

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Influencia del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobamba — Apurímac 2025

Presentado por:

Mauro Mamerto Peralta Huayna

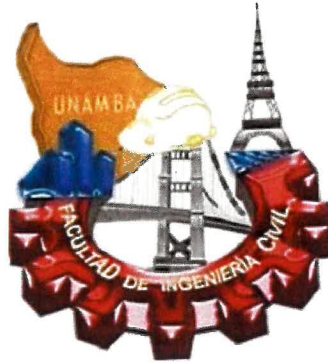
Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2026



**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



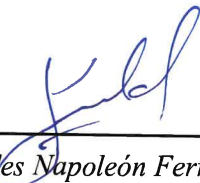
TESIS

**Influencia del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas  
de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobamba — Apurímac 2025**


Presentado por **Mauro Mamerto Peralta Huayna**, para optar el título de Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 26 de enero de 2026 ante el jurado evaluador:

**Presidente:**

  
\_\_\_\_\_  
*Mtro. Diomedes Napoleón Ferrel Sarmiento*

**Primer miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Ing. Edison Ponce Torres*

**Segundo miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Mtro. Américo Roldan Juárez*

**Asesor:**

  
\_\_\_\_\_  
*Ing. Darwin Duhamel Loayza Encalada*



*Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional*

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 026-2026

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la tesis titulada: **Influencia del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobamba — Apurímac 2025**, presentado por el Bach: **MAURO MAMERTO PERALTA HUAYNA**, para optar el título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (8%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 21 de enero del 2026

Atentamente,

C. c.  
Archivo  
REG. N° 081

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
*Herrera*  
Dr. Hetherald Rojas Enriquez  
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA

## **Agradecimiento**

*Expreso mi sincero agradecimiento a mi familia por su constante apoyo y confianza durante todo este proceso. Agradezco también a mis docentes y asesor por su valiosa orientación académica. Finalmente, extendo mi gratitud a todas las personas que hicieron posible la culminación de esta tesis.*



## **Dedicatoria**

*Dedico esta tesis a quienes con su apoyo constante y ejemplo de perseverancia han sido la inspiración para culminar lo que un día solo fue un sueño. A mi familia, por su confianza y motivación, y a mis docentes, por compartir su conocimiento y guiar mi camino académico. Este trabajo es reflejo del compromiso y esfuerzo compartido con todos ellos.*



Influencia del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobamba — Apurímac 2025.

Línea de investigación: Ingeniería de materiales

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>RESUMEN</b>	3
<b>ABSTRACT</b>	4
<b>CAPÍTULO I</b>	5
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	7
1.2.1 Problema general	7
1.2.2 Problemas específicos	7
1.2.3 Justificación de la investigación	7
<b>CAPÍTULO II</b>	13
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b>	13
2.1 Objetivos de la investigación	13
2.1.1 Objetivo general	13
2.1.2 Objetivos específicos	13
2.2 Hipótesis de la investigación	13
2.2.1 Hipótesis general	13
2.2.2 Hipótesis específicas	14
2.3 Operacionalización de variables	15
<b>CAPÍTULO III</b>	17
<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b>	17
3.1 Antecedentes	17
3.1.1 A nivel internacional	17
3.1.2 A nivel nacional	19
3.1.3 A nivel local	21
3.2 Marco teórico	22
3.2.1 Pavimentos flexibles	22
3.2.1.1 Capas estructurales del pavimento flexible	22
3.2.2 Análisis geotécnico en el diseño de pavimentos flexibles	24
3.2.2.1 Importancia de la subrasante	24
3.2.2.2 Parámetros geotécnicos usados en el diseño	24
3.2.2.3 Relación entre capacidad de soporte y espesor de base	25



3.2.3	Material granular de cantera	25
3.2.4	Propiedades físicas de los materiales granulares	26
3.2.4.1	Granulometría y distribución de tamaños de partículas	26
3.2.4.2	Contenido de humedad	27
3.2.4.3	Límites de Atterberg (LL, LP, IP)	27
3.2.4.4	Sales solubles totales	28
3.2.4.5	Partículas chatas y alargadas y partículas con caras fracturadas	28
3.2.4.6	Equivalente de arena	29
3.2.5	Propiedades mecánicas de los materiales granulares	29
3.2.5.1	Abrasión Los Ángeles	30
3.2.5.2	Proctor modificado	30
3.2.5.3	CBR (California Bearing Ratio)	31
3.2.6	Clasificación de suelos	31
3.2.6.1	Sistema SUCS	31
3.2.6.2	Sistema AASHTO	32
3.2.7	Tereftalato de polietileno	33
3.2.8	Incorporación de PET-R en suelos y capas granulares	35
3.2.9	Especificaciones técnicas para materiales de base granular	36
3.2.9.1	Granulometría	36
3.2.9.2	Agregados gruesos	37
3.2.9.3	Agregados finos	37
3.3	Marco conceptual	38
<b>CAPÍTULO IV</b>		42
<b>METODOLOGÍA</b>		42
4.1	Tipo y nivel de investigación	42
4.2	Diseño de la investigación	42
4.3	Descripción ética de la investigación	43
4.4	Población y muestra	43
4.5	Procedimiento	46
4.5.1	Trabajo de campo	46
4.5.2	Preparación del PET reciclado	47
4.5.3	Ensayos en laboratorio	48
4.5.4	Análisis de resultados y comparación	51
4.6	Técnica e instrumentos	53
4.6.1	Técnica	53
4.6.2	Instrumentos	54
4.7	Análisis estadístico	55
4.7.1	Análisis descriptivo	55

4.7.2	Análisis inferencial	56
4.7.3	Herramientas utilizadas	58
<b>CAPÍTULO V</b>		<b>59</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>		<b>59</b>
5.1	Análisis de resultados	59
5.1.1	Resultados de propiedades físicas	59
5.1.2	Resultados de propiedades mecánicas	64
5.1.3	Síntesis comparativa del comportamiento con PET-R	68
5.1.4	Comparación de la base natural con el manual de carreteras EG-2013	70
5.2	Contrastación de hipótesis	71
5.2.1	Prueba de normalidad	71
5.2.2	Contrastación de la hipótesis general	72
5.2.3	Contrastación de la hipótesis específica 1	76
5.2.4	Contrastación de la hipótesis específica 2	77
5.2.5	Contrastación de la hipótesis específica 3	81
5.3	Discusión	83
5.3.1	Discusión en relación con el objetivo general	83
5.3.2	Discusión en relación con objetivo específico N°1	84
5.3.3	Discusión en relación con objetivo específico N°2	85
5.3.4	Discusión en relación con objetivo específico N°3	87
5.3.5	Discusión complementaria en relación con la normativa EG - 2013	88
<b>CAPÍTULO VI</b>		<b>89</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>89</b>
6.1	Conclusiones	89
6.2	Recomendaciones	92
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>93</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>99</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> — Operacionalización de variables	15
<b>Tabla 2</b> — Número de ensayos a realizar en laboratorio	51
<b>Tabla 3</b> — Coeficiente de confiabilidad Alfa de Cronbach	54
<b>Tabla 4</b> — Validadores instrumentales	54
<b>Tabla 5</b> — Resumen de valoración de instrumentos	55
<b>Tabla 6</b> — Contenido de humedad natural del material granular	59
<b>Tabla 7</b> — Límites de Atterberg de la fracción fina	60
<b>Tabla 8</b> — Contenido de sales solubles totales	60
<b>Tabla 9</b> — Equivalente de arena del material granular	61
<b>Tabla 10</b> — Forma y caras fracturadas del agregado grueso (muestra patrón)	62
<b>Tabla 11</b> — Distribución granulométrica global del material	62
<b>Tabla 12</b> — Clasificación del material según SUCS y AASHTO	63
<b>Tabla 13</b> — Tabla resultados promedio del ensayo Proctor modificado	64
<b>Tabla 14</b> — Tabla resultados promedio del CBR al 95 % y 100 % de compactación	66
<b>Tabla 15</b> — Tabla resultado del ensayo de abrasión Los Ángeles (muestra patrón)	68
<b>Tabla 16</b> — Tabla resumen del análisis de la influencia del PET-R	69
<b>Tabla 17</b> — Tabla comparación muestra patrón vs requisitos EG-2013	70
<b>Tabla 18</b> — Tabla prueba de normalidad	72
<b>Tabla 19</b> — Varianza propiedades físicas	73
<b>Tabla 20</b> — Valor de significancia propiedades mecánicas	73
<b>Tabla 21</b> — Tabla resumen del comportamiento de muestra con PET-R	75
<b>Tabla 22</b> — Valor de significancia propiedades mecánicas	76
<b>Tabla 23</b> — Variaciones de máxima densidad seca	78
<b>Tabla 24</b> — Variaciones humedad óptima	78
<b>Tabla 25</b> — Variaciones CBR al 100%	78
<b>Tabla 26</b> — Variaciones CBR al 95%	79
<b>Tabla 27</b> — Dosificaciones adicionales	79
<b>Tabla 28</b> — Comparación de dosificaciones evaluadas	81
<b>Tabla 29</b> — Matriz de consistencia	100



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> — Límites de Atterberg	28
<b>Figura 2</b> — Equivalente de arena	29
<b>Figura 3</b> — Clasificación SUCS	32
<b>Figura 4</b> — Clasificación AASHTO	33
<b>Figura 5</b> — Requerimientos para la granulometría de la base granular	37
<b>Figura 6</b> — Requerimientos y ensayos para el agregado grueso	37
<b>Figura 7</b> — Requerimientos y ensayos para el agregado fino	38
<b>Figura 8</b> — Vista ubicación de cantera	44
<b>Figura 9</b> — Vista de cantera en explotación	46
<b>Figura 10</b> — Extracción y transporte de muestra	47
<b>Figura 11</b> — Preparación de PET-R	48
<b>Figura 12</b> — Ensayos físicos L.L. en laboratorio	49
<b>Figura 13</b> — Preparación de muestra para desgaste Los Ángeles	50
<b>Figura 14</b> — Diagrama de flujo del procedimiento	53
<b>Figura 15</b> — Curva granulométrica global del material	63
<b>Figura 16</b> — Variación de $\gamma_d$ máx con el contenido de PET-R	65
<b>Figura 17</b> — Variación de la humedad óptima con el contenido de PET-R	65
<b>Figura 18</b> — Variación del CBR al 95 % y 100% con contenido de PET-R	67
<b>Figura 19</b> — Resultado análisis granulométrico muestra patrón	102
<b>Figura 20</b> — Resultado cont. de humedad muestra patrón	103
<b>Figura 21</b> — Resultado límites de consistencia muestra patrón	104
<b>Figura 22</b> — Resultado partículas con caras fracturadas	105
<b>Figura 23</b> — Resultado abrasión de Los Ángeles	106
<b>Figura 24</b> — Resultado cotenido de sales solubles	107
<b>Figura 25</b> — Resultado de equivalente de arena M. patrón	108
<b>Figura 26</b> — Resultado de partículas chatas y alargadas	109
<b>Figura 27</b> — Resultado proctor modificado M. patrón repetición N°1	110
<b>Figura 28</b> — Resultado proctor modificado M. patrón repetición N°2	111
<b>Figura 29</b> — Resultado proctor modificado M. patrón repetición N°3	112
<b>Figura 30</b> — Resultado CBR muestra patrón repetición N°1	113
<b>Figura 31</b> — Resultado CBR muestra patrón repetición N°1	114
<b>Figura 32</b> — Resultado CBR muestra patrón repetición N°2	115

<b>Figura 33</b> — Resultado CBR muestra patrón repetición N°2	116
<b>Figura 34</b> — Resultado CBR muestra patrón repetición N°3	117
<b>Figura 35</b> — Resultado CBR muestra patrón repetición N°3	118
<b>Figura 36</b> — Resultado granulométrico + 15% PET reciclado	119
<b>Figura 37</b> — Resultado contenido de humedad + 15% PET reciclado	120
<b>Figura 38</b> — Resultado límites de consistencia + 15% PET reciclado	121
<b>Figura 39</b> — Resultado contenido sales solubles + 15% PET reciclado	122
<b>Figura 40</b> — Resultado equivalente de arena + 15% PET reciclado	123
<b>Figura 41</b> — Resultado proctor modificado + 15% PET reciclado, repetición N°1	124
<b>Figura 42</b> — Resultado proctor modificado + 15% PET reciclado, repetición N°2	125
<b>Figura 43</b> — Resultado proctor modificado + 15% PET reciclado, repetición N°3	126
<b>Figura 44</b> — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°1	127
<b>Figura 45</b> — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°1	128
<b>Figura 46</b> — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°2	129
<b>Figura 47</b> — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°2	130
<b>Figura 48</b> — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°3	131
<b>Figura 49</b> — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°3	132
<b>Figura 50</b> — Granulometría + 25% PET	133
<b>Figura 51</b> — Contenido de humedad + 25% PET	134
<b>Figura 52</b> — Límites de consistencia + 25% PET	135
<b>Figura 53</b> — Cont. Sales solubles + 25% PET	136
<b>Figura 54</b> — Equivalente de arena + 25% PET-R	137
<b>Figura 55</b> — Proctor modificado + 25% PET-R, repetición N°1	138
<b>Figura 56</b> — Proctor modificado + 25% PET-R, repetición N°2	139
<b>Figura 57</b> — Proctor modificado + 25% PET-R, repetición N°3	140
<b>Figura 58</b> — CBR + 25% PET-R, repetición N°1	141
<b>Figura 59</b> — CBR + 25% PET-R, repetición N°1	142
<b>Figura 60</b> — CBR + 25% PET-R, repetición N°2	143
<b>Figura 61</b> — CBR + 25% PET-R, repetición N°2	144
<b>Figura 62</b> — CBR + 25% PET-R, repetición N°3	145
<b>Figura 63</b> — CBR + 25% PET-R, repetición N°3	146
<b>Figura 64</b> — Resultado granulometría + 35% PET-R	147
<b>Figura 65</b> — Resultado contenido de humedad + 35% PET-R	148
<b>Figura 66</b> — Límites de consistencia + 35% PET-R	149
<b>Figura 67</b> — Contenido de sales solubles + 35% PET-R	150
<b>Figura 68</b> — Equivalente de arena + 35% PET-R	151
<b>Figura 69</b> — Proctor modificado + 35% PET-R, repetición N°1	152
<b>Figura 70</b> — Proctor modificado + 35% PET-R, repetición N°2	153

<b>Figura 71</b> — Proctor modificado + 35% PET-R, repetición N°3	154
<b>Figura 72</b> — CBR + 35% PET-R, repetición N°1	155
<b>Figura 73</b> — CBR + 35% PET-R, repetición N°1	156
<b>Figura 74</b> — CBR + 35% PET-R, repetición N°2	157
<b>Figura 75</b> — CBR + 35% PET-R, repetición N°2	158
<b>Figura 76</b> — CBR + 35% PET-R, repetición N°3	159
<b>Figura 77</b> — CBR + 35% PET-R, repetición N°3	160
<b>Figura 78</b> — Resultado proctor modificado + 2.5% PET reciclado	161
<b>Figura 79</b> — Resultado CBR + 2.5% PET reciclado	162
<b>Figura 80</b> — Resultado CBR + 2.5% PET reciclado	163
<b>Figura 81</b> — Resultado proctor modificado + 5% PET reciclado	164
<b>Figura 82</b> — Resultado CBR + 5% PET reciclado	165
<b>Figura 83</b> — Resultado CBR + 5% PET reciclado	166
<b>Figura 84</b> — Valoración experto N°1	167
<b>Figura 85</b> — Valoración experto N°2	168
<b>Figura 86</b> — Valoración experto N°3	169
<b>Figura 87</b> — Constancia de autenticidad	170
<b>Figura 88</b> — Acta de autorización de cantera	171
<b>Figura 89</b> — Certificado de calibración balanza electrica	172
<b>Figura 90</b> — Certificado de calibración balanza electrica	173
<b>Figura 91</b> — Certificado de calibración balanza	174
<b>Figura 92</b> — Certificado de calibración maquina CBR	175
<b>Figura 93</b> — Certificado de calibración maquina CBR	176
<b>Figura 94</b> — Certificado de calibración maquina CBR	177
<b>Figura 95</b> — Certificado de calibracion	178
<b>Figura 96</b> — Certificado de calibración	179
<b>Figura 97</b> — Certificado de calibración	180
<b>Figura 98</b> — Certificado de calibración de equipos	181
<b>Figura 99</b> — Certificado de calibración de equipos	182
<b>Figura 100</b> — Certificado de calibración de equipos	183
<b>Figura 101</b> — Certificado de calibración balanza 0.1g	184
<b>Figura 102</b> — Certificado de calibración balanza 0.1g	185
<b>Figura 103</b> — Certificado de calibración balanza	186
<b>Figura 104</b> — Vista cantera Anta Anta en explotación	187
<b>Figura 105</b> — Ensayo caras fracturadas	187
<b>Figura 106</b> — Abrasión de los Ángeles	188
<b>Figura 107</b> — Ensayo de granulometría por tamizado	188
<b>Figura 108</b> — Ensayo de límites de consistencia	189

<b>Figura 109</b> — Ensayo de Proctor modificado	189
<b>Figura 110</b> — Ensayo proctor modificado + 15% PET-R	190
<b>Figura 111</b> — Ensayo equivalente de arena	190
<b>Figura 112</b> — Ensayo CBR de la muestra patrón	191
<b>Figura 113</b> — Ensayo de expansión y contracción	191
<b>Figura 114</b> — Ensayo de penetración CBR	192
<b>Figura 115</b> — Ensayo de límites de consistencia LL + PET reciclado	192
<b>Figura 116</b> — Ensayo CBR + 35% PET-R	193
<b>Figura 117</b> — Granulometría de muestra patrón + PET reciclado.	193
<b>Figura 118</b> — Abrasión los angeles, tamizado	194
<b>Figura 119</b> — Ensayo CBR + 2.5% PET-R	194



## SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- PET** — Tereftalato de polietileno
- PET-R** —Tereftalato de polietileno reciclado
- CBR** — California Bearing Ratio (índice de soporte California)
- OCH** — Óptimo contenido de humedad
- LL** — Límite líquido
- LP** — Límite plástico
- IP** — Índice de plasticidad
- MTC** — Ministerio de transportes y comunicaciones
- MDS** — Máxima densidad seca
- EG-2013** — Especificaciones generales para construcción

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el incremento en el consumo de plásticos, especialmente del tereftalato de polietileno (PET), ha generado una acumulación significativa de residuos sólidos de difícil degradación. Este problema ambiental se acentúa en países en desarrollo, donde la gestión de residuos y los sistemas de reciclaje aún presentan limitaciones técnicas y económicas, frente a ello, la búsqueda de alternativas de reutilización del PET en aplicaciones de ingeniería se ha convertido en una línea de investigación de interés, tanto por su contribución a la mitigación del impacto ambiental como por la posibilidad de modificar el comportamiento de materiales convencionales.

En el ámbito de la ingeniería vial, las capas granulares que conforman las bases de pavimentos flexibles desempeñan un papel fundamental en la distribución de cargas y en el desempeño estructural del sistema. La calidad de estos materiales se evalúa a partir de sus propiedades físicas y mecánicas, tales como la granulometría, plasticidad, densidad seca máxima y soporte CBR, las cuales deben ajustarse a los criterios establecidos por la normativa vigente, no obstante, en diversas zonas del país, las canteras disponibles presentan materiales que, si bien son utilizados en obra, no siempre cumplen rigurosamente con todos los parámetros recomendados normativamente, lo que hace pertinente evaluar alternativas de modificación o adición que permitan comprender cómo se altera su respuesta física y mecánica, en este contexto, el uso de PET reciclado como componente en mezclas granulares se plantea como una alternativa de interés técnico, ya que permite, por un lado, dar un destino útil a un residuo de alto volumen y, por otro, analizar su influencia sobre el desempeño de la base granular, la incorporación de partículas de PET en la fracción fina del material granular puede alterar parámetros asociados a la plasticidad, la compactabilidad y el soporte, por lo que su efecto requiere ser evaluado de manera sistemática, considerando que el comportamiento del material puede variar en función del rango de dosificación incorporado. La presente investigación se desarrolla en la carretera Tambobamba – Challhuahuacho, en la provincia de Cotabambas, departamento de Apurímac, utilizando material granular procedente de la cantera Anta Anta, empleada en la conformación de la base granular de un pavimento flexible. Sobre este material se analizan sus propiedades físicas y mecánicas en condición natural y posteriormente con la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en diferentes dosificaciones en la fracción



fina, con el fin de determinar la influencia de dicha adición en el comportamiento de la base granular. Los resultados permiten evidenciar que la respuesta del material depende de la dosificación incorporada, identificándose rangos donde el soporte mejora en comparación con la condición natural y rangos donde el desempeño mecánico se reduce. De este modo, el estudio busca aportar evidencia técnica sobre el uso potencial del PET reciclado en bases granulares para pavimentos flexibles, generando información específica para las condiciones de la cantera Anta Anta y del tramo vial Tambobamba – Challhuahuacho, y contribuyendo a la búsqueda de soluciones de ingeniería que integren criterios de desempeño estructural con un aprovechamiento más eficiente de residuos plásticos.

El trabajo de investigación se estructura en seis capítulos. En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema, el enunciado del problema general y específicos, así como la justificación de la investigación. En el Capítulo II se formulan los objetivos generales y específicos, y las hipótesis correspondientes, además de la operacionalización de variables. El Capítulo III desarrolla el marco teórico referencial, incluyendo antecedentes, fundamentos teóricos y conceptos relacionados con bases granulares, PET reciclado y las propiedades evaluadas. En el Capítulo IV se describe la metodología empleada, el tipo y diseño de investigación, la población y muestra, el procedimiento experimental y las técnicas e instrumentos utilizados. El Capítulo V presenta y analiza los resultados obtenidos, así como la contrastación de las hipótesis y la discusión de los hallazgos. Finalmente, en el Capítulo VI se exponen las conclusiones derivadas del estudio y las recomendaciones para futuras aplicaciones y trabajos de investigación.



## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la influencia del tereftalato de polietileno reciclado (PET-R) en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta, utilizada en pavimentos flexibles del tramo Tambobamba – Challhuahuacho, provincia de Cotabambas, Apurímac. El estudio es de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo y nivel descriptivo – comparativo. Se realizaron ensayos de laboratorio sobre una muestra patrón (0% PET-R) y mezclas modificadas con 15%, 25% y 35% de PET-R incorporado en la fracción fina (pasante del tamiz N.º 4); adicionalmente, se efectuaron ensayos complementarios de Proctor modificado y CBR para dosificaciones bajas de 2.5% y 5% PET-R. Las propiedades físicas se evaluaron mediante contenido de humedad, límites de Atterberg, sales solubles totales, partículas chatas y alargadas, partículas con caras fracturadas, equivalente de arena y análisis granulométrico; y las propiedades mecánicas mediante abrasión Los Ángeles, Proctor modificado y CBR. El material natural se clasificó como GP-GC (SUCS) y A-1-a(0) (AASHTO), mientras que las mezclas con PET-R mantuvieron la clasificación GP-GC y migraron a A-2-4(0). Se observó incremento del índice plástico (de 5.71% a 7.10 – 8.32%) y del equivalente de arena (de 54% hasta 77%), así como un ligero aumento del contenido de sales solubles, manteniéndose en niveles bajos, en el ámbito mecánico, la densidad seca máxima disminuyó con el incremento del PET-R y el CBR presentó un comportamiento dependiente de la dosificación, para 15 – 35% se registró una reducción marcada del CBR (de 37.62% y 49.58% en la muestra patrón a 12.36% y 16.08% con 35% PET-R, al 95% y 100% de compactación, respectivamente), mientras que en dosificaciones bajas (2.5% y 5%) se evidenció incremento del CBR respecto a la muestra patrón (hasta 51.75% al 95% y 61.27% al 100% con 2.5% PET-R). En conjunto, el PET-R modifica el comportamiento de la base granular, identificándose un rango bajo con mejora del soporte y un rango alto con deterioro, por lo que su aplicación debe sustentarse en verificación experimental y control de dosificación conforme a los requisitos técnicos aplicables.

**Palabras clave:** *Tereftalato de polietileno reciclado, base granular, pavimento flexible, propiedades físicas, propiedades mecánicas.*



## ABSTRACT

This research aimed to determine the influence of recycled polyethylene terephthalate (PET-R) on the physical and mechanical properties of a granular base produced with material from the Anta Anta quarry, used in flexible pavements along the Tambobamba–Challhuahuacho road section, Cotabambas Province, Apurímac. The study is applied in nature, with a quantitative approach and a descriptive–comparative level. Laboratory testing was conducted on a control sample (0% PET-R) and modified mixtures containing 15%, 25% and 35% PET-R incorporated into the fine fraction (passing sieve No. 4). In addition, complementary Modified Proctor and CBR tests were performed for low PET-R dosages of 2.5% and 5%. Physical properties were assessed through natural moisture content, Atterberg limits, total soluble salts, flat and elongated particles, fractured faces, sand equivalent, and gradation analysis; mechanical properties were evaluated using Los Angeles abrasion, Modified Proctor compaction, and CBR. The natural material was classified as GP-GC (USCS) and A-1-a(0) (AASHTO), while PET-R mixtures remained GP-GC and shifted to A-2-4(0). The plasticity index increased (from 5.71% to 7.10 – 8.32%) and the sand equivalent rose (from 54% up to 77%), with a slight increase in soluble salts that remained at low levels, mechanically, maximum dry density decreased as PET-R content increased, and CBR showed a dosage-dependent response, high dosages (15 – 35%) produced a marked reduction in CBR (from 37.62% and 49.58% in the control sample to 12.36% and 16.08% with 35% PET-R at 95% and 100% compaction, respectively), whereas low dosages (2.5% and 5%) increased CBR compared to the control (up to 51.75% at 95% and 61.27% at 100% compaction with 2.5% PET-R). Overall, PET-R significantly alters granular base behavior, with improved support at low dosages and mechanical deterioration at high dosages; therefore, its application should rely on experimental verification and dosage control in accordance with applicable technical requirements.

**Keywords:** *Recycled polyethylene terephthalate, granular base, flexible pavement, physical properties, mechanical properties.*



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción del problema

A nivel mundial, el crecimiento sostenido de la infraestructura vial y el predominio de pavimentos flexibles han incrementado la demanda de materiales granulares para capas estructurales, especialmente para la base granular, cuya función es distribuir cargas y aportar capacidad de soporte al sistema. Cuando el material granular presenta deficiencias de calidad (gradación inadecuada, finos problemáticos o baja resistencia), el pavimento se vuelve más susceptible a deterioros prematuros y mayores costos de conservación, lo cual ha motivado la búsqueda de estrategias de mejora y optimización de materiales en distintas etapas del ciclo de vida vial, Tasmin y otros (2021). En esa línea, la literatura técnica reconoce que las capas granulares (base y subbase) influyen directamente en el desempeño del pavimento y que sus propiedades físicas y mecánicas deben controlarse mediante ensayos normalizados, debido a que la variabilidad de los agregados puede generar comportamientos distintos aun dentro de un mismo tipo de material, en particular, la respuesta mecánica de los agregados empleados en capas granulares depende de su resistencia, forma, gradación y contenido de finos, lo que justifica caracterizaciones específicas por fuente de cantera, (Yilmaz, 2022).

Paralelamente, el mundo enfrenta una problemática ambiental persistente: el incremento de la producción y generación de residuos plásticos y la limitada capacidad de los sistemas actuales para gestionarlos adecuadamente. Organismos internacionales sostienen que la producción y los residuos plásticos continúan aumentando y que es necesario promover enfoques de economía circular que reduzcan el desperdicio e impulsen el reaprovechamiento de materiales, incluyendo alternativas tecnológicas para valorizar residuos plásticos en aplicaciones industriales, OECD (2022); UNEP – United Nations Environment Programme (2023). En este escenario, se ha incrementado el interés por estudiar el uso de residuos y subproductos en capas de pavimentos flexibles, incluyendo materiales reciclados en capas no ligadas como base y subbase, evaluando su efecto sobre parámetros de desempeño, (Kumar y otros, 2022).



Entre los residuos plásticos de mayor presencia en el ambiente se encuentra el tereftalato de polietileno (PET), cuyo reciclaje y valorización técnica constituye una línea de investigación vigente. Estudios recientes sobre PET reciclados en pavimentos reportan que su incorporación puede modificar el comportamiento de los materiales, pero que el efecto depende del tipo de suelo/agregado, del tamaño/forma del plástico, del método de mezcla y de la dosificación; por ello, no es válido extrapolar resultados sin validar experimentalmente cada material y condición de aplicación, (Singh y otros, 2023).

En el Perú, el diseño y control de calidad de materiales para pavimentos se guía por especificaciones técnicas que establecen requisitos mínimos para el empleo de materiales granulares como base en pavimentos flexibles, incluyendo rangos de gradación y umbrales de propiedades físicas y mecánicas. En paralelo, el ministerio del ambiente impulsa la implementación de la hoja de ruta de acción para reducir la contaminación por PET en el Perú al 2040, en coordinación con la plataforma nacional de acción sobre los plásticos, lo que refuerza la pertinencia de evaluar alternativas de valorización técnica del PET reciclado en aplicaciones de ingeniería. En ese sentido, la evaluación de alternativas de mejora debe sostenerse en ensayos estandarizados y criterios técnicos comparables con lo exigido por la normativa vigente aplicable a obras viales, (MTC, 2013).

A nivel regional, en Apurímac existe una red vial que articula centros poblados y corredores de conexión interprovincial, cuya información técnica se integra en publicaciones oficiales del sistema vial nacional. En este contexto, la disponibilidad y control de calidad de materiales de cantera para capas granulares resulta relevante para la sostenibilidad operativa de las vías y para la toma de decisiones en proyectos de pavimentación y mantenimiento, (MTC, 2023).

En el tramo Tambobamba - Challhuahuacho, donde se emplean materiales de canteras locales para la conformación de capas granulares, se requiere fortalecer la evidencia técnica sobre el desempeño de dichos materiales y sobre el efecto de posibles modificaciones. En particular, existe una necesidad de investigación aplicada para determinar cómo influye la incorporación de PET reciclado (PET-R) en la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta, dado que la respuesta del material modificado puede traducirse en cambios favorables o desfavorables en propiedades físicas y mecánicas relevantes para pavimentos flexibles. Por ello, la problemática se concreta en la insuficiencia de evidencia experimental local que permita sustentar, con



ensayos de laboratorio y comparación técnica, la influencia del PET-R en el comportamiento de la base granular.

## 1.2 Enunciado del problema

### 1.2.1 Problema general

¿Cómo influye la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta, utilizada en pavimentos flexibles del tramo Tambobamba – Challhuahuacho?

### 1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo varían las propiedades físicas de la base granular al incorporar tereftalato de polietileno reciclado en diferentes dosificaciones, en comparación con su condición natural?
- ¿Cómo varían las propiedades mecánicas de la base granular al incorporar tereftalato de polietileno reciclado en diferentes dosificaciones, en comparación con su condición natural?
- ¿Qué dosificación de tereftalato de polietileno reciclado proporciona el comportamiento más adecuado de la base granular en términos comparativos respecto a las demás dosificaciones evaluadas?

### 1.2.3 Justificación de la investigación

- **Justificación teórica**

La base granular es un elemento clave en el desempeño estructural de los pavimentos flexibles, porque controla la transmisión de esfuerzos hacia la subrasante y está directamente relacionada con parámetros como granulometría, plasticidad, densidad seca máxima y CBR. El manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos del MTC resalta que el diseño y evaluación de pavimentos debe sustentarse en la caracterización rigurosa de estos materiales para garantizar estabilidad y vida útil adecuada del sistema vial, MTC (2014), asimismo, en los últimos años se ha fortalecido una línea de investigación que estudia la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado (PET-R) en suelos y capas granulares,



analizando su efecto sobre el contenido óptimo de humedad, la densidad seca máxima y la capacidad de soporte CBR. Por ejemplo, Gómez Salcedo (2024), evaluó la influencia del PET-R en un suelo de la calle Ccechcca (Ayacucho), encontrando variaciones apreciables en el OCH, la MDS y el CBR al incorporar diferentes porcentajes de plástico. De manera similar, Tamay Ravillet (2022), analizó la base granular tratada con PET reciclado triturado en la cantera Chuyabamba (Chota), mostrando que la adición de PET modifica de forma importante las propiedades físico-mecánicas del material granular.

En Colombia, Ramirez Triviño y otros (2018), estudiaron una subbase granular mezclada con PET para vías terciarias y reportaron cambios significativos en el CBR en función de la dosificación del polímero. Estos trabajos se enfocan, en general, en suelos de subrasante o subbases y en rangos de dosificación relativamente bajos (del orden de 0,5 % a 10 % en peso), por lo que existe un vacío de información respecto al comportamiento de bases granulares con porcentajes más elevados de PET-R y en contextos geotécnicos específicos como el de la cantera Anta Anta.

La presente investigación aporta teóricamente al ampliar la evidencia experimental sobre cómo la incorporación de PET-R en dosificaciones evaluadas afecta simultáneamente propiedades físicas y mecánicas de la base granular real, bajo procedimientos normalizados NTP y MTC (INACAL, 2019a; INACAL, 2019b; INACAL, 2014). De este modo, esta investigación no solo describe resultados, sino que delimita el rango de dosificaciones donde el PET-R genera pérdidas importantes de capacidad de soporte, información tan relevante teóricamente como la identificación de mejoras.

- **Justificación técnica**

La evaluación técnica de materiales para bases granulares debe realizarse con métodos estandarizados que permitan comparar resultados entre proyectos y con los requisitos normativos vigentes. En el contexto peruano, los ensayos de contenido de humedad (NTP 339.127), análisis granulométrico (NTP 339.128), equivalente de arena (NTP 339.146),



compactación Proctor modificado (NTP 339.141) y CBR (MTC E-132 / ASTM D1883) son referencia obligatoria para el control de calidad de materiales de base.

Diversas investigaciones que incorporan PET a capas granulares han utilizado estos ensayos para cuantificar el efecto del aditivo, por ejemplo, Tamay Ravillet (2022), empleó Proctor modificado y CBR para comparar la base granular natural con la misma base tratada con PET reciclado triturado, evidenciando incrementos en el CBR, pero aún por debajo del mínimo exigido por el MTC, lo que demuestra la importancia de cuantificar técnicamente los límites de uso del PET, asimismo, en Costa Rica, Carballo Rojas y otros (2023), estudiaron la base granular estabilizada con cemento y fibras de PET reciclado, encontrando que la incorporación controlada de fibras puede mejorar el comportamiento mecánico de la mezcla, siempre que se respeten las especificaciones de la normativa.

En esta tesis, la caracterización física y evaluación mecánica del material de la cantera Anta Anta, tanto en condición natural como con la incorporación en distintas dosificaciones de PET-R, se realiza con los mismos procedimientos normalizados, lo que genera una base de datos técnicamente robusta y comparable con estudios previos. El hecho de que los resultados muestren reducciones de la densidad seca máxima y del CBR a medida que se incrementa el contenido de PET-R, especialmente a 25 % y 35 %, permite definir límites de dosificación desde el punto de vista estructural y descartar rangos que podrían conducir a fallas prematuras del pavimento, esta información técnica es esencial para que ingenieros y entidades públicas evalúen de manera responsable la posible aplicación del PET-R en bases granulares de proyectos futuros.

- **Justificación práctica**

En la práctica de la ingeniería vial peruana, es frecuente encontrar materiales de cantera que no cumplen completamente con los requisitos de gradación, plasticidad o CBR para ser usados como base granular, lo que obliga a mezclar fuentes o recurrir a soluciones de estabilización para alcanzar las especificaciones Tamay Ravillet (2022). En el caso de la cantera Anta Anta,



empleada en el tramo Tambobamba – Challhuahuacho, contar con una caracterización detallada del material tanto en su estado natural como modificado con PET-R ofrece una herramienta práctica directa para la toma de decisiones en futuras intervenciones de mantenimiento o mejoramiento del pavimento. Además, estudios como el de Chata Pacompia (2019), que analizó la capacidad portante de una subbase granular con material reciclable PET en Puno, muestran que las conclusiones obtenidas en laboratorio se han utilizado como insumo para propuestas de mejora en vías urbanas concretas. De manera análoga, los resultados de la presente tesis pueden ser consultados por gobiernos locales y regionales al momento de evaluar alternativas de reutilización de residuos plásticos y selección de materiales granulares para obras viales en la zona de influencia de Tambobamba, reduciendo la dependencia exclusiva de estudios generalistas y proporcionando datos específicos de una cantera real.

- **Justificación económica**

El uso intensivo de agregados naturales en la construcción de carreteras implica costos asociados a exploración, explotación, chancado, transporte y gestión de canteras, que pueden ser significativos en zonas donde las fuentes se encuentran alejadas de los frentes de obra, MTC (2014). La incorporación de PET-R como fracción fina sustituta de parte del material granular tiene el potencial de reducir, al menos parcialmente, el volumen de agregados vírgenes necesarios, lo que se traduce en ahorros económicos y en una menor presión sobre las fuentes de materiales, siempre que el desempeño mecánico se mantenga dentro de rangos aceptables. Trabajos como el de Tamay Ravillet (2022), en Chota muestran que la adición de PET triturado permite mejorar ciertas propiedades respecto al material natural y, simultáneamente, reducir el volumen de residuos plásticos que de otro modo deberían gestionarse como desecho, lo que representa un beneficio económico y logístico para la localidad. De manera complementaria, la OECD (2022), ha demostrado que la producción y el manejo actual de plásticos generan costos económicos elevados: la producción de plásticos se duplicó entre 2000 y 2019, mientras que los residuos plásticos aumentaron a 353 millones de toneladas, de las cuales solo un 9 % se recicla, generando importantes externalidades ambientales y económicas. En este contexto, la



tesis proporciona datos cuantitativos sobre cómo diferentes porcentajes de PET-R afectan el CBR y la compactación de la base granular específica. Esta información permite evaluar, con criterios de costo - beneficio, hasta qué punto resulta económicamente razonable incorporar PET-R sin comprometer el desempeño estructural, y cuándo una mayor dosificación dejaría de ser viable por la pérdida de capacidad portante.

- **Justificación social**

El inadecuado manejo de residuos sólidos, en particular de plásticos de un solo uso como las botellas de PET, tiene consecuencias directas en la calidad de vida de la población. En Perú, se estima que en 2022 se generaron más de 1,02 millones de toneladas de residuos plásticos, de las cuales aproximadamente el 49 % fue manejado de forma inadecuada, acumulándose en áreas degradadas, cuerpos de agua o siendo quemado a cielo abierto, GLOBAL PLASTIC ACTION PARTNERSHIP (GPAP) (2023). Además, se reporta, que uno de cada diez kilos de basura generada por los peruanos es plástico y que cerca del 46 % de los residuos encontrados en playas corresponde a este material, con tiempos de degradación del orden de cientos de años, WWF PERÚ (2018). En este escenario, explorar alternativas de valorización de residuos como el PET-R en infraestructura vial tiene una justificación social clara: contribuye a visibilizar soluciones basadas en la ingeniería para reducir la presión de los residuos sobre el entorno urbano y rural, a la vez que fomenta una cultura de reaprovechamiento y economía circular. La presente investigación genera evidencia científica sobre una aplicación concreta, la incorporación de PET-R en bases granulare, que puede ser comunicada a autoridades locales, empresas constructoras y comunidades como parte de estrategias más amplias de gestión de residuos y mejora de la infraestructura vial, aportando al bienestar y seguridad de los usuarios.

- **Justificación ambiental**

La contaminación por plásticos se ha consolidado como un problema ambiental global. Informes del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente señalan que la producción mundial de plásticos alcanza actualmente del orden de 400 millones de toneladas al año, y que solo una



fracción cercana al 9 % se recicla, mientras que el resto se incinera, se deposita en rellenos o termina disperso en ecosistemas terrestres y marinos, UNEP – United Nations Environment Programme (2021). La OECD (2022), advierte, asimismo, que, de mantenerse las tendencias actuales, la generación de residuos plásticos podría triplicarse hacia 2060, intensificando los impactos ambientales y climáticos asociados. Frente a esta situación, el informe Turning off the Tap de UNEP plantea la necesidad de soluciones basadas en la economía circular, donde la reutilización y el reaprovechamiento de plásticos se integren en cadenas productivas, reduciendo la extracción de recursos vírgenes y la generación de desechos, UNEP – United Nations Environment Programme (2021). La incorporación controlada de PET-R en materiales de construcción, como suelos y capas granulares, es una de las estrategias investigadas para dar un segundo uso a estos residuos y disminuir su presencia en vertederos informales y ambientes naturales, Gómez Salcedo (2024). Aunque los resultados de esta tesis evidencian que, en la cantera Anta Anta, las dosificaciones de evaluadas de PET-R tienden a reducir el CBR y la densidad seca respecto a la muestra patrón, documentar estas limitaciones tiene un valor ambiental claro: permite evitar aplicaciones inadecuadas del PET-R que podrían generar fallas prematuras del pavimento, incrementando las necesidades de reconstrucción, consumo de recursos y emisiones asociadas. En lugar de promover el uso indiscriminado de residuos, la investigación aporta criterios técnicos para definir cómo y hasta dónde es ambientalmente responsable incorporar PET-R en bases granulares, alineando la gestión de residuos plásticos con la seguridad y durabilidad de la infraestructura vial.



## **CAPÍTULO II OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1 Objetivos de la investigación**

#### **2.1.1 Objetivo general**

Determinar la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta, utilizada en pavimentos flexibles del tramo Tambobamba – Challhuahuacho.

#### **2.1.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades físicas de la base granular en su condición natural y con la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas.
  
- Evaluar las propiedades mecánicas de la base granular en su condición natural y con la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas.
  
- Identificar, a partir de la comparación de resultados, la dosificación de tereftalato de polietileno reciclado que proporciona el comportamiento más adecuado de la base granular en relación con las demás dosificaciones evaluadas.

### **2.2 Hipótesis de la investigación**

#### **2.2.1 Hipótesis general**

La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado modifica las propiedades físicas y mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.



### 2.2.2 Hipótesis específicas

- La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas produce variaciones en las propiedades físicas de la base granular respecto a su condición natural.
- La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas produce variaciones en las propiedades mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.
- Existe al menos una de las dosificaciones de tereftalato de polietileno reciclado evaluadas que proporciona un comportamiento más adecuado de la base granular en comparación con las demás dosificaciones analizadas.



### 2.3 Operacionalización de variables

Tabla 1 — Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad De Medida	Instrumento
<b>V.I.</b> Tereftalato de polietileno reciclado	El PET es un material plástico muy transparente, tonalidad verde e incoloro, mayormente se utiliza en la fabricación de botellas para aguas minerales, limonadas y gaseosas (CEPIS, 2003)	Es la cantidad y tamaño del tereftalato de polietileno reciclado incorporado a la base granular, medido a través de la granulometría del PET triturado y la dosificación en porcentaje respecto al peso seco del material granular. La variable se controla mediante el tamizado del material y la medición precisa de su masa para obtener los porcentajes establecidos en el diseño experimental.	Tamaño del PET reciclado	Diámetro del PET reciclado	mm	Tamices
			Dosificación del PET reciclado	Porcentajes de PET reciclado	% en peso	Balanza eléctrica Aproximación a 0.1 g
<b>V.D.</b> Propiedades físicas y mecánicas de la base granular	El soporte principal en pavimentos flexibles se encuentra en la base granular, situada entre la subbase y la capa de rodadura. La mayor parte de las cargas viales son absorbidas	Son los valores obtenidos mediante ensayos estandarizados que permiten cuantificar el comportamiento físico y mecánico de la base granular en estado natural		Contenido de Humedad	%	Ensayo de contenido de humedad NTP 339.127
				Plasticidad	%	Ensayo para determinar LL, LP e IP MTC E 111-200

	<p>por ella y puede estar formada por materiales granulares naturales, estabilizados o combinaciones de bituminosas. Su papel económico se asemeja al de la subbase, disminuyendo espesores a través de la utilización de materiales más asequibles (MONTEJO, 2002)</p>	<p>y con la incorporación del PET reciclado. La variable se mide mediante la determinación del contenido de humedad, plasticidad, partículas chatas y alargadas, partículas con caras fracturadas, equivalente de arena, granulometría, abrasión Los Ángeles, humedad óptima y CBR, empleando métodos y normas técnicas vigentes (NTP, MTC y ASTM).</p>	Propiedades físicas	Contenido de sales	%	Ensayo de sales solubles totales en suelos MTC 219-2000
				Partículas chatas y alargadas	%	Ensayo de partículas chatas y alargadas MTC E 223, ASTM D4791
				Partículas con caras fracturadas	%	Ensayo de partículas con caras fracturadas MTC E 2010, ASTM D 5821
				Equivalente de arena	%	Ensayo de equivalente de arena según MTC E 114, ASTM D 241, AASHTO T 176
				Tamaño de partículas	mm	Ensayo Granulométrico MTC E-107-99
			Propiedades Mecánicas	Abrasión Los Ángeles	%	Ensayo abrasión Los Ángeles MTC E 207-2000
				% Optimo contenido de Humedad	%	Ensayo de Proctor Modificado MTC E 115-2000
				Índice de CBR	%	Ensayo CBR MTC E 132-2000

## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 3.1 Antecedentes

##### 3.1.1 A nivel internacional

- a) Singh y otros (2023), en su artículo titulado “Innovative Integration of Recycled Plastics for Flexible Pavement Design”, presentaron como propósito general evaluar el efecto de polímeros termoplásticos reciclados en diseños de pavimentos flexibles para mejorar su resistencia mecánica. Presentaron una metodología experimental, donde agregaron polímeros tipo PET en diversas proporciones de 8%, 10%, 12% y 14%. Los hallazgos que presentaron fueron que al agregar el 10% en peso mostró una resistencia mecánica superior a la de las otras adicciones, evidenciando la mejora en su resistencia, siendo este porcentaje el óptimo a emplear. Concluyeron que la incorporación de este material mejoró considerablemente las propiedades mecánicas de los pavimentos flexibles, siendo efectivo para una solución viable y efectiva en cuanto a gestión de residuos plásticos. El aporte que nos brinda este estudio se centra, que, aunque se centra en mejorar el betún, más no la base granular, presenta una importancia, ya que radica en el poder demostrar que al incorporar residuos plásticos se logra mejorar el rendimiento estructural de los pavimentos.
- b) Carballo Rojas y otros (2023), en su revista titulada “Analysis of a cement-treated base with the addition of recycled PET fibers”, formularon como punto clave evaluar el efecto de fibras PET recicladas como reemplazo parcial del cemento con el fin de estabilizar la base y subbase granular. Establecieron como metodología un diseño cuasiexperimental, donde incorporaron 0.2%, 0.4% y 0.6% de PET y 2.5% de cemento. Los hallazgos encontrados demostraron que al incorporar el 2% de PET los valores de la M.D.S incrementaron. De igual manera con su resistencia, la cual fue de 3.3 Mpa incrementado un 12.5% a diferencia del patrón, superando lo mínimo que exigen que tiene un valor de 3.0 Mpa. Concluyeron que al emplear los residuos PET como mejoramiento para bases y subbases lograron disminuir la cantidad de material de cemento, facilitando a



presentar una disminución de los costos en las construcciones viales. Este estudio es relevante, dado que resalta la importancia de mejorar el desempeño mecánico de la base y subbase granular.

