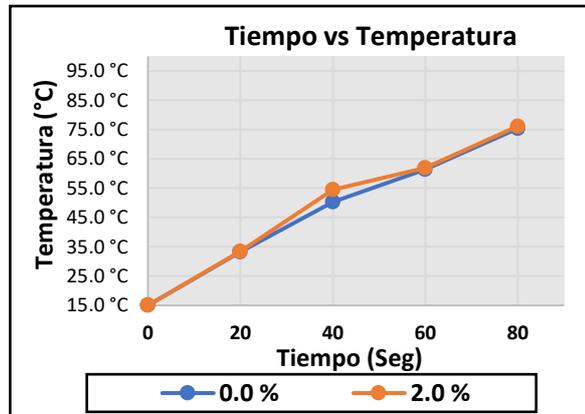
*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 2.0% F.A.*

Muestra	M-AB0	M-AB2	M-AB4	M-AB6	M-AB8	
Tiempo	0 s.	20 s.	40 s.	60 s.	80 s.	
FIBRA DE ACERO	0.00%	15.0 °C	33.2 °C	50.3 °C	61.4 °C	75.4 °C
	2.00%	15.0 °C	33.5 °C	54.6 °C	62.0 °C	76.2 °C

Nota: comparativa de calor alcanzado entre la mezcla asfáltica tradicional y la modificada con 2.0% de FA.

**Figura 56**

*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 2.0% F.A.*



Nota: elaboración propia

**Tabla 93**

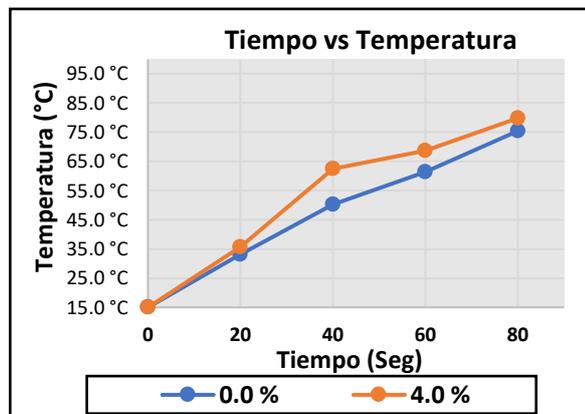
*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 4.0% F.A.*

Muestra		M-AB0	M-AB2	M-AB4	M-AB6	M-AB8
Tiempo (s)		0 s	20 s	40 s	60 s	80 s
FIBRA ACERO	DE 0.0 %	15.0 °C	33.2 °C	50.3 °C	61.4 °C	75.4 °C
	4.0 %	15.0 °C	35.7 °C	62.5 °C	68.6 °C	79.8 °C

Nota: comparativa de calor alcanzado entre la mezcla asfáltica tradicional y la modificada con 4.0% de FA.

**Figura 57**

*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 4.0% F.A.*



Nota: elaboración propia

**Tabla 94**

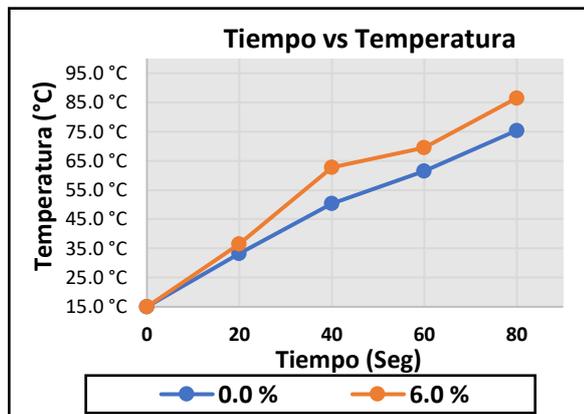
*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 6.0% F.A.*

Muestra			M-AB0	M-AB2	M-AB4	M-AB6	M-AB8
Tiempo (s)			0 s	20 s	40 s	60 s	80 s
FIBRA ACERO	DE 0.0 %		15.0 °C	33.2 °C	50.3 °C	61.4 °C	75.4 °C
	6.0 %		15.0 °C	36.5 °C	62.8 °C	69.5 °C	86.5 °C

Nota: comparativa de calor alcanzado entre la mezcla asfáltica tradicional y la modificada con 6.0% de FA..

**Figura 58**

*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 6.0% F.A.*



Nota: elaboración propia

**Tabla 95**

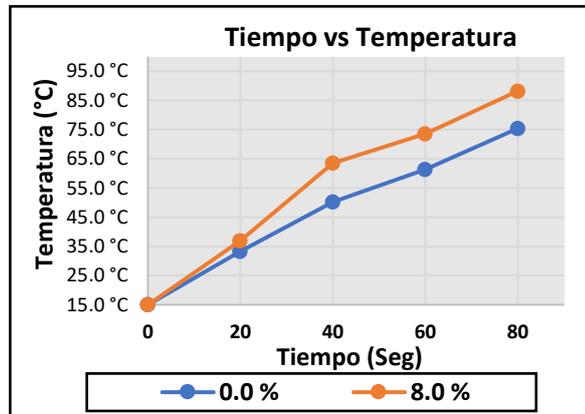
*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 8.0% F.A.*

Muestra			M-AB0	M-AB2	M-AB4	M-AB6	M-AB8
Tiempo (s)			0 s	20 s	40 s	60 s	80 s
FIBRA ACERO	DE 0.0 %		15.0 °C	33.2 °C	50.3 °C	61.4 °C	75.4 °C
	8.0 %		15.0 °C	37.0 °C	63.6 °C	73.6 °C	88.2 °C

Nota: comparativa de calor alcanzado entre la mezcla asfáltica tradicional y la modificada con 8.0% de FA.

**Figura 59**

*Comparativa de temperaturas de 0.0% y 8.0% F.A.*



Nota: elaboración propia

#### 4.5.3. Variación de temperatura respecto al tiempo en microondas

**Tabla 96**

*Variación de temperatura induciendo microondas - tiempo*

VARIACIÓN DE TEMPERATURA-TIEMPO						
Muestra	Tiempo	0.0 % F.A.	2.0% F.A.	4.0 % F.A.	6.0 % F.A.	8.0 % F.A.
M-AB0	0.0 s.	0.0 °C	0.0 °C	0.0 °C	0.0 °C	0.0 °C
M-AB2	(0 - 20) s	18.2 °C	18.5 °C	20.7 °C	21.5 °C	22.0 °C
M-AB4	(0 - 40) s	35.3 °C	39.6 °C	47.5 °C	47.8 °C	48.6 °C
M-AB6	(0 - 60) s	46.4 °C	47.0 °C	53.6 °C	54.5 °C	58.6 °C
M-AB8	(0 - 80) s	60.4 °C	61.2 °C	64.8 °C	71.5 °C	73.2 °C

Nota: Variación de temperatura respecto al tiempo inducido a microondas

#### 4.5.4. Variación de temperatura con respecto al porcentaje de F.A.

**Tabla 97**

*Variación de temperatura induciendo microondas - fibras de acero*

VARIACIÓN DE TEMPERATURA - FIBRAS					
Muestra	Fibras de Acero	20 segundos	40 segundos	60 segundos	80 segundos
M-AB2	(0 - 2) %	0.3 °C	4.3 °C	0.6 °C	0.8 °C
M-AB4	(0 - 4) %	2.5 °C	12.2 °C	7.2 °C	4.4 °C
M-AB6	(0 - 6) %	3.3 °C	12.5 °C	8.1 °C	11.1 °C
M-AB8	(0 - 8) %	3.8 °C	13.3 °C	12.2 °C	12.8 °C

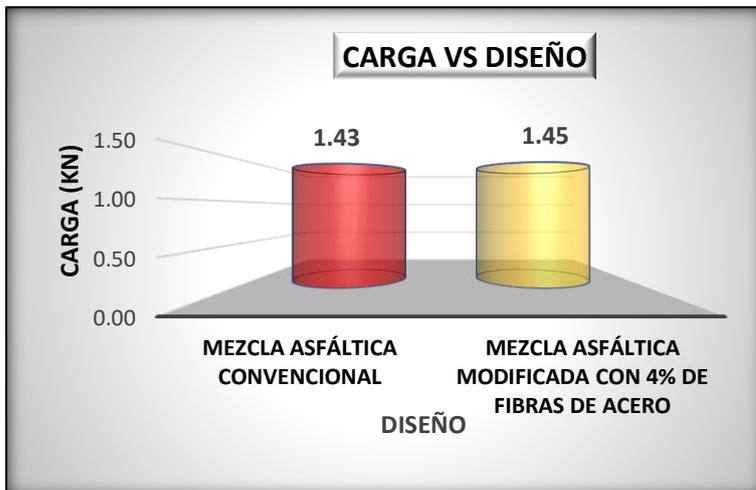
Nota: Variación de temperatura entre la mezcla asfáltica tradicional y modificada para los distintos porcentajes de acero

#### 4.6. RESISTENCIA A FLEXIÓN EN MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADO

Comparativa de la resistencia a la carga máxima en ensayo de compresión indirecta en mezcla convencional vs mezcla modificada con fibras de acero.

**Figura 60**

*Resistencia a la carga máxima en ensayo a flexión*



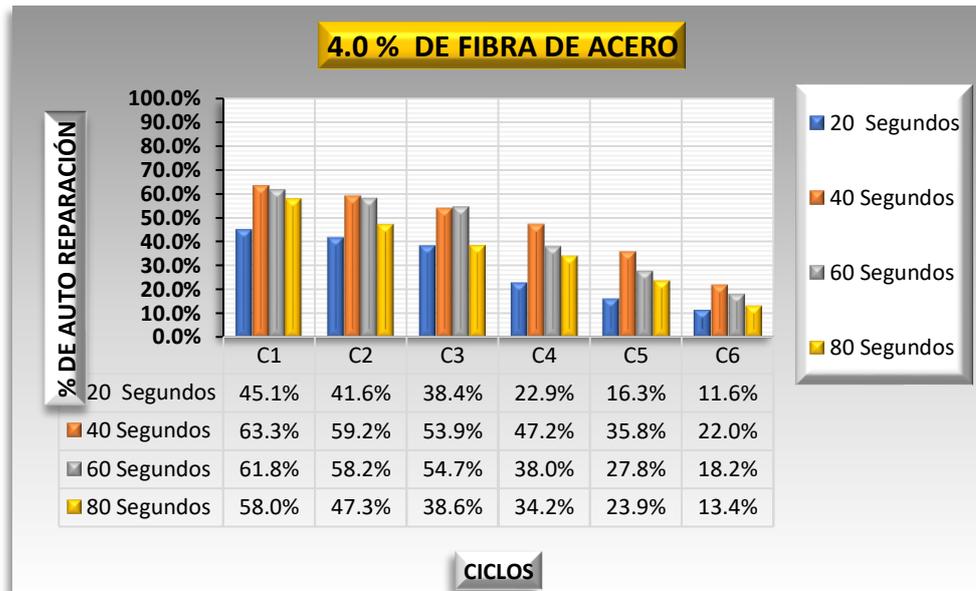
Nota: Comparativa de la resistencia a la carga máxima en ensayo a flexión en mezcla convencional y mezcla modificada con fibras de acero.

#### 4.7. AUTO REPARACIÓN EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE 4% DE F.A.

Porcentaje de auto reparación para diferentes ciclos y tiempos de inducción.

**Figura 61**

*Porcentaje de auto reparación para 4.0% de fibra de acero*



Nota: Porcentaje de auto reparación para 4.0% de fibra de acero, diferentes ciclos y tiempos de inducción de microondas.

#### 4.8. AUTO REPARACIÓN EN FUNCIÓN AL TIEMPO EN MICROONDAS

**Tabla 98**

*Auto reparación mediante la inducción de microondas para seis ciclos*

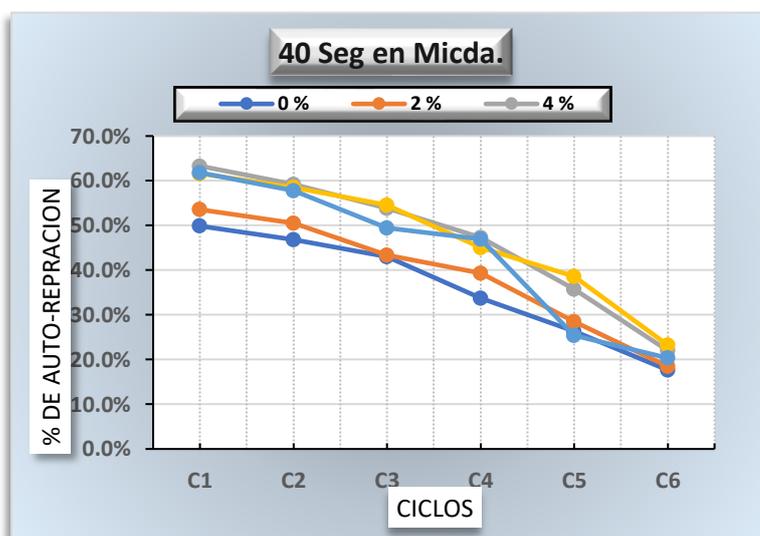
% ° FA	TIEMPO					
	40 segundos					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0%	49.90%	46.80%	43.00%	33.80%	26.30%	17.60%
2%	53.60%	50.50%	43.40%	39.30%	28.40%	18.50%
4%	63.30%	59.20%	53.90%	47.20%	35.80%	22.00%
6%	61.60%	58.50%	54.60%	45.00%	38.60%	23.20%