- c) Ali y otros (2024), en su estudio titulado “Performance evaluation of flexible pavement using polyethylene terephthalate(PET)”, presentaron como finalidad analizar los beneficios y viabilidad al agregar PET en pavimentos flexibles, con el fin de optimizar su resistencia mecánica. Emplearon un estudio cuasiexperimental, donde agregaron 3.5%, 4%, 5%, 5.5% y 6% de PET reciclado, los resultados mostraron que al agregar este insumo se logró mejorar la resistencia en un 52%, de igual manera, se pudo registrar una disminución en cuanto a la profundidad en un 40%. Concluyeron que, al añadir este insumo como mejora, se logra obtener resultados positivos, siendo una alternativa viable para mejorar sus características. Esta revista de estudio, aunque se centra en mezclas, los resultados positivos demuestran que este tipo de polímeros podría optimizar la base granular respecto a sus características físicas y mecánicas.
- d) Barboza y otros (2025), en su artículo de congreso titulado “Influence of Recycled PET Particle Size on the Improvement of Sandy Subgrades for Flexible Pavements”, evaluaron la influencia de la incorporación de PET reciclado triturado en el comportamiento mecánico de un suelo granular usado como capa de apoyo en pavimentos flexibles. Emplearon una metodología experimental, incorporando 2%, 5% y 7% de PET en un suelo clasificado como SP-SM (arena mal gradada con limo y grava). Realizaron ensayos Proctor Modificado y CBR al 95% y 100% de la máxima densidad seca, evidenciando que la adición de PET reduce la densidad seca máxima y aumenta la humedad óptima: el suelo natural presentó  $\gamma_d \text{ máx} = 2.126 \text{ g/cm}^3$  y  $w_{\text{ópt}} = 9.5\%$ , mientras que con 5% PET bajó a  $\gamma_d \text{ máx} = 2.024 \text{ g/cm}^3$  y subió a  $w_{\text{ópt}} = 11.1\%$ . En el CBR, el suelo natural tuvo 8.3% (95%) y 13.2% (100%); con 5% PET alcanzó 15.2% (95%) y 22.8% (100%), mostrando el mejor desempeño; sin embargo, con 7% PET el CBR disminuyó a 9.6% (95%) y 15.8% (100%), atribuyendo la caída a interferencia/exceso de partículas PET dentro de la matriz granular. Concluyeron que existe una dosificación óptima y que incrementos por encima de ese óptimo pueden reducir la capacidad portante, por lo que el control de dosificación y granulometría del PET es determinante.



### 3.1.2 A nivel nacional

- a) Tamay Ravillet (2022), en su tesis que lleva como nombre “análisis de las propiedades físico-mecánicas de la base granular tratada con adición de PET reciclado triturado, Cantera Chuyabamba, Chota, 2021”, emplearon como idea principal analizar el impacto del PET en las propiedades de la base granular obtenida de la cantera Chuyabamba. La metodología empleada fue aplicativa con un diseño cuasiexperimental, donde emplearon porcentajes del 10%, 20% y 30% de PET. Los resultados alcanzados fueron que el CBR incrementó hasta un 78.20% siendo el porcentaje óptimo el 20%. Asimismo, la diferencia es de 1.80%, lo que señala una mejora en cuanto a su resistencia. Por último, se logró disminuir el 90% de los residuos en calles y botaderos, aportando un beneficio positivo al medio ambiente. Concluyó que al incorporar este insumo reciclado se mejoraron la base granular, sin embargo, no llegó a cumplir completamente los requisitos del MTC. Es por eso por lo que recomendó ajustes en las proporciones o en el proceso de la compactación, con el fin de que pueda ser una alternativa sostenible para su uso en construcciones viales.
- b) Flores Zánchez (2023), en la tesis “Efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el material granular para uso en bases y subbases de pavimento” (Universidad Nacional de Ingeniería), evalúa el uso combinado de PET reciclado y cal como agentes de mejoramiento de un material granular empleado en capas estructurales. Utiliza un enfoque aplicado y diseño experimental, con diferentes porcentajes de PET (2 %, 4 % y 6 %) y contenidos de cal, analizando granulometría, límites de consistencia, Proctor modificado y CBR. Los resultados muestran que ciertas combinaciones de PET y cal pueden incrementar el CBR y reducir la plasticidad, pero también pueden disminuir la densidad seca máxima debido a la menor densidad del PET.
- c) Nima Puse (2023), en su estudio “Influencia de las carpetas asfálticas recicladas en las propiedades físicas y mecánicas de bases granulares para pavimento flexible, Chiclayo 2021”. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia de la incorporación de carpetas asfálticas recicladas (CAR) en las propiedades físicas y mecánicas de bases granulares para pavimentos flexibles, mediante la realización de ensayos de mecánica de suelos y la comparación de los resultados con los requisitos establecidos en la EG-2013 y la norma CE 010

Pavimentos Urbanos. La metodología consideró el uso de material granular procedente de la cantera Hitos–La Cría como muestra patrón y CAR obtenidas en cuatro sectores de la ciudad de Chiclayo, elaborando nueve mezclas entre material al 100% de cantera y combinaciones con 5% y 10% de CAR. Los resultados evidenciaron que, una vez trituradas, las CAR mantienen características físicas y mecánicas compatibles con el material granular convencional, cumpliendo los parámetros normativos; asimismo, se identificó que la mezcla con 10% de CAR presentó la mayor densidad seca máxima y los valores más altos de CBR, alcanzando hasta 137.50% a la máxima densidad seca y una penetración de 0.1”, en conclusión, la investigación demostró que la incorporación del 10% de CAR en bases granulares es técnica, económica y ambientalmente viable.

- d) Mogollon Palacios y otros (2024), en su estudio “Incorporación de partículas de plástico reciclado (PET) para mejorar propiedades en bases granulares para pavimentos de caminos de bajo tránsito”, El presente estudio tiene como objetivo evaluar la incorporación de tereftalato de polietileno (PET) triturado en el afirmado procedente de la cantera La Obrilla. Se busca determinar si la adición de este material mejora las propiedades físicas y mecánicas de las bases granulares destinadas a caminos de bajo tránsito. El análisis preliminar del suelo natural indicó que no satisfacía los requisitos mínimos establecidos por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Se obtuvo un valor de CBR del 70% a una máxima densidad seca del 100%. En consecuencia, se consideró necesario mejorar su desempeño mediante la incorporación de PET triturado en partículas de tamaño superior a 2 mm. Se llevaron a cabo mezclas con tres dosificaciones de PET, correspondientes al 2%, 4% y 6% del peso seco del suelo. En total, se realizaron 25 ensayos que abarcaron tanto la caracterización física como la mecánica de las muestras. Los resultados indicaron que la incorporación del 4% de PET produjo la mejora más significativa en el valor CBR a la máxima densidad seca, lo que se considera como la dosificación óptima. Asimismo, se registraron modificaciones favorables en la plasticidad del material. Se identificó que el material granular no procesado exhibió una discontinuidad en la gradación fina al ser comparado con la gradación B estipulada en la normativa. En conclusión, la investigación evidencia que la inclusión de PET tiene un impacto favorable en ciertas propiedades físicas y mecánicas de los materiales granulares empleados en la construcción de bases y subbases para caminos de bajo tránsito.



### 3.1.3 A nivel local

- a) Flores Sánchez (2024), en la tesis titulada “Efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR empleando material de cantera para afirmado, Abancay – Apurímac – 2023”, tiene como objetivo principal analizar los atributos físicos y mecánicos de un material granular destinado a afirmado, proveniente de la cantera Condebamba, al incorporar plástico reciclado PET y cal; emplea un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y diseño experimental, realizando la caracterización completa del material de cantera (granulometría, límites de consistencia, abrasión Los Ángeles, equivalente de arena, Proctor modificado y CBR), y posteriormente elaborando mezclas con cinco niveles de incorporación combinada de PET y cal (1 %, 2 %, 3 %, 4 % y 5 %). Los resultados muestran que la incorporación de PET + cal reduce la densidad seca máxima, aumenta ligeramente la humedad óptima y mejora el valor de CBR respecto al material patrón, identificándose una dosificación óptima de 3 % PET + 3 % cal, que proporciona el mayor incremento del CBR manteniendo un comportamiento compacto adecuado. El autor concluye que el plástico reciclado PET, acompañado de cal, puede emplearse como aditivo de mejoramiento en materiales granulares para afirmado en Abancay.
- b) Quispe Serrano y otros (2019), en su tesis titulada “Influencia de la incorporación de plástico reciclado triturado - PET en el mejoramiento del suelo a nivel de sub rasante en la prolongación de la Av. Micaela Bastidas, Tamburco – Abancay, 2018”, estudiaron el mejoramiento de un suelo de subrasante de baja capacidad de soporte mediante la incorporación de plástico reciclado triturado PET obtenido del reciclaje de botellas descartables procesadas industrialmente. La investigación se realizó con enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y diseño experimental, siguiendo la Norma Técnica Peruana y el Manual de Ensayos de Materiales del MTC para la caracterización del suelo: granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR, tanto en condición natural como con incorporación de PET. En una primera etapa se efectuaron ensayos preliminares de CBR al 2 % de PRT–PET para seleccionar la granulometría y textura más apropiadas del aditivo; se determinó como granulometría óptima un rango de tamaños entre 9,50 mm y 0,075 mm y como textura ideal la ondulada. En una segunda etapa, para establecer la dosificación óptima, se realizaron ensayos de CBR con distintos porcentajes de incorporación: para PRT–PET de textura lisa se evaluaron dosificaciones de 1 %,



2 %, 3 %, 4 % y 5 %, mientras que para PRT–PET de textura ondulada se consideraron dosificaciones de 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 % y 6 % respecto al peso seco del suelo. Los resultados indicaron que la dosificación óptima de 5 % de PRT–PET ondulado elevó el CBR de la subrasante de 3,4 % a 7,8 % (incremento aproximado de 129 %) y redujo la expansión de 1,1 % a 0,6 % (reducción de 45 %), logrando que el suelo pase de ser una subrasante insuficiente o pobre a una subrasante regular para el diseño de pavimentos. Además, las autoras señalan el beneficio ambiental de reutilizar botellas de PET como aditivo de mejoramiento, en lugar de disponerlas como residuo.

## 3.2 Marco teórico

### 3.2.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles son estructuras formadas por capas superpuestas de materiales granulares y ligantes asfálticos, cuya función principal es distribuir las cargas del tránsito hacia la subrasante de manera que las tensiones no superen su capacidad de soporte. En este tipo de pavimentos, la mayor parte de las deformaciones se concentran en las capas inferiores y el sistema trabaja por la interacción entre capas, a diferencia de los pavimentos rígidos, donde la losa de concreto soporta gran parte de los esfuerzos, (Huang, 2004).

De acuerdo con el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, los pavimentos flexibles se diseñan considerando las propiedades mecánicas de cada capa, el tipo y magnitud del tránsito, las condiciones climáticas y la resistencia de la subrasante, de manera que se obtenga una sección estructural capaz de brindar una vida útil adecuada y una condición de servicio aceptable, (MTC, 2014).

#### 3.2.1.1 Capas estructurales del pavimento flexible

La estructura de un pavimento flexible comprende las siguientes capas:

- **Carpeta asfáltica (superficie de rodadura)**

Es la capa superior en contacto directo con las acciones del tránsito y del ambiente. Está constituida por mezclas asfálticas en caliente o en frío, cuya función es proporcionar una superficie uniforme, antideslizante y resistente al desgaste, además de contribuir a la distribución de las cargas



hacia las capas inferiores. La calidad de la carpeta está asociada a propiedades como la estabilidad Marshall, flujo y vacíos de aire, así como a la resistencia a deformaciones permanentes y a la fatiga, (Huang, 2004; MTC, 2014).

- **Base granular**

La base granular es la capa estructural ubicada inmediatamente debajo de la carpeta asfáltica, compuesta por material granular seleccionado y compactado. Su función principal es distribuir las cargas hacia la subbase y la subrasante, proporcionando soporte estructural y estabilidad al pavimento. Según el MTC, debe cumplir estrictos requisitos de granulometría, baja plasticidad y resistencia mecánica, incluyendo parámetros como equivalente de arena, abrasión Los Ángeles, partículas chatas y alargadas, y un CBR mínimo, para garantizar su desempeño durante la vida útil del pavimento, (MTC, 2014).

El soporte principal en pavimentos flexibles se encuentra en la base granular, situada entre la subbase y la capa de rodadura. La mayor parte de las cargas viales son absorbidas por ella y puede estar formada por materiales granulares naturales, estabilizados o combinaciones de bituminosas. Su papel económico se asemeja al de la subbase, disminuyendo espesores a través de la utilización de materiales más asequibles, (Montejo, 2002).

- **Subbase granular**

La subbase es una capa granular de calidad inferior a la base, ubicada entre esta y la subrasante, cuya función es complementar la distribución de cargas, mejorar el drenaje y actuar como transición y separación estructural, evitando la migración de finos hacia la base. Además, contribuye a reducir deformaciones por expansión y variaciones de humedad, limita el ascenso capilar y puede disminuir el espesor y costo de las capas superiores; incluso puede omitirse cuando la subrasante presenta adecuada capacidad de soporte, (Huang, 2004; MTC, 2014; Montejo, 2002).

- **Subrasante**

La subrasante es el suelo de fundación que soporta toda la estructura del pavimento, ya sea terreno natural compactado o relleno mejorado, y se conforma mediante los movimientos de tierra de la plataforma vial, su calidad influye directamente en el diseño y espesor total del pavimento, ya que su capacidad de soporte evaluada comúnmente mediante el CBR condiciona los espesores de base y subbase según métodos empíricos y mecanicistas. Cuando presenta bajo CBR, debe mejorarse o estabilizarse hasta alcanzar valores mínimos cercanos al 6 %; de lo contrario, se requiere aumentar el espesor de las capas granulares o aplicar soluciones de estabilización más exigentes para asegurar el adecuado desempeño estructural, (Huang, 2004; MTC, 2014).

### **3.2.2 Análisis geotécnico en el diseño de pavimentos flexibles**

#### **3.2.2.1 Importancia de la subrasante**

La subrasante es el “fundamento” del pavimento y su comportamiento controla la magnitud de las deformaciones y el desarrollo de grietas, hundimientos y ahuellamientos. El MTC resalta que la capacidad de soporte de la subrasante debe determinarse mediante ensayos CBR y, cuando sea necesario, mediante parámetros elásticos (módulos resilientes), para que el diseño estructural garantice la seguridad y durabilidad del pavimento, (MTC, 2014).

Huang (2004), señala que subrasantes con baja capacidad de soporte (CBR bajos) requieren espesores mayores de base y subbase para limitar las tensiones transmitidas, mientras que subrasantes de mejor calidad permiten secciones más esbeltas y económicas.

#### **3.2.2.2 Parámetros geotécnicos usados en el diseño**

En los métodos empíricos y mecanicistas – empíricos de diseño de pavimentos flexibles, los parámetros geotécnicos y mecánicos son fundamentales para evaluar el comportamiento estructural de cada capa, entre ellos destaca el CBR (California Bearing Ratio) para subrasante, subbase y base, que determina la capacidad de soporte y condiciona el espesor de las capas superiores, también se consideran el módulo resiliente

del suelo de fundación y de los materiales granulares, que refleja la recuperación elástica ante cargas repetidas, y el módulo dinámico de las mezclas asfálticas, que indica rigidez bajo carga dinámica. Otros parámetros relevantes son la relación de Poisson, la resistencia al corte y los parámetros de fatiga, útiles para prever deformaciones permanentes y fisuración por tránsito. El CBR sigue siendo central en métodos simplificados y empírico-mecanicistas, sirviendo de base para correlaciones con módulos elásticos que permiten dimensionar espesores y rigidez para garantizar el desempeño estructural del pavimento durante su vida útil, (Ramirez Triviño y otros, 2018; Huang, 2004).

### **3.2.2.3 Relación entre capacidad de soporte y espesor de base**

En los métodos basados en CBR, como el de la AASHTO o metodologías derivadas, el espesor de base granular aumenta a medida que disminuye el CBR de la subrasante, con el fin de limitar las deformaciones permanentes y las tensiones en el terreno natural. Estudios como los de Huang (2004) y análisis recientes de sistemas bicapa (base granular – subrasante) muestran que el módulo de la base y su espesor influyen fuertemente en las tensiones en la parte superior de la subrasante y en la vida a fatiga de la carpeta asfáltica.

### **3.2.3 Material granular de cantera**

Los materiales de cantera empleados en bases y subbases granulares constituyen un elemento fundamental en el desempeño estructural de los pavimentos flexibles, por lo que deben cumplir estrictas exigencias de resistencia, durabilidad, adecuada gradación granulométrica y forma de partículas. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones establece que los agregados destinados a base granular deben presentar granulometría dentro de franjas especificadas para asegurar una correcta compactación y un adecuado intertrabazón, contenido limitado de finos plásticos e índice plástico reducido o nulo para evitar comportamientos expansivos o pérdida de estabilidad ante la humedad, así como resistencia suficiente al desgaste medida mediante el ensayo de abrasión Los Ángeles. Asimismo, se exige un porcentaje mínimo de partículas con caras fracturadas que garantice fricción interna y resistencia al corte, y un porcentaje máximo de partículas chatas y alargadas para prevenir la disminución de la estabilidad estructural.



Cuando estos requisitos no se cumplen, el comportamiento de la estructura granular se ve comprometido, pudiendo presentarse deformaciones permanentes o ahuellamientos por densificación insuficiente o excesiva plasticidad de los finos, fisuración y pérdida progresiva de soporte debido a la degradación de los agregados bajo cargas repetidas de tránsito, así como reducción de la resistencia al corte por pérdida de intertrabazón cuando predominan partículas de forma inadecuada, diversos estudios en carreteras de bajo y medio tránsito evidencian que el empleo de materiales con valores de CBR inferiores a los mínimos establecidos o con propiedades físicas fuera de los rangos normativos incrementa la susceptibilidad a fallas prematuras, disminuyendo la vida útil del pavimento y elevando los costos de mantenimiento, (MTC, 2014; Tamay Ravillet, 2022).

### **3.2.4 Propiedades físicas de los materiales granulares**

Las propiedades físicas de los materiales granulares influyen directamente en su comportamiento mecánico y en su desempeño como capas de base y subbase, asimismo en Perú, los ensayos físicos se rigen principalmente por normas técnicas peruanas NTP e instrucciones del MTC para suelos y agregados, (INACAL, 2019a; INACAL, 2019b; MTC, 2014).

#### **3.2.4.1 Granulometría y distribución de tamaños de partículas**

El análisis granulométrico permite determinar la distribución de tamaños de partículas en un suelo o material granular mediante tamizado y, cuando es necesario, sedimentación. La Norma Técnica Peruana NTP 339.128 establece el método para el análisis granulométrico de suelos granulares, indicando los procedimientos para determinar los porcentajes que pasan por cada tamiz normalizado y definir las fracciones de grava, arena y finos, (INACAL, 2019).

La distribución granulométrica condiciona la compacidad, la permeabilidad y la resistencia al esfuerzo cortante. Los suelos bien graduados (curvas granulométricas continuas) tienden a alcanzar mayores densidades secas y mejor trabazón interna, mientras que los suelos mal graduados pueden presentar vacíos excesivos o contactos ineficientes entre partículas. En el sistema SUCS, las gravas y arenas se clasifican como bien graduadas (GW, SW) o mal graduadas (GP, SP) en función de parámetros como el



coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc), (ASTM International, 2000).

#### **3.2.4.2 Contenido de humedad**

El contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada en porcentaje, entre el peso del agua contenida en una muestra y el peso de las partículas sólidas. La NTP 339.127 establece el método de ensayo para determinar el contenido de humedad en suelos, indicando el secado en estufa a temperatura controlada hasta alcanzar peso constante, INACAL (2019), la humedad influye en la compactación, la resistencia al corte y el CBR, para materiales granulares, existe un contenido de humedad óptimo que permite alcanzar la densidad seca máxima en el ensayo Proctor; humedades superiores o inferiores a la óptima tienden a reducir la densidad y, en consecuencia, la capacidad de soporte, (Huang, 2004; Das, 2014).

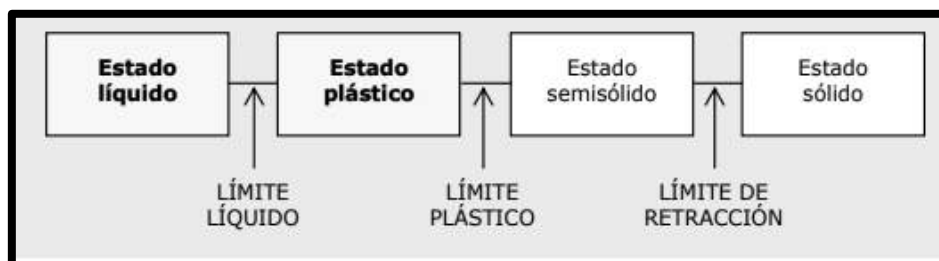
#### **3.2.4.3 Límites de Atterberg (LL, LP, IP)**

INACAL (2019), los límites de Atterberg definen los estados de consistencia de los suelos finos (líquido, plástico y semisólido) en función de su contenido de humedad, asimismo NTP 339.129 establece el método de ensayo para determinar el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad ( $IP = LL - LP$ ), siguiendo procedimientos consistentes con normas internacionales, por otro lado los límites de Atterberg permiten clasificar suelos finos como limos o arcillas, así como evaluar su tendencia a deformaciones plásticas, retracción y expansión. Atterberg y estudios posteriores muestran que suelos con IP altos y LL elevados tienden a presentar mayor compresibilidad y susceptibilidad a cambios volumétricos, lo que puede ser desfavorable en capas estructurales de pavimentos, (Atterberg, 1911).

El MTC limita el índice plástico de los finos en bases granulares a valores bajos, a fin de evitar un comportamiento excesivamente cohesivo y sensible a la humedad. Asimismo, los límites de Atterberg son aquellos que afectan la conducta de los suelos al interactuar con el agua, transformándose en dañinos en presencia de aquellas partículas pequeñas, en arcillas (Bevia Garcia, y otros, 2000).



Dentro de este ensayo, sus etapas se definen en que pasa de manera rápida de un estado sólido a otro líquido, teniendo en cuenta el aumento de agua en los suelos.



FUENTE: Bevia Garcia y otros, 2000

**Figura 1 — Límites de Atterberg**

#### 3.2.4.4 Sales solubles totales

El contenido de sales solubles totales en suelos y materiales granulares es importante porque ciertas sales (como sulfatos o cloruros) pueden generar problemas de expansión, corrosión de armaduras o degradación de mezclas asfaltadas y cementicias. Normas como la NTP 339.152/MTC E-219 establecen procedimientos para determinar las sales solubles mediante extracción y análisis químico, (MTC, 2014).

#### 3.2.4.5 Partículas chatas y alargadas y partículas con caras fracturadas

La forma de las partículas influye directamente en la intertrabazón y la resistencia al esfuerzo cortante de los agregados. La norma ASTM D4791, adoptada en la NTP 400.040, define métodos para determinar el porcentaje de partículas chatas y alargadas, mientras que el método MTC E-210 establece el procedimiento para cuantificar las partículas con caras fracturadas en agregados gruesos.

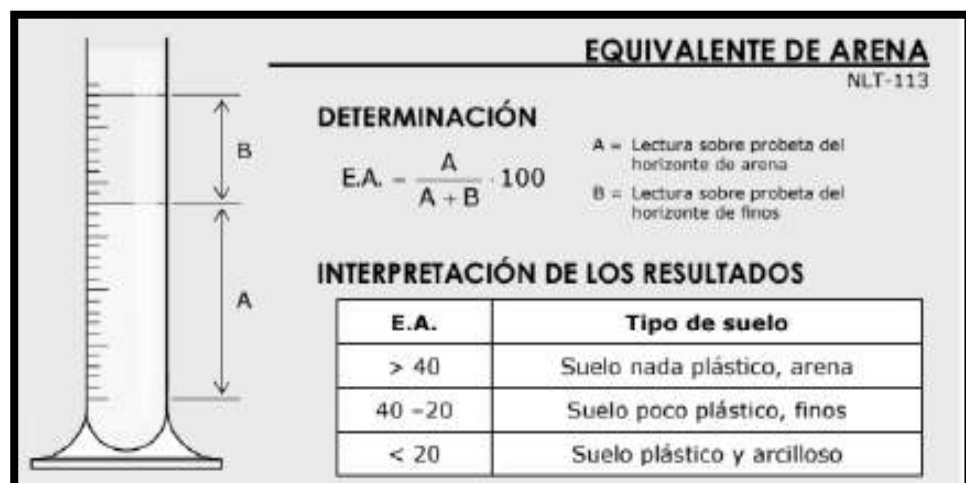
Un porcentaje elevado de partículas chatas y alargadas puede ocasionar orientación preferencial y menor resistencia al esfuerzo cortante, así como una compactación deficiente. Las partículas con caras fracturadas, por el contrario, favorecen la intertrabazón y aumentan la resistencia al corte y la estabilidad de la mezcla, (MTC, 2014).



### 3.2.4.6 Equivalente de arena

El equivalente de arena es un índice que mide la proporción relativa de material granular limpio frente a finos plásticos en un suelo o agregado fino, determinado según la NTP 339.146 como la relación entre la altura de la columna de arena y la altura total de arena más finos, expresada en porcentaje, INACAL (2019), valores altos indican bajo contenido de finos arcillosos y limosos, lo cual es deseable en materiales de base porque disminuye la plasticidad y mejora el drenaje, y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones establece un equivalente de arena mínimo para asegurar que la fracción fina sea principalmente granular y no plástica.

Su propósito es analizar de manera rápida el volumen máximo de partículas finas que se encuentran presentes en los suelos y se calcula de la siguiente manera, (Bevia Garcia y otros, 2000).



FUENTE: Bevia Garcia y otros, 2000

**Figura 2 — Equivalente de arena**

### 3.2.5 Propiedades mecánicas de los materiales granulares

Las propiedades mecánicas definen la capacidad de los materiales granulares para resistir cargas, deformaciones y degradación durante la vida útil del pavimento. En esta investigación, se evalúan principalmente la resistencia a la abrasión, el comportamiento en compactación Proctor modificado y la capacidad de soporte mediante CBR.



### 3.2.5.1 Abrasión Los Ángeles

Este ensayo mide la resistencia de los agregados gruesos a la degradación por abrasión e impacto en un tambor giratorio con bolas de acero. La NTP 400.019 establece el método para la determinación de esta propiedad, derivado de la norma ASTM C131. INACAL (2014). Un porcentaje de desgaste Los Ángeles bajo indica agregados resistentes a la fragmentación, condición favorable para bases granulares que estarán sometidas a cargas repetitivas. El MTC fija valores máximos de desgaste para asegurar la durabilidad de la capa. Este análisis se emplea para establecer la resistencia de los agregados ante la abrasión y los impactos. Para realizar este procedimiento, se necesita una muestra de 5.0 kg de agregado, que se coloca en un tambor de acero junto con 6 a 12 bolas de acero, cada una con un peso cercano a 430 g, (Menéndez Acurio, 2016).

### 3.2.5.2 Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado determina la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de un suelo compactado con una energía de compactación elevada, representativa de la energía aplicada en obras viales, la NTP 339.141 establece el método de ensayo para la compactación de suelos con energía modificada ( $2\ 700\ \text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ), obteniéndose la densidad seca máxima (MDS) y la humedad óptima (OCH), INACAL (2014). En bases granulares, la densidad seca máxima está relacionada con la resistencia al corte, la rigidez y el CBR, mientras que la humedad óptima indica el contenido de agua que debe alcanzarse en obra para lograr la mejor compactación. La incorporación de materiales no convencionales, como el PET-R, suele modificar tanto la densidad seca máxima como la humedad óptima, y por ello el Proctor modificado es un ensayo fundamental en la presente investigación, Tamay Ravillet (2022); Ramirez Triviño y otros (2018). La compactación es el procedimiento más importante en cada proyecto de carretera, ya que abarca la subrasante, subbase y la base granular. Este ensayo busca disminuir los vacíos en el suelo por medio de la adición de agua y aplicación de energía, facilitando una mejor cohesión y dispersión de las partículas. No obstante, el contenido de humedad juega un rol crucial, dado que una elevada cantidad de agua puede disminuir la

densidad al generar una separación entre cada una de las partículas del suelo, (Menéndez Acurio, 2016).

### **3.2.5.3 CBR (California Bearing Ratio)**

El CBR (California Bearing Ratio) es un índice que compara la presión necesaria para hacer penetrar un pistón estándar en un suelo compactado, respecto a la presión requerida para igual penetración en un material granular de referencia. El ensayo se realiza bajo condiciones controladas de humedad y densidad, con muestras compactadas típicamente al 95 % o 100 % de la densidad máxima Proctor, MTC (2016); ASTM International (2019). El CBR se utiliza ampliamente para evaluar la capacidad de soporte de subrasantes, subbases, bases y afirmados, y es un parámetro clave en el dimensionamiento de espesores de pavimentos flexibles, (Huang, 2004; MTC, 2014).

En el presente ensayo se busca determinar cada espesor de los pavimentos, y se tiene en cuenta que el índice de CBR está conectado de manera directa a la densidad seca, ya que, si este valor incrementa, su capacidad portante aumentará (Menéndez Acurio, 2016).

## **3.2.6 Clasificación de suelos**

### **3.2.6.1 Sistema SUCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), según la norma ASTM International, clasifica los suelos por granulometría y plasticidad para caracterizar su comportamiento mecánico y geotécnico; para gravas y arenas se consideran el porcentaje de material que pasa o se retiene en los tamices N.º 4 y N.º 200, la forma de la curva granulométrica ( $C_u$  y  $C_c$ ) y la plasticidad de los finos; las gravas se representan con G y las arenas con S, los subíndices W y P indican material bien o mal graduado y M y C señalan finos limosos o arcillosos, permitiendo una evaluación precisa de resistencia, compactación y estabilidad; los suelos se dividen en finos (pasan por el tamiz 200) y gruesos (retenidos), facilitando la valoración de su comportamiento frente a cargas, estabilidad y drenaje; la norma ASTM D2487 y las guías de California Department of Transportation (2019) incluyen tablas y criterios para la correcta clasificación, asegurando



uniformidad en estudios geotécnicos y selección de materiales para pavimentos, y la tabla siguiente resume este procedimiento integrando granulometría y plasticidad para su aplicación en obra, (Bevia Garcia y otros, 2000).

DIVISIÓN MAYOR		NOMBRES TÍPICOS		CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO				
<b>SUELOS DE PARTICULAS GRANULASAS</b> Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 Ø Menos de la mitad del material es retenido en la malla número 400 Ø	<b>ARENAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICAR, ACTÚEN VISUALMENTE PARA USARSE EN OBRAS CORRIENTES EQUIVALENTE A LA ARQUITECTURA DE LA MALLA No. 4.	<b>GRANULOSAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 400	<b>GM</b>	Gravas y arenas limosas, con poca o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (U) mayor de 1. COEFICIENTE DE CURVATURA (Cc) entre 1 y 3. $Cu = D_{60}/D_{30}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{60}D_{10})$			
			<b>GP</b>	Gravas y arenas limosas, con poca o nada de finos				
		<b>ARENAS CON FINOS</b> Menos de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 400	<b>GM</b>	Arenas limosas, con poca o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GM.		
			<b>GC</b>	Arenas arcillosas, con poca o nada de finos				
		<b>ARENAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICAR, ACTÚEN VISUALMENTE PARA USARSE EN OBRAS CORRIENTES EQUIVALENTE A LA ARQUITECTURA DE LA MALLA No. 4.	<b>ARENAS CON FINOS</b> Menos de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 400	<b>SM</b>		Arenas limosas, con poca o nada de finos	LÍMITES DE ATTERBERG: ARriba de la "LÍNEA A" y con LP MENOR QUE 4.	
				<b>SC</b>		Arenas arcillosas, con poca o nada de finos		LÍMITES DE ATTERBERG: ARriba de la "LÍNEA A" y con LP MAYOR QUE 4.
	<b>ARENAS CON FINOS</b> Menos de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 400			<b>SW</b>		Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW.	
				<b>SP</b>		Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
	<b>SUELOS DE PARTICULAS FINAS</b> Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 Ø Menos de la mitad del material pasa por la malla número 400 Ø			<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Límite Líquido menor de 50		<b>ML</b>	Limos inorgánicos, arena de poca, arena arcillosa o arcillosos ligeramente plásticos.	G - Grava, S - Arena, O - Suelo Orgánico, P - Turba, M - Limo, C - Arcilla, W - Bien Graduado, P - Mal Graduado, U - Hija Compresibilidad, H - Otra Compresibilidad
						<b>CL</b>	Arcillas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas con arena, arena arcillosa, arcillas limosas, arcillas pobres.	
		<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Límite Líquido Mayor de 50	<b>OL</b>	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		<b>CARTA DE PLASTICIDAD (SUCS)</b> 		
			<b>MH</b>	Limos inorgánicos, limos inorgánicos o arcillosos, más plásticos.				
<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Límite Líquido Mayor de 50		<b>CH</b>	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas limosas.					
		<b>OH</b>	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.					
<b>SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS</b>	<b>P</b>	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.						

FUENTE: Bevia Garcia y otros, 2000

Figura 3 — Clasificación SUCS

3.2.6.2 Sistema AASHTO

Este sistema de clasificación de suelos agrupa los materiales en categorías A-1 a A-7, en función de su granulometría, contenido de finos y plasticidad. Los grupos A-1, A-2 y A-3 corresponden principalmente a materiales granulares, mientras que A-4 a A-7 representan suelos finos limosos o arcillosos de menor calidad para aplicaciones viales, AASHTO (1993), entre los materiales granulares, los grupos A-1-a y A-1-b representan gravas



y arenas de alta calidad para bases y subbases, mientras que el grupo A-2 incluye materiales granulares con contenido de finos plásticos moderado, que pueden utilizarse bajo ciertas restricciones. El índice de grupo (IG) permite refinar la calidad del suelo dentro de cada grupo.

CLASIFICACION GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% o menos peso el Tamiz N°200)							MATERIALES LIMO-ARCILLOSOS (Más del 35% peso el Tamiz N°200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Granometría (%) que pasa tamiz												
No 10	50 máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No 40	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Plasticidad de 10000 que pasa tamiz No 40												
Límite líquido	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	41 mín
Índice plástico	0 máx	0 máx	N.P.	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	11 mín
Tipo de materiales	Frag. de piedra, grava y arena		Arena fina	Grava y Arena limada ó arcillosa				Suelos limosos			Suelos arcillosos	
Calificación como subbase	excelente ó buena							Regular ó deficiente				
$IG = [F-35] [ 0.2 + 0.005(LL-40) ] + 0.01 [F-15](IP-10)$							(*) El índice plástico del subgrupo A-7-6 es igual al menor que (LL-30)					
F = % de finos, LL = límite líquido, IP = índice plástico							(**) El índice plástico del subgrupo A-7-6 es mayor que (LL-30)					

FUENTE: Bevia Garcia y otros, 2000

Figura 4 — Clasificación AASHTO

- **Relación con el uso como base granular**

En el diseño y especificación de pavimentos, los materiales de base granular suelen pertenecer a los grupos A-1-a, A-1-b o A-2-4/A-2-5, con índices de grupo cercanos a cero, y se espera que en SUCS se correspondan con gravas y arenas bien o mal graduadas con finos no plásticos o de baja plasticidad, (MTC, 2014; Huang, 2004).

### 3.2.7 Tereftalato de polietileno

El PET es un material plástico muy transparente, de tonalidad verde e incoloro, ampliamente utilizado en la fabricación de botellas para aguas minerales, limonadas y gaseosas, y presenta características sobresalientes que lo hacen ideal para estas aplicaciones; entre ellas se destacan su alta resistencia mecánica y rigidez estructural, su superficie dura que permite un acabado brillante, notable resistencia química y estabilidad dimensional, densidad superior a la del agua, óptimas propiedades tribológicas, así como muy buenas características eléctricas y propiedades dieléctricas estables, lo que lo convierte en un material versátil y confiable para envases y otras aplicaciones industriales, (CEPIS, 2003).



Estos efectos explican la variabilidad reportada en investigaciones recientes, mientras algunos autores señalan mejoras cuando el PET actúa como refuerzo fibroso o combinado con agentes cementantes, otros evidencian disminuciones en la resistencia cuando se emplea en mayores proporciones o sin tratamiento adicional, por ello, su desempeño depende estrechamente del porcentaje incorporado, la forma del material reciclado (fibra, hojuelas, partículas) y su interacción con la matriz granular. El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en envases de bebidas, alimentos y productos de consumo. Su alta producción y baja tasa de reciclaje hacen que el PET sea uno de los principales componentes de los residuos plásticos urbanos.

Informes recientes del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente señalan que solo alrededor del 9 % de los plásticos producidos globalmente se reciclan de manera mecánica, mientras que el resto se deposita en rellenos sanitarios, se incinera o termina disperso en el ambiente, (UNEP – United Nations Environment Programme, 2023).

#### **a) Propiedades del PET**

El PET se caracteriza por su alta resistencia a la tracción, buena estabilidad química, baja absorción de agua y densidad relativamente baja, aproximadamente entre 1,3 y 1,4 g/cm<sup>3</sup>, propiedades que lo hacen especialmente atractivo como material de refuerzo o componente en mezclas granulares y suelos, ya que al incorporarse puede aumentar la resistencia a la tracción, mejorar la rigidez y modificar la deformabilidad de los materiales sin introducir elementos corrosivos ni susceptibles a degradación rápida; además, su comportamiento estable frente a variaciones químicas y ambientales permite que su inclusión contribuya a la durabilidad de las estructuras, haciendo del PET una alternativa confiable y sostenible para optimizar las propiedades mecánicas de suelos, mejorar la compactación y reducir deformaciones permanentes en aplicaciones de ingeniería civil y pavimentación, ampliando así el potencial de materiales reciclados en obras de infraestructura, (Yilmaz, 2019).

#### **b) Formas de presentación del PET reciclado**

El PET reciclado puede presentarse en diversas formas, incluyendo escamas (flakes) producto del triturado y lavado de botellas, partículas finas obtenidas



mediante molienda que pueden incorporarse a la fracción fina de suelos, y fibras o tiras alargadas que actúan como refuerzo dentro de mezclas granulares y suelos; estudios sobre el mejoramiento de suelos arcillosos y granulares con PET reciclado han utilizado estas tres formas, mostrando que su incorporación puede generar cambios significativos en propiedades como densidad, plasticidad, resistencia a compresión y CBR, evidenciando que el PET reciclado no solo contribuye a la reutilización de materiales plásticos, sino que también mejora el comportamiento mecánico de los suelos y refuerza su capacidad de soporte, ampliando las posibilidades de aplicación en ingeniería civil y pavimentación, (Salimi y otros, 2020; Carballo Rojas y otros, 2023).

### **3.2.8 Incorporación de PET-R en suelos y capas granulares**

La incorporación de residuos de PET en suelos y materiales granulares ha sido objeto de numerosos estudios, los cuales han mostrado efectos tanto favorables como desfavorables dependiendo del tipo de suelo, del porcentaje de PET y de la forma del polímero.

#### **a) Experiencias en suelos finos y subrasantes**

Investigaciones sobre arcillas reforzadas con tiras o fibras de PET evidencian incrementos en la resistencia no confinada, en el CBR y en el módulo resiliente, además de reducciones en el índice de plasticidad y en la susceptibilidad a deformaciones permanentes, (Salimi y otros, 2020; Yilmaz, 2019).

#### **b) Experiencias en bases y subbases granulares**

Trabajos como los de Ramirez Triviño y otros (2018) y Tamay Ravillet (2022), han incorporado PET-R a subbases y bases, encontrando que pequeños porcentajes del polímero pueden incrementar el CBR y modificar la densidad seca máxima y la humedad óptima, mientras que porcentajes más elevados tienden a reducir la compactación.

Carballo Rojas y otros (2023), estudiaron la base granular estabilizada con cemento y fibras de PET reciclado, concluyendo que la adición de fibras mejora la resistencia a compresión y el comportamiento post - fisuración, siempre que las dosificaciones se mantengan dentro de un rango controlado.



**c) Efectos típicos sobre densidad seca máxima, humedad óptima y CBR**

La incorporación de PET reciclado (PET-R) en suelos y materiales granulares produce típicamente una reducción de la densidad seca máxima por la menor densidad del PET, cambios ligeros o incrementos en la humedad óptima debido a la modificación del empaquetamiento y la distribución de vacíos, aumentos en el CBR para pequeñas dosificaciones cuando el PET actúa como refuerzo y disminuciones de CBR para dosificaciones elevadas al interrumpir la estructura granular y reducir la rigidez; estos efectos han sido documentados en investigaciones sobre mejoramiento de suelos y mezclas granulares, evidenciando que dosis controladas de PET pueden mejorar la resistencia y estabilidad estructural, mientras que excesos requieren ajustes para evitar pérdida de desempeño, (Tamay Ravillet, 2022; Ramirez Triviño y otros, 2018; Yilmaz, 2019).

**d) Dosificación óptima de PET-R.**

La dosificación óptima de PET-R es aquella que genera un mejoramiento neto o, al menos, una pérdida admisible de la capacidad de soporte y/o resistencia del material sin introducir efectos negativos significativos en la compactación, la estabilidad o la durabilidad. Varios estudios reportan que este óptimo suele encontrarse en rangos de 1 % a 10 % en peso del suelo para suelos finos, y en porcentajes similares o algo superiores para mezclas granulares específicas, (Salimi y otros, 2020; Tamay Ravillet, 2022).

### **3.2.9 Especificaciones técnicas para materiales de base granular**

Los materiales de base granular en pavimentos flexibles deben cumplir los requisitos de granulometría y calidad de agregados establecidos en el Manual EG-2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, para garantizar un desempeño adecuado frente a cargas de tránsito y condiciones ambientales, (MTC, 2013).

#### **3.2.9.1 Granulometría**

Los materiales compuestos en la base granular son las que deben presentar una granulometría uniforme, cuya distribución sea la correcta y conforme a los parámetros que están establecidos en la normativa vigente como se muestra a continuación, (MTC, 2013).



Tamiz	Porcentaje que pasa en peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm. (2")	100	100		
25 mm. (1")		75-95	100	100
9,5 mm. (3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100
4,75 mm. (N.º 4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2,0 mm. (N.º 10)	15-40	20-45	25-50	40-70
425 µm. (N.º 40)	8-20	15-30	15-30	25-45
75 µm. (N.º 200)	2-8	5-15	5-15	8-15

FUENTE: MTC, 2013

**Figura 5 — Requerimientos para la granulometría de la base granular**

### 3.2.9.2 Agregados gruesos

Según el EG-2013, en el material de base se denomina agregado grueso a la fracción de partículas retenidas en el tamiz N.º 4 (4,75 mm), que pueden provenir de fuentes naturales, procesadas o de una combinación de ambas, Este agregado constituye la estructura principal de la base granular y debe cumplir requisitos de resistencia a la degradación (abrasión Los Ángeles), durabilidad frente a sales, porcentaje máximo de partículas chatas y alargadas y porcentaje mínimo de partículas con caras fracturadas, de acuerdo con las tablas de requisitos del EG-2013, (MTC, 2013).

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimientos Altitud	
				< 3.000 msnm	≥ 3.000 msnm
Partículas con una cara fracturada	MTC E 210	D 5821		80% mín.	80% mín.
Partículas con dos caras fracturadas	MTC E 210	D 5821		40% mín.	50% mín.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	40% máx.	40% máx.
Partículas chatas y alargadas (1)		D 4791		15% máx.	15% máx.
Sales solubles totales	MTC E 219	D 1888		0,5% máx.	0,5% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	C 88	T 104		18% máx.