TIEMPO						
% ° FA	40 segundos					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
8%	61.80%	57.80%	49.50%	47.00%	25.40%	20.40%

Nota: Auto reparación para diferentes porcentajes de fibras de acero mediante la inducción de microondas a 40s para seis ciclos

**Figura 62**

*Auto reparación para 40 segundos de inducción en microondas - ciclos.*



Nota: Auto reparación para diferentes porcentajes de acero durante 40 segundos de inducción de microondas.

## 4.9. CAPACIDAD DE AUTO REPARACIÓN EN FUNCIÓN A CICLOS

### 4.9.1. Mezcla convencional

**Tabla 99**

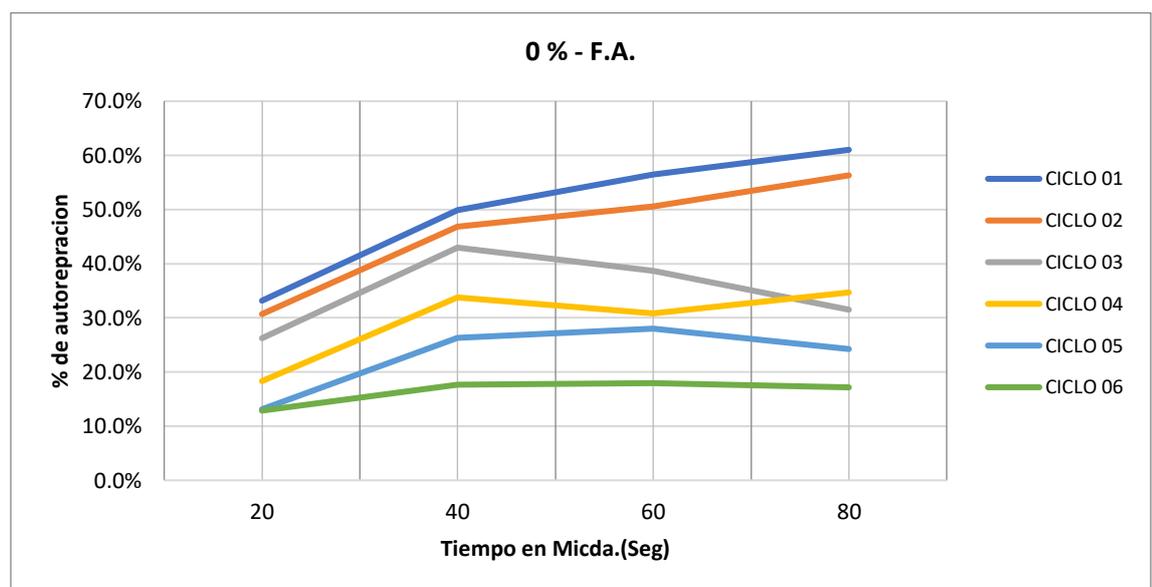
*Auto reparación en función a ciclos y diferentes tiempos - 0% F.A.*

CICLOS	0 % - F.A.			
	TIEMPO EN MICDA.			
	20 s	40 s	60 s	80 s
CICLO 01	33.20%	49.90%	56.50%	61.00%
CICLO 02	30.70%	46.80%	50.50%	56.30%
CICLO 03	26.20%	43.00%	38.70%	31.50%
CICLO 04	18.30%	33.80%	30.90%	34.70%
CICLO 05	13.10%	26.30%	28.00%	24.20%
CICLO 06	12.90%	17.60%	17.90%	17.10%

Nota: Elaboración propia

**Figura 63**

*Auto reparación con 0% de fibras de acero para seis ciclos*



Nota: Elaboración propia



#### 4.9.2. Mezcla modificada con 2% de F.A.

Porcentaje de auto reparación de concreto asfáltico modificado con 2% de fibras acero luego de la inducción de microondas para diferentes ciclos y diferentes tiempos.

**Tabla 100**

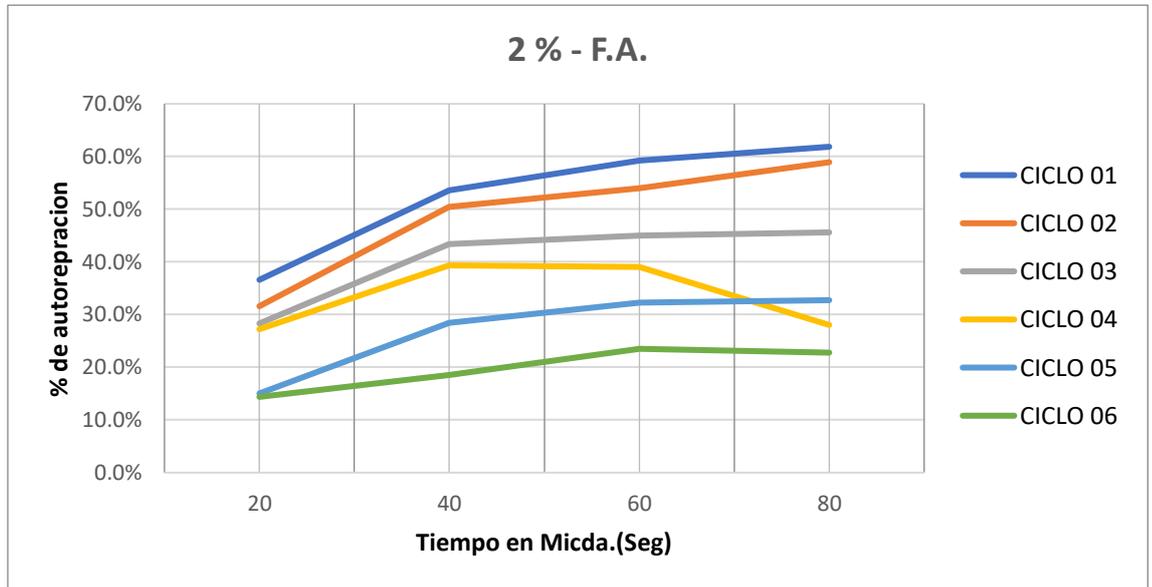
*Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos - 2% F.A.*

2 % - F.A.				
CICLOS	TIEMPO EN MICDA.			
	20 s	40 s	60 s	80 s
CICLO 01	36.60%	53.60%	59.30%	61.90%
CICLO 02	31.60%	50.50%	54.00%	58.90%
CICLO 03	28.30%	43.40%	45.00%	45.60%
CICLO 04	27.20%	39.30%	39.00%	28.00%
CICLO 05	15.00%	28.40%	32.30%	32.70%
CICLO 06	14.40%	18.50%	23.50%	22.80%

Nota: Elaboración propia

**Figura 64**

*Porcentaje de Auto reparación para 2% de fibras de acero - ciclos*



Nota: Elaboración propia

#### 4.9.3. Mezcla modificada con 4% de F.A.

Porcentaje de auto reparación de concreto asfáltico modificado con 4% de fibras acero luego de la inducción de microondas para diferentes ciclos y diferentes tiempos.

**Tabla 101**

*Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos - 4% F.A*

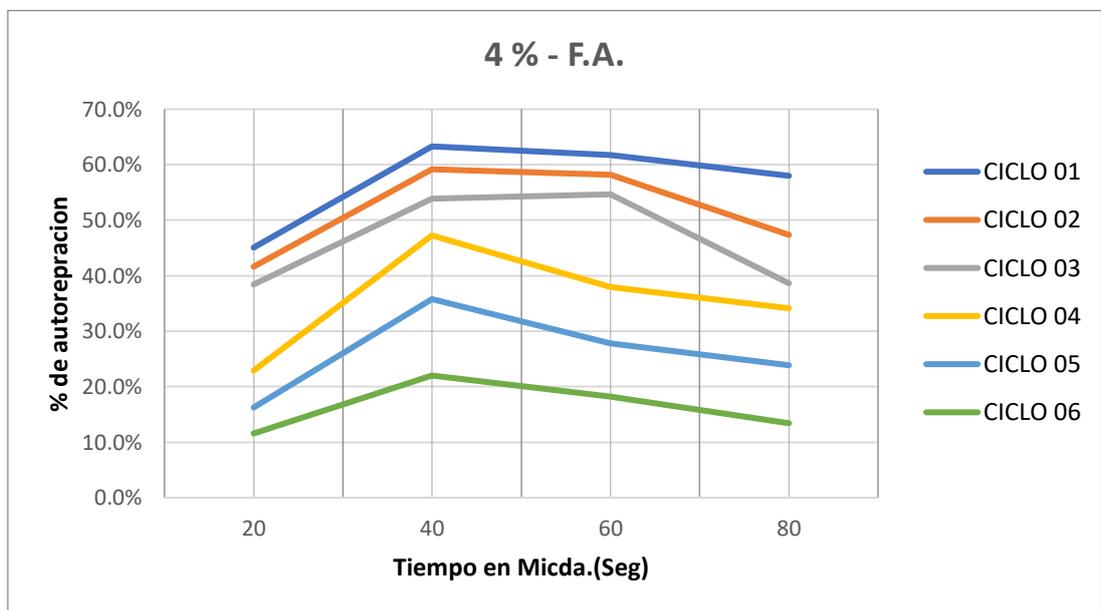
CICLOS	4 % - F.A.			
	TIEMPO EN MICDA.			
	20 s	40 s	60 s	80 s
CICLO 01	45.10%	63.30%	61.80%	58.00%
CICLO 02	41.60%	59.20%	58.20%	47.30%
CICLO 03	38.40%	53.90%	54.70%	38.60%
CICLO 04	22.90%	47.20%	38.00%	34.20%

4 % - F.A.				
CICLOS	TIEMPO EN MICDA.			
	20 s	40 s	60 s	80 s
CICLO 05	16.30%	35.80%	27.80%	23.90%
CICLO 06	11.60%	22.00%	18.20%	13.40%

Nota: Elaboración propia

### Figura 65

*Porcentaje de Auto reparación para 4% de fibras de acero - ciclos*



Nota: Elaboración propia

#### 4.9.4. Mezcla modifica con 6% de F.A.

Porcentaje de auto reparación de concreto asfáltico modificado con 6% de fibras acero luego de la inducción de microondas para diferentes ciclos y diferentes tiempos.

**Tabla 102**

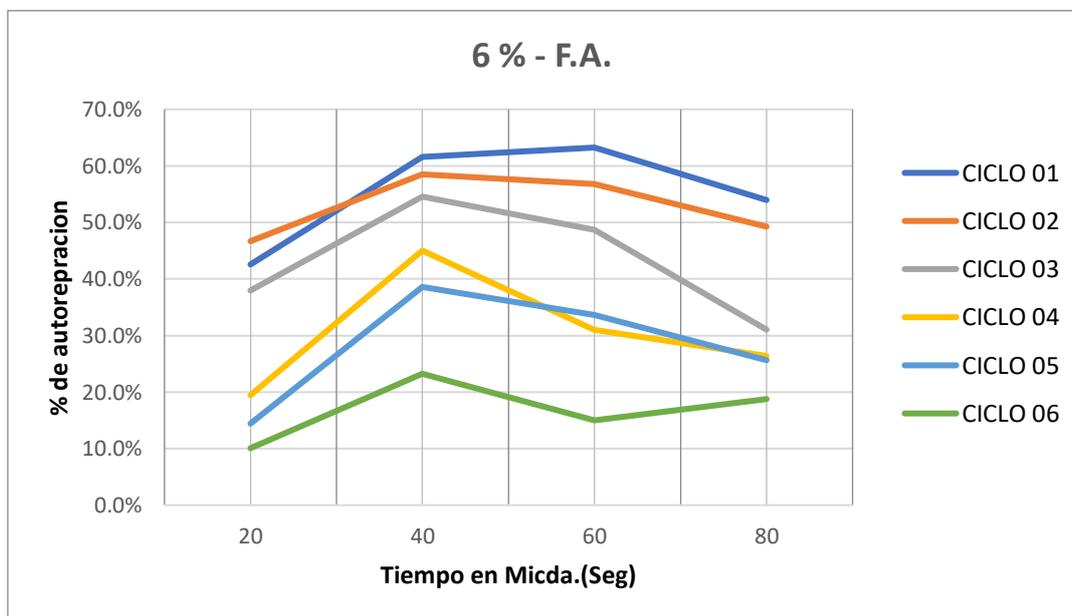
*Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos - 6% FA*