FUENTE: MTC, 2013

**Figura 6 — Requerimientos y ensayos para el agregado grueso**

### 3.2.9.3 Agregados finos

De acuerdo con el EG-2013, el agregado fino en material de base corresponde a la fracción más pequeña del material granular, constituida por las partículas que se encuentran por debajo de un tamaño límite (en la práctica, la fracción que pasa por el tamiz N.º 4 y se distribuye hasta el tamiz



N.º 200), este agregado fino puede provenir también de fuentes naturales o procesadas y debe cumplir requisitos de granulometría, equivalente de arena, plasticidad y contenido de finos, ya que un exceso de finos plásticos o muy activos puede reducir la capacidad de soporte y el drenaje de la base granular, (MTC, 2013).

Ensayo	Norma	Requerimientos Altitud	
		<3.000 msnm	≥3.000 msnm
Índice plástico	MTC E 111	4% máx.	2% mín.
Equivalente de arena	MTC E 114	35% mín.	45% mín.
Sales solubles	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	----	15%

FUENTE: MTC, 2013

**Figura 7 — Requerimientos y ensayos para el agregado fino**

### 3.3 Marco conceptual

A continuación, se definen los principales términos que se emplean en la presente investigación:

**a) Pavimento flexible**

El pavimento flexible es una estructura vial de capas granulares y asfálticas diseñada para distribuir gradualmente las cargas hacia la subrasante, evitando que el suelo exceda su capacidad de soporte y asegurando la vida útil de la vía, (MTC, 2014).

**b) Carpeta asfáltica**

La capa superior del pavimento flexible constituida por una mezcla asfáltica en caliente o en frío, que proporciona la superficie de rodadura, resistencia al desgaste, adherencia y contribuye a la distribución de las cargas hacia las capas inferiores, (MTC, 2014)

**c) Base granular**

Capa granular ubicada inmediatamente debajo de la carpeta asfáltica, conformada por material procedente de cantera o planta de chancado, seleccionada y compactada, cuya función principal es brindar soporte estructural y distribuir los esfuerzos hacia la subbase y la subrasante, cumpliendo requisitos de granulometría, plasticidad, equivalente de arena, abrasión Los Ángeles y CBR mínimo establecidos por la normativa, (MTC 2013).



**d) Subbase granular**

Capa granular situada entre la base y la subrasante, constituida por material de calidad inferior a la base, pero adecuado para distribuir cargas, mejorar el drenaje y servir de transición entre el suelo natural y la base granular, (MTC, 2014).

**e) Subrasante**

Suelo de fundación sobre el cual se apoyan la subbase, la base y la carpeta asfáltica, puede corresponder al terreno natural compactado o a un relleno previamente mejorado; su capacidad de soporte se evalúa mediante CBR u otros parámetros mecánicos y condiciona el espesor total del pavimento, (Huang, 2004; MTC, 2014).

**f) Material granular**

Conjunto de partículas minerales de tamaño predominantemente grueso, como gravas y arenas, con un contenido limitado de finos, que se emplea en capas estructurales de pavimentos como base, subbase o afirmado, proporcionando soporte y estabilidad a la vía al distribuir las cargas del tránsito y mejorar el comportamiento mecánico de la estructura, (Das, 2014).

**g) Cantera**

Yacimiento o zona de explotación de materiales pétreos (gravas, arenas, roca triturada) que pueden ser utilizados en la construcción de pavimentos y otras estructuras, siempre que cumplan las especificaciones técnicas de calidad y resistencia establecidas por la normativa vigente, (MTC, 2013).

**h) Propiedades físicas del material granular**

Conjunto de características que describen el comportamiento físico del material, tales como granulometría, contenido de humedad, límites de Atterberg (LL, LP, IP), contenido de sales solubles, forma de las partículas (chatas/alargadas) y equivalente de arena, evaluadas mediante normas NTP y MTC, (INACAL, 2014; INACAL, 2019).

**i) Análisis granulométrico**

Ensayo que determina la distribución de tamaños de las partículas de un suelo o material granular mediante el uso de una serie de tamices normalizados. El resultado se expresa como el porcentaje en peso que pasa por cada tamiz y permite distinguir las fracciones de grava, arena y finos, (INACAL, 2019; ASTM D422).



**j) Contenido de humedad**

Relación, expresada en porcentaje, entre el peso del agua contenida en un suelo y el peso de sus sólidos, determinada habitualmente mediante secado en estufa, es un parámetro fundamental para la compactación y para la evaluación de la resistencia y deformabilidad del material, (INACAL, 2019; Das, 2014).

**k) Equivalente de arena**

Índice que mide la proporción relativa de arena limpia respecto a finos plásticos en un suelo o agregado fino. Se expresa como porcentaje y valores elevados indican bajo contenido de finos arcillosos, condición deseable para materiales de base y subbase, (INACAL, 2014; MTC, 2016).

**l) Propiedades mecánicas del material granular**

Características que describen la respuesta del material frente a cargas y deformaciones, tales como densidad seca máxima y humedad óptima (Proctor modificado), resistencia a la abrasión (Los Ángeles) y capacidad de soporte (CBR), las cuales condicionan el desempeño estructural de la base granular, (INACAL, 2014; MTC, 2014).

**m) Ensayo Proctor modificado**

Ensayo de compactación en laboratorio que relaciona contenido de humedad y densidad seca de un suelo compactado con una energía elevada (energía modificada), permite obtener la densidad seca máxima y la humedad óptima, condiciones de referencia para la compactación en campo, (INACAL, 2014; Das, 2014).

**n) CBR (California Bearing Ratio)**

Índice de capacidad de soporte de un suelo o material granular, definido como la razón entre la presión necesaria para hacer penetrar un pistón estándar en el material ensayado y la presión requerida para igual penetración en un material granular de referencia. Se expresa en porcentaje y se emplea ampliamente en el diseño de pavimentos flexibles, (MTC, 2016).

**o) Capacidad de soporte**

Aptitud de un suelo o material granular para resistir las cargas aplicadas sin experimentar deformaciones excesivas o fallas estructurales, por tanto en pavimentos



flexibles, se suele valorar mediante el CBR, módulos resilientes u otros parámetros mecánicos, (Huang, 2004; Ramirez Triviño, y otros, 2018).

**p) Tereftalato de polietileno (PET)**

Polímero termoplástico ampliamente utilizado en la fabricación de envases de bebidas, alimentos y otros productos, caracterizado por su alta resistencia mecánica, estabilidad química y baja degradabilidad en el ambiente, (UNEP – United Nations Environment Programme, 2023).

**q) Tereftalato de polietileno reciclado (PET-R)**

PET que ha sido recuperado de residuos posconsumo (por ejemplo, botellas descartadas), sometido a procesos de selección, lavado y triturado, para obtener escamas, partículas o fibras reutilizables en diferentes aplicaciones, como refuerzo o componente en suelos y materiales de construcción, (UNEP, 2023; Tamay, 2022).

**r) Mezcla patrón**

En el contexto de la investigación, se denomina mezcla patrón a la base granular en su condición natural, sin adición de PET-R (0 % PET-R), que sirve como referencia para comparar los cambios en propiedades físicas y mecánicas al incorporar el reciclado.

**s) Mezclas modificadas con PET-R**

Son las mezclas obtenidas al incorporar PET-R a la base granular en las dosificaciones de 15 %, 25 % y 35 % en la fracción fina, manteniendo las mismas condiciones de preparación y ensayo que la mezcla patrón, con el fin de evaluar la influencia del PET-R en el comportamiento del material.



## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA**

#### **4.1 Tipo y nivel de investigación**

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la medición numérica de variables físicas y mecánicas del material granular y en la comparación objetiva de resultados entre distintas condiciones de estudio. El enfoque cuantitativo se caracteriza por la recolección de datos mediante instrumentos estandarizados, el análisis estadístico básico de dichos datos y la búsqueda de patrones o tendencias que permitan responder a las preguntas de investigación planteadas, (Hernández Sampieri y otros, 2014).

Por su finalidad, el estudio es de tipo aplicado, ya que utiliza conocimientos teóricos y normas técnicas sobre pavimentos, materiales granulares y PET-R para analizar el comportamiento de un material de base granular real, proveniente de la cantera Anta Anta, con el propósito de generar resultados útiles para la toma de decisiones en el ámbito de la ingeniería vial, por otro lado la investigación aplicada se orienta a resolver problemas concretos y a generar soluciones o criterios de intervención en contextos específicos, apoyándose en la teoría existente, Tamayo (2004); Bernal Torres (2010). En cuanto a su alcance, la investigación se sitúa en el nivel descriptivo - comparativo. Es descriptiva porque describe y caracteriza las propiedades físicas y mecánicas del material granular en las condiciones de estudio, presentando los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio de forma sistemática, es comparativa porque establece comparaciones entre la base granular en su condición natural y la misma base modificada con diferentes contenidos de PET-R. Según Hernández Sampieri y otros (2014), los estudios descriptivo - comparativos se centran en describir fenómenos y en comparar grupos o condiciones para identificar similitudes y diferencias relevantes.

#### **4.2 Diseño de la investigación**

El diseño de la presente investigación es experimental, debido a que se manipula de forma deliberada una variable independiente la incorporación en distintas dosificaciones de



tereftalato de polietileno reciclado en la base granular y se observan sus efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas del material, medidas mediante ensayos normalizados, en este tipo de diseño, el investigador aplica tratamientos controlados y analiza los cambios que estos producen en las variables de interés, Hernández Sampieri y otros (2014), asimismo el estudio se organiza como un experimento de un solo material base sometido a distintas condiciones de ensayo, con una condición de referencia (material en estado natural) y condiciones modificadas con PET reciclado, manteniendo constantes el procedimiento de preparación y los métodos de ensayo.

### 4.3 Descripción ética de la investigación

El desarrollo del estudio se realizó conforme a las disposiciones del Reglamento de Investigación de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA), asegurando una conducta académica responsable, el uso adecuado de métodos científicos y la integridad en el manejo de la información. Para garantizar la validez técnica de los resultados, los ensayos de laboratorio se ejecutaron siguiendo normas estandarizadas de referencia, entre ellas ASTM, AASHTO y las especificaciones del MTC y NTP, según correspondiera a cada procedimiento de caracterización y evaluación del material granular, el cumplimiento riguroso de estos lineamientos permitió obtener datos precisos y confiables, mediante un registro ordenado de las actividades y la aplicación cuidadosa de cada método. La interpretación de los resultados se realizó de manera objetiva y responsable, evitando cualquier acción que pudiera comprometer la exactitud del estudio, por otro lado, todas las fuentes utilizadas serán citadas conforme a la norma ISO 690, asegurando el respeto a la propiedad intelectual y la originalidad del trabajo. Durante la investigación se aplicaron buenas prácticas de manejo de materiales, equipos y residuos generados, cumpliendo con las condiciones de seguridad y evitando impactos negativos en el ambiente y en el laboratorio, asimismo cada actividad se desarrolló de manera ordenada, transparente y coherente con los principios éticos institucionales, procurando que los resultados del estudio sean útiles para el conocimiento técnico y para la implementación de alternativas más sostenibles en el campo de la construcción vial.

### 4.4 Población y muestra

- **Población**

La población del presente estudio está constituida por el conjunto total del material granular disponible en la cantera Anta Anta, ubicada en la provincia de Cotabambas en el tramo Tambobamba – Challhuahuacho, aproximadamente en el kilómetro 0+017.



Este material constituye la fuente natural utilizada en la conformación de la base granular del pavimento existente en dicho tramo, el cual actualmente presenta deterioro, motivo por el cual se considera pertinente caracterizar sus propiedades físicas y mecánicas. En términos metodológicos, la población comprende todos los elementos que comparten las características que se desean estudiar. Hernández Sampieri y otros (2014), definen la población como “el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones”, lo que en este contexto se refiere a la totalidad del material granular existente en la cantera Anta Anta de 15 hectáreas aproximadamente. De manera específica en ingeniería geotécnica, Das y otros (2017), señala que un depósito natural como una cantera se considera la población geotécnica, pues representa el volumen completo de material cuyas propiedades pueden inferirse a través del análisis de muestras representativas. Bajo esta perspectiva, la cantera Anta Anta constituye el universo del cual se busca obtener información confiable para determinar la aptitud del material en aplicaciones de pavimentación.



FUENTE: Google Earth, 2025

**Figura 8 — Vista ubicación de cantera**

- **Muestra**

La muestra corresponde a la fracción del material granular extraída desde el acopio de la cantera Anta Anta, para su análisis de laboratorio se extrajeron entre 450kg a 500 kg de muestra en 8 unidades de sacos de 60kg aproximadamente. Esta muestra fue material granular representativa de la población, es decir, del total del material

disponible en la cantera. Según Montgomery (2017), una muestra representativa es aquella que conserva las características esenciales del conjunto del cual se extrae, permitiendo realizar inferencias válidas sobre sus propiedades, para asegurar dicha representatividad, la selección de la muestra se fundamenta en los lineamientos establecidos por la norma ASTM International (2014), que recomienda obtener el material desde diferentes puntos del acopio o frente de explotación y conformar una muestra compuesta que refleje fielmente el estado general del depósito. Esta práctica permite evitar la influencia de posibles segregaciones o heterogeneidades propias de los acopios y garantiza que el material seleccionado sea adecuado para los ensayos de caracterización. En este estudio, la muestra se concibe como la porción única y homogeneizada extraída de la cantera, la cual servirá como base para la caracterización física y mecánica que permitirá describir el comportamiento del material granular original. Esta caracterización será la referencia fundamental para posteriores análisis comparativos dentro del desarrollo de la investigación. Por otro lado, el tipo de muestreo seleccionado para esta investigación es no probabilístico, por conveniencia, ya que la muestra se extrae de una cantera en explotación específica (Anta Anta), que representa la población objetivo. Este tipo de muestreo se utiliza cuando el investigador selecciona deliberadamente la fuente de material que es relevante para los objetivos del estudio, priorizando la representatividad del material sobre la aleatoriedad de la selección, (Hernández Sampieri y otros, 2014).

En el presente estudio, la elección de la cantera Anta Anta responde a criterios técnicos y prácticos:

- Es la fuente principal del material granular utilizado en la base del tramo vial Tambobamba – Challhuahuacho.
- El material extraído actualmente se encuentra en explotación y representa las condiciones reales del pavimento existente, que presenta deterioro.

El muestreo consiste en la selección deliberada de la porción de material que será homogeneizada para constituir la muestra patrón. Esta muestra, al ser representativa del total del material disponible, permitirá realizar análisis comparativos, incluyendo la evaluación de la influencia de la adición de PET reciclado al 15%, 25% y 35%, según Montgomery (2017), en estudios experimentales donde la población es limitada y homogénea, el muestreo por conveniencia es adecuado siempre que la muestra



refleje las propiedades esenciales del conjunto. Asimismo, ASTM International (2014), indica que, para depósitos únicos o canteras, es válido formar una muestra compuesta homogeneizada que represente adecuadamente la población, garantizando confiabilidad en los resultados de laboratorio.

## 4.5 Procedimiento

El procedimiento de la investigación se desarrolló de manera sistemática y secuencial, asegurando la obtención de resultados confiables para evaluar la influencia del PET reciclado en las propiedades físicas y mecánicas del material granular de la cantera Anta Anta. Este procedimiento se estructuró en tres etapas principales: trabajo de campo, ensayos de laboratorio y análisis de resultados y comparación. Cada etapa siguió las normativas nacionales (NTP/MTC) e internacionales (ASTM) aplicables.

### 4.5.1 Trabajo de campo

#### a) Visita a la cantera

Se realizó una inspección detallada del acopio de material granular de la cantera Anta Anta, ubicada en el tramo vial Tambobamba – Challhuahuacho, durante la cual se registraron las características visibles del material, incluyendo el tamaño de las partículas, la humedad aparente, la presencia de finos y la geometría de las mismas; además, el procedimiento se documentó mediante fotografías y registros escritos, asegurando la trazabilidad del material y la representatividad de la muestra.



Figura 9 — Vista de cantera en explotación

**b) Extracción y homogeneización de la muestra**

Se extrajeron aproximadamente 450 a 500 kg de material del acopio en ocho unidades de sacos de aproximadamente 60 kg cada uno, siguiendo lo establecido en la norma ASTM International (2014) para garantizar la representatividad de la muestra; posteriormente, el material se homogeneizó cuidadosamente mediante mezcla manual, evitando la segregación por tamaño de partículas y asegurando uniformidad en toda la muestra; finalmente, una vez homogeneizada, la muestra se almacenó en condiciones controladas, protegiéndola de humedad excesiva o contaminación, de manera que sus propiedades se conservaran intactas antes de la realización de los ensayos de laboratorio.



**Figura 10 — Extracción y transporte de muestra**

**4.5.2 Preparación del PET reciclado**

Se adquirió PET reciclado proveniente de botellas postconsumo, el cual se incorporó en porcentajes de 15%, 25% y 35% sobre el peso del material granular; antes de su uso, se inspeccionó y tamizó cuidadosamente para eliminar impurezas y partículas fuera del tamaño deseado, asegurando uniformidad y consistencia en la mezcla, y posteriormente se almacenó en bolsas selladas bajo condiciones controladas hasta su incorporación en los ensayos y mezclas correspondientes.



**Figura 11 — Preparación de PET-R**

#### **4.5.3 Ensayos en laboratorio**

Una vez realizado el muestreo y homogenización del material granular y acondicionado el PET-R, se procedió a la ejecución de los ensayos de laboratorio, organizados en tres bloques: determinación de propiedades físicas en la base natural, determinación de propiedades mecánicas en la base natural y preparación de ensayo de las mezclas con PET-R.

##### **a) Ensayos para determinación de propiedades físicas**

Para determinar las propiedades físicas de la base granular en su condición natural (muestra patrón), se realizó una serie de ensayos siguiendo las normas técnicas peruanas y las especificaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones; inicialmente se determinó el contenido de humedad mediante secado en horno hasta alcanzar peso constante (NTP 339.127), permitiendo conocer el porcentaje de agua presente en el material, seguido de la evaluación de la plasticidad del suelo mediante límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad utilizando métodos estandarizados de laboratorio y el dispositivo de Casagrande (MTC E 111-200), lo que proporcionó información sobre la consistencia y comportamiento plástico del material; posteriormente, se efectuó la determinación de la granulometría mediante tamizado mecánico para establecer la distribución de tamaños de partículas y la uniformidad del material (MTC E-107-99), y se midió el equivalente de arena para cuantificar la proporción de finos que influyen en la cohesión, estabilidad y compactación del

suelo (MTC E 114); adicionalmente, se evaluó el porcentaje de partículas chatas y alargadas, que pueden afectar la compactación y resistencia, siguiendo MTC E 223 y ASTM D4791, así como el porcentaje de partículas con caras fracturadas, considerando una, dos o más caras fracturadas y sin fracturas, lo que resulta fundamental para la resistencia mecánica de la base granular (MTC E-210); finalmente, se determinó el contenido de sales solubles mediante extracción con agua para evaluar posibles efectos sobre la durabilidad y corrosión en pavimentos, garantizando que el material cumpla con los requisitos de calidad para su uso en la estructura vial.

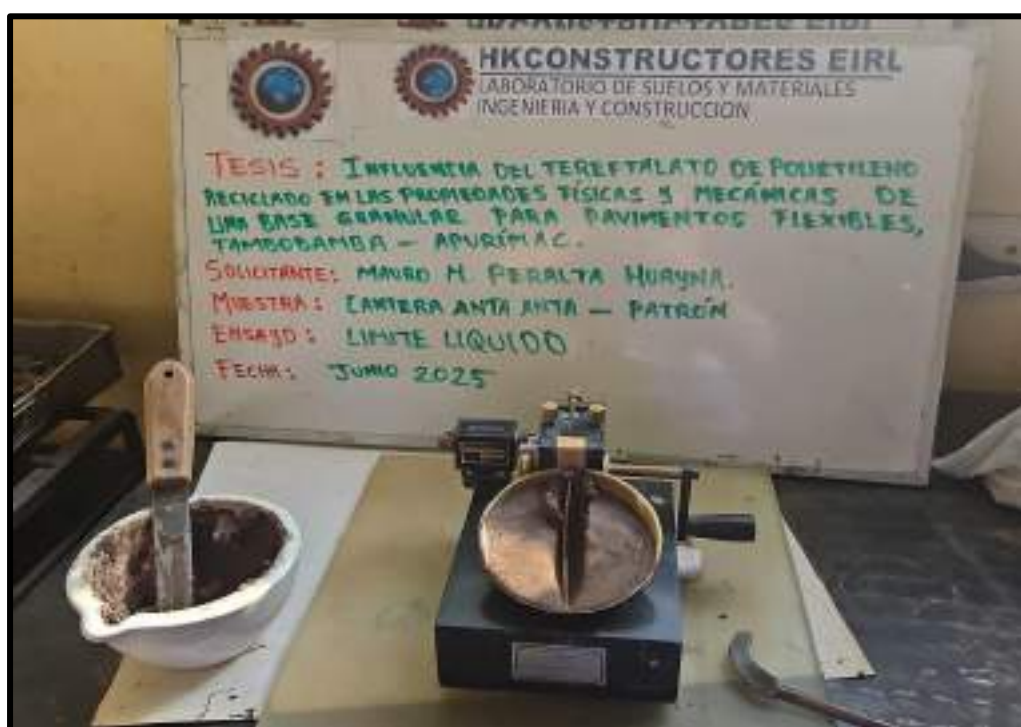


Figura 12 — Ensayos físicos L.L. en laboratorio

b) **Ensayos para determinación de propiedades mecánicas**

En una segunda etapa, se llevaron a cabo los ensayos orientados a determinar las propiedades mecánicas de la base granular en condición natural, bajo los parámetros de densidad y humedad de compactación definidos en laboratorio, entre ellos:

- **Abrasión Los Ángeles (MTC E 207-2000):** Se evaluó la resistencia al desgaste de las partículas mediante rotación en un tambor con bolas de acero y posterior determinación de la pérdida de material.

- **Proctor modificado (MTC E 115-2000):** Se determinó la densidad seca máxima y humedad óptima mediante compactación estandarizada del material en moldes, utilizando golpeo mecánico, para cada condición se realizaron tres ensayos Proctor modificado, a fin de obtener un valor promedio de densidad seca máxima y humedad óptima.
- **CBR (MTC E 132-2000):** Se evaluó la resistencia portante del material para bases granulares, realizando ensayos de penetración con pistón y cálculo del índice CBR, para cada condición se realizaron tres ensayos de CBR, compactadas con los parámetros obtenidos en el Proctor modificado, evaluándose el valor de CBR promedio.



**Figura 13 — Preparación de muestra para desgaste Los Ángeles**

**c) Preparación y ensayos de mezclas con PET reciclado**

En la tercera etapa de laboratorio se prepararon las mezclas modificadas incorporando PET reciclado (PET-R) a la base granular de la cantera Anta Anta; a partir de la muestra patrón se elaboraron tres mezclas experimentales con PET-R en proporciones de 15%, 25% y 35% en peso, y cada mezcla se homogeneizó cuidadosamente para garantizar una distribución uniforme del material plástico; posteriormente, las mezclas se sometieron a los mismos ensayos físicos y mecánicos descritos anteriormente, lo que permitió evaluar los cambios en las propiedades de la base granular debido a la adición de PET; como etapa

complementaria, y con el fin de analizar el comportamiento del material en rangos bajos de incorporación, se realizaron ensayos adicionales de Proctor modificado y CBR para dosificaciones de PET-R de 2,5% y 5%, asegurando así una caracterización completa de los efectos del PET sobre la mezcla.

Es importante señalar que los ensayos asociados exclusivamente a la fracción gruesa del material, tales como la abrasión Los Ángeles y la determinación de partículas chatas y alargadas o caras fracturadas, se realizaron únicamente para la base granular en su condición natural, puesto que la incorporación de PET-R se efectuó sobre la fracción fina y no modifica el origen ni la naturaleza de los agregados gruesos.

**Tabla 2 — Número de ensayos a realizar en laboratorio**

Ensayos físico-mecánico	Muestra patrón	Combinaciones				
		Muestra patrón con incorporación del tereftalato de polietileno reciclado			Ensayos adicionales	
		15%	25%	35%	2.5%	5%
Contenido de humedad	1	1	1	1	-	-
Granulometría	1	1	1	1	-	-
Límite Líquido	1	1	1	1	-	-
Límite Plástico	1	1	1	1	-	-
clasificación del suelo	1	1	1	1	-	-
Caras Fracturadas	1	-	-	-	-	-
Partículas Chatas y Alargadas	1	-	-	-	-	-
Equivalente de Arena	1	1	1	1	-	-
Sales Solubles	1	1	1	1	-	-
Abrasión	1	-	-	-	-	-
Proctor Modificado	3	3	3	3	1	1
CBR	3	3	3	3	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>16</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

#### 4.5.4 Análisis de resultados y comparación

Una vez ejecutados todos los ensayos físicos y mecánicos, se llevó a cabo el análisis de resultados siguiendo un proceso estructurado en varias etapas. En primer lugar, se organizaron todos los datos obtenidos en tablas y gráficos, diferenciando claramente la condición natural de la base granular y las mezclas modificadas con PET reciclado (PET-R), lo que facilitó la visualización precisa de las tendencias y variaciones en cada una de las variables evaluadas, permitiendo una comparación clara entre los materiales y sus comportamientos. A continuación, se realizó un análisis descriptivo



detallado de las propiedades físicas, interpretando cómo la incorporación de PET-R influía en parámetros clave como la granulometría, la plasticidad de los finos, el equivalente de arena y el contenido de humedad, lo que proporcionó una comprensión más profunda de los efectos del material reciclado en las características fundamentales del suelo, en especial en su capacidad de compresión y cohesión. De manera paralela, se analizaron las propiedades mecánicas, comparando la densidad seca máxima, la humedad óptima y los valores de CBR de la base granular natural con los obtenidos de las mezclas con PET-R, identificando las variaciones en la capacidad de soporte, la rigidez y la estabilidad de las mezclas, lo que permitió entender mejor cómo el PET reciclado afecta la resistencia mecánica del material, posteriormente, se procedió a determinar la dosificación más adecuada de PET-R entre las opciones evaluadas, aplicando un criterio comparativo basado en los resultados obtenidos en los ensayos y el comportamiento general de las mezclas, para seleccionar la mezcla que presentara las mejores propiedades de resistencia y durabilidad. Finalmente, cuando fue pertinente, se contrastaron los resultados obtenidos para la base granular en su condición natural con los requisitos establecidos por el Manual de Carreteras del MTC para materiales de base, con el fin de evaluar el grado de cumplimiento normativo del material de la cantera Anta Anta, asegurando que las mezclas modificadas con PET reciclado cumplieran con los estándares requeridos para su uso en pavimentos. Este exhaustivo análisis permitió establecer de manera precisa la influencia de la incorporación de PET-R en el comportamiento físico y mecánico de la base granular, cumpliendo así con los objetivos descriptivos y comparativos planteados en la investigación, y proporcionando una base sólida para la aplicación del PET reciclado en la mejora de materiales para pavimentación, con un enfoque sostenible, optimización de recursos y reducción de residuos en la construcción vial.



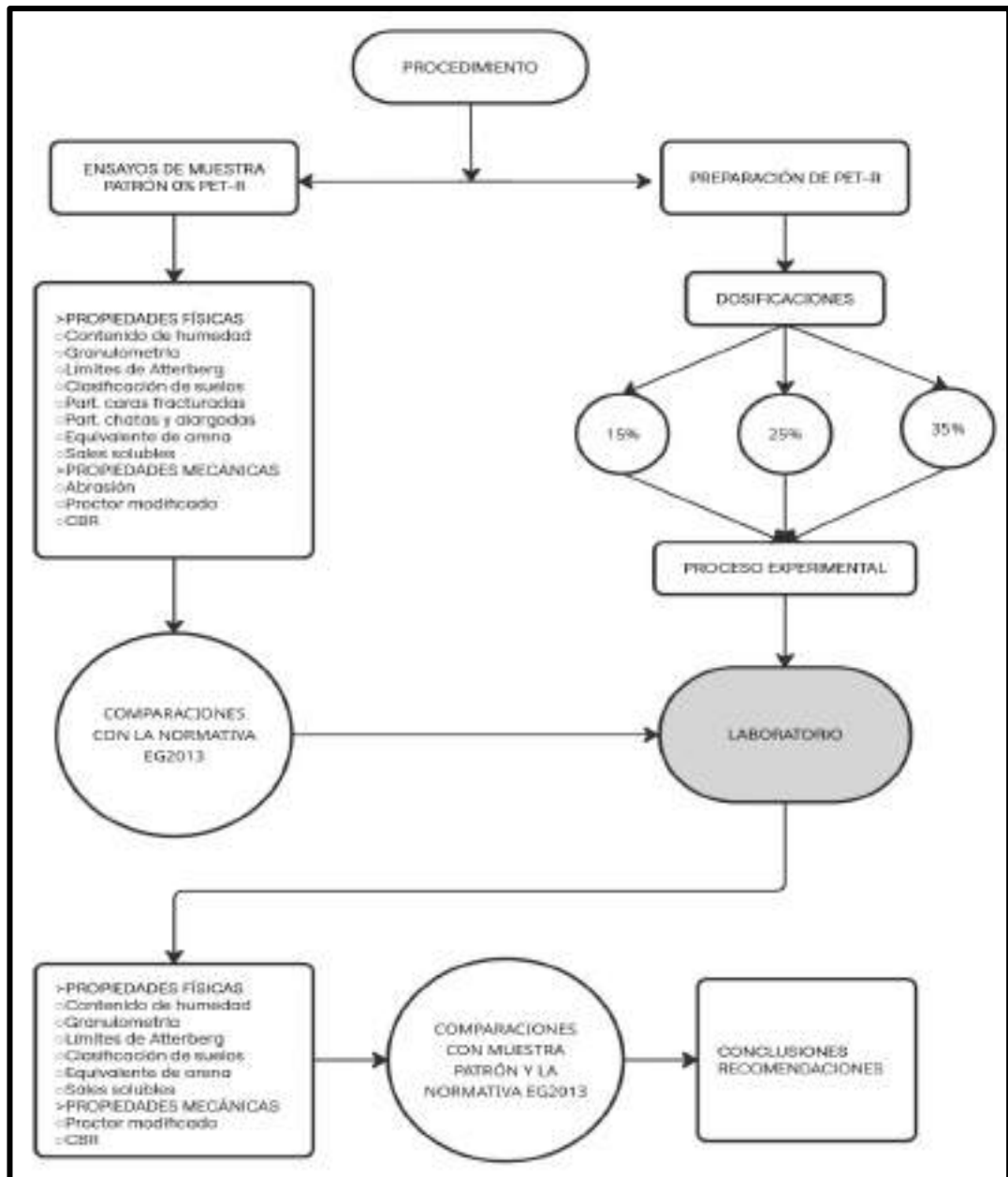


Figura 14 — Diagrama de flujo del procedimiento

## 4.6 Técnica e instrumentos

### 4.6.1 Técnica

- a) **Observación directa:** Método por el cual el investigador logra conseguir información de forma directa sobre el grupo general u objeto de estudio de la población, Romero y otros (2021). En el presente estudio, se llevarán a cabo visitas a la cantera que se seleccionó para la obtención de las muestras de la base granular. Del mismo modo, se observará y registrará la adquisición del PET reciclado que será utilizado en las mezclas experimentales. Esta técnica permitirá documentar adecuadamente el estado real de los materiales antes de someterlos a los ensayos físicos y mecánicos.



**b) Análisis documental:** En este estudio, el análisis documental se aplicará a normas técnicas, manuales de ensayos, investigaciones previas y documentos relacionados con bases granulares, pavimentos flexibles y el uso de PET reciclado, ya que el propósito es asegurar que la metodología experimental, los procedimientos de ensayo y la interpretación de resultados se ajusten a la normativa vigente y al marco teórico, (Romero y otros, 2021).

#### 4.6.2 Instrumentos

En esta sección se describen los instrumentos de medición empleados para la recolección de datos en los ensayos realizados, los cuales son fundamentales para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de la base granular con PET-R. Estos instrumentos se seleccionaron conforme a las normas técnicas pertinentes para cada tipo de ensayo, con el fin de garantizar que los resultados obtenidos sean precisos y fiables. Los instrumentos de medición utilizados en esta investigación incluyen equipos para realizar ensayos de compactación, capacidad de carga y granulometría, tales como prensa de CBR, equipo de compactación Proctor, tamices, entre otros, asimismo los formatos o instrumentos de recolección de datos elaboradas bajo normativas correspondientes y validadas por expertos. Todos los instrumentos fueron seleccionados en base a su capacidad para medir de manera precisa las propiedades del material granular y el PET-R en las condiciones experimentales: La validación se hizo de la siguiente manera:

**Tabla 3 — Coeficiente de confiabilidad Alfa de Cronbach**

Validez nula	Validez muy baja	Validez baja	Validez aceptable	Validez buena	Validez muy buena
0.00 - 0.49	0.50 - 0.59	0.60 - 0.69	0.70 - 0.79	0.80 - 0.89	0.90 - 1.00

**Tabla 4 — Validadores instrumentales**

N°	EXPERTO	ESPECIALIDAD	GRADO ACADÉMICO	VEREDICTO
1	Wilfredo Soto Palomino	Ingeniero civil	Doctor	Aplicable
2	Saúl José Chipa Cahuana	Ingeniero civil	Maestro	Aplicable
3	Edgar Anibal Perez Olaguivel	Estadístico	Doctor	Aplicable



Tabla 5 — Resumen de valoración de instrumentos

CRITERIOS	INDICADORES	Validación 01	Validación 01	Validación 01
PERTINENCIA DE LOS ENSAYOS	Relevancia	4	4	5
	Alineación	4	4	4
	Normatividad	5	5	5
COHERENCIA METODOLÓGICA	Procedimientos	4	5	5
	Variables	4	4	4
	Resultados	5	4	5
SUFICIENCIA DE ENSAYOS	Cobertura	5	4	4
	Muestra	5	5	5
	Repeticiones	4	4	4
PRECISIÓN Y CONFIABILIDAD DE RESULTADOS	Reproducibilidad	5	4	4
	Exactitud	4	5	4
	Variación	4	5	4
<b>COEFICIENTE DE VALIDEZ - ALFA DE CRONBACH</b>		<b>0.88</b>	<b>0.88</b>	<b>0.88</b>
<b>PROMEDIO</b>		<b>0.88</b>		

La validación realizada por los expertos asegura que los resultados obtenidos, respaldados por un coeficiente de Alfa de Cronbach de 0.88, son confiables y presentan un nivel de validez buena. Esto confirma que los instrumentos utilizados son adecuados para medir las propiedades del material con PET-R. Además, la evaluación experta verifica la precisión de los procedimientos experimentales y la consistencia de los resultados, garantizando la validez de la investigación.

#### 4.7 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos, se utilizarán pruebas descriptivas e inferenciales, como ANOVA para comparar las medias de las propiedades físicas y mecánicas entre las diferentes dosificaciones de PET-R y la muestra patrón, y Shapiro-Wilk para verificar la normalidad de los datos, asegurando la validez de los resultados.

##### 4.7.1 Análisis descriptivo

El análisis descriptivo se encargará de resumir y organizar los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio de manera que se pueda tener una visión general de las propiedades físicas y mecánicas bajo las diferentes condiciones de la investigación (muestra patrón y muestras con PET-R en diferentes dosificaciones: 15%, 25% y 35%). Las principales medidas estadísticas descriptivas que se utilizarán son la media

(promedio), que se calculará de cada propiedad (CBR y Proctor modificado), proporcionando una idea general del comportamiento promedio de las propiedades de la base granular para cada dosificación de PET-R; la desviación estándar ( $\sigma$ ), que nos permitirá conocer la dispersión de los datos respecto a la media, indicándonos la variabilidad de cada propiedad, de modo que una desviación estándar baja sugiere que los datos son consistentes, mientras que una alta indicaría mayor variabilidad; y los valores mínimos y máximos, que son importantes para entender el rango en el que las propiedades fluctúan, siendo necesario conocer los extremos de cada conjunto de datos para tener una visión más amplia del comportamiento de los materiales, con estas medidas descriptivas, se busca proporcionar un resumen cuantitativo claro de las propiedades de la base granular, tanto en su estado natural como con las diferentes dosificaciones de PET-R, permitiendo identificar patrones y tendencias iniciales.

#### 4.7.2 Análisis inferencial

El análisis inferencial se realiza para hacer comparaciones estadísticas entre las muestras de la base granular con distintas concentraciones de PET-R y la muestra patrón, con el fin de determinar si existen diferencias significativas en las propiedades estudiadas. Este tipo de análisis permite generalizar los resultados obtenidos en la muestra a la población completa (en este caso, la cantera Anta Anta), lo cual es crucial para la validación de las hipótesis planteadas, se utilizarán dos pruebas clave para obtener resultados confiables:

##### a) Prueba de normalidad de Shapiro - Wilk

Antes de proceder con el análisis de varianza (ANOVA), es imprescindible asegurarse de que los datos siguen una distribución normal, ya que este es uno de los supuestos clave de ANOVA. Para ello, se aplicará la prueba de Shapiro-Wilk, que es adecuada para tamaños de muestra pequeños a medianos.

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** Los datos siguen una distribución normal.
- **Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):** Los datos no siguen una distribución normal.

Criterio de aceptación:

- Si el p - valor de la prueba de Shapiro-Wilk es mayor que 0.05 ( $p > 0.05$ ), no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que los datos siguen una distribución normal y, por lo tanto, podemos aplicar ANOVA.



- Si el p - valor es menor o igual a 0.05 ( $p \leq 0.05$ ), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos no siguen una distribución normal, lo que implicaría que debemos optar por métodos no paramétricos, como el test de Kruskal - Wallis.

**b) Análisis de varianza (ANOVA)**

Una vez verificada la normalidad de los datos, se utilizó el Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor, con el fin de comparar las medias de las propiedades de la base granular para las distintas dosificaciones de PET-R, incluida la muestra patrón.

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** No existen diferencias significativas entre las medias de las propiedades evaluadas para las diferentes dosificaciones de PET-R.
- **Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):** Existen diferencias significativas entre las medias de las propiedades evaluadas para las diferentes dosificaciones de PET-R.

Criterio de aceptación:

- Si el p-valor obtenido de ANOVA es mayor que 0.05 ( $p > 0.05$ ), no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no hay diferencias significativas entre las dosificaciones de PET-R y la muestra patrón.
- Si el p-valor es menor o igual a 0.05 ( $p \leq 0.05$ ), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que las dosificaciones de PET-R influyen significativamente en las propiedades de la base granular.

Si ANOVA indica diferencias significativas, se llevará a cabo una prueba post-hoc, como el test de Tukey's HSD, con el fin de identificar específicamente cuáles dosificaciones difieren respecto a la muestra patrón y entre ellas. Esto permitirá un análisis más detallado de las comparaciones entre grupos para determinar las diferencias exactas.

### 4.7.3 Herramientas utilizadas

Para realizar el análisis estadístico, se utilizaron herramientas estadísticas reconocidas y ampliamente utilizadas en la investigación científica:

- Microsoft Excel: Fue utilizado para el cálculo de las estadísticas descriptivas básicas, como la media, desviación estándar, y los gráficos iniciales que permitieron visualizar las distribuciones de las propiedades.
- IBM SPSS Statistics: Esta herramienta fue esencial para realizar los análisis inferenciales avanzados, como el ANOVA y la prueba de normalidad Shapiro-Wilk. SPSS es un software confiable y robusto que permite realizar análisis estadísticos complejos con precisión y eficiencia.

Estas herramientas fueron elegidas debido a su fiabilidad y facilidad de uso, lo que asegura que los resultados obtenidos sean válidos y reproducibles. Además, el uso de SPSS permitió aplicar pruebas estadísticas avanzadas de manera eficiente, garantizando que los resultados fueran robustos y adecuados para respaldar las conclusiones de la investigación.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1 Análisis de resultados

En este apartado se presentan y analizan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la base granular de la cantera Anta Anta, en condición natural (0 % PET-R) y con incorporación de PET-R en diferentes dosificaciones. El estudio se organiza en propiedades físicas y mecánicas, e incluye una síntesis comparativa y la evaluación de la base natural según el Manual de Carreteras EG-2013.

##### 5.1.1 Resultados de propiedades físicas

###### a) Contenido de humedad natural

Se presenta el contenido de humedad natural del material granular para cada condición evaluada.

**Tabla 6 — Contenido de humedad natural del material granular**

Condición	Contenido de humedad w (%)
0 % PET-R	3.78
15 % PET-R	3.75
25 % PET-R	3.73
35 % PET-R	3.72

Los valores de humedad natural son relativamente bajos y se mantienen en un rango estrecho, entre 3.72 % y 3.78 %, lo que indica que el material se encontraba en condiciones similares al momento de la toma de muestras, la incorporación de PET-R no afecta el contenido de humedad natural de la base como tal, ya que el polímero se adiciona y mezcla posteriormente en laboratorio.

###### b) Límites de Atterberg (LL, LP, IP)

Se muestran los resultados de límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) de la fracción fina del material granular, en condición natural y con PET-R.



**Tabla 7 — Límites de Atterberg de la fracción fina**

Condición	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0 % PET-R	24.22	18.51	5.71
15 % PET-R	28.27	21.17	7.10
25 % PET-R	28.08	19.76	8.32
35 % PET-R	27.83	19.69	8.14

Los resultados muestran que la fracción fina del material presenta baja plasticidad (IP entre 5.71 % y 8.32 %), con una ligera tendencia progresiva y sostenida al incremento del IP al incorporar PET-R, posiblemente debido a la alteración y redistribución interna gradual de las partículas finas. No obstante, el material sigue ubicándose dentro de rangos de plasticidad moderada a baja, por lo que no se espera un comportamiento fuertemente expansivo o altamente compresible. El manual de carreteras EG-2013 establece, para el agregado fino de base granular, un índice de plasticidad máximo de 4 % para altitudes menores a 3000 msnm y de 2 % para altitudes mayores a 3000 msnm, como en el caso de proyectos ubicados en la sierra peruana. En este sentido, los valores de IP obtenidos superan los límites establecidos por la norma para el agregado fino de base granular, lo que indica que, desde el punto de vista de la calidad de los finos, el material de la cantera Anta Anta no cumple estrictamente con el requisito de plasticidad del EG-2013, aun antes de la incorporación de PET-R.

### c) Sales solubles

Se presenta el contenido de sales solubles totales del material granular en cada condición.

**Tabla 8 — Contenido de sales solubles totales**

Condición	Sales solubles totales (%)
0 % PET-R	0.031
15 % PET-R	0.031
25 % PET-R	0.047
35 % PET-R	0.053

Los valores se encuentran en el rango de 0.031 % a 0.053 %, por debajo del límite máximo de 0.5 % exigido por el EG-2013 para el material granular de base, tanto para agregado grueso como para agregado fino. Esto indica que la presencia de sales solubles en el material de la cantera Anta Anta es baja y no representa un factor crítico de riesgo de deterioro químico o inestabilidad en el pavimento. La incorporación de PET-R no introduce sales adicionales, por lo que la variación observada se mantiene dentro de un rango aceptable.

**d) Equivalente de arena**

Se presenta el equivalente de arena (EA), indicador de la limpieza de la fracción fina y del contenido relativo de partículas arcillosas.

**Tabla 9 — Equivalente de arena del material granular**

Condición	Equivalente de arena EA (%)
0 % PET-R	54.00
15 % PET-R	67.00
25 % PET-R	77.00
35 % PET-R	75.00

Se observa que el equivalente de arena es ya aceptable en la condición natural (54 %), y se incrementa al incorporar PET-R, alcanzando valores de hasta 77 %, la EG-2013 establece, para el agregado fino de base granular, un EA mínimo de 35 % para altitudes menores a 3000 msnm y de 45 % para altitudes mayores a 3000 msnm. En todos los casos, el material de la cantera Anta Anta supera ampliamente estos límites, lo que indica una baja presencia de finos plásticos y una fracción fina predominantemente arenosa.

El aumento del EA con PET-R indica que la inclusión del polímero, al estar en partículas limpias, reduce el impacto de los finos arcillosos, mejorando la limpieza relativa de la fracción fina en la mezcla.

**e) Partículas chatas y alargadas y partículas con caras fracturadas**

Los ensayos de partículas chatas y alargadas y partículas con caras fracturadas se aplican a la fracción gruesa del material (retenido tamiz N.º 4), por lo que se



realizaron únicamente sobre la muestra patrón sin PET-R, ya que la incorporación del polímero se limita a la fracción fina y no modifica la naturaleza ni el origen del agregado grueso.

**Tabla 10 — Forma y caras fracturadas del agregado grueso (muestra patrón)**

Propiedad	Resultado (%)
Partículas chatas y alargadas	12.75
Partículas con caras fracturadas (mín.)	82.00

Según el EG-2013, para el agregado grueso de base granular, se exige un máximo de 15 % de partículas chatas y alargadas y un mínimo de 80 % de partículas con una cara fracturada, con valores mayores cuando se requiere dos caras fracturadas. Los resultados obtenidos (12.75 % de partículas chatas y alargadas y 82 % de partículas con caras fracturadas) se encuentran dentro de los rangos aceptables, lo que indica una buena calidad geométrica del agregado grueso de la cantera Anta Anta, con adecuada intertrabazón para resistir esfuerzos cortantes.

#### f) Granulometría y clasificación del material

La granulometría del material granular se determinó mediante ensayo de tamizado para la muestra patrón y para las mezclas con PET-R. Se presenta un resumen de la distribución global en términos de porcentajes de grava, arena y finos para cada condición.