CICLOS	6 % - F.A.			
	TIEMPO EN MICDA.			
	20 s	40 s	60 s	80 s
CICLO 01	42.60%	61.60%	63.20%	53.90%
CICLO 02	46.70%	58.50%	56.80%	49.30%
CICLO 03	38.00%	54.60%	48.70%	31.00%
CICLO 04	19.50%	45.00%	31.00%	26.40%
CICLO 05	14.40%	38.60%	33.70%	25.60%
CICLO 06	10.10%	23.20%	15.00%	18.70%

Nota: Elaboración propia

**Figura 66**

*Porcentaje de Auto reparación para 6% de fibras de acero - ciclos*



Nota: Elaboración propia

#### 4.9.5. Mezcla modificada con 8% de F.A.

**Tabla 103**

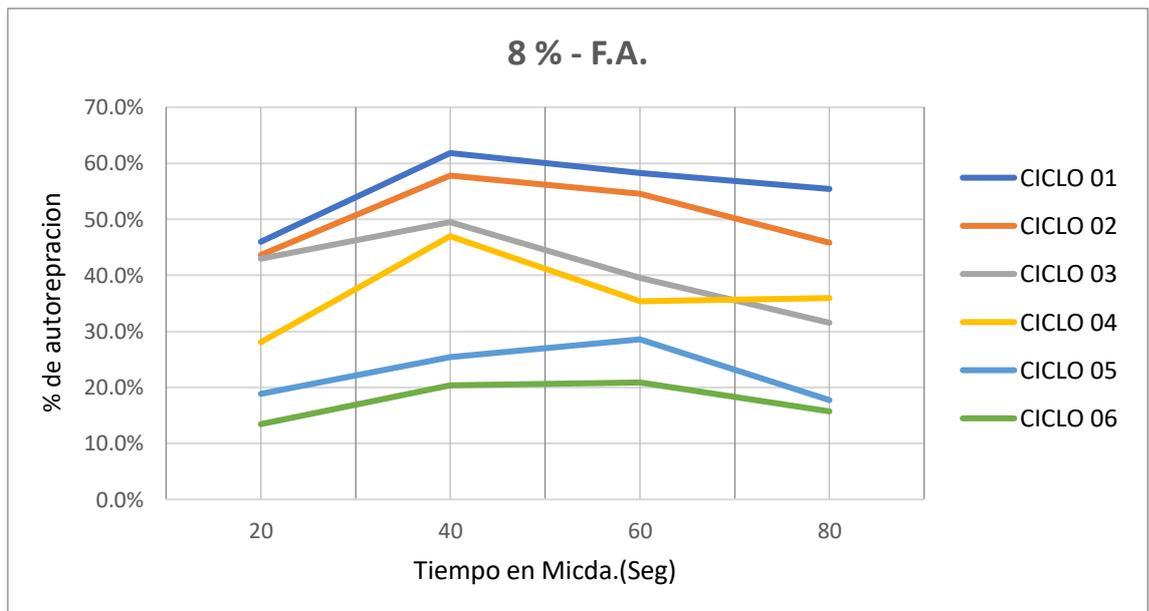
*Auto reparación en función a ciclos y a diferentes tiempos – 8 % FA*

CICLOS	8 % - F.A.			
	TIEMPO EN MICDA.			
	20 s	40 s	60 s	80 s
CICLO 01	46.00%	61.80%	58.20%	55.40%
CICLO 02	43.60%	57.80%	54.50%	45.80%
CICLO 03	42.90%	49.50%	39.60%	31.50%
CICLO 04	28.10%	47.00%	35.40%	36.00%
CICLO 05	18.90%	25.40%	28.60%	17.70%
CICLO 06	13.40%	20.40%	20.90%	15.80%

Nota: Elaboración propia

**Figura 67**

*Porcentaje de Auto reparación para 8% de fibras de acero - ciclos*



Nota: Elaboración propia

## 4.10. ÓPTIMOS DE PORCENTAJE DE FA, TIEMPO Y CICLOS DE AUTO REPARACIÓN

### 4.10.1. Análisis comparativo de auto reparación de la mezcla tradicional y modificada

**Tabla 104**

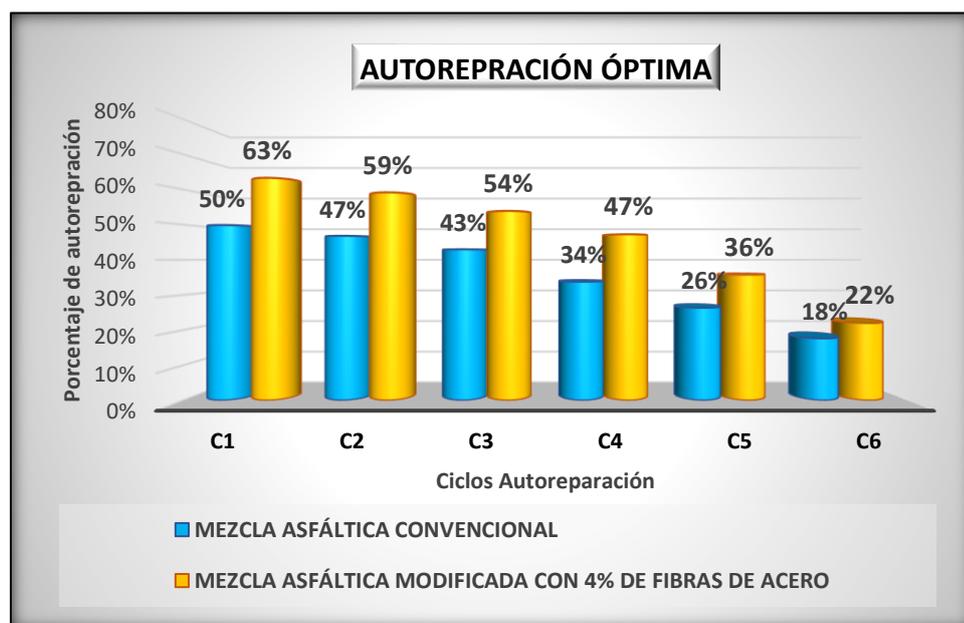
*Análisis comparativo entre concreto asfáltico convencional y modificado óptimo*