**Tabla 11 — Distribución granulométrica global del material**

Condición	% Grava	% Arena	% Finos (pasante N° 200)
0 % PET-R	68.48	21.54	9.98
15 % PET-R	59.88	31.47	8.65
25 % PET-R	55.33	36.70	7.97
35 % PET-R	51.74	40.82	7.44

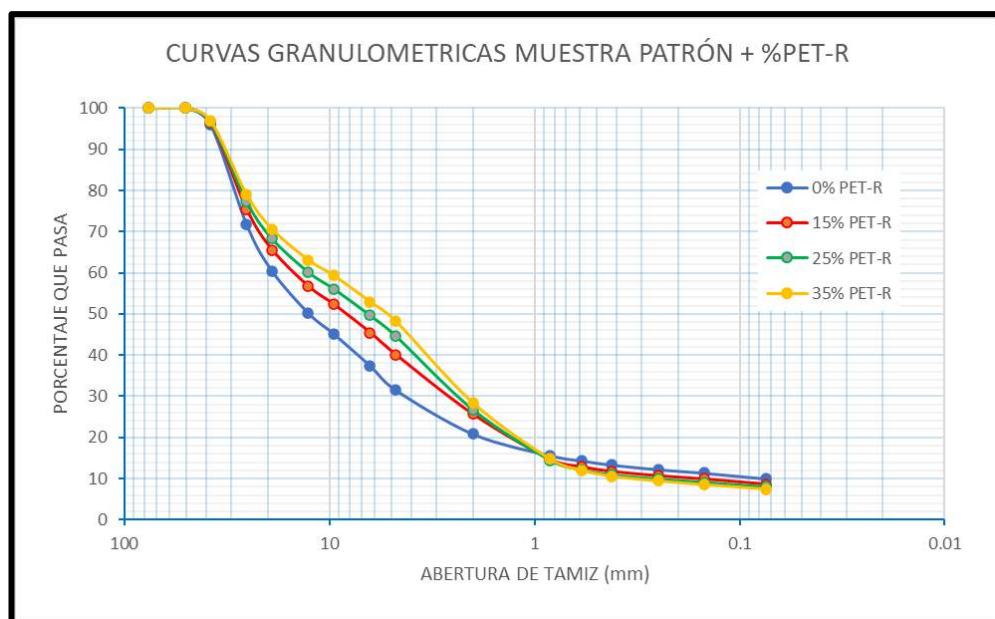


Figura 15 — Curva granulométrica global del material

Los resultados muestran que, al incrementar el contenido de PET-R, se produce una disminución progresiva del porcentaje de grava y un aumento del porcentaje de arena, mientras que el contenido de finos (pasante N.º 200) se mantiene por debajo del 10 %, con ligera disminución. Ello es consistente con el hecho de que el PET-R se incorpora a la fracción fina (pasante N.º 4), alterando la relación entre las fracciones arena - finos y el conjunto de la mezcla. En cuanto a la clasificación, el material se caracterizó, en términos generales, como:

Tabla 12 — Clasificación del material según SUCS y AASHTO

Condición	SUCS	AASHTO
0 % PET-R	GP-GC	A-1-a(0)
15 % PET-R	GP-GC	A-2-4(0)
25 % PET-R	GP-GC	A-2-4(0)
35 % PET-R	GP-GC	A-2-4(0)

La clasificación GP-GC indica una grava mal gradada con contenido de finos arcillosos, mientras que las clases A-1-a y A-2-4 del sistema AASHTO se asocian a materiales granulares de buena a regular calidad para uso en bases y subbases, dependiendo de su índice de grupo y del contenido de finos. La transición de (A-1-a) a (A-2-4) al incorporar PET-R refleja que el material



adquiere un carácter algo más “mixto” (grava con finos), manteniendo sin embargo un comportamiento granular dominante.

## 5.1.2 Resultados de propiedades mecánicas

### a) Ensayo Proctor modificado

Se presentan los valores promedio de densidad seca máxima ( $\gamma_d$  máx) y humedad óptima ( $w_{opt}$ ) obtenidos en el ensayo Proctor modificado, para cada condición de contenido de PET-R, cada valor promedio resulta del procesamiento de tres réplicas por condición.

**Tabla 13 — Tabla resultados promedio del ensayo Proctor modificado**

Condición	$\gamma_d$ máx promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ promedio (%)
0 % PET-R	2.090	7.283
15 % PET-R	1.756	7.317
25 % PET-R	1.560	7.367
35 % PET-R	1.399	7.363
2.5 % PET-R	2.0730	7.2800
5 % PET-R	2.0460	7.2000

Los resultados muestran claramente que la densidad seca máxima disminuye de manera progresiva al aumentar el contenido de PET-R, pasando de 2.090 g/cm<sup>3</sup> en la muestra patrón (0 % PET-R) a 1.399 g/cm<sup>3</sup> en la mezcla con 35 % PET-R, los resultados del Proctor modificado muestran que, en dosificaciones bajas (2.5% y 5%), la densidad seca máxima disminuye ligeramente respecto a la condición natural (0% PET-R), manteniéndose muy cercana al valor patrón (reducciones aproximadas de 0.8% y 2.1%, respectivamente), mientras que la humedad óptima se conserva prácticamente estable.

La reducción de densidad seca máxima se explica principalmente por la menor densidad del PET-R en comparación con el material granular. Además, las partículas poliméricas no contribuyen de la misma manera al empaquetamiento denso del esqueleto granular, lo que afecta la compactación de la mezcla, por último, la introducción de elementos más ligeros y deformables puede provocar



una pérdida de contacto efectivo entre las partículas granulares, disminuyendo la densidad máxima alcanzada.

Para visualizar esta tendencia, se generó el siguiente gráfico:

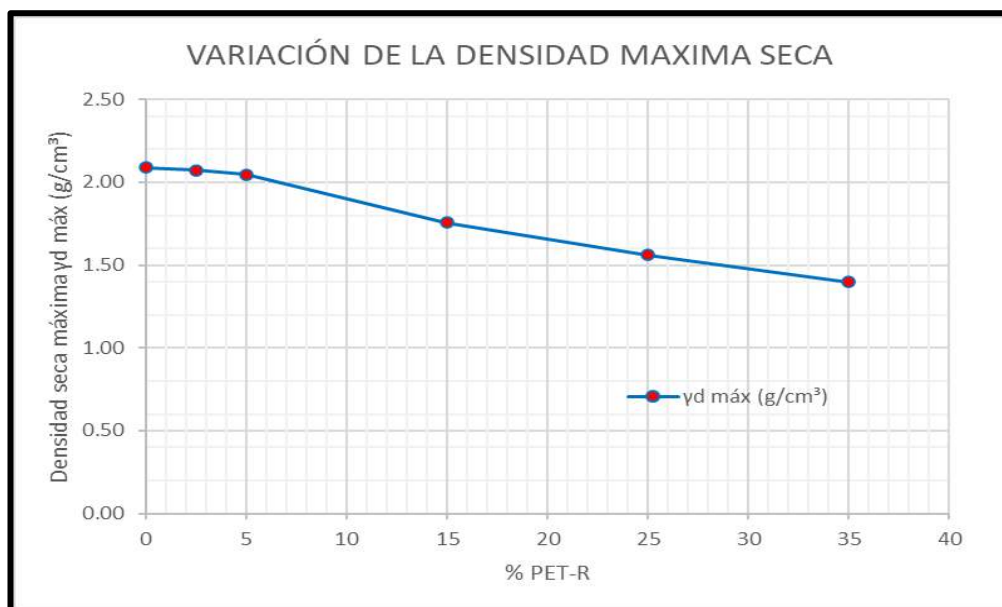


Figura 16 — Variación de  $\gamma_d$  máx con el contenido de PET-R

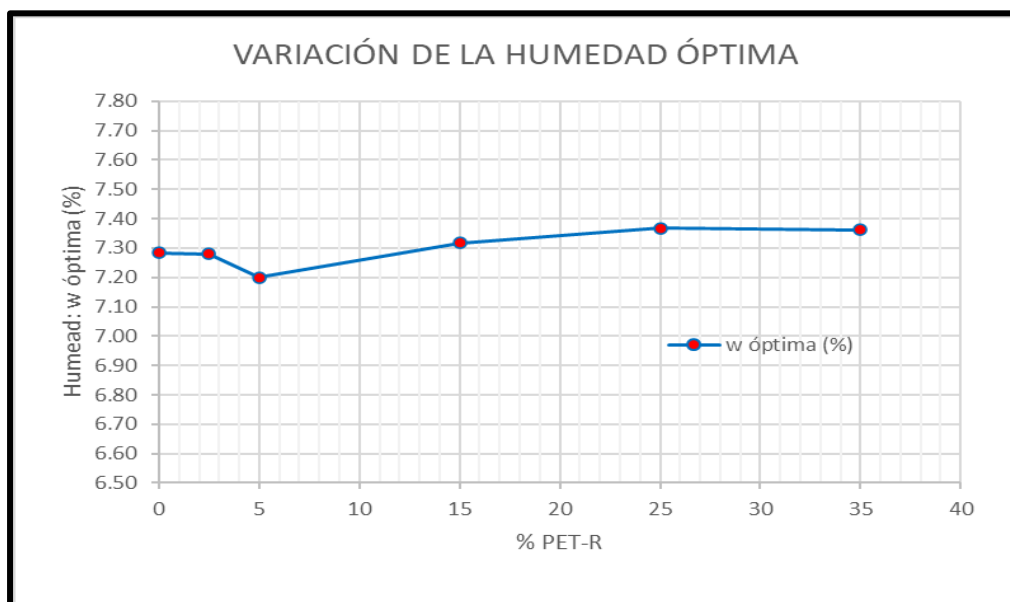


Figura 17 — Variación de la humedad óptima con el contenido de PET-R

En la figura que corresponde a la máxima densidad seca se aprecia una curva descendente de la densidad seca máxima conforme aumenta el porcentaje de PET-R, mientras que la figura correspondiente a óptimo contenido de humedad muestra una línea prácticamente horizontal para la humedad óptima, desde el



punto de vista de diseño y construcción de pavimentos, la reducción de densidad máxima implica que, aunque la energía de compactación sea la misma, la estructura granular resultante es menos densa y potencialmente menos rígida, lo cual tendrá repercusiones directas en la capacidad de soporte evaluada mediante el CBR.

**b) Ensayo CBR (California Bearing Ratio)**

Se presentan los valores promedio del CBR al 95 % y al 100 % de compactación, para cada condición de contenido de PET-R. Cada valor promedio se obtuvo a partir de tres repeticiones ensayadas por condición.

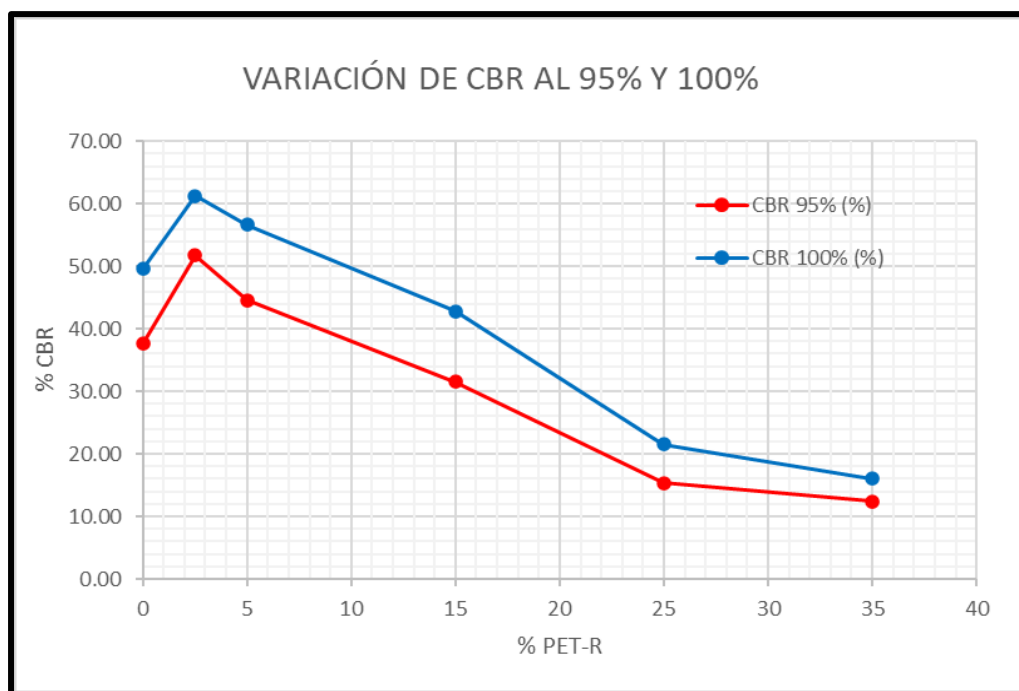
**Tabla 14 — Tabla resultados promedio del CBR al 95 % y 100 % de compactación**

Condición	CBR 95 % promedio (%)	CBR 100 % promedio (%)
0 % PET-R	37.617	49.583
15 % PET-R	31.545	42.773
25 % PET-R	15.301	21.493
35 % PET-R	12.364	16.076
2.5 % PET-R	51.749	61.273
5 % PET-R	44.574	56.645

Se observa que, para ambas condiciones de compactación, el CBR disminuye de manera considerable conforme se incrementa el contenido de PET-R en la base granular. En el caso de 95 % de compactación, el CBR pasa de aproximadamente 37.6 % (0 % PET-R) a 31.5 % (15 % PET-R), 15.3 % (25 % PET-R) y 12.4 % (35 % PET-R). Para el 100 % de compactación, los valores descienden de 49.6 % a 42.8 %, 21.5 % y 16.1 %, respectivamente.

Las gráficas siguientes permiten visualizar estas tendencias:





**Figura 18 — Variación del CBR al 95 % y 100% con contenido de PET-R**

En la figura se aprecia dos curvas claramente descendentes, lo que indica que el PET-R, en los porcentajes evaluados (15%, 25% y 35%), reduce la capacidad de soporte del material granular de la cantera Anta Anta. La disminución es relativamente moderada entre 0 % y 15 % de PET-R, pero se vuelve muy significativa a partir de 25 %, donde los valores de CBR caen a niveles cercanos a los típicos de subbases o incluso de subrasantes mejoradas.

Este comportamiento puede explicarse por varios factores técnicos: la reducción de densidad seca máxima observada en el Proctor modificado indica que la estructura granular es menos densa, generando un mayor volumen relativo de vacíos, además el PET-R, al ser un material más flexible y ligero, no contribuye de la misma manera a la transmisión de cargas ni a la resistencia al esfuerzo cortante, y finalmente, el esqueleto del material granular se ve interrumpido por partículas poliméricas que actúan como inclusiones menos rígidas, disminuyendo el rozamiento interno efectivo entre las partículas, desde la perspectiva de diseño de pavimentos, los valores de CBR obtenidos en las mezclas con alto contenido de PET-R se alejan de los requisitos usuales para bases granulares, lo que limita su uso estructural directo en capas de base sin una estrategia complementaria de diseño o estabilización.

Por otro lado, con las dosificaciones adicionales a diferencia de las dosificaciones altas (15%-35%), donde el CBR disminuye de manera sostenida respecto a la condición natural, las dosificaciones complementarias bajas evidencian un comportamiento favorable: con 2.5% PET-R se obtiene un incremento del CBR respecto a la muestra patrón tanto al 95% como al 100% de compactación, y con 5% PET-R también se observa mejora, aunque menor que con 2.5%. Este resultado indica un comportamiento no lineal del PET-R en la base granular: existe un rango bajo donde la respuesta mecánica mejora, mientras que incrementos del contenido de PET-R por encima de ese rango conducen a pérdidas significativas de capacidad de soporte.

### c) Ensayo de abrasión Los Ángeles

El ensayo de abrasión Los Ángeles se aplicó exclusivamente a la fracción gruesa de la muestra patrón sin PET-R, dado que el PET-R se incorporó únicamente en la fracción fina, en la siguiente tabla se presenta el resultado obtenido.

**Tabla 15 — Tabla resultado del ensayo de abrasión Los Ángeles (muestra patrón)**

Condición	% Desgaste Los Ángeles
0 % PET-R	27.00

El EG-2013 establece para el agregado grueso de base granular un valor máximo de 40 % de desgaste Los Ángeles, tanto para proyectos ubicados por debajo como por encima de los 3000 msnm. El valor de 27 % indica que el agregado grueso de la cantera Anta Anta posee una buena resistencia al desgaste mecánico, cumpliendo holgadamente con la exigencia normativa y siendo adecuado para su uso en capas de base desde el punto de vista de durabilidad frente al tráfico.

### 5.1.3 Síntesis comparativa del comportamiento con PET-R

A partir de los resultados físicos y mecánicos analizados, es posible establecer una visión integrada del efecto de la incorporación de PET-R en la base granular de la cantera Anta Anta. La siguiente tabla resume, de forma cualitativa, las principales tendencias observadas.



Tabla 16 — Tabla resumen del análisis de la influencia del PET-R

Propiedad	Tendencia al aumentar PET-R (0–35 %)
Densidad seca máxima ( $\gamma_d$ máx)	Disminuye de manera progresiva
Humedad óptima ( $w_{ópt}$ )	Se mantiene prácticamente constante
CBR 95 % y 100 %	Disminuye de manera significativa con las dosificaciones evaluadas y con dosificaciones adicionales aumenta favorablemente
Índice de plasticidad (IP)	Aumenta levemente, manteniéndose en baja–media
Equivalente de arena (EA)	Aumenta, indicando fracción fina más limpia
% Grava	Disminuye ligeramente
% Arena	Aumenta
% Finos (pasante N.º 200)	Se mantiene por debajo de 10 %, leve descenso
Abrasión Los Ángeles (0 % PET)	Cumple con EG-2013, valor satisfactorio

En síntesis:

**a) Desde el punto de vista físico, la incorporación de PET-R**

Redistribuye la granulometría, reduciendo el contenido relativo de grava y aumentando la fracción de arena. Además, incrementa ligeramente el índice de plasticidad y mejora el equivalente de arena, lo que indica una menor cantidad de finos plásticos. Asimismo, mantiene el contenido de finos pasante N.º 200 dentro de un rango razonable.

**b) Desde el punto de vista mecánico, al incorporar PET-R**

La densidad seca máxima disminuye de forma consistente, y los valores de CBR al 95 % y al 100 % se reducen significativamente, quedando por debajo de los requisitos del EG-2013. Sin embargo, con las dosificaciones adicionales, el CBR mejora respecto a la muestra patrón, aunque aún no cumple con las normativas establecidas.

En consecuencia, aunque algunos parámetros físicos como el equivalente de arena muestran mejoras, estas no se traducen en un mejor comportamiento mecánico, por



el contrario, el PET-R tiende a debilitar la respuesta estructural del material cuando se incorpora en las proporciones analizadas, sin embargo, con dosificaciones adicionales en menores porcentajes llega a mejorar la muestra patrón.

#### 5.1.4 Comparación de la base natural con el manual de carreteras EG-2013

Como complemento al análisis interno de los resultados, es importante comparar la muestra patrón sin PET-R (0 %) con los requisitos establecidos por el manual de carreteras – especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 para materiales de base granular.

Se presenta una comparación resumida para los parámetros más representativos.

**Tabla 17 — Tabla comparación muestra patrón vs requisitos EG-2013**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado base 0 % PET-R</b>	<b>Requisito EG-2013 (Base granular)</b>	<b>Cumple</b>
CBR 100 % Proctor	49.6 % aprox.	$\geq 80 \%$	No
IP (fracción fina)	5.71 %	$\leq 4 \%$ (< 3000 msnm) o $\leq 2 \%$ (> 3000 msnm)	No
Equivalente de arena (EA)	54 %	$\geq 35 \%$ (< 3000 msnm) o $\geq 45 \%$ (> 3000 msnm)	Sí
Sales solubles totales	0.031 %	$\leq 0.5 \%$	Sí
Abrasión Los Ángeles (ag. grueso)	27 %	$\leq 40 \%$	Sí
% Partículas chatas y alargadas	12.75 %	$\leq 15 \%$	Sí
% Partículas con caras fracturadas	82 %	$\geq 80 \%$	Sí

La comparación muestra que:

- En términos de calidad del agregado grueso (abráción Los Ángeles, forma y caras fracturadas), el material de la cantera Anta Anta cumple con las exigencias del EG-2013, lo cual es consistente con su aptitud como agregado para capas estructurales.



- En cuanto a la fracción fina, el equivalente de arena también cumple holgadamente, lo que indica una fracción fina predominantemente arenosa y con bajo contenido de finos arcillosos.
- Sin embargo, los parámetros críticos son: el índice de plasticidad (IP), que supera los valores máximos permitidos para base granular, y el CBR al 100 % de compactación, que resulta inferior al mínimo de 80 % exigido para capas de base.

Esto implica que, aunque ciertos aspectos del material son adecuados, la capacidad de soporte de la base natural y la plasticidad de su fracción fina no cumplen plenamente con los requerimientos normativos del MTC para ser utilizada como base granular en pavimentos flexibles sin medidas adicionales de mejora o estabilización. Al incorporar PET-R, los valores de CBR disminuyen aún más, alejándose de los criterios establecidos para bases, lo que refuerza la conclusión de que, en los porcentajes de PET-R analizados, el material no alcanza las condiciones estructurales mínimas necesarias para desempeñarse como base granular conforme al EG-2013.

## 5.2 Contrastación de hipótesis

La contrastación de hipótesis se basa en el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y en la aplicación de herramientas estadísticas adecuadas para determinar si los datos respaldan o refutan las hipótesis planteadas en la investigación, en este caso, se utilizarán tanto pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) como el análisis de varianza (ANOVA) para contrastar cada una de las hipótesis, permitiendo evaluar si las variaciones observadas entre las diferentes dosificaciones de PET-R son estadísticamente significativas.

A continuación, se presenta la prueba de normalidad y la contrastación de la hipótesis general y de las hipótesis específicas.

### 5.2.1 Prueba de normalidad

La prueba de normalidad Shapiro – Wilk se aplicó para verificar el ajuste de los datos de las propiedades mecánicas a una distribución normal, requisito previo para el uso de pruebas estadísticas paramétricas.



**Tabla 18 — Tabla prueba de normalidad**

Descripción	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Proctor modificado (máxima densidad seca)	0.863	12	0.053
Proctor modificado (humedad óptima)	0.957	12	0.735
CBR al 100% de compactación	0.823	12	0.171
CBR al 95% de compactación	0.801	12	0.097

Los resultados muestran valores de significancia superiores a 0.05 en todas las variables evaluadas, por lo que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad, en particular, la densidad seca máxima presenta un valor de  $p = 0.053$ , lo que permite considerar una distribución aproximadamente normal. La humedad óptima ( $p = 0.735$ ), el CBR al 100 % ( $p = 0.171$ ) y el CBR al 95 % ( $p = 0.097$ ) también cumplen el supuesto de normalidad, estos resultados confirman que los datos presentan un comportamiento estadístico adecuado, lo que justifica el uso de pruebas paramétricas, como ANOVA, para evaluar el efecto de las dosificaciones de PET-R sobre el comportamiento mecánico de la base granular.

### 5.2.2 Contrastación de la hipótesis general

Hipótesis general: “La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado modifica las propiedades físicas y mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.”

- $H_0$ : La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado no modifica de manera significativa las propiedades físicas ni mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.
- $H_1$ : La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado modifica las propiedades físicas y mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.

Para contrastar esta hipótesis, se consideran los principales resultados físicos y mecánicos:



Tabla 19 — Varianza propiedades físicas

Variable	Contenido de humedad (%)	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Equivalente de arena (%)	Sales solubles (%)
0 % PET-R	3.78	24.22	18.51	5.71	54	0.03
15 % PET-R	3.75	28.27	21.17	7.1	67	0.03
25 % PET-R	3.73	28.08	19.76	8.32	77	0.05
35 % PET-R	3.72	27.83	19.69	8.14	75	0.05
Mínimo	3.72	24.22	18.51	5.71	54	0.03
Máximo	3.78	28.27	21.17	8.32	77	0.05
Rango	0.06	4.05	2.66	2.61	23	0.02
$\Delta$ (35% – 0%)	-0.06	3.61	1.18	2.43	21	0.02
$\Delta\%$ (35% vs 0%)	-1.59%	14.91%	6.37%	42.56%	38.89%	66.67%

Tabla 20 — Valor de significancia propiedades mecánicas

Descripción		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Proctor modificado (máxima densidad seca)	Entre grupos	0.795	3	0.265	15518.119	0.000
	Dentro de grupos	0.000	8	0.000		
	Total	0.795	11			
Proctor modificado (humedad óptima)	Entre grupos	0.014	3	0.005	0.724	0.565
	Dentro de grupos	0.053	8	0.007		
	Total	0.067	11			
CBR al 100% de compactación	Entre grupos	2364.846	3	788.282	341.929	0.000
	Dentro de grupos	18.443	8	2.305		
	Total	2383.289	11			
CBR al 95% de compactación	Entre grupos	1359.714	3	453.238	2074.474	0.000
	Dentro de grupos	1.748	8	0.218		
	Total	1361.461	11			

Para su contraste, se analizaron conjuntamente los resultados descriptivos de las propiedades físicas y los resultados inferenciales (ANOVA) de las propiedades mecánicas, considerando un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

**a) En cuanto a las propiedades físicas**

El contenido de humedad presenta una variación mínima entre las dosificaciones evaluadas, con un rango total de 0.06 % y una variación relativa de -1.59 % al comparar la dosificación máxima (35 % PET-R) con la condición natural. Este comportamiento indica que la incorporación de PET-R no produce cambios significativos en la retención de humedad del material, manteniéndose un comportamiento hídrico estable. En contraste, los límites de Atterberg muestran variaciones apreciables. El límite líquido incrementa de 24.22 % a un máximo de 28.27 %, con una variación relativa de 14.91 %, mientras que el límite plástico presenta un aumento más moderado, con una variación relativa de 6.37 %. Como consecuencia, el índice de plasticidad evidencia un incremento notable, pasando de 5.71 % en la condición natural a valores superiores a 8 %, alcanzando una variación relativa de 42.56 %, estos resultados demuestran que el PET-R modifica de manera significativa el comportamiento plástico de la base granular, siendo esta una de las propiedades físicas más sensibles a su incorporación. El equivalente de arena presenta uno de los cambios más relevantes, aumentando de 54 % a un máximo de 77 %, con un rango de 23 % y una variación relativa de 38.89 %. Este comportamiento refleja una mejora sustancial en la calidad del agregado fino, asociada a una menor proporción relativa de partículas arcillosas activas, lo cual constituye un efecto físico favorable del uso de PET-R. En cuanto a las sales solubles, si bien la variación relativa alcanza 66.67 %, el incremento absoluto es reducido (0.02 %) y los valores máximos se mantienen muy por debajo de los límites normativos. En términos prácticos, la incorporación de PET-R no introduce riesgos químicos ni de durabilidad para la base granular.

**b) En cuanto a las propiedades mecánicas**

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a las propiedades mecánicas evidencia un efecto estadísticamente significativo de la incorporación de PET-R sobre la densidad seca máxima, con un valor de  $F = 15518.119$  y  $p = 0.000$ , lo que confirma que la dosificación de PET-R modifica de manera significativa la capacidad de compactación del material. Por el contrario, la humedad óptima de compactación no presenta diferencias estadísticamente significativas entre las dosificaciones evaluadas ( $F = 0.724$ ;  $p = 0.565$ ), lo que indica que el PET-R no altera de forma relevante las condiciones óptimas de compactación desde



el punto de vista hídrico. En cuanto a la capacidad portante, los resultados del ANOVA muestran diferencias altamente significativas tanto para el CBR al 100 % de compactación ( $F = 341.929$ ;  $p = 0.000$ ) como para el CBR al 95 % de compactación ( $F = 2074.474$ ;  $p = 0.000$ ). Estos resultados demuestran que la incorporación de PET-R influye de manera significativa en el comportamiento mecánico de la base granular, afectando su resistencia a la penetración.

El análisis muestra que, aunque variables como el contenido de humedad y la humedad óptima no cambian de forma significativa, la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas sí presentan modificaciones claras y estadísticamente significativas debido a la incorporación de PET-R, especialmente el índice de plasticidad, el equivalente de arena, la densidad seca máxima y el CBR.

En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ), concluyéndose que la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado modifica las propiedades físicas y mecánicas de la base granular respecto a su condición natural, validando la hipótesis general del estudio.

**Tabla 21 — Tabla resumen del comportamiento de muestra con PET-R**

Propiedad	0 % PET-R	Rango con PET-R (15–35 %)	Tendencia global
Índice de plasticidad (IP)	5.71 %	7.10 – 8.32 %	Aumenta
Equivalente de arena (EA)	54 %	67 – 77 %	Aumenta
% Grava	68.48 %	51.74 – 59.88 %	Disminuye
% Arena	21.54 %	31.47 – 40.82 %	Aumenta
% Finos (pasante N.º 200)	9.98 %	7.44 – 8.65 %	Ligera disminución
Clasificación AASHTO	A-1-a(0)	A-2-4(0)	Cambia de A-1-a a A-2-4

$\gamma_d$ máx Proctor (g/cm <sup>3</sup> )	2.090	1.399 – 1.756	Disminuye
CBR 95 %	37.62 % aprox.	12.36 – 31.55 %	Disminuye
CBR 100 %	49.58 % aprox.	16.08 – 42.77 %	Disminuye
CBR 100%	PET-R 2.5% y 5%	61.27–56.65%	Aumenta

### 5.2.3 Contrastación de la hipótesis específica 1

Hipótesis específica 1: “La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas produce variaciones en las propiedades físicas de la base granular respecto a su condición natural.”

- Ho: La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas no produce variaciones significativas en las propiedades físicas de la base granular respecto a su condición natural.
- Hi: La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas produce variaciones en las propiedades físicas de la base granular respecto a su condición natural.

**Tabla 22 — Valor de significancia propiedades mecánicas**

Dosificación PET-R	Contenido de humedad (%)	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Equivalente de arena (%)	Salas solubles (%)
0%	3.78	24.22	18.51	5.71	54	0.03
15%	3.75	28.27	21.17	7.1	67	0.03
25%	3.73	28.08	19.76	8.32	77	0.05
35%	3.72	27.83	19.69	8.14	75	0.05

El contenido de humedad disminuye ligeramente al aumentar la dosificación de (3.78% a 3.72% con 35% de PET-R), sin afectar significativamente el comportamiento hídrico de la base granular.

En relación con los límites de Atterberg, se observa un incremento del límite líquido, que pasa de 24.22 % en la muestra natural a valores superiores al 27 % en todas las dosificaciones con PET-R. El límite plástico también presenta aumentos respecto a la condición natural, especialmente con 15 % PET-R, lo que provoca un incremento progresivo en el índice de plasticidad, alcanzando un valor máximo de 8.32 % con 25 % PET-R. Además, el equivalente de arena muestra un aumento significativo con la incorporación de PET-R, pasando de 54 % en la condición natural a valores entre 67 % y 77 % en las dosificaciones evaluadas, este comportamiento refleja una mejora en la calidad del agregado fino, asociada a una menor proporción de partículas arcillosas activas, lo que constituye un efecto físico favorable del PET-R. En cuanto a las sales solubles, los valores aumentan ligeramente en las dosificaciones de 25 % y 35 % PET-R, pero se mantienen en niveles muy bajos (0.03 % – 0.05 %) y dentro de los límites normativos, lo que indica que la incorporación del polímero no genera riesgos químicos ni de durabilidad para la base granular. Los resultados evidencian que, si bien el contenido de humedad no presenta variaciones significativas, otras propiedades físicas como el índice de plasticidad y el equivalente de arena muestran cambios apreciables, los cuales varían de manera sistemática con la dosificación de PET-R.

Por tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ), concluyéndose que la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado produce variaciones significativas en las propiedades físicas de la base granular respecto a su condición natural, con efectos diferenciados según la propiedad evaluada.

#### 5.2.4 Contrastación de la hipótesis específica 2

Hipótesis específica 2: “La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas produce variaciones en las propiedades mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.”

- $H_0$ : La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas no produce variaciones significativas en las propiedades mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.



- H<sub>1</sub>: La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas sí produce variaciones en las propiedades mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.

**Tabla 23 — Variaciones de máxima densidad seca**

Dosificación		N	Subconjunto para alfa = 0.05			
			1	2	3	4
HSD Tukey <sup>a</sup>	35% PET-R	3.000	1.399			
	25% PET-R	3.000		1.560		
	15% PET-R	3.000			1.756	
	0% PET-R	3.000				2.090
	Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

**Tabla 24 — Variaciones humedad óptima**

Dosificación		N	Subconjunto para alfa = 0.05
			1
HSD Tukey <sup>a</sup>	0% PET-R	3.000	7.283
	15% PET-R	3.000	7.317
	35% PET-R	3.000	7.363
	25% PET-R	3.000	7.367
	Sig.		0.613

**Tabla 25 — Variaciones CBR al 100%**

Dosificación		N	Subconjunto para alfa = 0.05			
			1	2	3	4
HSD Tukey <sup>a</sup>	35% PET-R	3.000	16.076			
	25% PET-R	3.000		21.493		
	15% PET-R	3.000			42.773	
	0% PET-R	3.000				49.583
	Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 26 — Variaciones CBR al 95%

Dosificación		N	Subconjunto para alfa = 0.05			
			1	2	3	4
HSD Tukey <sup>a</sup>	35% PET-R	3.000	12.364			
	25% PET-R	3.000		15.301		
	15% PET-R	3.000			31.545	
	0% PET-R	3.000				37.617
	Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 27 — Dosificaciones adicionales

Dosificación PET-R Adicionales	Densidad seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)	CBR 100 % (%)	CBR 95 % (%)
2.50%	2.073	7.28	61.273	51.749
5%	2.046	7.2	56.645	44.574

Para contrastarla, se analizaron la densidad seca máxima y la humedad óptima obtenidas mediante el Proctor modificado, así como los valores de CBR al 100 % y 95 % de compactación, aplicándose el análisis de varianza y la prueba post hoc HSD de Tukey con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

En cuanto a la densidad seca máxima, los resultados evidencian la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre todas las dosificaciones evaluadas, observándose una disminución progresiva conforme se incrementa el contenido de PET-R. La condición natural (0 % PET-R) presenta el mayor valor de densidad seca, mientras que la dosificación de 35 % PET-R registra el valor más bajo, este comportamiento indica que la incorporación del polímero afecta de manera directa la capacidad de compactación del material, siendo las dosificaciones altas las que generan los mayores cambios mecánicos, particularmente en términos de reducción de densidad. Respecto a la humedad óptima de compactación, los resultados muestran un comportamiento homogéneo entre las dosificaciones evaluadas, la prueba HSD de Tukey agrupa a todas las dosificaciones en un único subconjunto, con un valor de significancia  $p = 0.613$ , lo que demuestra que no existen diferencias

estadísticamente significativas en esta propiedad. En consecuencia, la incorporación de PET-R no modifica de manera relevante el contenido óptimo de humedad requerido para alcanzar la máxima densificación del material.

En relación con el CBR al 100 % de compactación, se identifican diferencias estadísticamente significativas entre todas las dosificaciones, evidenciándose una disminución progresiva de la capacidad portante a medida que aumenta el porcentaje de PET-R. La dosificación de 35 % PET-R presenta la mayor reducción del CBR, seguida por la de 25 % PET-R, lo que confirma que las dosificaciones elevadas generan las variaciones más desfavorables en la resistencia a la penetración de la base granular.

De manera concordante, el CBR al 95 % de compactación presenta el mismo patrón de comportamiento, con valores decrecientes conforme aumenta el contenido de PET-R. La dosificación de 35 % PET-R vuelve a evidenciar el mayor cambio negativo respecto a la condición natural, confirmando que la incorporación del polímero en proporciones elevadas compromete significativamente el desempeño mecánico del material, incluso bajo condiciones de compactación menos exigentes, no obstante, al considerar las dosificaciones adicionales de 2.5 % y 5 % PET-R, se observa un comportamiento diferenciado. Estas dosificaciones presentan ligeras reducciones en la densidad seca máxima, sin variaciones significativas en la humedad óptima; sin embargo, los valores de CBR al 100 % y 95 % de compactación aumentan de manera notable, superando a los obtenidos en la condición natural. Este resultado demuestra que las variaciones mecánicas inducidas por el PET-R dependen directamente de la dosificación empleada, siendo favorables a bajas proporciones y desfavorables a proporciones medias y altas.

En función de los resultados obtenidos, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ), al comprobarse que la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado sí produce variaciones en las propiedades mecánicas de la base granular respecto a su condición natural. Asimismo, se concluye que la dosificación de 35 % PET-R es la que presenta los mayores cambios mecánicos, caracterizados por una reducción significativa de la densidad seca máxima y de la capacidad portante, mientras que las dosificaciones bajas (2.5 % y 5 % PET-R) generan variaciones favorables en el comportamiento mecánico del material.



### 5.2.5 Contrastación de la hipótesis específica 3

Hipótesis específica 3: “Existe al menos una de las dosificaciones de tereftalato de polietileno reciclado evaluadas que proporciona un comportamiento más adecuado de la base granular en comparación con las demás dosificaciones analizadas.”

- Ho: Ninguna de las dosificaciones de tereftalato de polietileno reciclado evaluadas proporciona un comportamiento más adecuado de la base granular en comparación con las demás dosificaciones analizadas.
- H1: Existe al menos una de las dosificaciones de tereftalato de polietileno reciclado evaluadas que proporciona un comportamiento más adecuado de la base granular en comparación con las demás dosificaciones analizadas.

**Tabla 28 — Comparación de dosificaciones evaluadas**

Variable	0% PET-R	2.5% PET-R Δ (Δ%)	5% PET-R Δ (Δ%)	15% PET-R Δ (Δ%)	25% PET-R Δ (Δ%)	35% PET-R Δ (Δ%)
Densidad seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )	2.089	-0.016 (-0.77%)	-0.043 (-2.06%)	-0.333 (-15.94%)	-0.529 (-25.33%)	-0.690 (-33.03%)
Humedad óptima (%)	7.283	-0.003 (-0.04%)	-0.083 (-1.14%)	+0.033 (+0.46%)	+0.083 (+1.14%)	+0.080 (+1.10%)
CBR 100% (%)	49.583	+11.690 (+23.58%)	+7.062 (+14.24%)	-6.810 (-13.73%)	-28.090 (-56.65%)	-33.507 (-67.58%)
CBR 95% (%)	37.617	+14.132 (+37.57%)	+6.957 (+18.49%)	-6.071 (-16.14%)	-22.315 (-59.32%)	-25.253 (-67.13%)

En la condición natural (0 % PET-R), la base granular presenta una densidad seca máxima de 2.089 g/cm<sup>3</sup>, una humedad óptima de 7.283 % y valores de CBR de 49.583 % y 37.617 % al 100 % y 95 % de compactación, respectivamente. Con la incorporación de 2.5 % de PET-R, la densidad seca máxima disminuye ligeramente (-0.77 %), sin ser significativa desde el punto de vista técnico, y la humedad óptima se mantiene casi constante. Sin embargo, los valores de CBR muestran incrementos notables, alcanzando +23.58 % al 100 % de compactación y +37.57 % al 95 %, lo que indica una mejora significativa en la capacidad portante del material, lo que sugiere que la incorporación de PET-R mejora la interacción entre las partículas del agregado. En la dosificación de 5 % PET-R, la densidad seca máxima disminuye



levemente (-2.06 %), pero sigue dentro de un rango aceptable. La humedad óptima muestra una ligera reducción, sin implicancias prácticas. Los valores de CBR aumentan en +14.24 % y +18.49 % al 100 % y 95 % de compactación, respectivamente, confirmando que esta dosificación también mejora el comportamiento mecánico de la base granular, aunque en menor magnitud que con 2.5 % PET-R.

Al incrementar la dosificación a 15 % PET-R, se evidencia un cambio desfavorable en el comportamiento mecánico. La densidad seca máxima se reduce en 15.94 %, reflejando una pérdida significativa de compacidad. Asimismo, los valores de CBR disminuyen en -13.73 % (100 %) y -16.14 % (95 %), lo que indica que esta dosificación afecta negativamente la capacidad portante, anulando los beneficios observados en las dosificaciones bajas. Con 25 % de PET-R, la reducción de la densidad seca máxima se acentúa (-25.33 %), y la humedad óptima aumenta ligeramente. Los valores de CBR presentan caídas severas, con reducciones superiores al 56 %, evidenciando que esta dosificación compromete seriamente el desempeño estructural de la base granular, haciéndola inadecuada para su aplicación en capas de pavimento. La dosificación de 35 % PET-R muestra el peor comportamiento mecánico entre las evaluadas. La densidad seca máxima disminuye en 33.03 %, y los valores de CBR se reducen en más del 67 %, tanto al 100 % como al 95 % de compactación. Estos resultados confirman que altas dosificaciones de PET-R deterioran de manera significativa la capacidad portante y la compacidad del material, descartando su uso estructural.

En función del análisis por dosificaciones, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ), al demostrarse que al menos una dosificación de PET-R proporciona un comportamiento más adecuado de la base granular en comparación con las demás. En particular, la dosificación de 2.5 % PET-R presenta el mejor desempeño mecánico, evidenciado por los mayores incrementos de CBR y una densidad seca máxima comparable a la condición natural, constituyéndose como la dosificación óptima del estudio. La dosificación de 5 % PET-R puede considerarse como una alternativa aceptable, mientras que las dosificaciones iguales o superiores al 15 % PET-R resultan técnicamente no recomendables.



## 5.3 Discusión

La discusión está orientada a interpretar los resultados obtenidos a la luz del objetivo general y los objetivos específicos de la investigación, relacionándolos con los antecedentes nacionales e internacionales y con los criterios de diseño de pavimentos establecidos en la normativa vigente.

### 5.3.1 Discusión en relación con el objetivo general

Los resultados evidencian que la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado (PET-R) en la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta ejerce una influencia clara y sistemática sobre sus propiedades físicas y mecánicas, al comparar la condición natural con las mezclas modificadas. En el plano físico, se aprecia que la gradación global de la mezcla tiende hacia una condición relativamente más arenosa (disminuye el porcentaje de grava y aumenta el de arena), el índice de plasticidad (IP) presenta un incremento y el equivalente de arena (EA) aumenta de manera marcada. En el plano mecánico, la densidad seca máxima disminuye en general conforme aumenta el contenido de PET-R; sin embargo, la respuesta del CBR muestra un comportamiento dependiente del rango de dosificación, con incrementos en dosificaciones bajas y disminuciones en dosificaciones altas. Este comportamiento confirma que el PET-R no actúa como un componente neutro dentro de la mezcla granular, su presencia modifica la estructura interna del material y afecta el arreglo de partículas que define tanto la compactabilidad como la respuesta resistente frente a esfuerzos de penetración, esta interpretación es consistente con antecedentes que reportan que la incorporación de PET en materiales de pavimentación puede alterar parámetros físicos y mecánicos, y que su efecto depende del tipo de capa y del modo de incorporación. Por ejemplo, estudios que incorporan PET en sistemas estabilizados o en combinaciones con ligantes muestran que el polímero puede comportarse como elemento de refuerzo en determinados rangos, pero también advierten que el desempeño final está condicionado por la matriz del material y por el contenido del aditivo, (Carballo Rojas y otros, 2023; Flores Zánchez, 2023).

En la presente investigación, al incorporarse PET-R en proporciones elevadas (15%, 25% y 35%) dentro de la fracción fina de la base granular no estabilizada, el resultado global observado es una pérdida de densificación y una reducción de la capacidad de soporte. No obstante, al evaluar dosificaciones bajas complementarias



(2.5% y 5%), se evidenció un incremento del CBR respecto a la muestra patrón, lo cual indica que el efecto del PET-R no es estrictamente lineal y que puede existir un rango de incorporación donde el comportamiento mecánico mejora. Por tanto, el objetivo general se aborda de manera completa: se demuestra la influencia del PET-R sobre el comportamiento físico-mecánico del material, identificándose un desempeño favorable en rangos bajos de dosificación y un comportamiento desfavorable al incrementarse el contenido del PET-R.

### 5.3.2 **Discusión en relación con objetivo específico N°1**

En lo que respecta a las propiedades físicas, los resultados permiten caracterizar con claridad cómo se comporta el material en condición natural y cómo se modifica al incorporar PET-R.

El incremento del índice de plasticidad (IP) desde valores cercanos al 5,7 % en la base natural hasta valores en torno a 7–8 % en las mezclas modificadas indica que la fracción fina adquiere una ligera mayor plasticidad aparente, aunque el PET-R no es un material plástico en el sentido de los finos arcillosos, su presencia en la fracción pasante del tamiz N.º 4 altera la distribución de tamaños y la respuesta del material en los ensayos de límites de Atterberg, este incremento del IP es particularmente relevante al compararlo con la normativa EG-2013, que establece límites de 2-4 % para bases granulares, lo que implica que el material de Anta Anta ya se encuentra fuera de especificación en condición natural y se aleja aún más del requisito con la incorporación del PET-R. Por otro lado, el equivalente de arena (EA) muestra una tendencia claramente creciente, pasando de 54 % en la base natural a valores entre 67 % y 77 % en las mezclas con PET-R. Esto sugiere una fracción fina más “limpia” en términos de menores contenidos relativos de finos arcillosos, lo que en principio es favorable para el comportamiento granular. Resultados similares se han reportado en investigaciones donde la incorporación de residuos reciclados modifica la limpieza y textura de la fracción fina; por ejemplo, Flores Zánchez (2023), describe cómo ciertas combinaciones de PET y cal pueden reducir la plasticidad y mejorar la calidad de la fracción fina, aunque a costa de una ligera reducción de la densidad seca máxima. En cuanto a la granulometría global, el material mantiene un porcentaje de finos (pasante N.º 200) inferior al 10 % en todas las condiciones, pero la relación grava–arena cambia al aumentar el PET-R se reduce el porcentaje de grava y aumenta el de arena, este fenómeno obedece a la

incorporación de partículas de PET-R en la fracción fina, que alteran el empaquetamiento del esqueleto de la base granular, estudios como el de Nima Puse (2023), que analiza la inclusión de carpetas asfálticas recicladas (CAR) en bases granulares, también reportan que los materiales reciclados pueden modificar la gradación de la mezcla, pero en su caso las CAR contribuyen a mantener o mejorar la densidad y el CBR, lo que no ocurre en la presente investigación debido a la naturaleza distinta del PET-R y al rango de dosificación empleado, la clasificación SUCS y AASHTO también refleja estas modificaciones físicas. En condición natural, el material se clasifica como una grava mal gradada con finos arcillosos (GP-GC) y entra en la categoría A-1-a(0) según AASHTO, propia de materiales granulares de buena calidad para capas de base. Con la incorporación de PET-R, el material pasa a ser clasificado como A-2-4(0), categoría asociada a materiales granulares con mayor influencia de finos, típicamente empleados como subbases o materiales de calidad intermedia, esta transición concuerda con el desplazamiento de la granulometría hacia una mezcla más arenosa y con finos, y con el ligero incremento del IP.