% FA	TIEMPO					
	40 s.					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0%	50%	47%	43%	34%	26%	18%
4%	63%	59%	54%	47%	36%	22%

Nota: Comparativa entre concreto asfáltico convencional y concreto asfáltico modificado con fibras de acero respecto a sus diferentes ciclos de auto reparación

**Figura 68**

*Análisis por ciclos entre concreto asfáltico tradicional y modificado óptimo*



Nota: Elaboración propia

#### 4.11. COMPONENTES ÓPTIMOS PARA EL DISEÑO MODIFICADO

**Tabla 105**

*Componentes óptimos de la mezcla asfáltica modificada*

COMPONENTE	VALOR
Porcentaje de cemento asfáltico	5.86 %
Porcentaje de fibras de acero	4.0 %
Temperatura superficial alcanzada en microonda.	62.5 °C
Tiempo óptimo auto reparación	40 segundos
Número de ciclos aceptables	3

Nota: Elaboración propia

#### 4.12. DISCUSIÓN

Los hallazgos derivados de la tesis “diseño de mezcla asfáltica adicionando fibras de acero con la propiedad de auto reparación mediante inducción de microondas en la ciudad de puno-2021” fueron que el porcentaje óptimo de fibras de acero es del 4% con respecto al bitumen, con este nivel de porcentaje la capacidad de auto reparación del espécimen después de someterlo a microondas durante 40 segundos mostró una tasa de recuperación del 63.3% en el primer ciclo, con respecto a la resistencia inicial. Esta tasa disminuyó a un 53.9% en el tercer ciclo, además, se observó que la temperatura superficial de las muestras a los 40 segundos en microondas alcanzó los 62.5°C.

(Fiallos & Unda, 2018) en la tesis “análisis comparativo de propiedades y características mecánicas entre mezcla asfáltica en caliente “auto reparable” (con lana de acero) y mezcla asfáltica en caliente convencional” determinaron que el porcentaje óptimo de fibras de acero para ser utilizado en una mezcla asfáltica convencional es del 4% en peso con respecto al bitumen. Este porcentaje cumplió con los objetivos del estudio



al mejorar satisfactoriamente los parámetros físicos evaluados como la estabilidad y flujo. Los resultados indican que la mezcla asfáltica alterada con lana de acero, exhibe un incremento en la estabilidad de 1719.1 kg en relación con la mezcla tradicional, la cual tiene una estabilidad de 1655.6 kg. Este aumento equivale a un incremento porcentual de alrededor del 4%. En el mismo ensayo, la medición del flujo para la mezcla convencional es de 13 centésimas de pulgada, y al igual que la estabilidad, experimenta un aumento a 15 centésimas de pulgada.

(Torres & Quispe, 2020) en la tesis “diseño de mezcla asfáltica auto reparable mediante inducción de calor para controlar fallas superficiales de tráfico pesado en vías metropolitanas de lima” el nivel óptimo de estabilidad en las mezclas asfálticas modificadas se logra al incluir un 1% de fibra de lana de acero con respecto al cemento asfáltico. Los datos obtenidos de los ensayos señalan que, al aumentar el porcentaje de fibra de lana de acero, se observa una reducción en la estabilidad. La prueba de la mezcla asfáltica alterada con fibra, revela una estabilidad de 1123.4 Kg en comparación con la mezcla convencional, que muestra una estabilidad de 1035.8 Kg. Este resultado sirve como referencia, indicando que el diseño modificado resultara una mayor capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones cuando se someta a cargas de tránsito y el grado más alto de reparación alcanzado con un 1% de fibras de lana de acero, después de realizar el ensayo a flexión de tres puntos en los especímenes, fue del 50.7%. En otras palabras, las mezclas que presentaban fisuras lograron recuperar el 50.7% de su resistencia original a través del proceso de auto reparación. Este resultado lleva a la conclusión de que es posible reparar las fisuras en mezclas asfálticas en caliente al incorporar fibras de lana de acero mediante la inducción de calor.



(Norambuena et al., 2017) en el artículo “desarrollo de una nueva mezcla asfáltica con propiedades de auto reparación” manifiesta que el calentamiento mediante microondas contribuye a la restauración de la resistencia mecánica en mezclas con fibras de lana de acero que presentan fisuras. Sin embargo, se observa que este proceso de recuperación baja a medida que se repite el número de ciclos y para la creación de una nueva mezcla asfáltica con capacidad de auto reparación mediante calentamiento por microondas, tuvieron mejores resultados agregando un 2% de fibras en volumen con respecto al bitumen. Lograron una mezcla con una capacidad de reparación promedio de 80% durante los primeros ciclos de reparación, además de mantener una resistencia mecánica ligeramente superior en comparación con una mezcla que no contiene fibras. En adición, se pudo notar en el estudio que la temperatura de las combinaciones aumenta de manera lineal conforme avanza el tiempo de exposición al calor en el microondas la temperatura máxima promedio alcanzada por la mezcla asfáltica alterada con fibras de lana de acero, tras 40 segundos de exposición al calentamiento mediante microondas, en la superficie de los especímenes, oscila entre 57.5°C y 47.9°C.

(González et al., 2018). Según el artículo “Pavimentos asfálticos autorreparables con materiales reciclados mediante calentamiento por microondas” la tasa media de auto reparación lograda en el proyecto se situó en torno al 50%. Es decir, las mezclas que presentaban grietas, al someterse a la auto reparación mediante calentamiento por microondas, recuperaron aproximadamente el 50% de su resistencia inicial, de acuerdo a los resultados de este artículo, el contenido óptimo de fibras de lana de acero es de 2%, mientras que el contenido óptimo de virutas metálicas es de 1% las cuales mejoraron la capacidad de auto reparación de fisuras.