En conjunto, los resultados muestran que el PET-R modifica la textura y la clasificación geotécnica del material, mejorando ciertos parámetros (como el equivalente de arena) pero empeorando otros (como el índice de plasticidad frente a la norma MTC, 2013). Esto coincide con la literatura que señala que los materiales reciclados pueden alterar varias propiedades de los suelos y agregados de manera simultánea, no siempre en la misma dirección. Flores Zánchez (2023) y Mogollon Palacios y otros (2024), reportan cambios en la granulometría, plasticidad y limpieza de los materiales al incorporar PET, en algunos casos con mejoras globales, pero siempre condicionadas a las características iniciales del material y a la dosificación.

### **5.3.3 Discusión en relación con objetivo específico N°2**

El análisis de las propiedades mecánicas revela un efecto marcado del PET-R sobre la compactabilidad y la capacidad de soporte de la base granular. En términos de compactación, la densidad seca máxima ( $\gamma_d$  máx) tiende a disminuir conforme aumenta el contenido de PET-R, pasando de valores cercanos a  $2.09 \text{ g/cm}^3$  en la base natural a valores del orden de  $1.40 \text{ g/cm}^3$  en la mezcla con 35% PET-R. Este comportamiento es coherente con la menor densidad del PET respecto al material



granular y con el hecho de que las partículas poliméricas no contribuyen a formar un esqueleto mineral denso y rígido. No obstante, en dosificaciones bajas (2.5% y 5%), la densidad seca máxima solo disminuye ligeramente respecto a la base natural, lo cual sugiere que en rangos bajos el PET-R no domina el arreglo interno y la pérdida de densificación es limitada. Esta reducción de densidad ha sido reportada en antecedentes nacionales y locales, Flores Zánchez (2023), señala que la incorporación de PET, ya sea solo o en combinación con cal, generalmente conlleva disminuciones de  $\gamma_d$  máx, aunque en algunos casos se logra mejorar el soporte cuando las dosificaciones son moderadas y el sistema se estabiliza, Mogollon Palacios y otros (2024), también mencionan que la adición de PET requiere control cuidadoso de la dosificación para evitar pérdidas asociadas a compactación. En cuanto a la capacidad de soporte medida mediante CBR al 95% y al 100% de compactación, los resultados muestran un comportamiento diferenciado por rangos. Para dosificaciones altas (15%, 25% y 35%), los valores de CBR disminuyen significativamente con el incremento de PET-R, evidenciando pérdida de rigidez y soporte. Sin embargo, al incorporar dosificaciones bajas complementarias (2.5% y 5%), el CBR aumenta respecto a la muestra patrón, alcanzando valores superiores tanto al 95% como al 100% de compactación. Este hallazgo indica que existe un rango bajo en el que el PET-R puede asociarse a un mejor desempeño de soporte, mientras que en porcentajes altos predomina el efecto negativo sobre el esqueleto granular.

Al comparar con antecedentes, Tamay Ravillet (2022), reporta incrementos de CBR e identifica una dosificación óptima en la base granular modificada con PET, aunque reconoce limitaciones de cumplimiento normativo, Mogollon Palacios y otros (2024), reportan también una dosificación óptima baja (del orden del 4%) para materiales granulares de caminos de bajo tránsito. De forma similar, Quispe Serrano y otros (2019), evidencian mejoras del CBR en subrasantes pobres al incorporar porcentajes reducidos de PET. En conjunto, estos antecedentes respaldan la idea de que la mejora del soporte suele presentarse en rangos bajos de dosificación y bajo control de compactación, mientras que incrementos mayores pueden generar pérdida de interbloqueo, reducción de densificación y deterioro del soporte. Por tanto, los resultados obtenidos no contradicen la posibilidad de mejora con PET-R; más bien, muestran que dicha mejora depende del rango de dosificación y de la matriz granular, identificándose que en la base granular de Anta Anta la mejora



mecánica se presenta en rangos bajos (2.5% y 5%), mientras que en rangos altos (15% – 35%) el desempeño se deteriora significativamente.

#### **5.3.4 Discusión en relación con objetivo específico N°3**

El análisis comparativo de las dosificaciones evaluadas permite afirmar que existe al menos una condición con comportamiento más adecuado en términos mecánicos, si se considera el conjunto total de dosificaciones estudiadas (2.5%, 5%, 15%, 25% y 35% PET-R, además de la base natural), se identifica que las dosificaciones bajas presentan un desempeño superior al material patrón en términos de CBR, mientras que las dosificaciones altas muestran disminuciones marcadas de soporte.

En particular, la dosificación de 2.5% PET-R evidencia el mayor valor de CBR dentro de todas las condiciones evaluadas, seguida por 5% PET-R, lo que sugiere la existencia de un rango de incorporación reducido donde la mezcla logra mejorar la respuesta resistente sin afectar significativamente la compactabilidad, en contraste, al incrementarse el contenido de PET-R a 15% o más, el comportamiento mecánico se deteriora y el CBR disminuye progresivamente, coherente con la pérdida de densificación y con la afectación del contacto entre agregados.

Este resultado se alinea con antecedentes que identifican “dosificaciones óptimas” bajas para PET en capas granulares o suelos, y que advierten que incrementos mayores resultan contraproducentes. A nivel nacional y local, Tamay Ravillet (2022), Flores Zánchez (2023), Mogollon Palacios y otros (2024) y Quispe Serrano y otros (2019), reportan rangos óptimos acotados en los que el CBR puede mejorar, generalmente menores al 10%, y en algunos casos con estabilización adicional. En ese sentido, el aporte del presente estudio es evidenciar que, para el material de Anta Anta, el rango alto (15% – 35%) no es viable como alternativa de mejora mecánica, mientras que en dosificaciones adicionales el rango bajo (2.5% – 5%) sí muestra un comportamiento favorable comparativo. Por lo tanto, en relación con el objetivo de identificar una dosificación más adecuada, se concluye que dentro del conjunto evaluado la dosificación de 2.5% PET-R representa la condición más favorable en términos de soporte, seguida de 5% PET-R, mientras que las dosificaciones altas no son recomendables para la base granular sometida a exigencias estructurales.



### 5.3.5 Discusión complementaria en relación con la normativa EG - 2013

Al contrastar los resultados obtenidos con las Especificaciones Técnicas Generales para Pavimentos Flexibles y Materiales Granulares – EG-2013, se evidencia que el material de la cantera Anta Anta presenta restricciones para su empleo como base granular, debido a que algunos parámetros críticos asociados al desempeño estructural y al control de calidad de la fracción fina no se ubican dentro de los rangos exigidos para esta capa. En condición natural (muestra patrón), el material muestra un comportamiento que evidencia limitaciones, principalmente en términos de capacidad de soporte, lo cual resulta determinante porque el diseño de pavimentos flexibles exige que la base granular proporcione rigidez y resistencia suficientes para distribuir las cargas hacia la subrasante.

La incorporación de PET-R modifica este panorama de manera dependiente de la dosificación. En porcentajes altos (15% – 35%), los resultados confirman un deterioro del desempeño mecánico, ya que se reduce la densidad seca máxima y disminuye de forma marcada el CBR, alejando aún más al material de una condición compatible con los criterios de base granular. En cambio, en las dosificaciones bajas complementarias (2.5% y 5%), se observa una mejora del CBR respecto a la muestra patrón, lo que evidencia que en rangos reducidos el PET-R puede contribuir a incrementar la resistencia al esfuerzo penetrante del material bajo compactación. Sin embargo, aun cuando existe esta mejora comparativa frente a la condición natural, el valor alcanzado no resulta suficiente para satisfacer plenamente los requisitos de la EG-2013 para la base granular, por lo que el material modificado sigue presentando limitaciones para su uso directo como capa de base bajo exigencias típicas de pavimentos flexibles. Por lo tanto, la evidencia indica que la incorporación de PET-R, por sí sola, no garantiza la conformidad normativa del material como base granular, ya que el cumplimiento en la EG-2013 depende del conjunto de requisitos (no de un único parámetro) y, en el presente caso, persisten condicionantes técnicas vinculadas al soporte y a la calidad de la fracción fina, en consecuencia, el principal aporte de esta comparación normativa es delimitar el alcance real de los resultados: aunque se identificó un rango bajo de PET-R con mejora del CBR respecto a la muestra patrón, dicha mejora no implica automáticamente que el material alcance la condición normativa requerida para base granular.



## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

- Del objetivo general se concluye que la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta efectivamente modifica su comportamiento físico y mecánico respecto a la condición natural; sin embargo, dicha influencia depende del rango de dosificación, la granulometría se desplaza hacia mezclas relativamente más arenosas, el índice de plasticidad aumenta, el equivalente de arena se eleva y la clasificación AASHTO pasa de A-1-a(0) a A-2-4(0), lo que evidencia una reconfiguración del material; en el comportamiento mecánico se observa que la densidad seca máxima tiende a disminuir con el incremento del PET-R y que el CBR presenta una respuesta no lineal: en dosificaciones altas (15 %, 25 % y 35 %) el CBR al 95 % y 100 % se reduce de forma marcada, mientras que en dosificaciones bajas complementarias (2.5 % y 5 %) se registró un incremento del CBR respecto a la muestra patrón. En consecuencia, para el material de Anta Anta, el PET-R influye de manera clara, pero solo en rangos bajos muestra mejora del soporte respecto a la condición natural, mientras que en el rango 15–35 % conduce a una disminución de la capacidad de soporte y no permite alcanzar las exigencias usuales del diseño estructural de pavimentos.
- Del objetivo específico N°1 se concluye que fue posible caracterizar con precisión las propiedades físicas de la base granular tanto en su condición natural como con la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado, evidenciando cambios cuantificables en textura, plasticidad y clasificación. La base natural presenta un índice de plasticidad del orden de 5,7 %, equivalente de arena de 54 %, contenido de finos inferior al 10 % y distribución dominada por la fracción grava, lo que la ubica como una grava mal gradada con finos arcillosos (GP-GC) y en la categoría A-1-a(0) de AASHTO. Al añadir PET-R en 15 %, 25 % y 35 %, el índice de plasticidad aumenta a valores entre 7 % y 8 %, el equivalente de arena se incrementa hasta aproximadamente 67–77 %, el porcentaje relativo de grava disminuye y el de arena aumenta, manteniendo los finos siempre por debajo del 10 %, y la clasificación



AASHTO pasa a A-2-4(0). Esto muestra que el PET-R modifica de forma consistente el esquema granulométrico y las propiedades de la fracción fina, mejorando la limpieza relativa de ésta, pero sin resolver el incumplimiento del índice de plasticidad frente a los límites establecidos para materiales de base, por lo que el material continúa presentando restricciones para su uso como capa estructural principal.

- Del objetivo específico N°2 se concluye que la evaluación de las propiedades mecánicas de la base granular con y sin tereftalato de polietileno reciclado evidencia que el efecto del polímero sobre la compactabilidad y el soporte varía con la dosificación. Para las dosificaciones altas (15 %, 25 % y 35 %), la densidad seca máxima desciende desde aproximadamente 2,09 g/cm<sup>3</sup> en la muestra patrón hasta valores cercanos a 1,40 g/cm<sup>3</sup> en la mezcla con 35 % de PET-R, mientras que la humedad óptima se mantiene prácticamente constante, lo que indica que la presencia del polímero rompe la continuidad del esqueleto granular y reduce el empaquetamiento denso del material. En paralelo, los valores de CBR al 95 % de compactación decrecen desde alrededor de 37–38 % en la base natural hasta aproximadamente 12–13 % en la mezcla con mayor contenido de PET-R, y los CBR al 100 % disminuyen desde cerca de 49–50 % hasta valores del orden de 16 %, confirmando que el rango alto actúa como factor de debilitamiento. No obstante, en las dosificaciones bajas complementarias (2.5 % y 5 %) se obtuvieron valores de CBR superiores a la muestra patrón (incremento tanto al 95 % como al 100 %), a pesar de registrarse una ligera reducción de la densidad seca máxima, lo cual sugiere la existencia de un rango bajo de incorporación donde el soporte mejora sin afectaciones severas de compactabilidad. En conjunto, los resultados muestran que el PET-R no garantiza mejora mecánica en cualquier porcentaje y que su eficacia está condicionada por el contenido incorporado.
- Del objetivo específico N°3 se concluye que, dentro del conjunto de dosificaciones de tereftalato de polietileno reciclado analizadas, sí se identifica una proporción con comportamiento más adecuado en comparación con la condición natural. En particular, la dosificación 2.5 % PET-R registró el mejor desempeño mecánico, al presentar los mayores valores de CBR al 95 % y 100 % de compactación respecto a la muestra patrón, seguida por la dosificación de 5 % PET-R. En contraste, las dosificaciones altas (15 %, 25 % y 35 %) mostraron un desempeño inferior al material natural, con reducciones progresivas del CBR y disminución de densidad seca máxima, lo que confirma que el rango 15–35 % excede el umbral a partir del cual el polímero deja de



ser potencialmente beneficioso y pasa a comprometer el comportamiento del material como base de pavimento flexible.

- Finalmente, se concluye que la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en la base granular de la cantera Anta Anta presenta un comportamiento dependiente de la dosificación: en porcentajes elevados (15 %, 25 % y 35 % en la fracción fina) no constituye una técnica de mejoramiento estructural viable para capas de base de pavimentos flexibles, debido a la reducción sostenida de la densidad seca máxima y a la caída significativa del CBR. En cambio, en porcentajes bajos complementarios (2.5 % y 5 %) se evidenció un incremento del CBR respecto a la muestra patrón, aunque dicho incremento no necesariamente implica el cumplimiento integral de los requisitos de la EG-2013, dado que el desempeño como base granular depende del cumplimiento conjunto de parámetros físicos y mecánicos. El principal aporte de esta investigación radica en demostrar, con resultados experimentales sobre un material real utilizado en obra, que existe un rango bajo de PET-R con mejora del soporte y que el uso de porcentajes elevados puede ser contraproducente desde el punto de vista mecánico, delimitando condiciones de aplicación más realistas para la incorporación de polímeros reciclados en infraestructura vial.



## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda que el material granular de la cantera Anta Anta, modificado con tereftalato de polietileno reciclado en proporciones del 15 %, 25 % y 35 % en la fracción fina, no sea considerado para su uso como base granular en pavimentos flexibles bajo los criterios establecidos en el Manual de Carreteras EG-2013, mientras no se adopten medidas adicionales de mejora. La disminución de la densidad seca máxima y la reducción significativa del CBR observadas en estas mezclas evidencian que, en el contexto analizado.
- Se recomienda que, para el caso del material de la cantera Anta Anta, las evaluaciones técnicas de incorporación de PET-R se prioricen en rangos bajos de dosificación, debido a que en esta investigación se registró un incremento del CBR respecto a la muestra patrón en dosificaciones 2.5 % y 5 %. No obstante, se sugiere que la selección final de una dosificación se sustente en la verificación integral de requisitos físicos y mecánicos exigidos para base granular, ya que una mejora del CBR respecto al patrón no implica necesariamente el cumplimiento total de la EG-2013.
- Se recomienda complementar el análisis de desempeño del material modificado con PET-R mediante un mayor número de réplicas en las dosificaciones bajas identificadas como favorables (especialmente 2.5 % y 5 %), con el fin de estimar la variabilidad experimental y fortalecer la confiabilidad estadística de los resultados. Esto permitirá sustentar con mayor solidez la selección de una dosificación recomendable y reducir la incertidumbre asociada a resultados obtenidos con ensayos únicos.
- Finalmente, se recomienda evaluar el potencial uso del material de la cantera Anta Anta, con y sin tereftalato de polietileno reciclado, en capas de menor exigencia estructural (como subbase o afirmado), o en aplicaciones donde el diseño lo permita, siempre verificando los requisitos técnicos específicos mediante ensayos complementarios. Aunque el material presenta limitaciones para su uso como base bajo exigencias normativas, posee características favorables en parámetros como equivalente de arena, abrasión Los Ángeles y propiedades del agregado grueso.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. 1993.** *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- ACOSTA, Ignacio, y otros. 2017.** *Degradación física de suelos; compactación superficial y subsuperficial*". s.l. : 1-15. Disponible en <https://lossuelosdemipais.crea.org.ar/wp-content/uploads/2020/11/Degradacion-fisica-de-suelos-compactacion.pdf>, 2017.
- ALI, Sajjad, SIDDIQUI, Muhammad Owais Raza y ALI, Hassan. 2024.** *Performance evaluation of flexible pavement using polyethylene terephthalate(PET)*. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology [en línea], 43(3) : 1-10. Disponible en <https://doi.org/10.22581/muet1982.3140>, 2024.
- ARIAS, José, y otros. 2022.** *Metodología de la investigación*. s.l. : Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C [en línea]. Disponible en 10.35622/inudi.b.016, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. 2019.** *ASTM D1883-16: Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2019.
- ASTM. 2000.** *ASTM D2487-00: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2000.
- ASTM. 2018.** *ASTM D4791-18: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2018. ASTM D4791.
- ASTM. 2014.** *ASTM D75/D75M-14: Standard Practice for Sampling Aggregates*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2014.
- ATTERBERG, Albert. 1911.** *Über die physikalische Bodenuntersuchung, und über die Plastizität der Tone. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde, vol. 1, p. 10-43.* 1911.
- BARBOZA, Giovanni y CARRION, Leydi. 2025.** *Influence of Recycled PET Particle Size on the Improvement of Sandy Subgrades for Flexible Pavements*. London : Avestia Publishing, 2025. Pg. No. 151.
- BENEGAS, Yeraldin Maciel y HURTADO, Erika Monserrat. 2017.** *Agregados de la construcción*. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo [en línea] : 1-17. Disponible en [https://hctarelo.weebly.com/uploads/4/6/9/7/46979447/06\\_agregados.pdf](https://hctarelo.weebly.com/uploads/4/6/9/7/46979447/06_agregados.pdf), 2017.



- BERNAL TORRES, César Augusto. 2010.** *Metodología de la investigación: administración, economía humanidades y ciencias sociales*. 3ª ed. Bogotá : Pearson Educación, 2010.
- BEVIÁ GARCÍA, José Francisco y BAÑÓN BLÁZQUEZ, Luis. 2000.** *Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento*. España : Editorial Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana[en línea]. Disponible en <http://hdl.handle.net/10045/1787>, 2000.
- BORJA, Manuel. 2016.** *Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil*. Chiclayo : Disponible en [https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Cient%C3%ADfica\\_para\\_ingenier%C3%ADa\\_Civil](https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil), 2016.
- CALTRANS. 2019.** (CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION), *Pavement Design Manual*. Sacramento, CA : Caltrans, 2019.
- CARBALLO ROJAS, Mauricio, GALLARDO MEJIA, María del Carmen y MURILLO CHACÓN, Minor. 2023.** *Análisis de una base granular estabilizada con cemento y adición de fibras de PET reciclado. Infraestructura Vial*, 25(44). 2023. págs. 75-95. Vol. 25.
- CENTER FOR INTERNATIONAL ENVIROMENTAL LAW. 2019.** El plástico y la salud. [En línea] 2019. Disponible en: <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/03/Plastic-Health-Spanish.pdf>.
- CEPIS. 2003.** *El reciclaje, oportunidades para reducir la generación de los desechos sólidos y reintegrar materiales recuperables en el círculo económico*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - CEPIS. s.l. : Disponible en <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/reciclaje-oportunidades-reducir-generacion-desechos-solidos>, 2003. pág. 103.
- CHÁNCHEZ, Brioso y MILITA, Olinda. 2021.** *Mejoramiento de material granular de cantera para afirmado con aditivo terrasil en la carretera Pipus -Chontapampa, Chachapoyas 2021*. Tesis[Pregrado]. Lima : Universidad César Vallejo. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12692/84956>, 2021.
- CHATA PACOMPIA, David. 2019.** *Análisis de la capacidad portante de la sub-base granular con material reciclado de polietileno tereftalato aplicadas en las vías urbanas de la ciudad de Puno, caso Jr. Asamblea – Jr. Los Romanos*. Puno : Universidad Nacional del Altiplano, 2019. Tesis.
- DAS, Braja M y SOBHAN , Khaled. 2017.** *Principles of geotechnical engineering. 9ª ed.* Boston: Cengage Learning. 2017.



- DAS, Braja M. 2014.** *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. 4ta ed. Ciudad de México : Cengage Learning, 2014.
- DEL POZO, Edwin Moises. 2022.** *Diseño de pavimento flexible empleando fibras de acero como mejora a la resistencia en Avenida Padre Fermín Toledano, Apurímac 2022*. Tesis[Pregrado]. Apurimac : Universidad César Vallejo. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12692/105160>, 2022.
- FLORES SÁNCHEZ, J. 2023.** *Efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el material granular para uso en bases y subbases de pavimento*. Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
- FLORES SÁNCHEZ, Víctor Raúl. 2024.** *Efecto de la incorporación de plástico reciclado PET y cal en el valor del CBR empleando material de cantera para afirmado, Abancay – Apurímac – 2023*. s.l. : Universidad Tecnológica de los Andes, 2024. Tesis.
- FLORES, Alberto. 2023.** *Conservación del pavimento flexible mediante el método PCI*. Salud, Ciencia y Tecnología : 1-9. Disponible en [10.56294/sctconf2023397](https://doi.org/10.56294/sctconf2023397), 2023.
- GLOBAL PLASTIC ACTION PARTNERSHIP (GPAP). 2023.** *Global Plastics Action Partnership – Peru*. [En línea] 2023. Disponible en: <https://www.globalplasticaction.org/home>.
- GÓMEZ SALCEDO, José Ronald. 2024.** *Adición de polietileno tereftalato reciclado en las propiedades mecánicas del suelo de la calle Ccehccha, distrito Tambillo – Ayacucho 2024*. Trujillo : Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI, 2024. Tesis.
- HAI, Mohamed, y otros. 2023.** *Metodología De La Investigación*. Puno : Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C [en línea]. Disponible en <https://editorial.inudi.edu.pe/index.php/editorialinudi/catalog/view/82/124/149>, 2023.
- HENAO, Emmanuel. 2022.** *Carpeta asfáltica*. Universidad EIA [en línea] : 1-4. Disponible en <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/4567>, 2022.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. 2014.** *Metodología de la investigación*. 6ta ed. México : McGraw-Hill Education, 2014.
- HERRERA H., Juan. 2018.** *Canteras de áridos y de minerales industriales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía*. [En línea] 2018. Disponible en: [https://oa.upm.es/70228/3/CANTERAS\\_ARIDOS\\_Y\\_MINERALES\\_INDUSTRIALES\\_LM1B3T2\\_R0-20181022.pdf](https://oa.upm.es/70228/3/CANTERAS_ARIDOS_Y_MINERALES_INDUSTRIALES_LM1B3T2_R0-20181022.pdf).
- HUANG, Yang H. 2004.** *Pavement Analysis and Design*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall. 2004.



- INACAL. 2014.** *Normas Técnicas Peruanas (NTP) aplicables a la ingeniería geotécnica y de materiales.* Lima : Instituto Nacional de Calidad, 2014.
- INACAL. 2019.** *Normas Técnicas Peruanas (NTP) para ensayos de suelos y agregados.* Lima : Instituto Nacional de Calidad, 2019.
- KARUPPASAMY, S. y PRASANTH, S. 2021.** *Experimental Study of Flexible Pavement Using Polyethylene Terephthalate Plastic. International Journal for Scientific Research and Technology (IJSART), 7(5), pp. 380-384.* 2021.
- KELLER, G. y WARRACK, B. 2019.** *Statistics for Management and Economics.* (11th ed.). s.l. : Cengage Learning, 2019.
- KUMAR, Pradeep y SHALINEE, Shukla. 2022.** *Flexible pavement construction using different waste materials: A review.* 2022. págs. 1697-1702. Vol. 65.
- LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS - LARSP. 2017.** *Relación de soporte california.* s.l. : 1-25. Disponible en <https://pavimentosulacivil.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/01/prc3a1ctica-nc2b0-7-cbr.pdf>, 2017.
- LARA, José. 2008.** Reducir, reutilizar, reciclar. *Revista de la Universidad Autónoma de Puebla.* [En línea] 2008. pp. 1–5. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/294/29406907.pdf>.
- MEF. 2015.** *MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS, 2015. Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública en carreteras.* Lima: MEF. 2015.
- MENÉNDEZ ACURIO, José Rafael. 2016.** *Ingeniería de Pavimentos.* 1ra ed. Lima : Instituto de la Cosntrucción y Gerencia, 2016.
- MTC. 2016.** *Ingeniería de Pavimentos.* 1ra ed. Lima : Instituto de la Cosntrucción y Gerencia, 2016.
- MILLAN, Romo y CLENIN, Jhonatan. 2023.** *El polímero y su efecto en las propiedades de suelos granulares para su uso como material de subbase.* Tesis [Pregrado]. Huancayo : Universidad Peruana Los Andes. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12848/6743>, 2023.
- MOGOLLON PALACIOS, Juanita Yanela y ROJAS ATARAMA, Riksy Andalys del Rosario. 2024.** *Incorporación de partículas de plástico reciclado (PET) para mejorar propiedades en bases granulares para pavimentos de caminos de bajo tránsito.* Piura : Universidad de Piura, 2024.
- MONTEJO, Alfonso. 2002.** *Ingeniería de pavimentos.* Colombia : Universidad Católica de Colombia [en línea]. Disponible en



[https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_Alfonso\\_Montejo\\_Fonseca](https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca), 2002.

**MONTGOMERY, Douglas. 2017.** *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed. New York : John Wiley & Sons, 2017.

**MTC. 2013.** *Especificaciones Técnicas Generales para Pavimentos Flexibles y Materiales Granulares - EG 2013*. Lima : MTC, 2013.

**MTC. 2014.** *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima : Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2014.

**MTC. 2014.** *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos*. Lima : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014.

**MTC. 2016.** *Manual de Ensayo de Materiales para Carreteras (EM 2016)*. Lima : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016. RD N° 18-2016-MTC/14.

**MTC. 2023.** Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Apurímac - Red Vial*

*Georreferenciada*. [En línea] 2023. Disponible en:

[https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/4768631-apurimac-red-vial-georreferenciada?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/4768631-apurimac-red-vial-georreferenciada?utm_source=chatgpt.com).

**NIMA PUSE, L. 2023.** *Influencia de las carpetas asfálticas recicladas en las propiedades físicas y mecánicas de bases granulares para pavimento flexible*, Chiclayo 2021. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque. 2023.

**OECD. 2022.** *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. Paris : OECD Publishing, 2022.

**ORO, Cristina y VERA, Brando. 2023.** *Adición de escoria y PET reciclado para el mejoramiento del pavimento flexible Av. Perú, San Martín de Porres, Lima-2023*. Tesis [Pregrado]. Lima : Universidad César Vallejo. Disponible en

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/136396>, 2023.

**PINO, Raul. 2024.** *Metodología de la investigación. Elaboración de diseños para contrasta hipótesis*. s.l. : San Marcos E.I.R [en línea]. Disponible en ISBN:9786123157647, 2024.

**PINO, Raul. 2024.** *Metodología de la investigación. Elaboración de diseños para contrasta hipótesis*. s.l. : San Marcos E.I.R [en línea]. Disponible en ISBN:9786123157647, 2024.

**PISCO, Tulumba y MAYTE, Selene. 2023.** *Adición de granallas de acero reciclado para mejorar la base del pavimento flexible, Av. 2 de octubre, Los Olivos, 2022*. Tesis [Pregrado].

Lima : Universidad César Vallejo. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12692/131946>, 2023.

**QUINCHO, Raul, y otros. 2022.** *Metodología de la investigación*. s.l. : Instituto

Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C [en línea]. Disponible en 10.35622/inudi.b.39, 2022.



- QUISPE SERRANO, Esperanza y SAÑAC VILCA, Magaly. 2019.** *Influencia de la incorporación de plástico reciclado triturado – PET en el mejoramiento del suelo a nivel de sub rasante en la prolongación de la Av. Micaela Bastidas, Tamburco – Abancay, 2018.* Abancay : Universidad Tecnológica de los Andes, 2019. Tesis.
- RAMÍREZ TRIVIÑO, Valentina y HINCAPIE OLANO, Julio César. 2018.** *Evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias.* Pereira : Universidad Libre, 2018. Tesis.
- ROMERO, Holguer, y otros. 2021.** *Metodología de la Investigación.* s.l. : Edicumbre Editorial Corporativa [en línea]. Disponible en ISBN: 978-9942-40-104-5, 2021.
- SALIMI, M. y GHAZAVI, M. 2020.** *Geotechnical properties of clayey soil reinforced with recycled PET particles.* *Cogent Engineering*, vol. 7. 2020.
- SINGH, Bishwajeet, y otros. 2023.** *Innovative Integration of Recycled Plastics for Flexible Pavement Design.* *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(12). 2023. págs. 89 - 97. Vol. 25.
- TAMAY RAVILLET, Andy Roy. 2022.** *Análisis de las propiedades físico-mecánicas de una base granular tratada con adición de PET reciclado triturado, Canteras Chuyabamba, Chota, 2021.* Chiclayo : Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, 2022. Tesis.
- TAMAYO, Mario. 2004.** *El proceso de la investigación científica.* 5ta ed. México : Limusa, 2004.
- TASNIM, Sadia, y otros. 2021.** *A Comprehensive Review of Flexible Pavement Failures, Improvement Methods and its Disadvantages.* Suiza : Trans Tech Publications Ltd, 2021. págs. 136–148. Vol. 879.
- UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. 2021.** *Drowning in Plastics: Marine Litter and Plastic Waste – Vital Graphics.* Nairobi : UNEP, 2021.
- UNEP. 2023.** *Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy.* Nairobi : UNEP, 2023.
- WWF PERÚ. 2018.** *Almost 90% of the Garbage Generated Daily Is Not Recycled.* [En línea] 2018. Disponible en: <https://www.wwf.org.pe/en/?328834/Almost-90-of-the-garbage-generated-daily-is-not-recycled>.
- YILMAZ, Altan. 2022.** *Engineering Properties of Basalt Aggregates in Terms of Use in Granular Layers of Flexible Pavements.* *Case Studies in Construction Materials.* 2022, Vol. 17.
- YILMAZ, Ibrahim. 2019.** *The mechanical performance of clayey soils reinforced with waste PET fibers.* *International Journal of Engineering Science and Applications.* 2019, Vol. 3, 1, págs. p. 1–10.



## ANEXOS



Anexo A

Tabla 29 — Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES			Metodología
General	General	General	Variable independiente	Dimensiones	Indicadores	
¿Cómo influye la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta, utilizada en pavimentos flexibles del tramo Tambobamba – Challhuahuacho?	Determinar la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular elaborada con material de la cantera Anta Anta, utilizada en pavimentos flexibles del tramo Tambobamba – Challhuahuacho.	La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado modifica las propiedades físicas y mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.	Tereftalato de polietileno reciclado (PET-R)	Tamaño del PET reciclado	Diámetro del PET reciclado	<b>Enfoque:</b> Cuantitativo. <b>Tipo:</b> Aplicada. <b>Nivel:</b> descriptivo - comparativo. <b>Diseño:</b> Experimental. <b>Población:</b> La población está conformada por el conjunto total del material granular disponible en la cantera Anta Anta - Tambobamba. <b>Muestra:</b> La muestra está conformada por la fracción del material granular extraída desde el acopio de la cantera Anta Anta, seleccionada para su análisis de laboratorio. <b>Muestreo:</b> No
				Dosificación del PET reciclado	Porcentajes de PET reciclado	
Específicos	Específicos	Específicos	Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	
¿Cómo varían las propiedades físicas de la base granular al incorporar tereftalato de polietileno reciclado en diferentes dosificaciones, en comparación con su condición natural?	Caracterizar las propiedades físicas de la base granular en su condición natural y con la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas.	La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas produce variaciones en las propiedades físicas de la base granular	Propiedades físicas y mecánicas de la base granular	Propiedades físicas	Contenido de Humedad	
					Plasticidad	

		respecto a su condición natural.				probabilístico. <b>Técnica:</b> Observación directa y análisis documental. <b>Instrumento:</b> Guía de observación y guía de análisis documental. <b>Análisis:</b> Método estadístico descriptivo e inferencial <b>Línea de investigación:</b> Ingeniería de materiales.
¿Cómo varían las propiedades mecánicas de la base granular al incorporar tereftalato de polietileno reciclado en diferentes dosificaciones, en comparación con su condición natural?	Evaluar las propiedades mecánicas de la base granular en su condición natural y con la incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas.	La incorporación de tereftalato de polietileno reciclado en las dosificaciones evaluadas produce variaciones en las propiedades mecánicas de la base granular respecto a su condición natural.			Contenido de sales	
					Partículas chatas y alargadas	
					Partículas con caras fracturadas	
					Equivalente de arena	
					Tamaño de partículas	
¿Qué dosificación de tereftalato de polietileno reciclado proporciona el comportamiento más adecuado de la base granular en términos comparativos respecto a las demás dosificaciones evaluadas?	Identificar, a partir de la comparación de resultados, la dosificación de tereftalato de polietileno reciclado que proporciona el comportamiento más adecuado de la base granular en relación con las demás dosificaciones evaluadas.	Existe al menos una de las dosificaciones de tereftalato de polietileno reciclado evaluadas que proporciona un comportamiento más adecuado de la base granular en comparación con las demás dosificaciones analizadas.		Propiedades Mecánicas	Abrasión Los Ángeles	
					% Optimo contenido de Humedad	
					Índice de CBR	

## Anexo B Ensayos en laboratorio

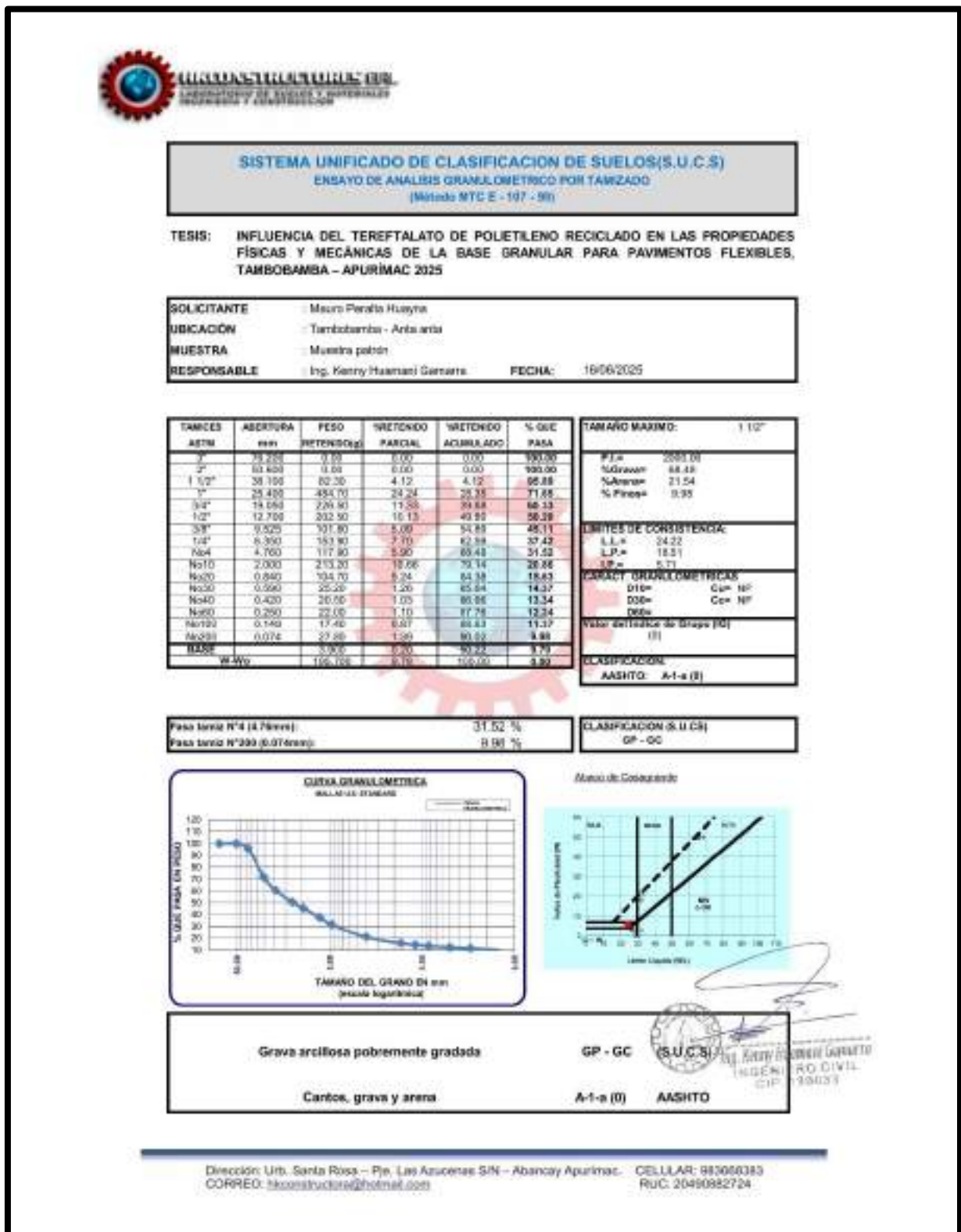


Figura 19 – Resultado análisis granulométrico muestra patrón



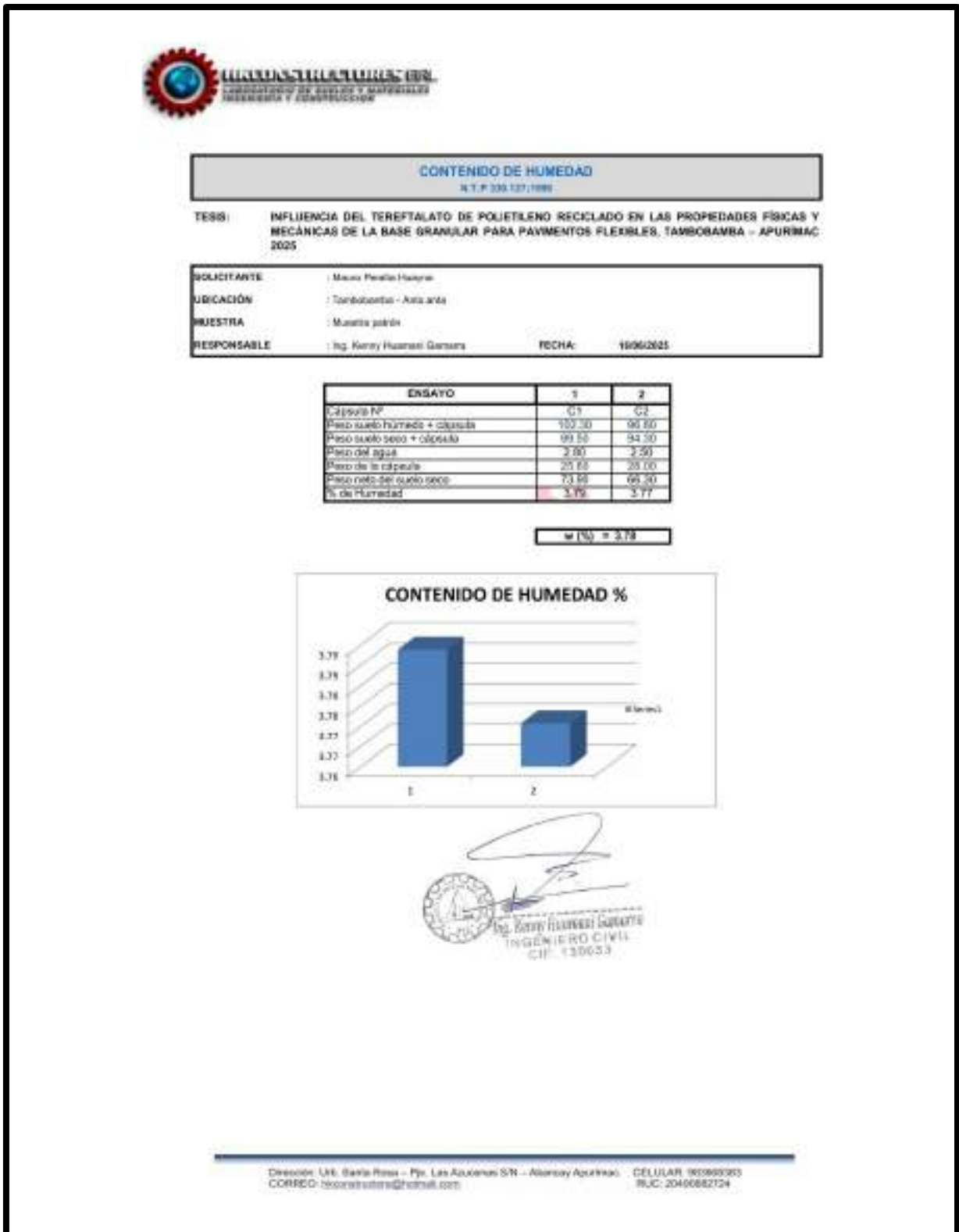


Figura 20 — Resultado cont. de humedad muestra patrón



Figura 21 — Resultado límites de consistencia M. patrón

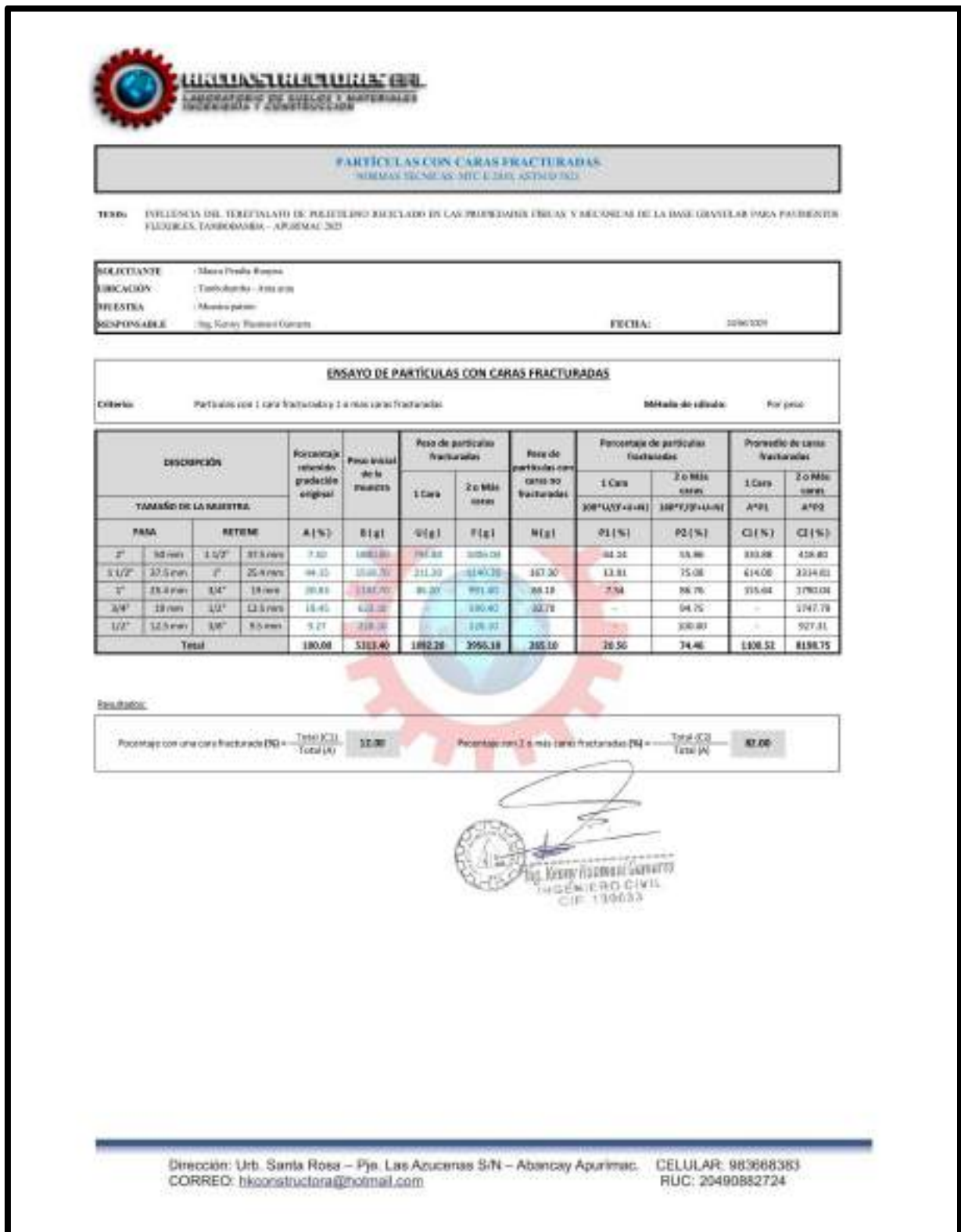


Figura 22 — Resultado partículas con caras fracturadas



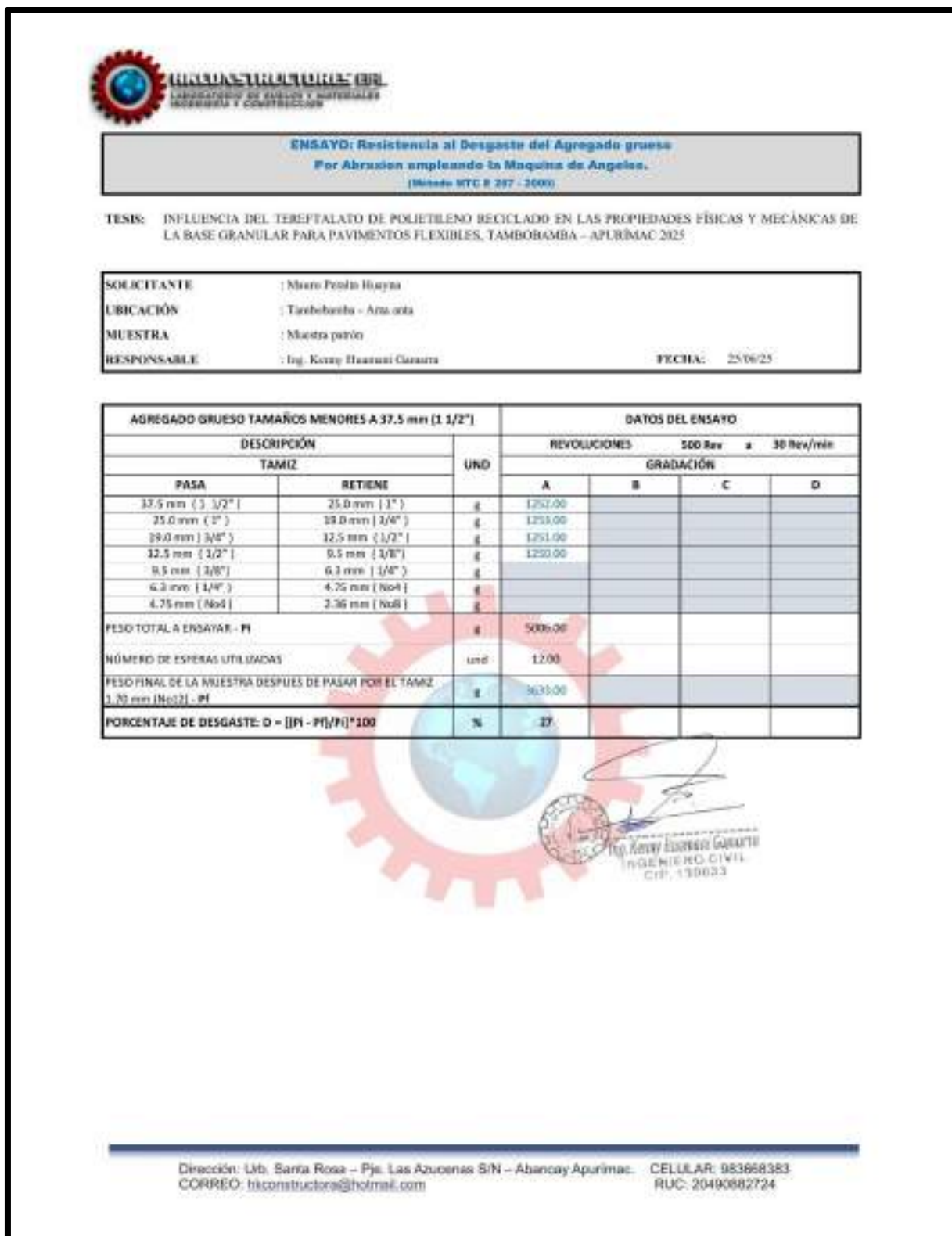


Figura 23 — Resultado abrasión de Los Ángeles

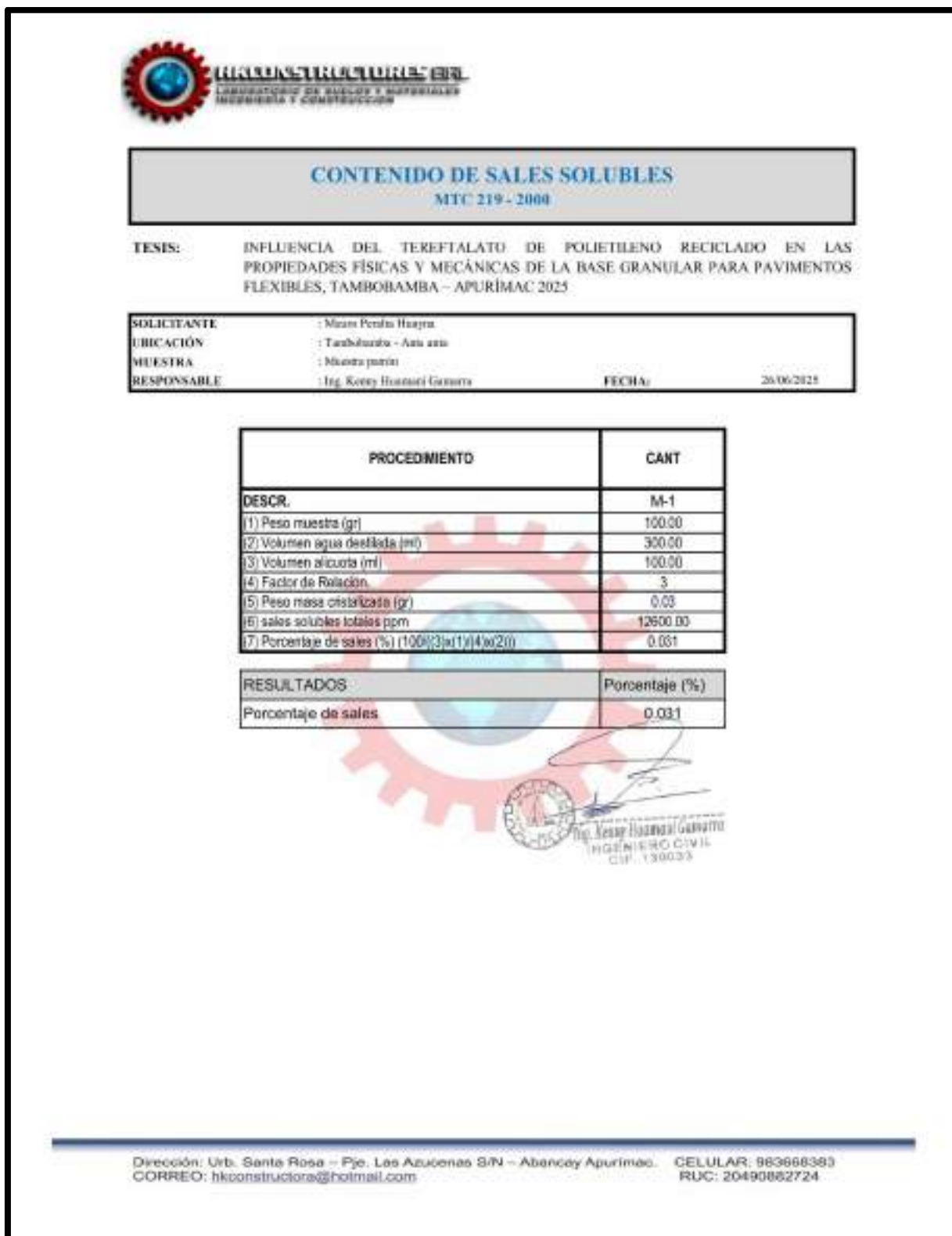


Figura 24 — Resultado contenido de sales solubles

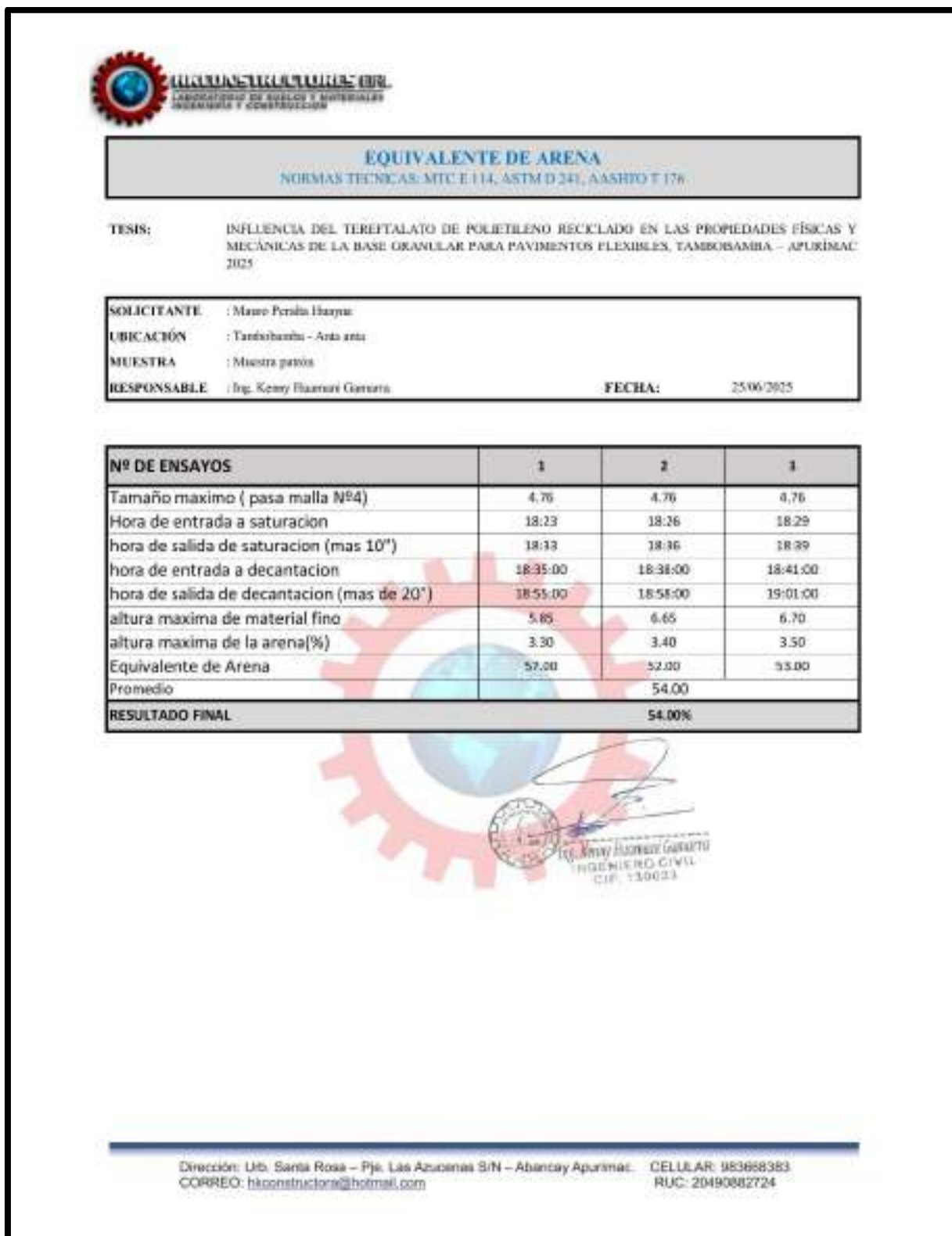


Figura 25 — Resultado de equivalente de arena M. patrón



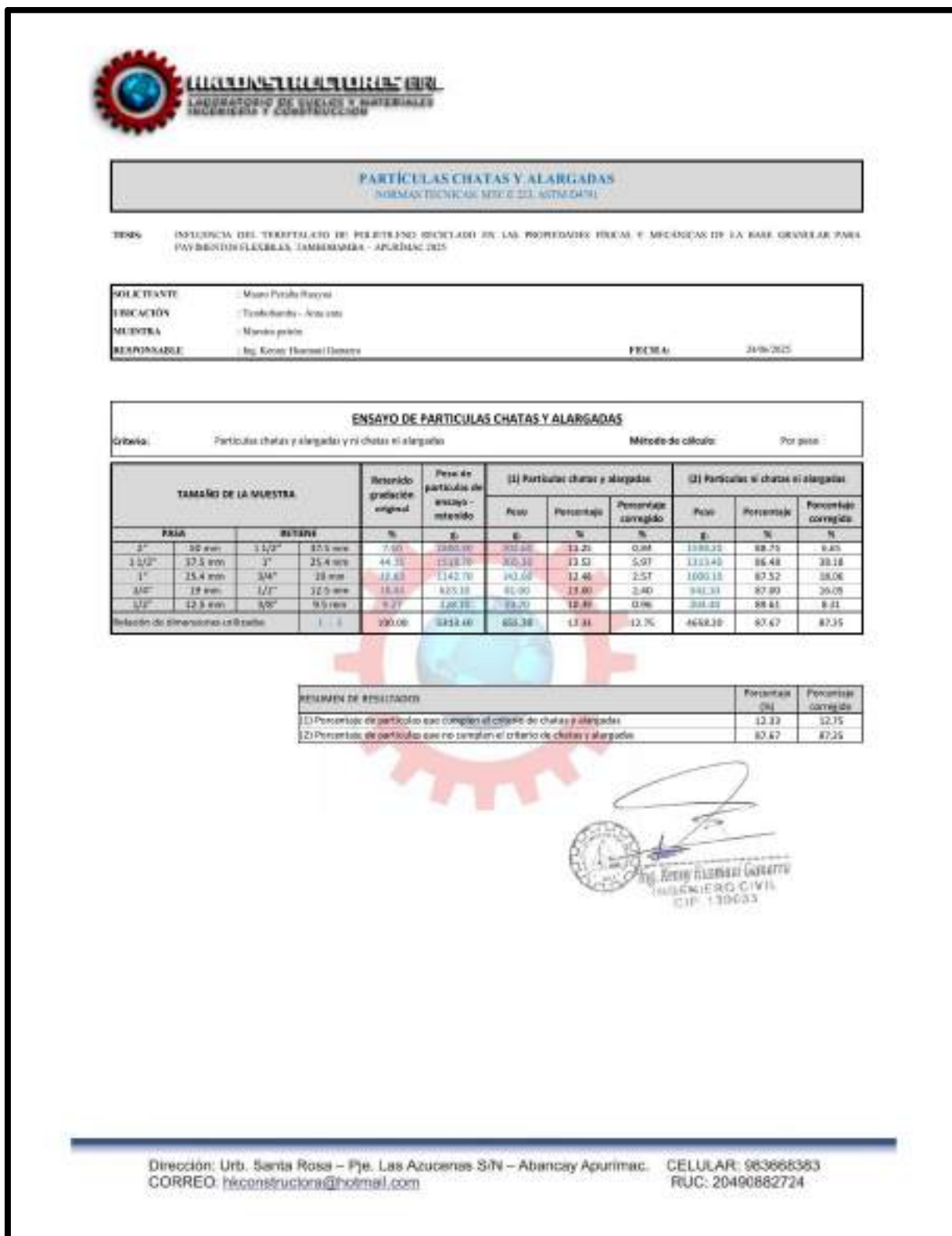


Figura 26 — Resultado de partículas chatas y alargadas



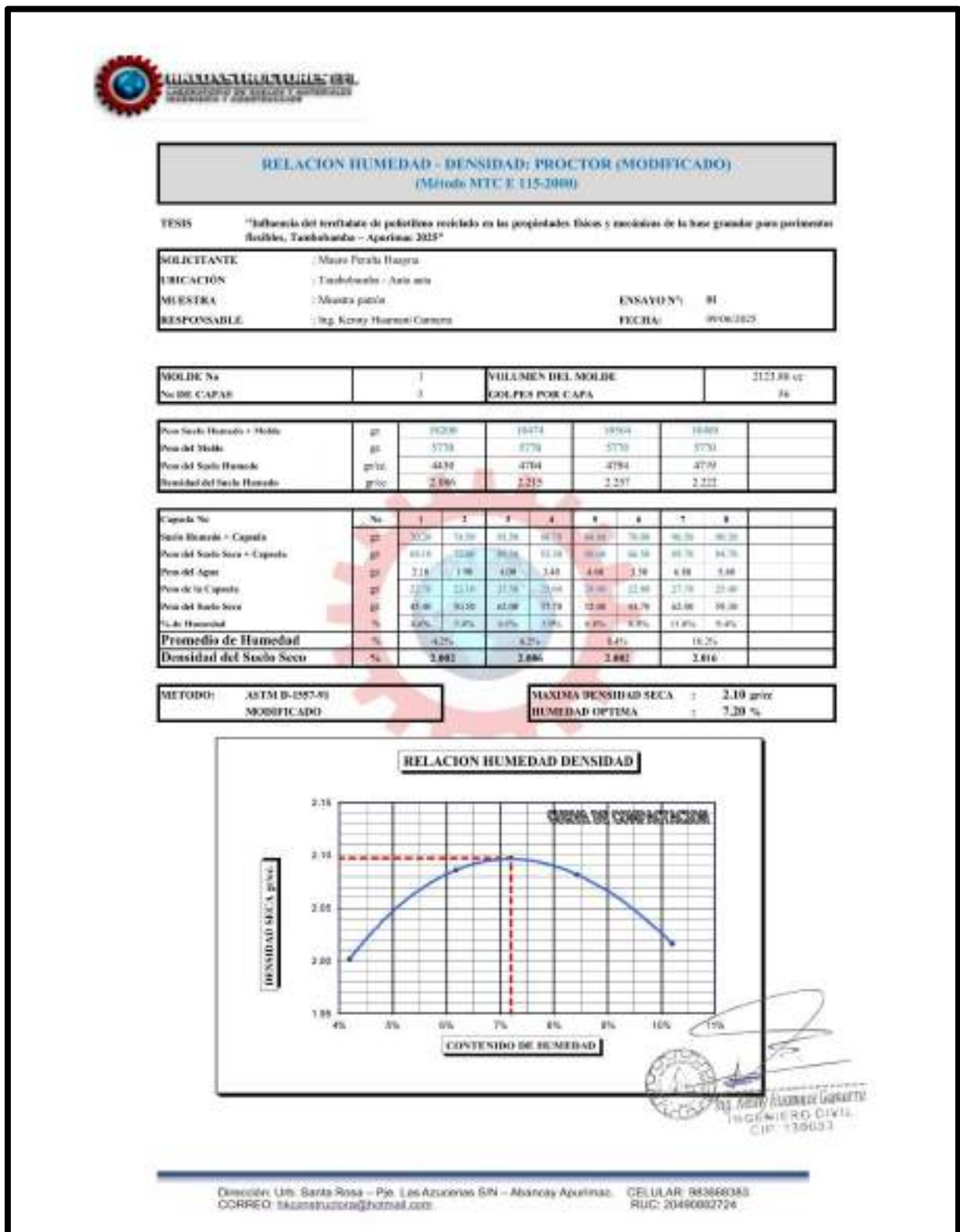


Figura 27 — Resultado proctor modificado M. patrón repetición N°1



**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD; PROCTOR (MODIFICADO)**  
(Método NTC E 115-2000)

TESIS "Influencia del terfitato de pedilina reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tumbabamba - Apurímac 2015"

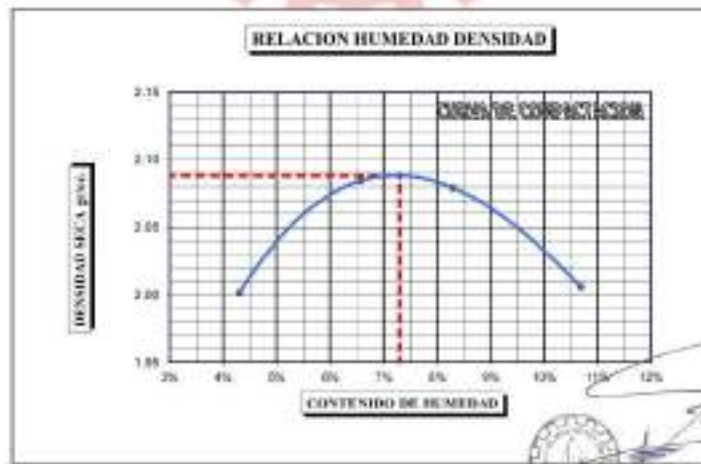
SOLICITANTE	: Muro Parala Huagra	ENSAÑO N°	: 2
UBICACIÓN	: Tumbabamba - Azuay	FECHA	: 09/06/2015
MUESTRA	: Muestra patrón		
RESPONSABLE	: Ing. Kenay Huarmacarama		

MOLDE No	: 1	VOLUMEN DEL MOLDE	: 2123,88 cc
No DE CAPAS	: 3	COSES POR CAPA	: 36

Peso Saco Humedo + Molde	gr	19294	19497	19552	19493		
Peso del Molde	gr	5733	5774	5750	5730		
Peso del Saco Humedo	gr/gr	4434	4717	4782	4715		
Humedad del Saco Humedo	gr/gr	2,868	2,221	2,231	2,220		

Capas No	No	1	2	3	4	5	6	7	8
Saco Humedo + Capas	gr	3936	4130	3918	3700	3188	3640	3140	4720
Peso del Saco Seco + Capas	gr	4130	3908	3908	3300	3608	3218	3670	4130
Peso del Agua	gr	138	218	478	378	348	420	470	990
Peso de la Capas	gr	2900	2230	2118	2400	2518	2680	2780	2470
Peso del Saco Seco	gr	4098	3718	4408	3938	4158	3838	4150	3640
% de Humedad	%	4,3%	5,7%	6,9%	6,2%	6,9%	7,8%	9,9%	10,4%
Promedio de Humedad	%	4,3%	6,0%	6,6%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,7%
Densidad del Saco Seco	%	2,662	2,664	2,670	2,670	2,670	2,670	2,670	2,666

METODO:	ASTM D-1557-91 MODIFICADO	MAXIMA DENSIDAD SECA	: 2,09 gr/cc
		HUMEDAD OPTIMA	: 7,30 %



Ing. Kenay Huarmacarama  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP: 130033

Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Los Azuleños S/N - Abancay Apurímac. CELULAR: 843660348  
 CORREO: tkconstructora@hotmail.com RUC: 20490002724