## V. CONCLUSIONES

- En la investigación se diseñó una mezcla asfáltica en caliente adicionando fibras de acero utilizando como método el diseño Marshall; después del estudio se concluye de forma general que la incorporación de las fibras de acero a una mezcla asfáltica influye de manera positiva en la mejora de la capacidad de auto reparación de las fallas, luego de haber sido sometido a microondas a 40 segundos y con un 4% de fibras de acero, estas fueron las más óptimas, por el tiempo mínimo y porcentaje mínimo de fibras añadidas a la mezcla que satisfacen la investigación y parámetros de diseño que da la normativa peruana; se observó que existe una mejora en la reparación de fisuras de la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero frente a los especímenes con diseño de mezcla asfáltica convencional; En el estudio se realizó 6 ciclos de prueba para cada espécimen modificado, resultando que los tres primeros ciclos sobrepasan el 50 % de auto reparación respecto a la rotura inicial, de tal manera que los resultados confirman que el porcentaje añadido de fibras de acero ayudan a la reparación de la resistencia ante una carga después de haber sufrido una falla, del mismo modo se concluye que la presencia de fibras de acero reduce el tiempo necesario para que la temperatura aumente en el concreto asfáltico induciéndole microondas.
- Los porcentajes de fibras de acero utilizados en la investigación fueron 2%,4%,6% y 8% respecto al cemento asfáltico, estos fueron sometidos a microondas a un tiempo de 40 segundos, las cuales tuvieron mayor porcentaje de auto reparación de fallas frente a la mezcla asfáltica convencional sujeta a las mismas condiciones de prueba, resultando que el 4% de fibras de acero añadido a la mezcla asfáltica resultó con un 63.3% de recuperación de la resistencia con



respecto al original obteniendo una leve superioridad al 6% y 8%, de la misma manera se determina el 4% de fibras de acero como el óptimo por la menor cantidad de material a utilizar y mayor auto recuperación en los ensayos de resistencia.

- Se concluye en la investigación que el porcentaje de fibras de acero incorporados a la mezcla asfáltica en caliente varía la temperatura de manera positiva frente a las muestras convencionales sin fibras de acero, a un tiempo de 40 segundos de inducción a microondas para un 2%,4%,6% y 8% de fibras de acero fueron 50.3°C, 54.6°C, 62.5°C, 62.8°C y 63.6°C respectivamente.
- En la comparativa de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente convencional y la modificada con 4% de fibras de acero, diseñados por el método Marshall, en la mayoría de los criterios evaluados no se encontró una mejora significativa, salvo en algunos criterios como: Flujo (incrementó en 0.55, representa un 4.15 %), porcentaje de vacíos llenos de asfalto (decreció en 2.65, representa un 3.65 %) y el porcentaje de vacíos (incremento en 0.20, representa un 5.6%), cabe mencionar que ambas mezclas cumplieron con las condiciones que se requiere en el diseño Marshall.
- Al diseñar la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero por el método Marshall se llegó al siguiente balance.

DESCRIPCIÓN	RESULTADOS
Porcentaje de Fibras de Acero	4.0%
Porcentaje de Vacíos	4.161%
Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada	2.287
Porcentaje de vacíos de agregado mineral	14.57%
porcentaje de vacíos llenados con asfalto	69.92%



DESCRIPCIÓN	RESULTADOS
ESTABILIDAD	1194 kg.
FLUJO (0.25mm)	13.89
ESTABILIDAD/FLUJO (kg/cm)	3438

- Los resultados de los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos son como se muestra en los cuadros las cuales cumplen con los límites exigidos por el M.T.C. para los diseños de mezclas asfálticas.

#### AGREGADO GRUESO

ENSAYOS	RESULTADO
Durabilidad	1.80%
Abrasión Los Ángeles	16.75%
Partículas chatas y alargadas	2.49%
Caras fracturadas	94/85
Sales Solubles Totales	0.03%
Absorción	0.87%

#### AGREGADO FINO

ENSAYOS	ARENA CHANCADA	ARENA NATURAL
Equivalente de Arena	85	75
Azul de metileno	2.5	3.5
Durabilidad	4.25%	5.03%
Índice de Plasticidad	NP	NP
Sales Solubles Totales	0.04%	0.12%
Absorción	0.51%	0.48%



## VI. RECOMENDACIONES

- Realizar investigaciones con otros tipos de fibras de acero que tenga características distintas a las utilizadas en esta tesis, que puedan poseer propiedades modificadas idóneas para pavimentos flexibles, de tal manera que mejore la capacidad de auto reparación de las fallas (grietas y fisuras) y las propiedades físicas y mecánicas del pavimento.
- Añadir como una especificación técnica en las normas peruanas, la utilización de fibras de acero como un agregado a añadir para la auto reparación de fallas mecánicas mediante la inducción de microondas en los pavimentos flexibles.
- Diseñar una maquina con capacidad de generen microondas de mayor potencia que reduzca el tiempo de autodepuración de las grietas y fisuras al aplicarle directamente a la carpeta asfáltica haciendo un alargue de la vida útil de las vías asfaltadas.
- Diseñar mezclas asfálticas en caliente modificada con fibras de acero con la capacidad de auto reparación mediante la inducción de microondas para tránsito pesado en altitudes menores a 3000 msnm. La presente investigación se llevó a cabo para zonas con temperaturas bajas, como la ciudad de Puno, lugar de estudio.
- Diseñar mezclas asfálticas en caliente modificada con fibras de acero con la capacidad de auto reparación mediante la inducción de microondas para transito ligero y transito medio para altitudes menores a 3000 msnm de esta manera expandiendo el estudio para diferentes situaciones de tránsito y climáticas.
- Aplicar de manera cuidadosa los ensayos de los materiales pétreos (gruesos y finos), componentes de la mezcla asfáltica, restringiéndose a las normativas que se esté utilizando en el proceso de la recopilación de datos.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 544., & American Concrete Institute. (2008). *Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete*. American Concrete Institute. <http://auber.com.vn/upload/download/738213331873.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2013). D5581 - 07a: Standar Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM International.
- Cárdenas, J. (30 de marzo de 2015) Fibras de acero para refuerzo. Materiales. [https://issuu.com/legissa/docs/metal17\\_pags66a69](https://issuu.com/legissa/docs/metal17_pags66a69)
- Carrizales Apaza, J. J. (2015). *Asfalto Modificado con Material Reciclado de Llantas para su Aplicación en Pavimentos Flexibles (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Espinoza, A. (2005). *¿Que son? | Microondas ondas electromagnéticas*. Espinoza Acevedo. <https://itic92user.wixsite.com/microondasutvt>
- Fiallos, J., & Unda, L. (2018). *Análisis comparativo de propiedades y características mecánicas entre mezcla asfáltica en caliente autorreparable con lana de acero y mezcla asfáltica en caliente convencional*. <https://core.ac.uk/download/pdf/157803011.pdf>
- González, A., Schlangen, E., & Norambuena, J. (2018). *Pavimentos asfálticos autorreparables con materiales reciclados mediante calentamiento por microondas*. <https://www.researchgate.net/publication/328135313>