Figura 28 — Resultado proctor modificado M. patrón repetición N°2



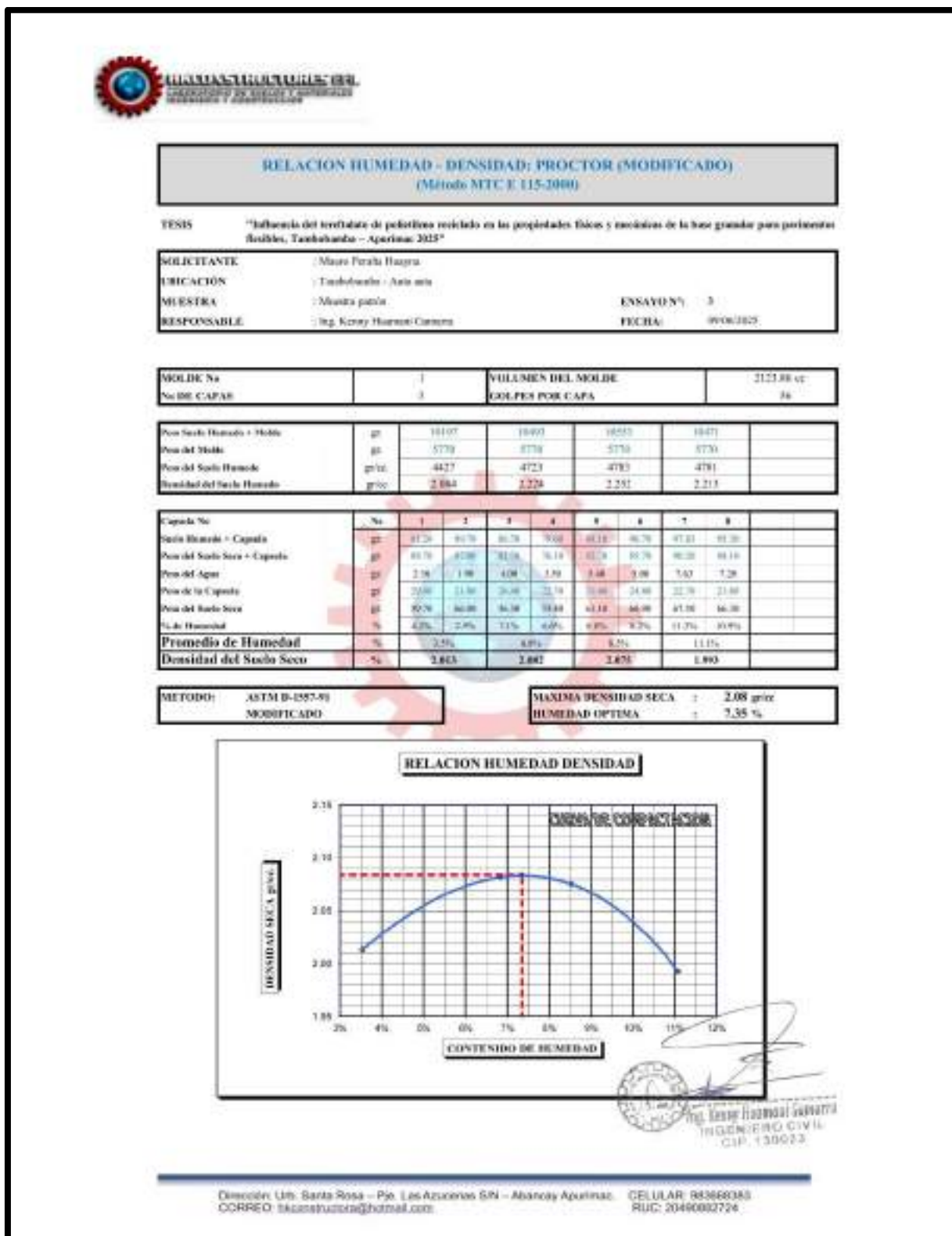


Figura 29 — Resultado proctor modificado M. patrón repetición N°3



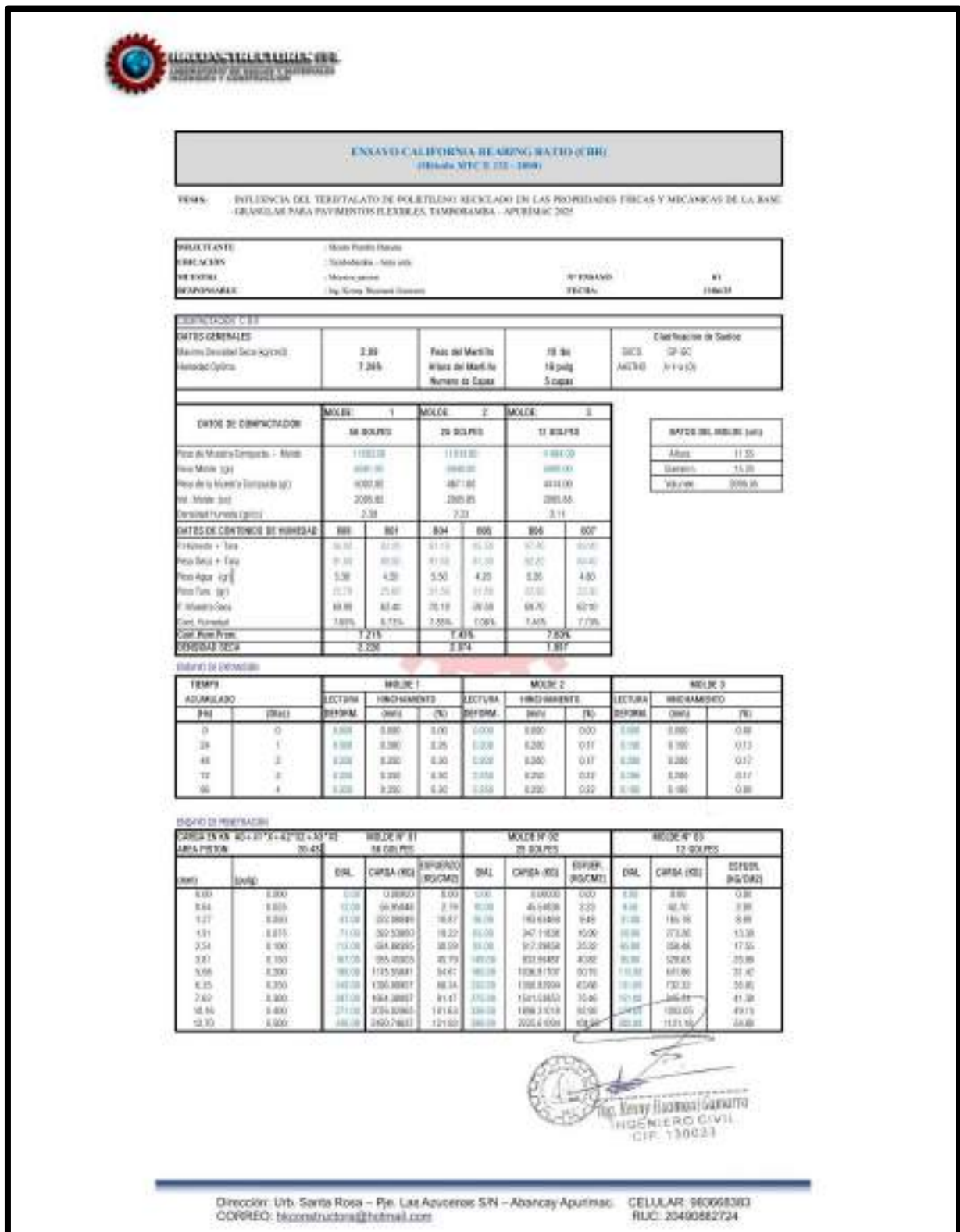


Figura 30 — Resultado CBR muestra patrón repetición N°1



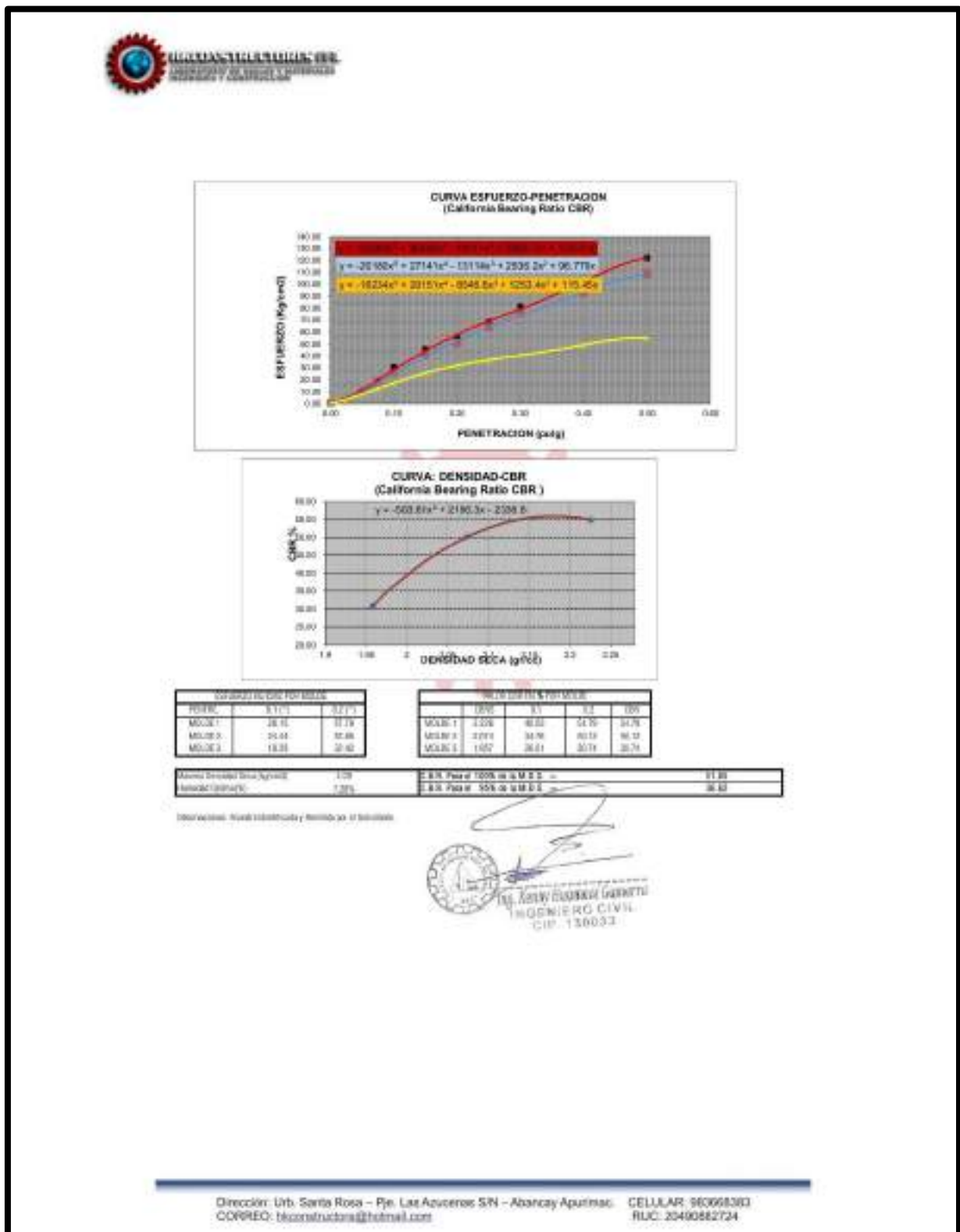


Figura 31 — Resultado CBR muestra patrón repetición N°1



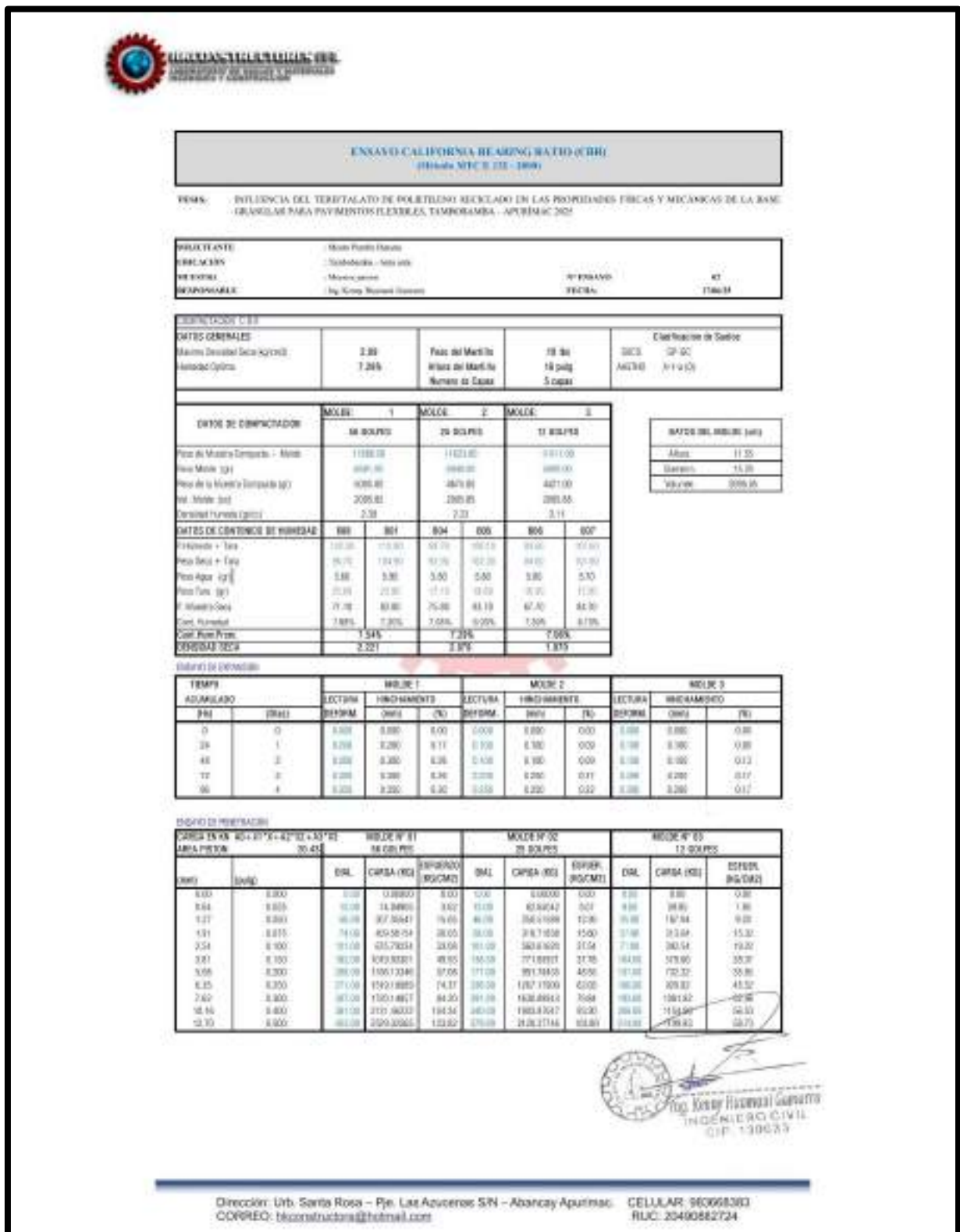


Figura 32 — Resultado CBR muestra patrón repetición N°2



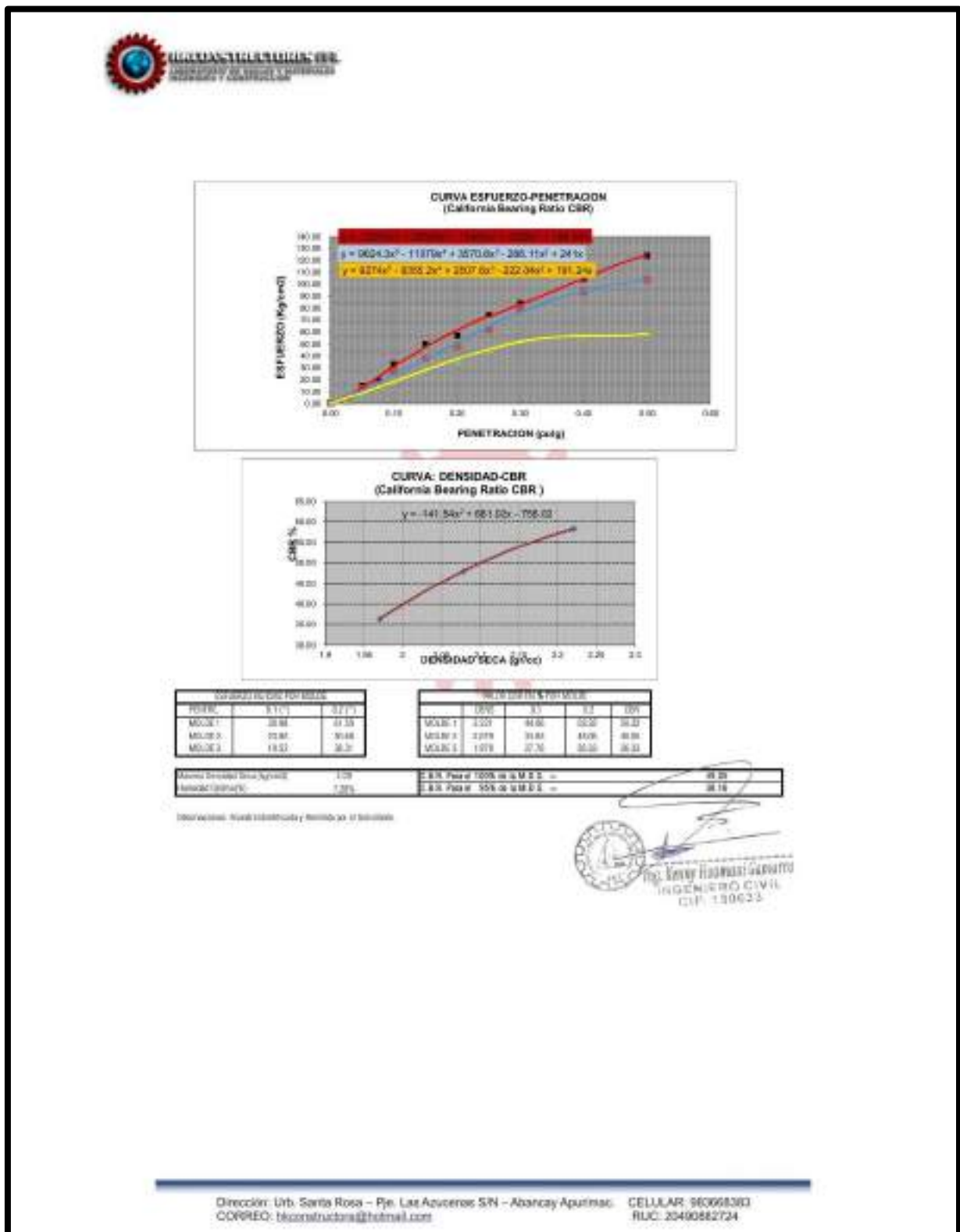


Figura 33 — Resultado CBR muestra patrón repetición N°2



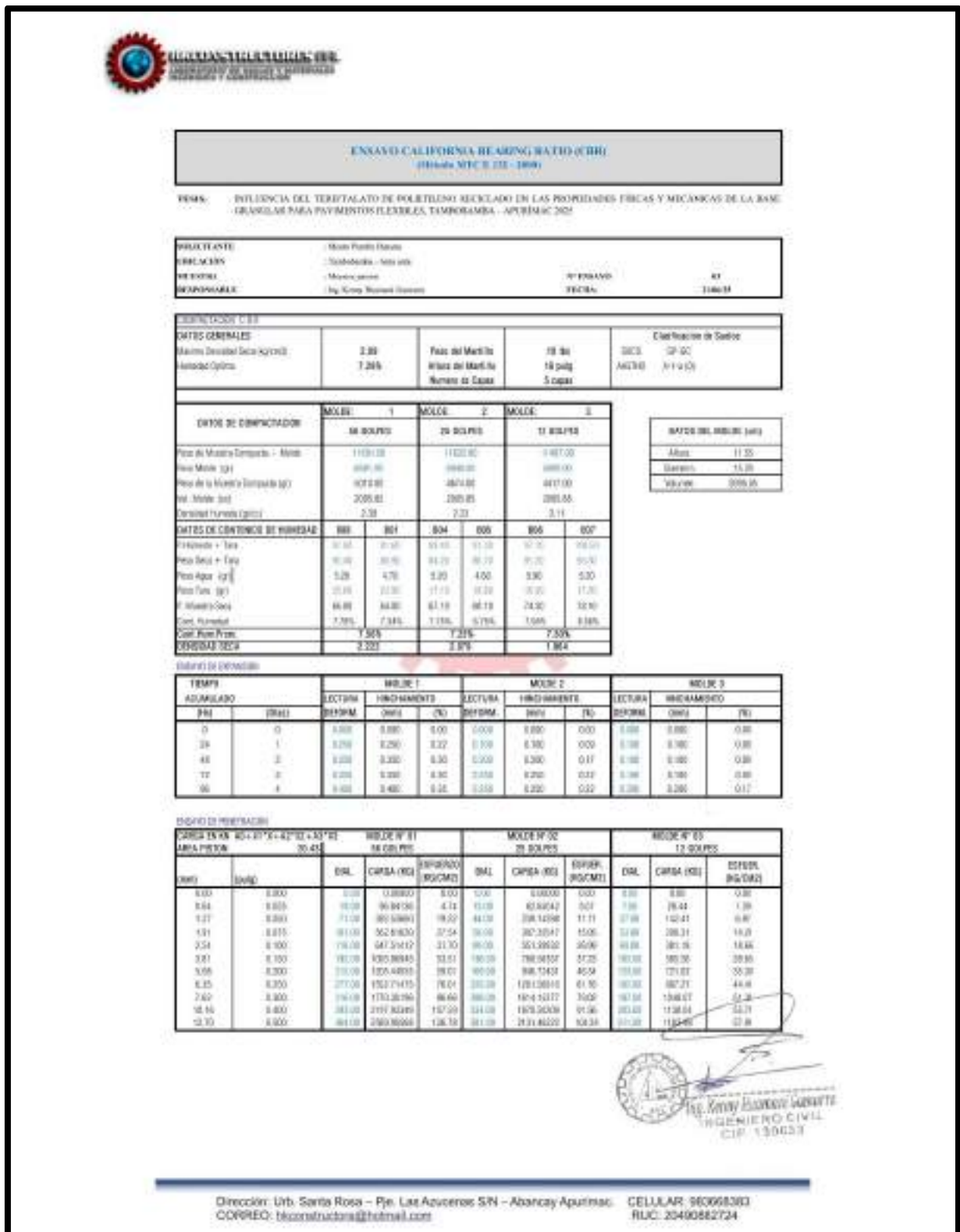


Figura 34 — Resultado CBR muestra patrón repetición N°3



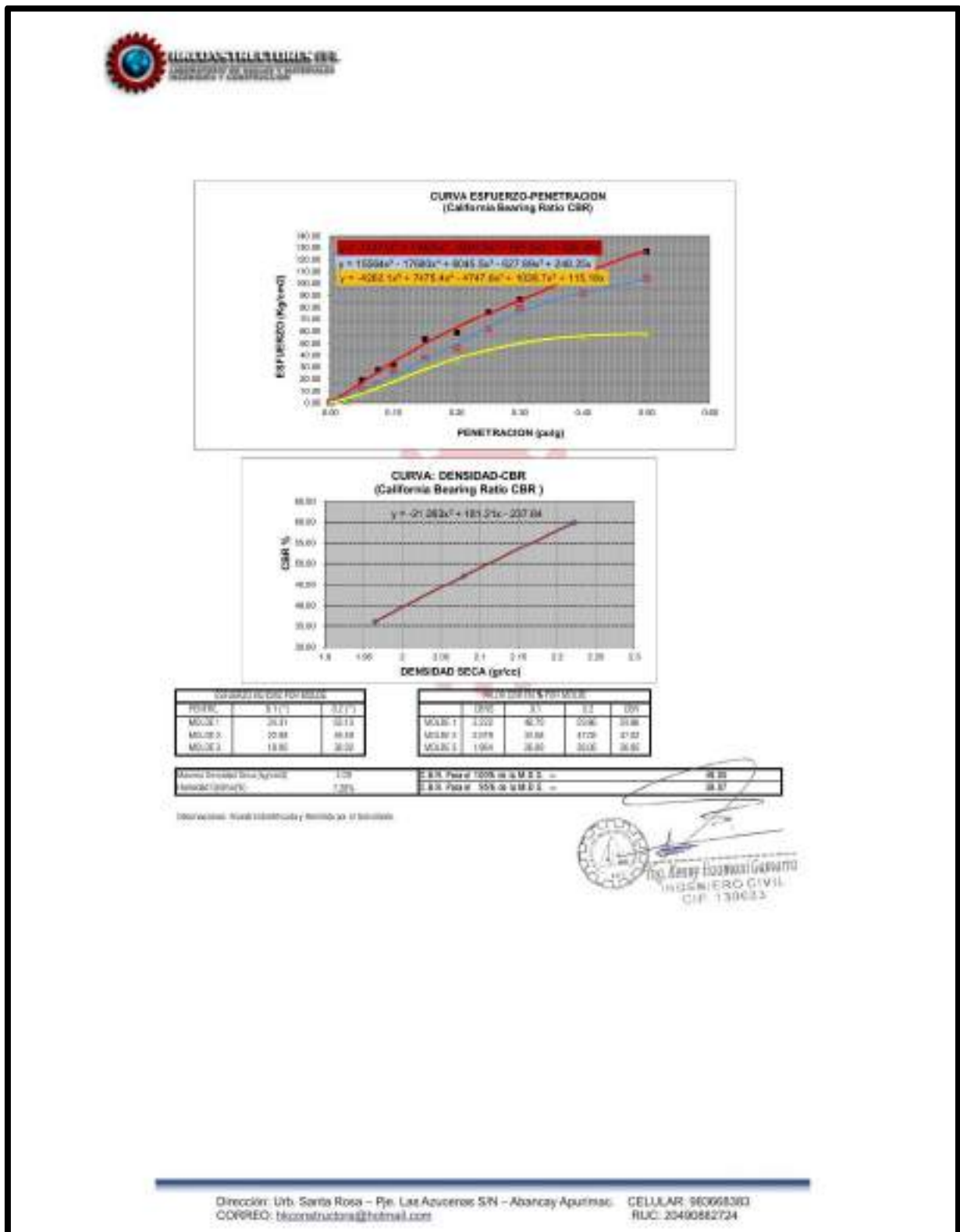


Figura 35 — Resultado CBR muestra patrón repetición N°3



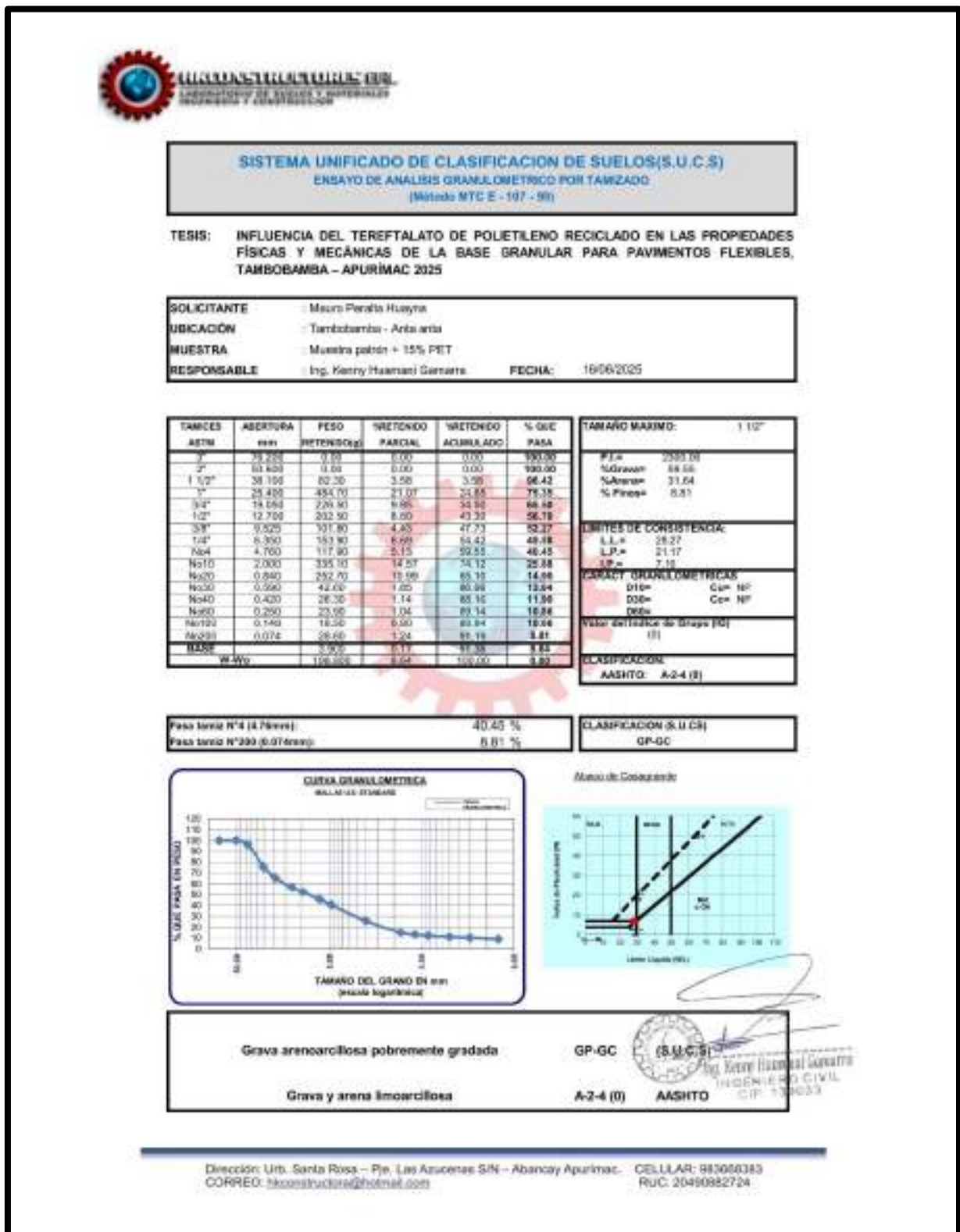


Figura 36 — Resultado granulométrico + 15% PET reciclado



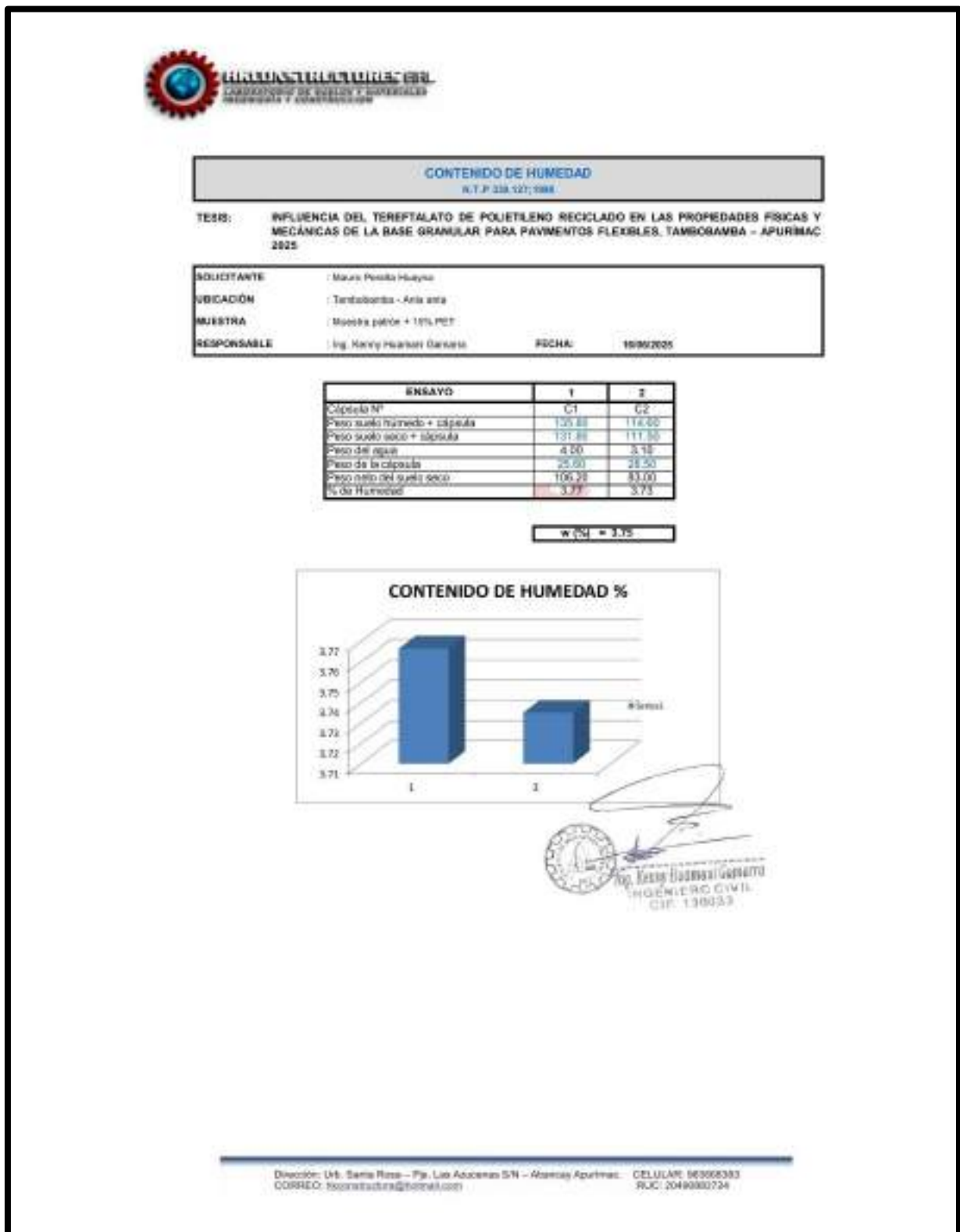


Figura 37 — Resultado cotenido de humedad + 15% PET reciclado



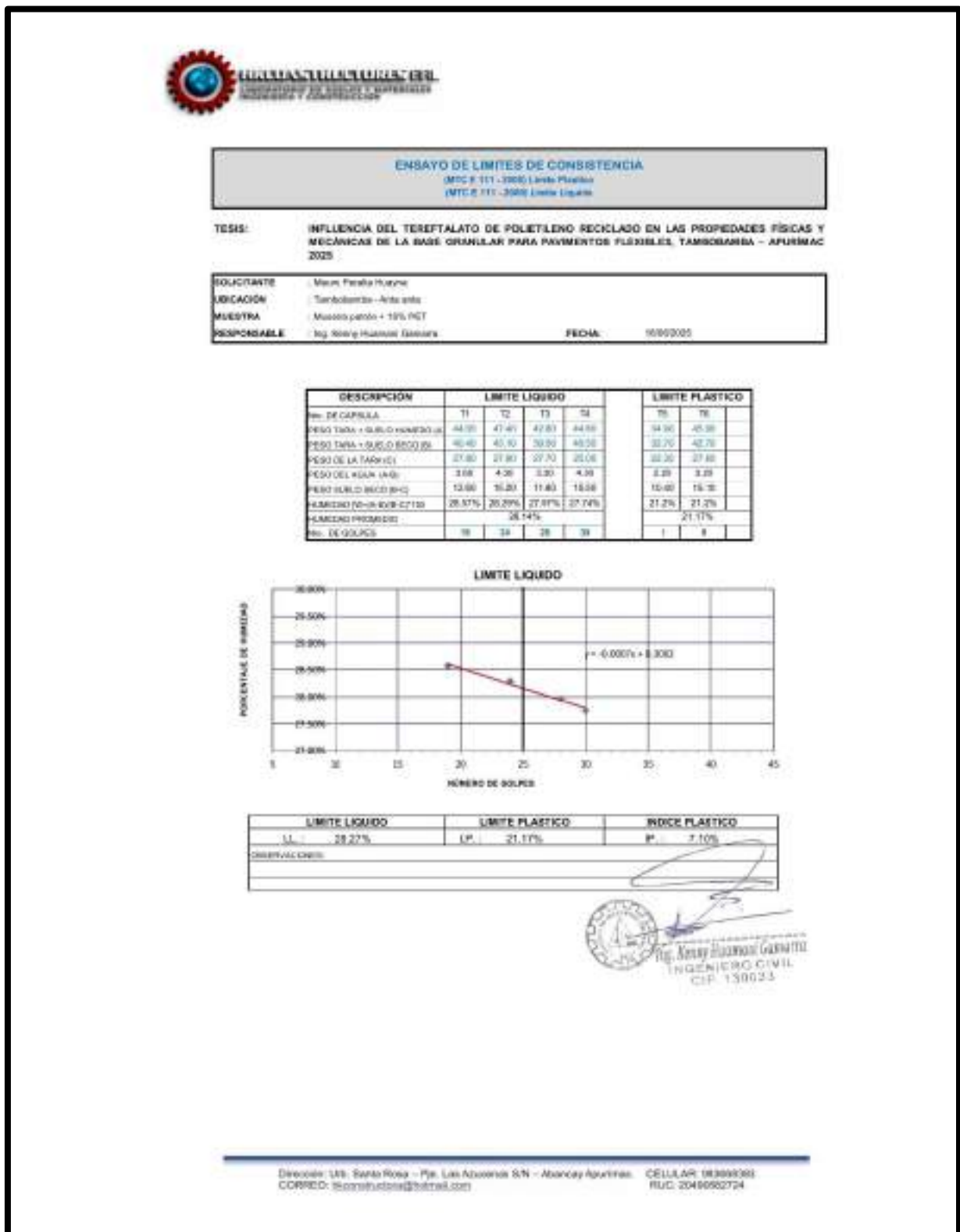


Figura 38 — Resultado límites de consistencia + 15% PET reciclado

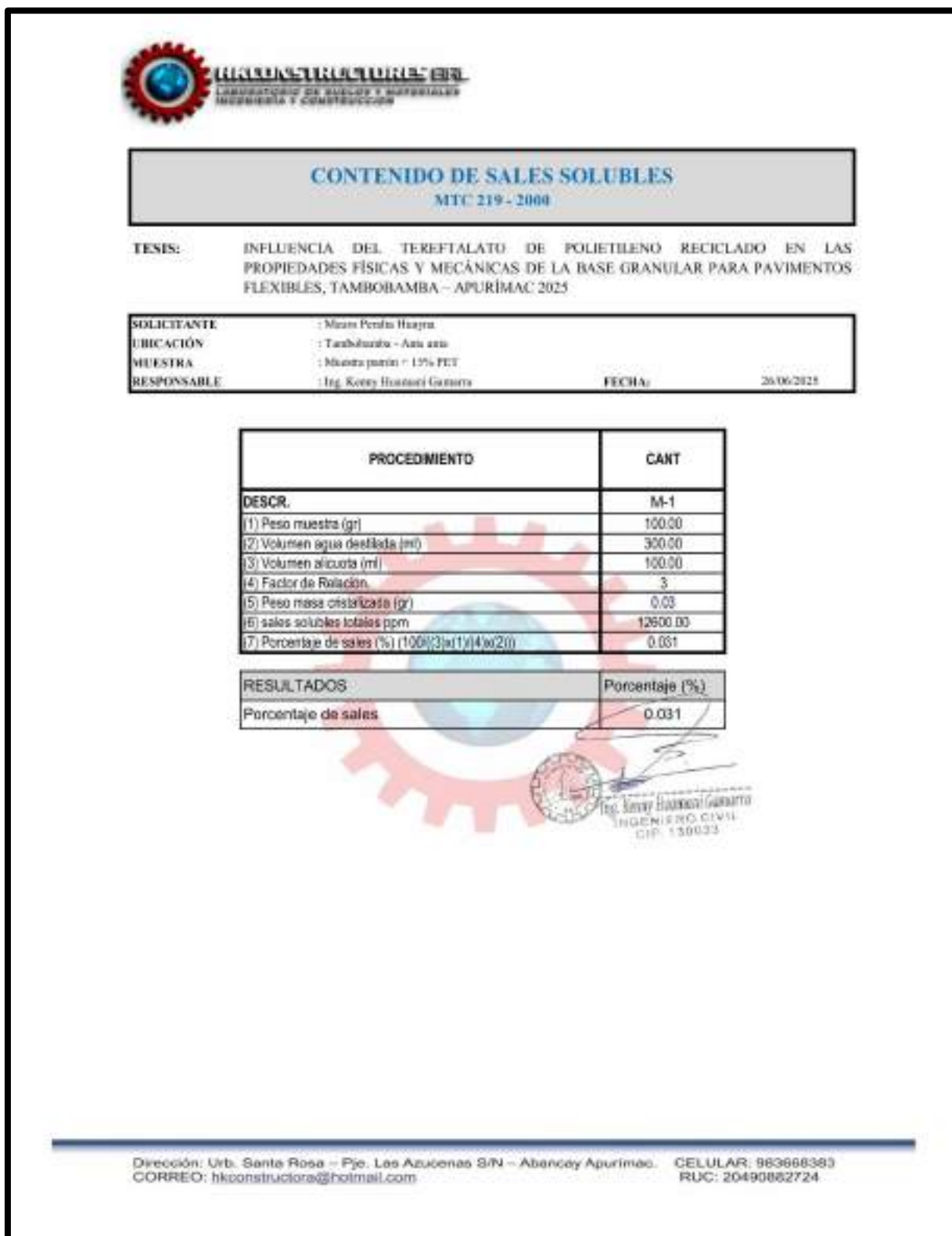


Figura 39 — Resultado contenido sales solubles + 15% PET reciclado



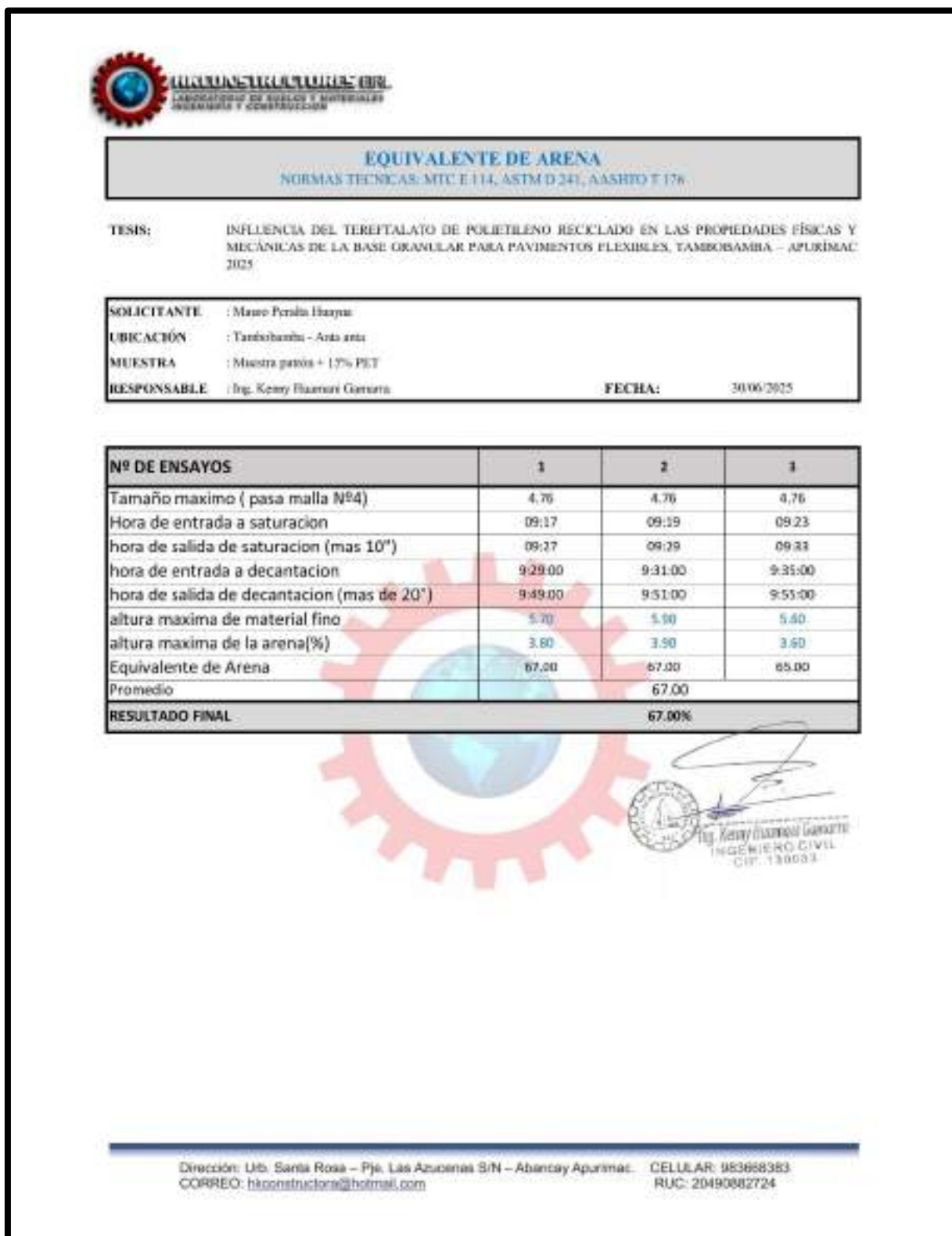


Figura 40 — Resultado equivalente de arena + 15% PET reciclado

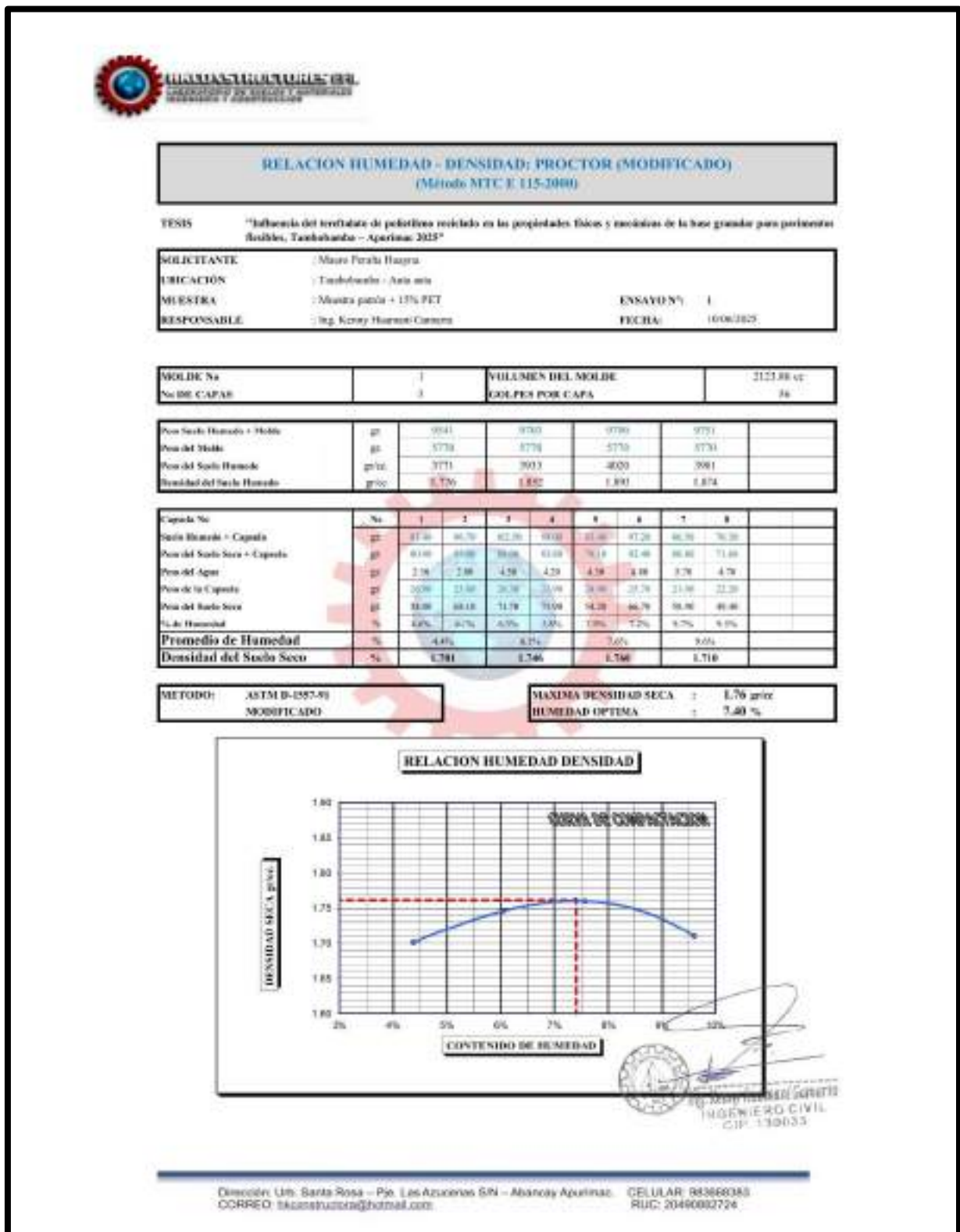


Figura 41 — Resultado proctor modificado + 15% PET reciclado, repetición N°1





**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD: PROCTOR (MODIFICADO)**  
(Método NTC E.115-2000)

TESIS "Influencia del terrefabato de petelina reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobanda – Apurímac 2025"

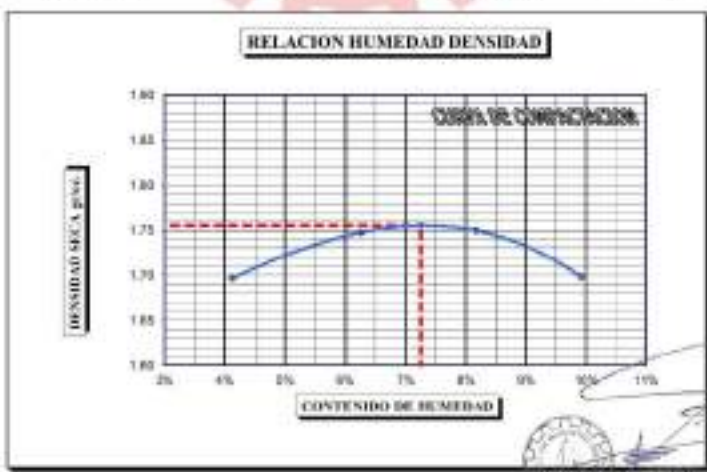
SOLICITANTE : Mauro Peralt Huagra  
 UBICACIÓN : Tambobanda - Areca seca  
 MUESTRA : Muestra pasta + 15% PET  
 RESPONSABLE : Ing. Kenay Huarcay Carrasco  
 ENSAYO N° : 2  
 FECHA : 10/06/2025

MOLDE No	1	VOLUMEN DEL MOLDE	2123,88 cc
No DE CAPAS	3	GOLPES POR CAPA	26

Peso Suelo Humedo + Molde	g	9523	9713	9789	9734
Peso del Molde	g	5733	5733	5733	5733
Peso del Suelo Humedo	g/gr	3793	3983	4059	3984
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc	1.787	1.897	1.892	1.886

Capas No	No	1	2	3	4	5	6	7	8
Suelo Humedo + Capas	g	29,30	30,79	32,00	33,06	33,80	34,50	35,00	35,70
Peso del Suelo Seco + Capas	g	30,30	30,80	32,00	33,00	33,60	34,20	34,60	35,20
Peso del Agua	g	1,40	2,90	4,00	5,10	5,80	7,10	8,20	9,50
Peso de la Capas	g	21,20	21,30	24,70	23,60	23,60	27,90	27,60	26,70
Peso del Suelo Seco	g	31,90	34,50	36,80	36,60	36,20	36,30	36,00	35,20
% de Humedad	%	4,3%	8,4%	9,5%	10,9%	12,7%	17,6%	20,7%	24,4%
Promedio de Humedad	%		4,1%		6,1%		8,2%		9,9%
Densidad del Suelo Seco	%		1,697		1,747		1,749		1,698

METODO: ASTM D-1557-01 MODIFICADO  
 MAXIMA DENSIDAD SECA : 1,76 gr/cc  
 HUMEDAD OPTIMA : 7,25 %



*[Signature]*  
 Ing. Kenay Huarcay Carrasco  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP 130033

Directorio: Urb. Santa Rosa - Pje. Las Azuleiras S/N - Abancay Apurímac. CELULAR: 983660345  
 CORREO: ikconstruccion@hotmail.com RUC: 20490002724