- Google Maps. (2022). Mapa Satelital de la Región de Puno. Recuperado 1 de octubre de 2022.
- Hernández, S. (2014). *Metodología de la Investigación Sampieri 6ta Edición. Sexta Edición.*
- Hernández Sampieri, R. y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación “Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta”*. México D.F., México: Edamsa Impresiones.
- Instituto del Asfalto. (1985). *Tecnología del Asfalto y Practicas de Construcción (Comisión Permanente del Asfalto de la Republica de Argentina, trad.)*. Buenos Aires, Argentina: (Obra Original Publicada en enero de 1983).
- Instituto del Asfalto. (2014). *Asphalt Mix Design Methods [Métodos de Diseño de Concreto Asfáltico]*. Estados Unidos.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2004). *Aspectos Del Diseño Volumétrico De Mezclas Asfálticas*. Queretaro, Mexico.
- Minaya, S. y Ordoñez, A. (2001). *Manual De Laboratorio Ensayos Para Pavimentos Volumen I*. Universidad Nacional De Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú.
- Minaya, S. y Ordoñez, A. (2006). *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos (Segunda Ed)*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción*. Lima, Perú



- Ministerio de Transportes y comunicaciones. (2013). Manual de carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos". Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Manual de Ensayo y Materiales. Lima, Perú: MTC.
- MTC. (2015). Provias nacional, Plan operativo institucional. Ministerio de transporte y comunicaciones, Lima.
- Norambuena, J., González, I., Sánchez, M., & Dowling, R. (2017). *Desarrollo de una nueva mezcla asfáltica con propiedades de auto reparación*.
- Padilla, A. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. (Tesina). Universitat Politècnica de Catalunya, Mexico. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Torres, D., & Quispe, E. (2020). *Diseño de mezcla asfáltica auto reparable mediante inducción de calor, para controlar fallas superficiales de tráfico pesado en vías metropolitanas de Lima*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652833>
- Wikipedia la enciclopedia libre, horno microondas. (20 de febrero de 2023). Funcionamiento del horno de microondas. [https://es.wikipedia.org/wiki/Horno\\_de\\_microondas#:~:text=Un%20microondas%20es%20un%20electrodom%C3%A9stico,de%20radio%20de%20alta%20frecuencia](https://es.wikipedia.org/wiki/Horno_de_microondas#:~:text=Un%20microondas%20es%20un%20electrodom%C3%A9stico,de%20radio%20de%20alta%20frecuencia).



Wikipedia la enciclopedia libre, microondas. (20 de febrero de 2023). Usos de  
microondas. <https://es.wikipedia.org/wiki/Microondas>



## ANEXOS

- ANEXO 1:** Granulometría MAC-2
- ANEXO 2:** Ensayos a agregados pétreos
- ANEXO 3:** Diseño de mezcla asfáltica convencional
- ANEXO 4:** Diseño de mezcla asfáltica modificada
- ANEXO 5:** Registro y análisis de temperaturas superficiales
- ANEXO 6:** Registro de rotura de especímenes de prueba
- ANEXO 7:** Análisis de la auto reparación de especímenes
- ANEXO 8:** Certificado de calibración - prensa Marshall
- ANEXO 9:** Gradación para mezcla asfáltica en caliente
- ANEXO 10:** Especificaciones del cemento asfáltico PEN 120-150
- ANEXO 11:** Especificaciones técnicas del cemento asfáltico
- ANEXO 12:** Especificaciones del cemento portland (filler)
- ANEXO 13:** Manual técnico de fibras de acero
- ANEXO 14:** Especificaciones del horno microondas
- ANEXO 15:** Cuadro de valores para estadística
- ANEXO 16:** Matriz de consistencia
- ANEXO 17:** Especificaciones de termómetro infrarrojo
- ANEXO 18:** Certificados de SENAMHI



**ANEXO 19:** Ecuaciones y procedimientos de cálculos del diseño Marshall

**ANEXO 20:** Prototipo de horno microondas auto reparador

**ANEXO 21:** Constancia de Laboratorio de Suelos y pavimentos

**ANEXO 22:** Panel fotográfico

**ANEXO 23:** Documentos de tesis



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JORGE LUIS ROMERO VOLERO  
identificado con DNI 48224789 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA CIVIL

,informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado

Título Profesional denominado:

"DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO FIBRAS DE ACEPO CON LA PROPIEDAD  
DE ANTIREPARACION MEDIANTE INDUCCION DE MICROONDAS EN LA CIUDAD DE PUNO -2021

" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 27 de noviembre del 20 23

FIRMA (obligatoria)



Huella



### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JORGE LUIS ROMERO VALERO  
identificado con DNI 48224789 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
INGENIERIA CIVIL

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado  
 Título Profesional denominado:

"DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO FIBRAS DE ACCERO CON  
LA PROPIEDAD DE AUTOREPARACION MEDIANTE INDUCCION DE MICROONDAS EN LA CIUDAD DE PUNO-2021"

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 27 de Noviembre del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JULIO CARLOS GONZALES QUISPE  
identificado con DNI 44900408 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA CIVIL

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado  
 título Profesional denominado:

"DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA ADICIONANDO FIBRAS DE ACERO CON LA PROPIEDAD DE  
AUTOREPARACIÓN MEDIANTE INDUCCIÓN DE MICROONDAS EN LA CUDDO DE PUNO - 2021

" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

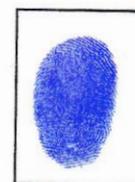
Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcanzan del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 27 de Noviembre del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JULIO CARLOS GONZALES QUISPE, identificado con DNI 44900408 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
INGENIERIA CIVIL

, informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación para la obtención de  Grado

Título Profesional denominado:

"DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA ODICOMANDO FIBRAS DE ACERO CON LA PROPIEDAD DE AUTOREPARACION MEDIANTE INYECCION DE MICROONDAS EN LA CIUDAD DE PUNO-20"

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

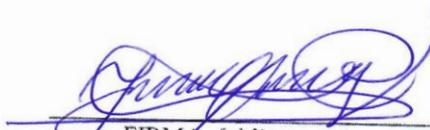
En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 27 de Noviembre del 20 23

  
FIRMA (obligatoria)



Huella