Figura 42 — Resultado proctor modificado + 15% PET reciclado, repetición N°2



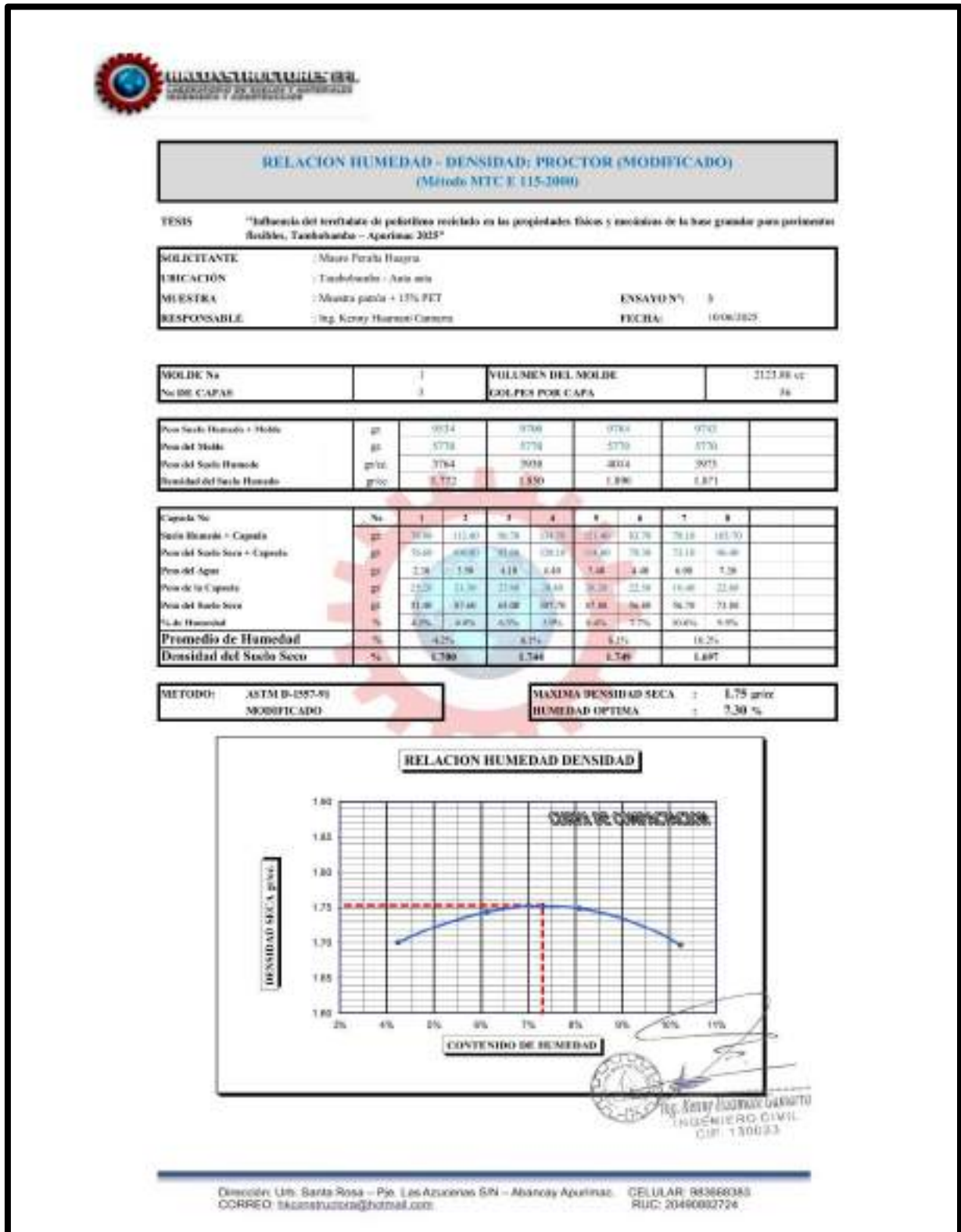


Figura 43 — Resultado proctor modificado + 15% PET reciclado, repetición N°3



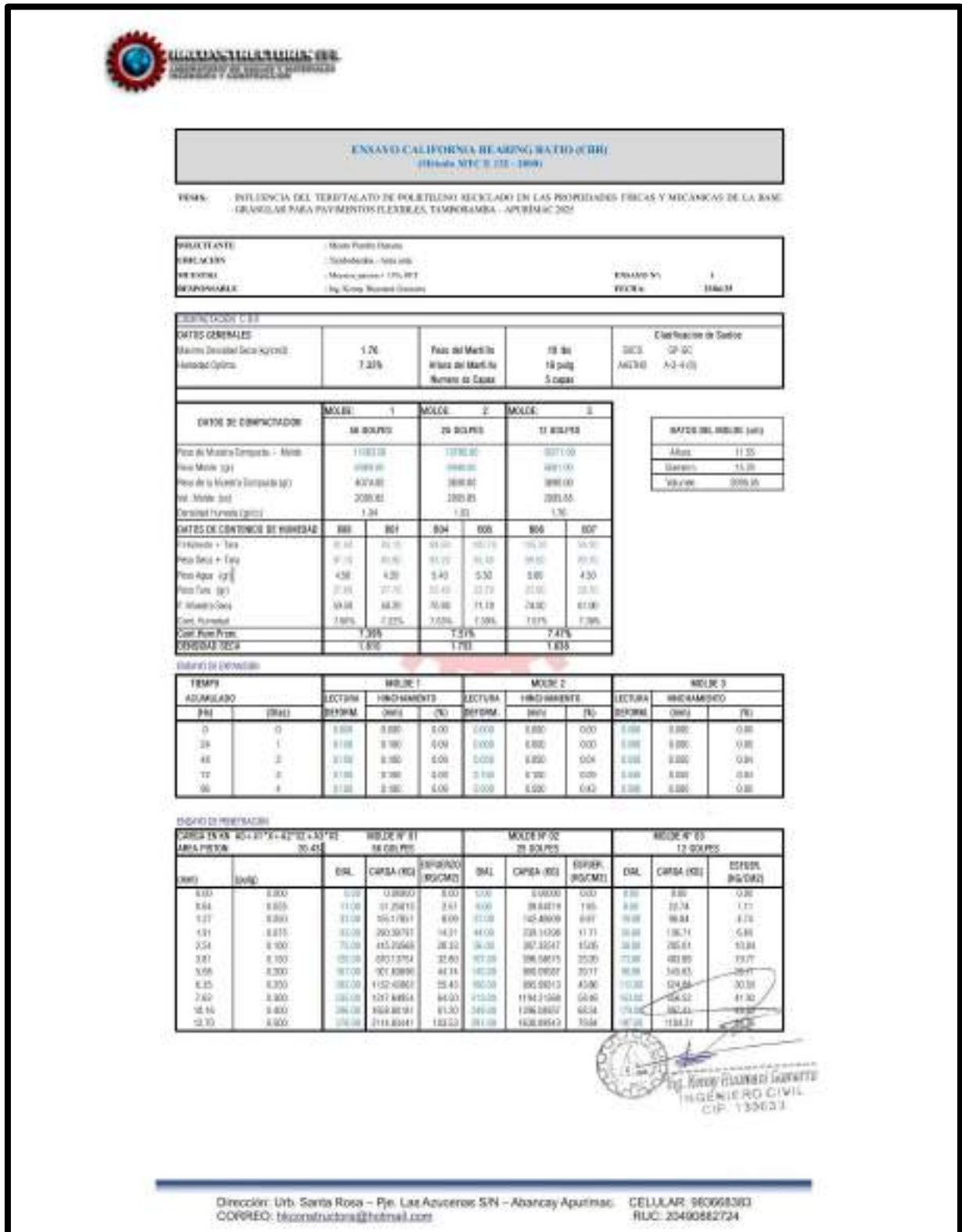


Figura 44 — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°1



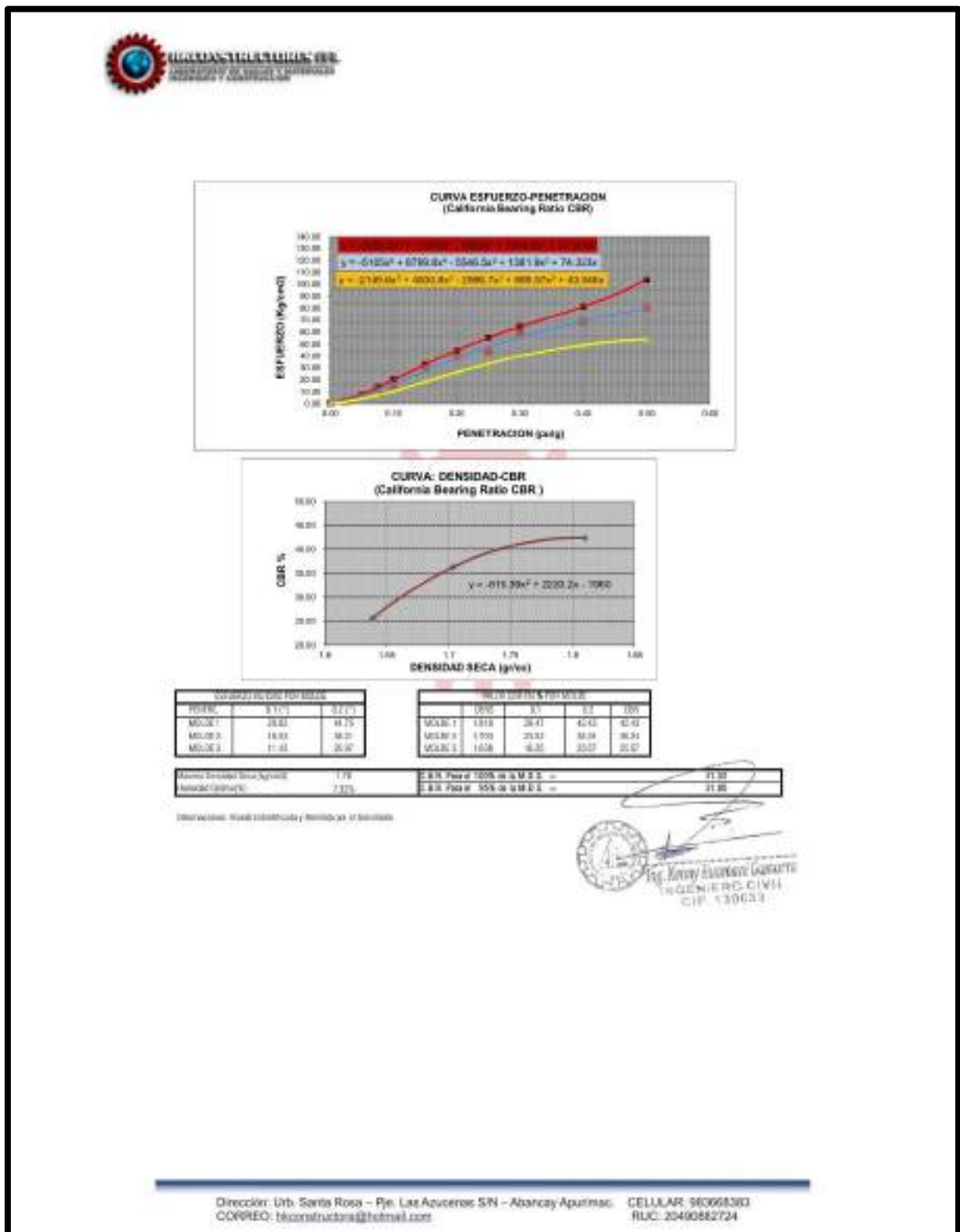


Figura 45 — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°1



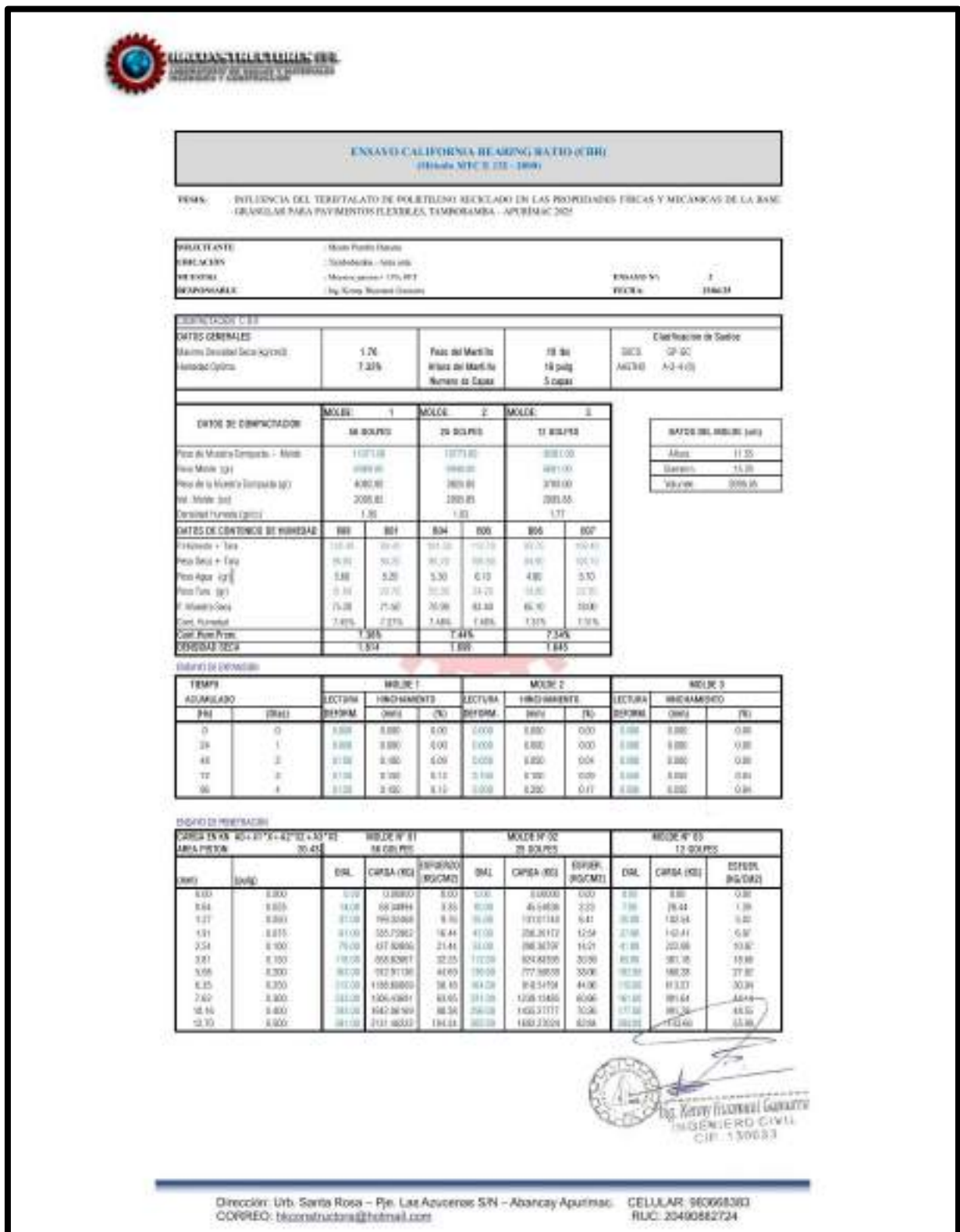


Figura 46 — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°2



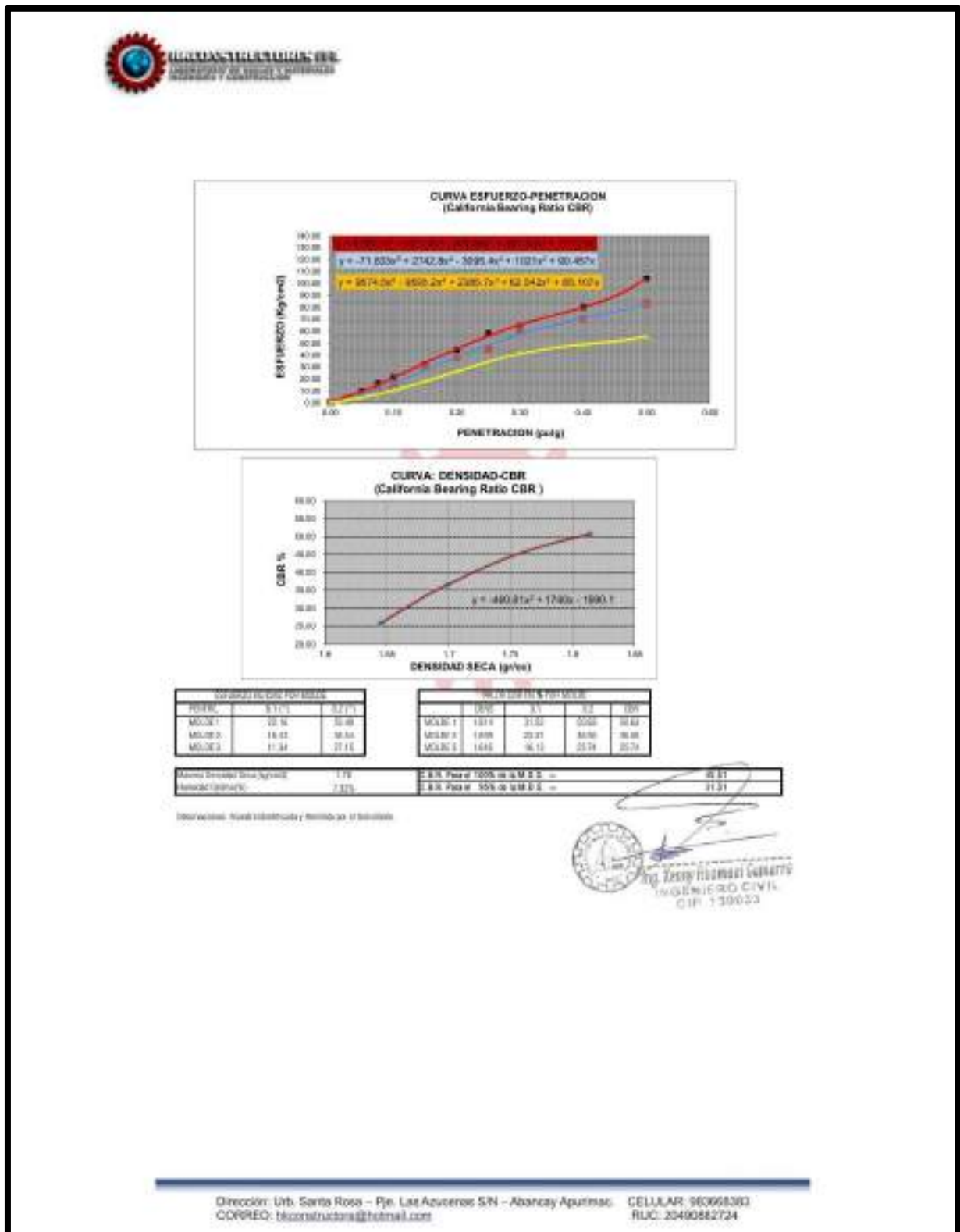


Figura 47 — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°2



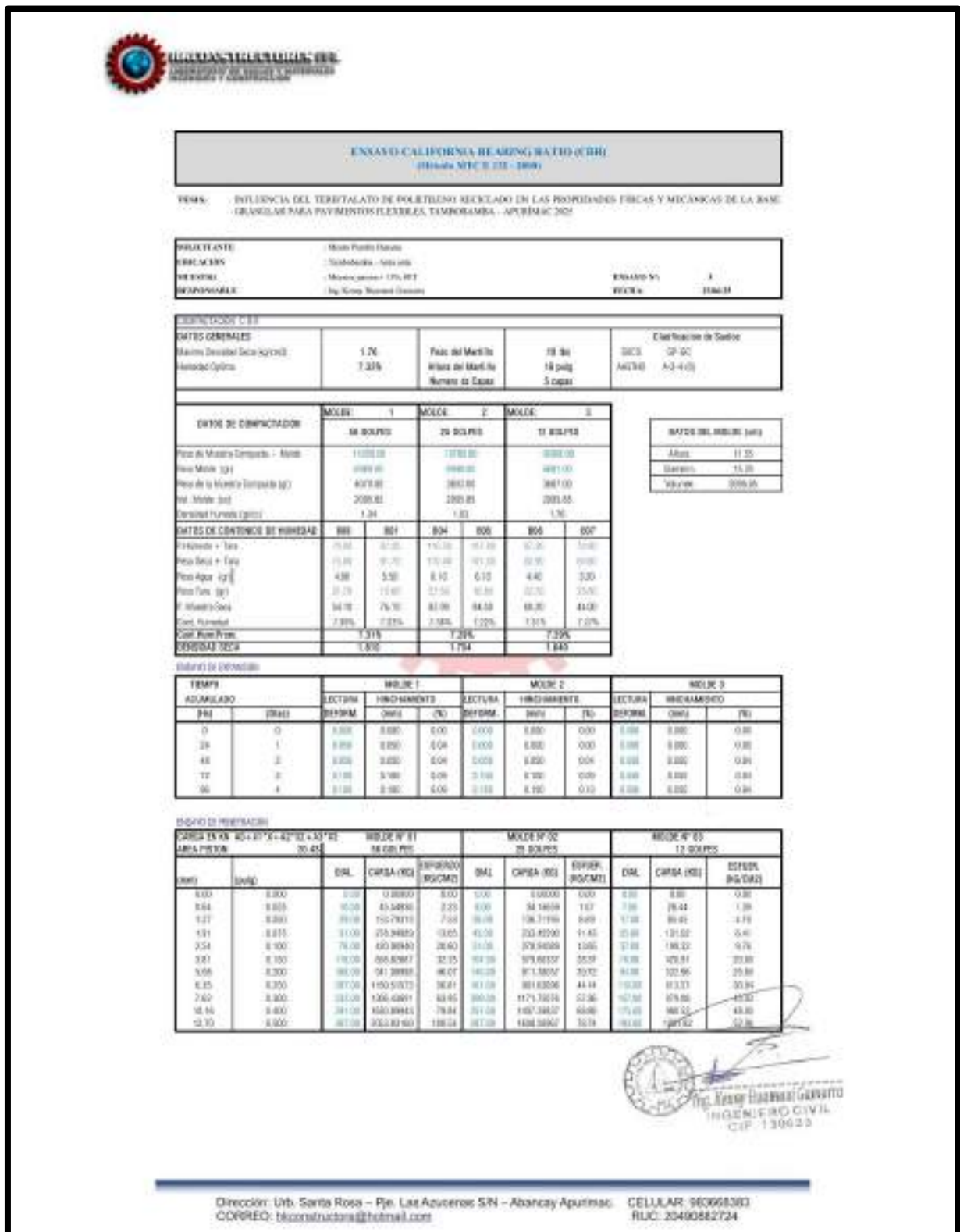


Figura 48 — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°3



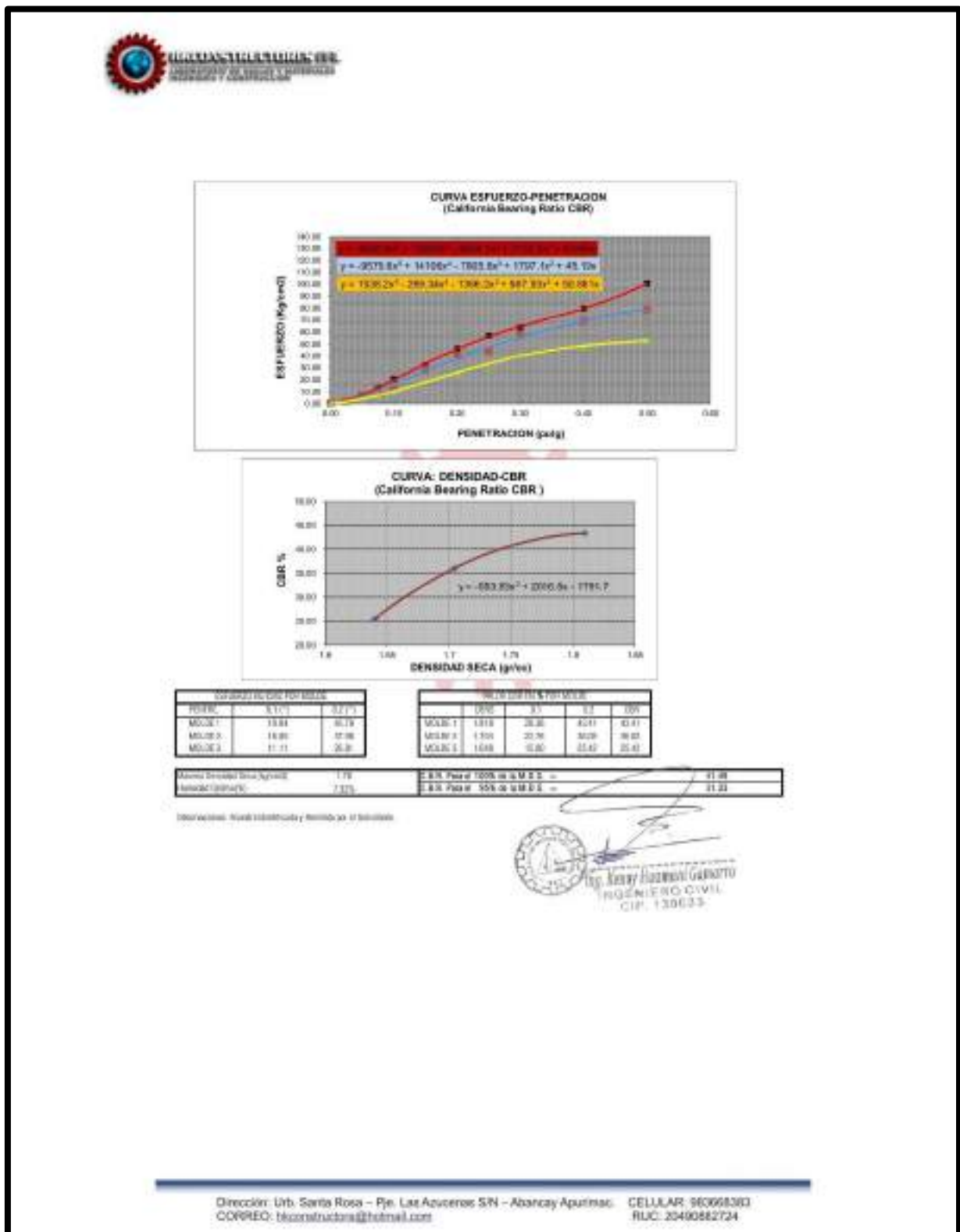


Figura 49 — Resultado CBR + 15% PET reciclado, repetición N°3



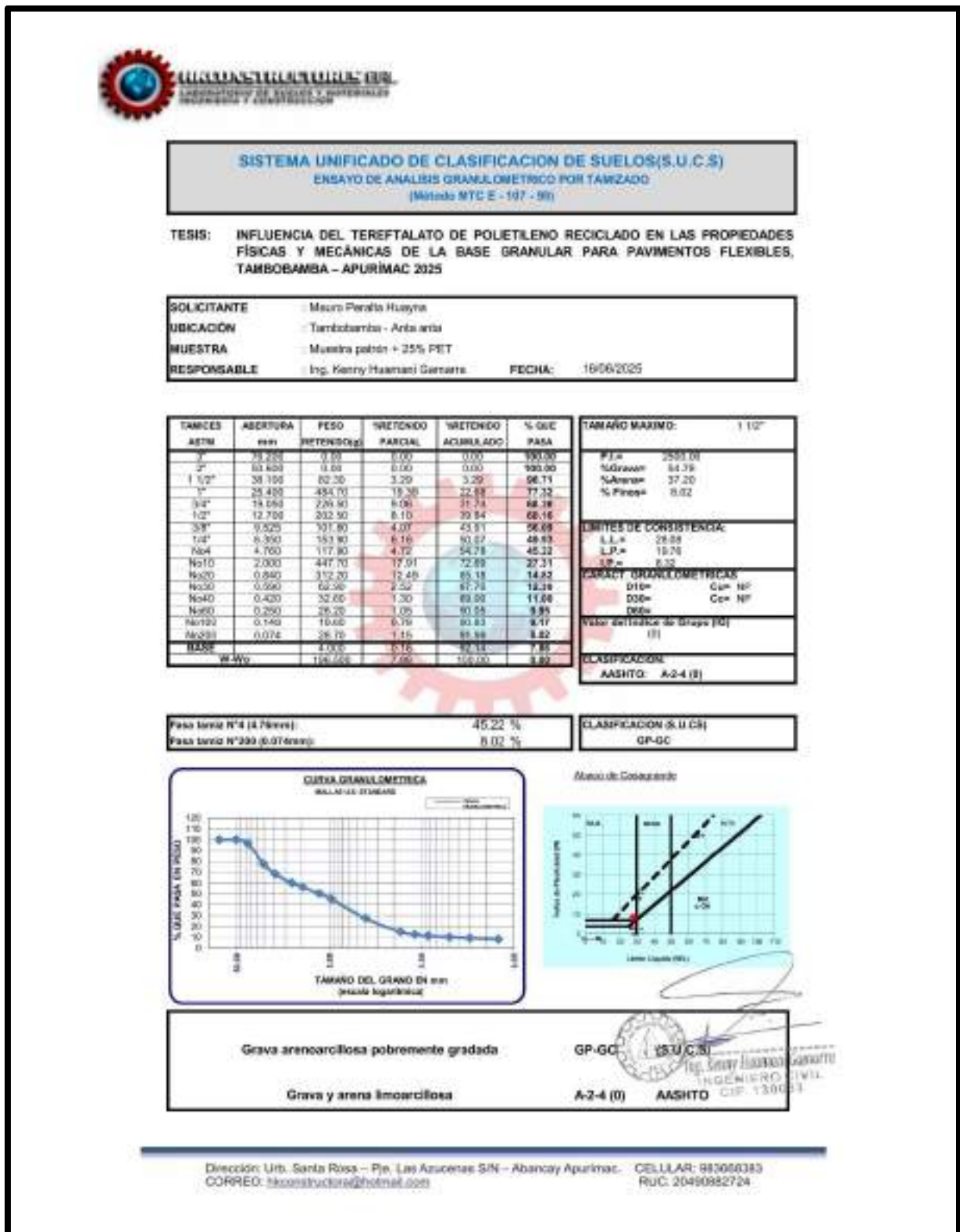


Figura 50 — Granulometría + 25% PET



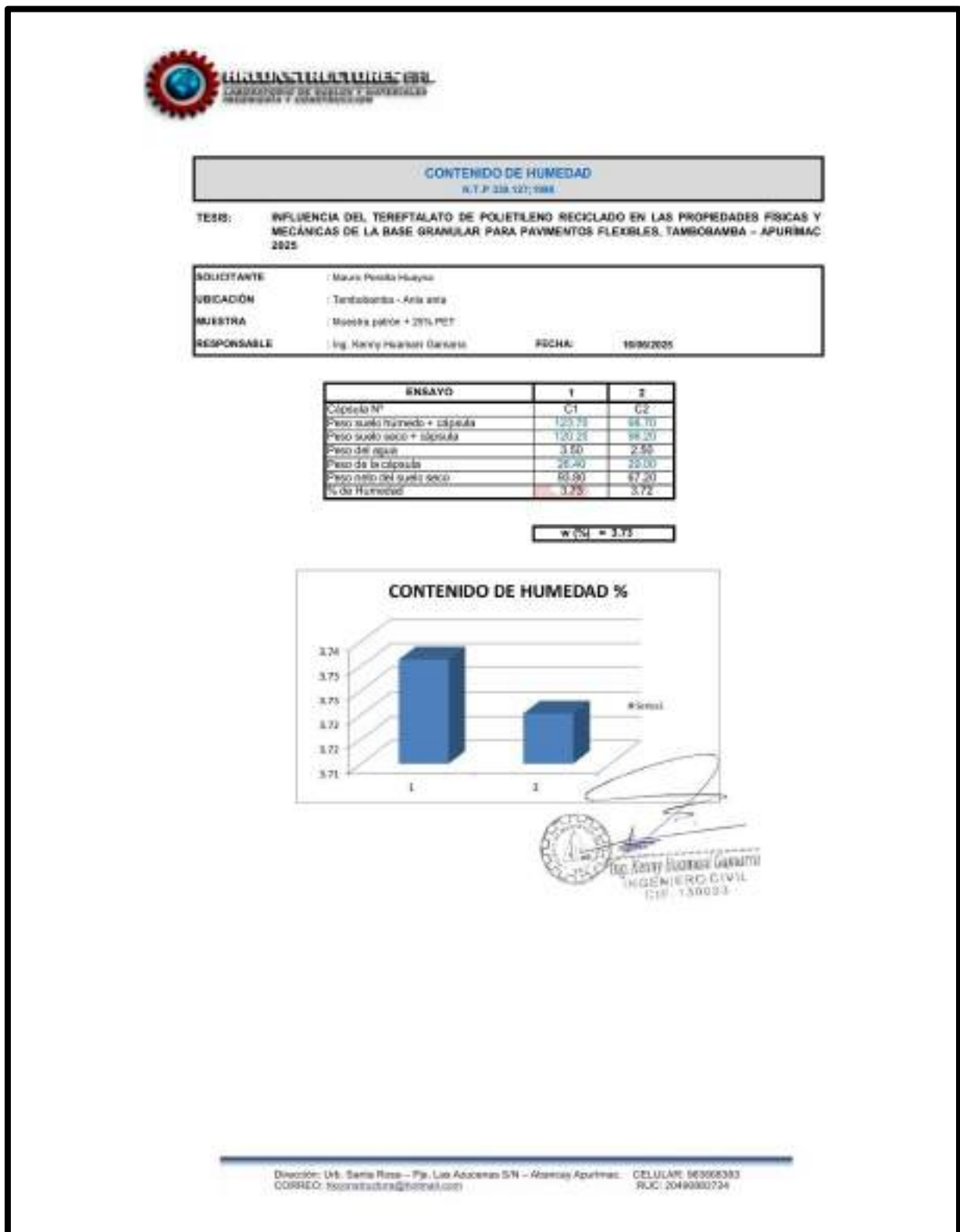


Figura 51 — Contenido de humedad + 25% PET



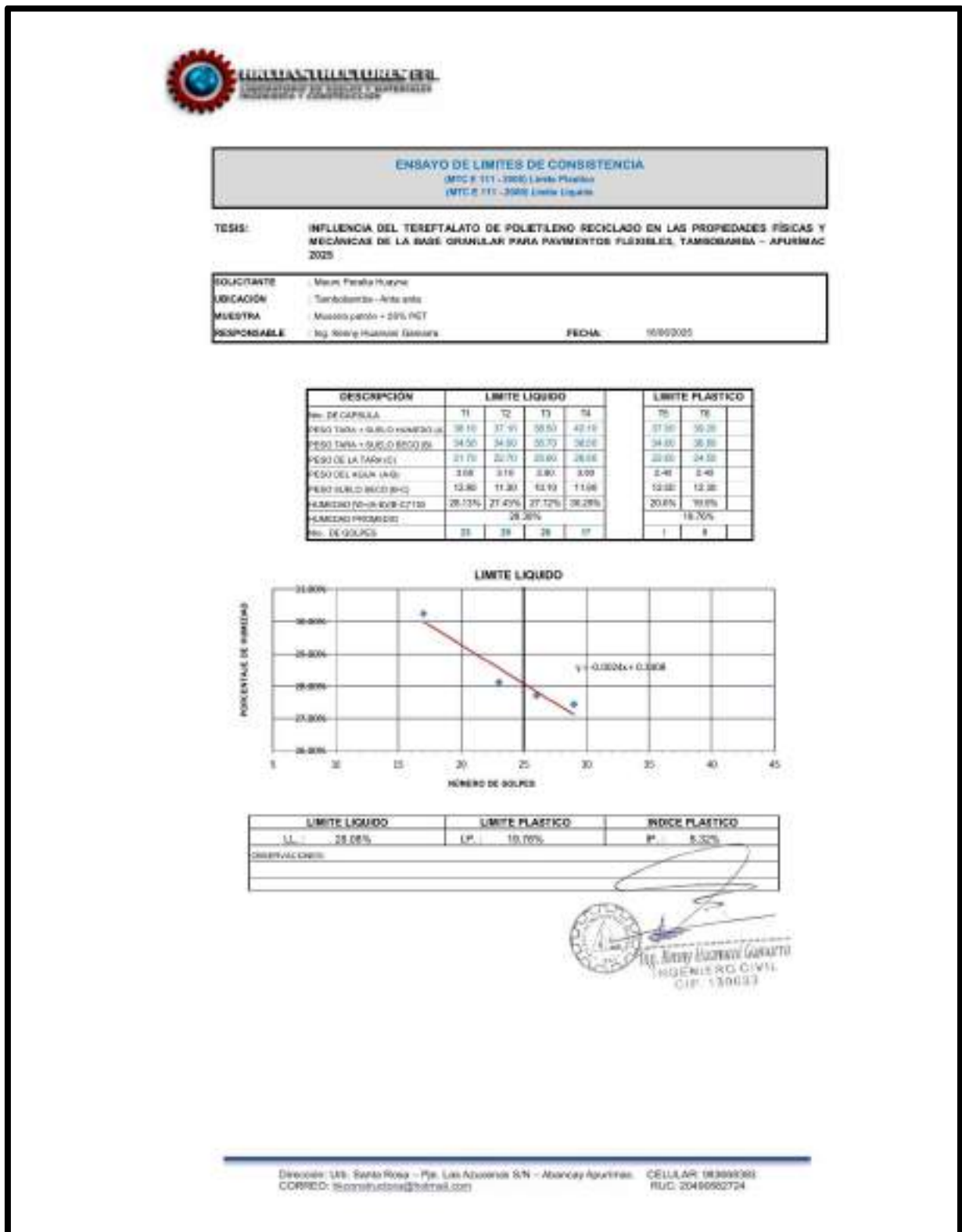



Figura 52 — Límites de consistencia + 25% PET





### CONTENIDO DE SALES SOLUBLES

MTC 219 - 2000

**TESIS:** INFLUENCIA DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO REICLADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA BASE GRANULAR PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES, TAMBOBAMBA – APURÍMAC 2025


<b>SOLICITANTE</b>	: Mirza Perito Huayra		
<b>UBICACIÓN</b>	: Tambobamba - Arequipa		
<b>MUESTRA</b>	: Muestra parón + 25% PET		
<b>RESPONSABLE</b>	: Ing. Kenry Ivanori Gamero	<b>FECHA:</b>	26/06/2025

PROCEDIMIENTO	CANT
<b>DESCR.</b>	M-1
(1) Peso muestra (gr)	100.00
(2) Volumen agua destilada (ml)	300.00
(3) Volumen alcohola (ml)	100.00
(4) Factor de Relación	0.385
(5) Peso masa cristalizada (gr)	0.36
(6) sales solubles totales ppm	19350.10
(7) Porcentaje de sales (%) $(100) \cdot (3) \cdot (1) \cdot (4) \cdot (2) \cdot (5)$	0.047

RESULTADOS	Porcentaje (%)
Porcentaje de sales	0.047



Ing. Kenry Ivanori Gamero  
INGENIERO CIVIL  
CIP: 130033

---

Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Las Azuleñas S/N - Abancay Apurímac.  
CORREO: hikonstructora@hotmail.com

CELULAR: 983668383  
RUC: 20490862724

Figura 53 — Cont. Sales solubles + 25% PET







**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD; PROCTOR (MODIFICADO)**  
(Método NTC E 115-2000)

TESIS "Influencia del terfitato de polifosfo reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobamba - Apurímac 2015"

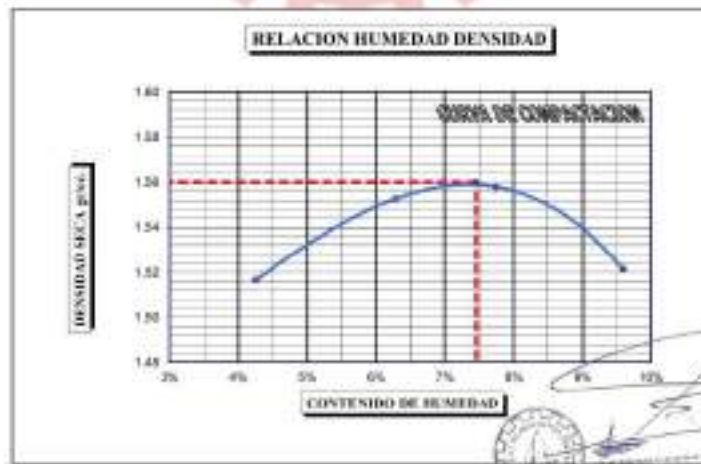
SOLICITANTE : Mauro Parala Huagra  
 UBICACIÓN : Tambobamba - Azuay  
 MUESTRA : Muestra pasta + 25% PET  
 RESPONSABLE : Ing. Kenzo Huamán-Camero  
 ENSAYO N° : 1  
 FECHA : 10/06/2017

MOLDE No	1	VOLUMEN DEL MOLDE	2123,88 cc
No DE CAPAS	3	COSES POR CAPA	36

Peso Saco Humedo + Molde	gr	9228	9278	9320	9371
Peso del Molde	gr	5731	5774	5770	5731
Peso del Saco Humedo	gr/lot	3558	3560	3565	3541
Humedad del Saco Humedo	gr/oc	3,581	3,550	3,476	3,467

Capacidad	No	1	2	3	4	5	6	7	8
Saco Humedo + Capacidad	gr	29,70	60,60	110,20	169,10	21,00	81,00	130,00	17,00
Peso del Saco Seco + Capacidad	gr	49,20	86,70	139,00	194,00	20,00	86,00	131,00	11,00
Peso del Agua	gr	5,50	2,90	1,40	1,00	4,40	4,00	4,00	1,90
Peso de la Capacidad	gr	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
Peso del Saco Seco	gr	31,40	34,00	31,20	30,00	61,00	62,00	60,00	61,00
% de Humedad	%	4,0%	3,4%	3,0%	4,1%	7,4%	7,7%	6,9%	6,2%
Promedio de Humedad	%	4,3%	3,3%	3,3%	3,3%	7,7%	7,7%	6,9%	6,2%
Densidad del Saco Seco	%	1,817	1,555	1,558	1,558	1,558	1,521		

METODO: ASTM D-1557-01 MODIFICADO  
 MAXIMA DENSIDAD SECA : 1,56 gr/cc  
 HUMEDAD OPTIMA : 7,45 %



ING. KENZO HUAMÁN-CAMERO  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP: 130033

Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Los Azuleños S/N - Abancay Apurímac. CELULAR: 983660348  
 CORREO: tkconstructora@hotmail.com RUC: 20490002724

Figura 55 — Proctor modificado + 25% PET-R, repetición N°1





**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD; PROCTOR (MODIFICADO)**  
(Método NTC E 115-2000)

TESIS "Influencia del terfitato de polifosfo reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tumbabamba - Apurímac 2015"

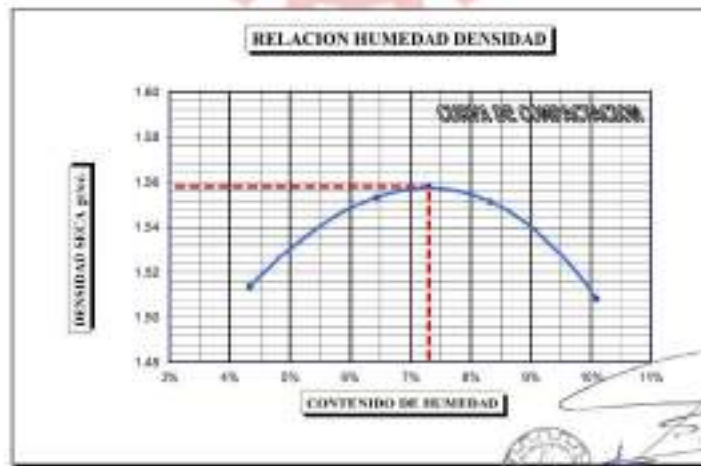
SOLICITANTE:	Miguel Parodi Huagra	ENSAÑO N°:	2
UBICACIÓN:	Tumbabamba - Azuay	FECHA:	10/06/2017
MUESTRA:	Muestra pasta + 25% PET		
RESPONSABLE:	Ing. Kenzo Huamán-Camero		

MOLDE No	1	VOLUMEN DEL MOLDE	2123,88 cc
No DE CAPAS	3	COSES POR CAPA	36

Peso Saco Humedo + Molde	gr	9324	9280	9320	9287
Peso del Molde	gr	5718	5718	5718	5718
Peso del Saco Humedo	gr/gr	3554	3511	3549	3527
Humedad del Saco Humedo	gr/gr	3.379	3.655	3.690	3.661

Capas No	No	1	2	3	4	5	6	7	8
Saco Humedo + Capas	gr	2000	4070	6040	7710	9670	1110	12040	13900
Peso del Saco Seco + Capas	gr	6000	6100	6120	6030	6100	6060	6110	6130
Peso del Agua	gr	370	230	120	30	60	60	60	70
Peso de la Capas	gr	2170	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2170
Peso del Saco Seco	gr	7020	7020	7040	7010	7060	7060	7060	7080
% de Humedad	%	4.70%	3.40%	3.60%	4.20%	4.30%	4.10%	4.30%	4.90%
Promedio de Humedad	%		4.31%		4.41%		4.11%		4.11%
Densidad del Saco Seco	%		1.554		1.555		1.551		1.548

METODO:	ASTM D-1557-91 MODIFICADO	MAXIMA DENSIDAD SECA	1.56 gr/cc
		HUMEDAD OPTIMA	7.30 %



  
 Ing. Kenzo Huamán-Camero  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP: 139653

Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Los Azuleños S/N - Abancay Apurímac. CELULAR: 983660348  
 CORREO: tkconstructora@hotmail.com RUC: 20490002724

Figura 56 — Proctor modificado + 25% PET-R, repetición N°2



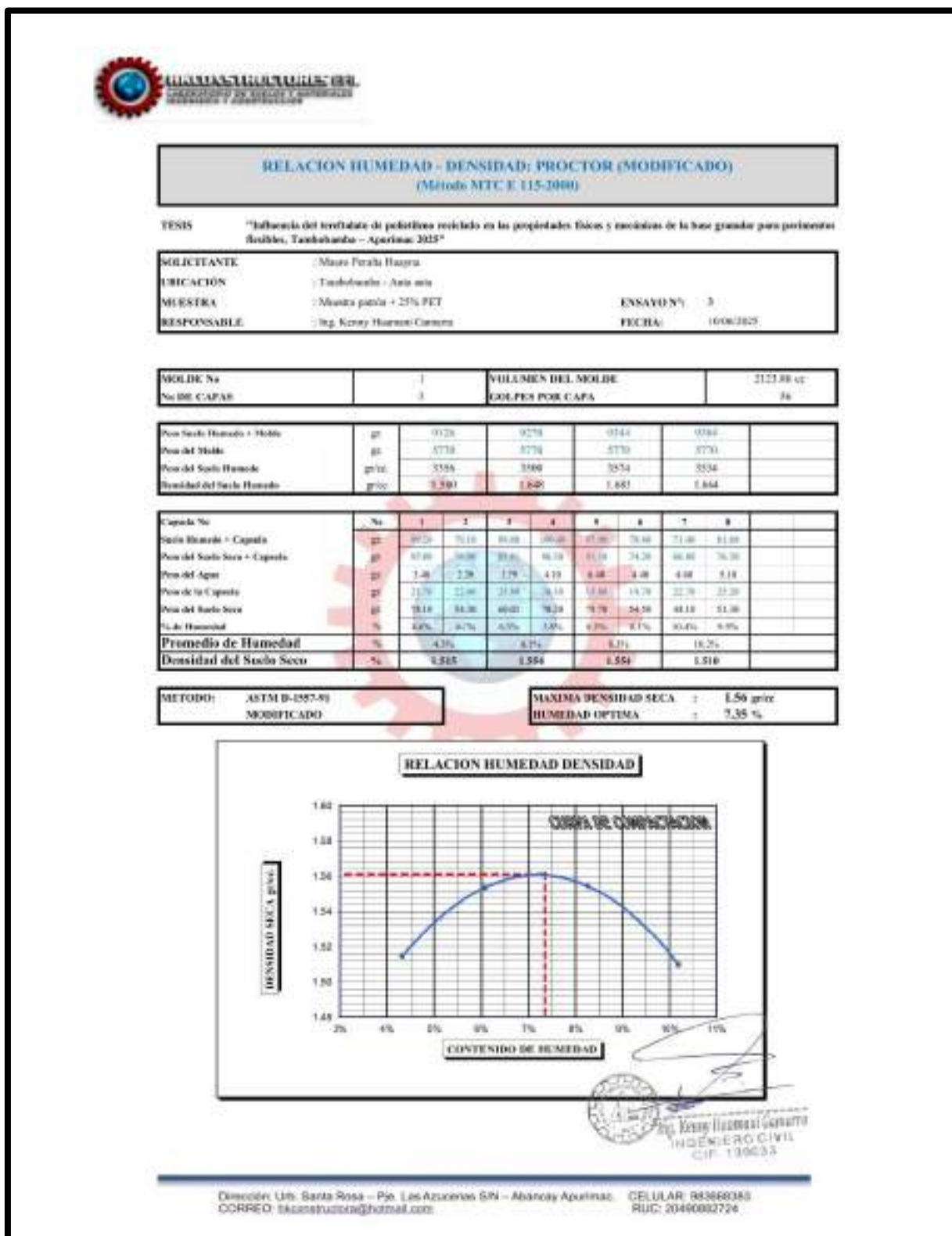


Figura 57 — Proctor modificado + 25% PET-R, repetición N°3

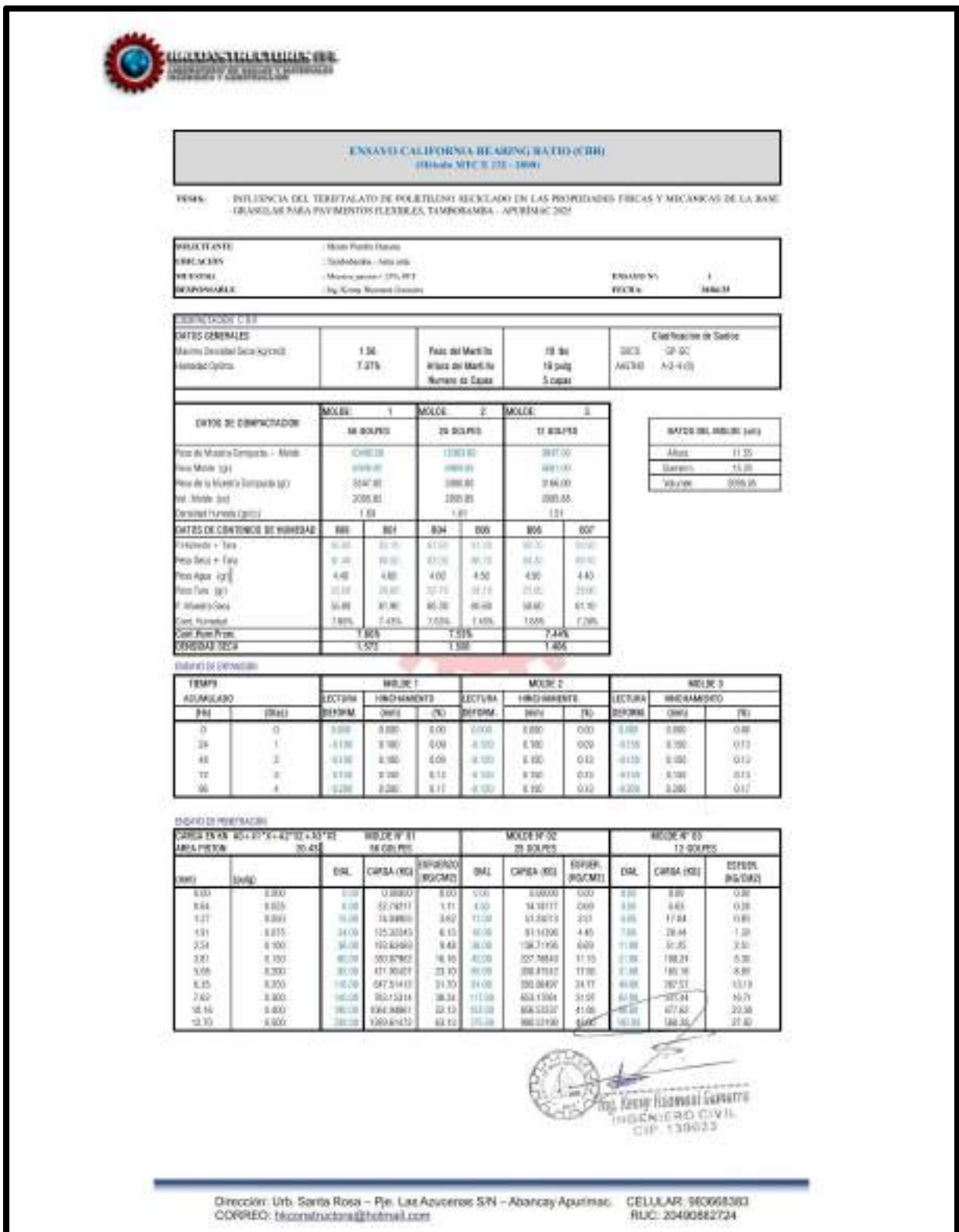


Figura 58 — CBR + 25% PET-R, repetición N°1



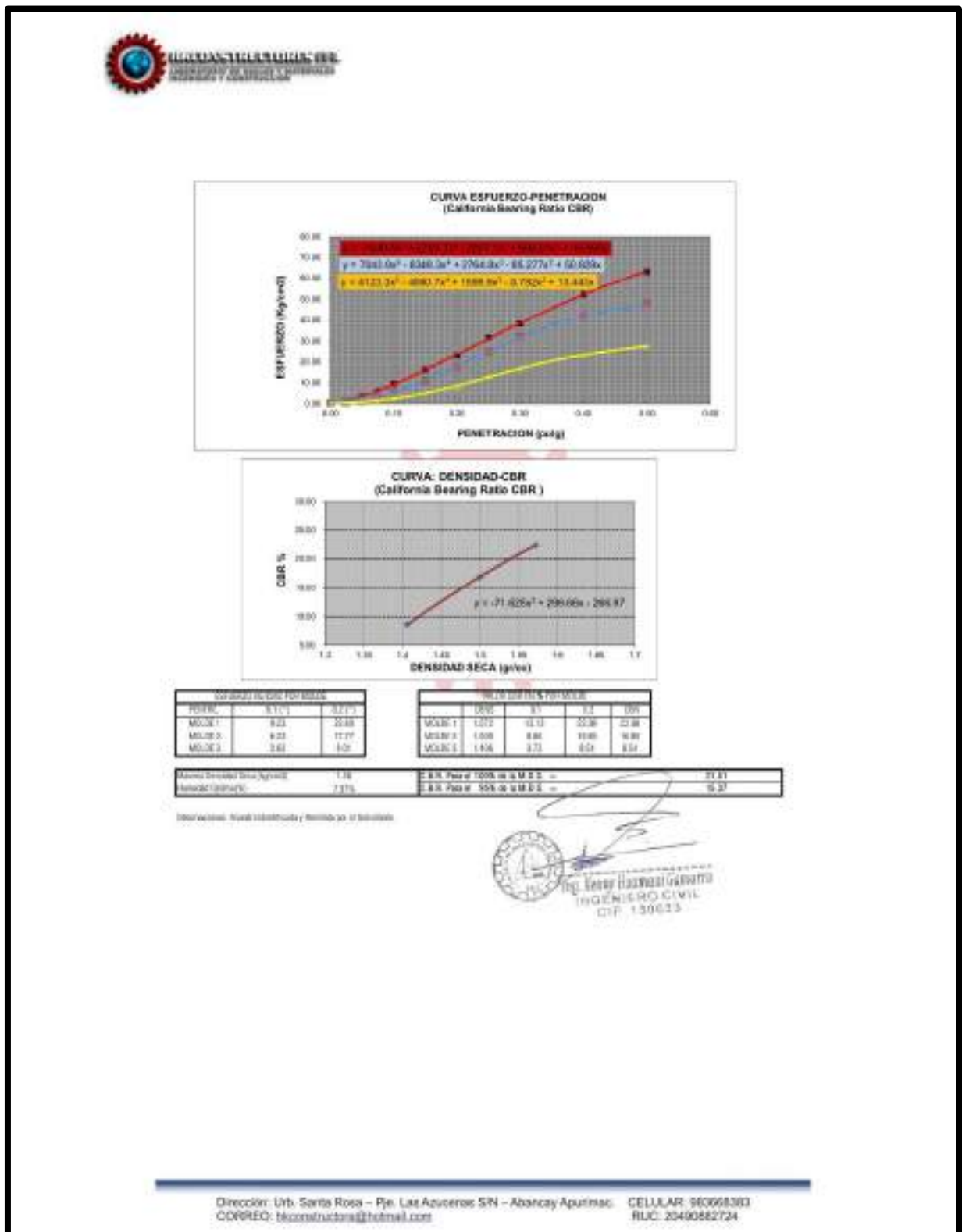


Figura 59 — CBR + 25% PET-R, repetición N°1





**ENSAYO CALIFORNIA HEADING RATIO (CHR)**  
(Módulo NTC E 111 - 1999)

**TEMA:** INFLUENCIA DEL TEREFALATO DE POLIETILENO RECYCLADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA BASE GRAVILAR PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES TAMBORANDA - APUJIMAC 202

<b>PROYECTANTE</b>	Molina Pareda Esteban	<b>ENSAYO N°</b>	1
<b>PROYECTORA</b>	CONSTRUCIONES Y OBRAS S.A.	<b>FECHA</b>	06/03/18
<b>PROYECTISTA</b>	Molina Pareda Esteban		
<b>RESPONSABLE</b>	Ing. Keny Augusto Guzmán		

<b>CONDICIONES DE ENSAYO</b>					<b>Clasificación de Suelos</b>
<b>BASES GENERALES</b>	1.5M	Paño del Molde No	18 kg		USCS - GP-SC
Estado de la Base Agrícola	7.37%	Paño del Molde No	18 pag		AAC(3) A3-4(3)
Intensidad Optima		Numero de Capas	5 capas		

DATOS DE DENSIIFICACION	MOLDE 1		MOLDE 2		MOLDE 3	
	38 SOLPES	25 SOLPES	25 SOLPES	11 SOLPES		
Peso de Muestra Compacta - Mide	1047.18	1027.40		1018.00		
Peso Molde (g)	999.90	999.90		991.00		
Peso de la Muestra Compacta (g)	447.28	1027.50		27.00		
Vol. Molde (ml)	2000.00	1000.00		1000.00		
Densidad Humida (g/cm³)	1.83	1.87		1.31		

<b>DATOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	800	801	804	806	805	807
Frecuencia + Tara	37.22	155.49	155.79	175.48	37.00	35.00
Peso Agua + Tara	30.70	87.70	87.70	101.20	30.00	29.40
Peso Agua (g)	5.28	5.50	5.30	6.20	5.00	5.50
Peso Hum (g)	37.79	121.67	121.67	117.79	31.00	31.00
F. Humedad (%)	7.44	7.30	7.19	8.48	7.40	7.80
Cont. Humedad	7.39%	7.30%	7.19%	7.38%	7.35%	7.39%
Cont. Hum. Prom.	7.35%	7.35%	7.35%	7.35%	7.35%	7.35%
<b>ENSAYO 202</b>	1.57	1.58	1.58	1.58	1.46	1.46

TIEMPO ADJUSTADO	TEMP (°C)	MOLDE 1		MOLDE 2		MOLDE 3	
		LECTURA	INCR. (mm)	LECTURA	INCR. (mm)	LECTURA	INCR. (mm)
		0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	2	-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	3	0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00
96	4	-0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00

MOLDE	Densidad (g/cm³)	MOLDE # 01			MOLDE # 02			MOLDE # 03		
		DM	CMPSA (KG)	ESPEUR (CM)	DM	CMPSA (KG)	ESPEUR (CM)	DM	CMPSA (KG)	ESPEUR (CM)
8.03	0.800	100	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.04	0.805	100	17.8014	8.83	0.00	11.0010	0.00	0.00	0.00	0.00
1.27	0.800	100	78.7470	3.90	0.00	89.4474	1.96	0.00	77.74	1.77
1.91	0.815	100	159.6204	3.80	0.00	98.8430	4.74	0.00	94.12	1.87
2.54	0.800	100	176.5823	8.64	0.00	125.2212	6.12	0.00	60.80	3.82
3.87	0.790	100	384.1833	17.63	0.00	291.2149	19.08	0.00	76.84	4.74
5.06	0.800	100	442.2713	21.89	0.00	389.8292	18.10	0.00	178.96	8.84
8.25	0.800	100	607.3889	18.70	0.00	545.2225	20.71	0.00	284.82	13.33
2.62	0.800	100	771.8081	37.36	0.00	636.1668	31.14	0.00	384.75	17.80
10.16	0.800	100	1048.5781	51.31	0.00	828.1790	40.00	0.00	572.30	25.37
10.37	0.800	100	1261.2708	68.13	0.00	946.7147	60.84	0.00	788.64	33.37

  
**Ing. Keny Augusto Guzmán**  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP. 130033

Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Las Azuleiras SRN - Abancay Aputimas.    CELULAR: 960668383  
 CORREO: tkonstruccion@hotmail.com    RUC: 20490882724

Figura 60 — CBR + 25% PET-R, repetición N°2



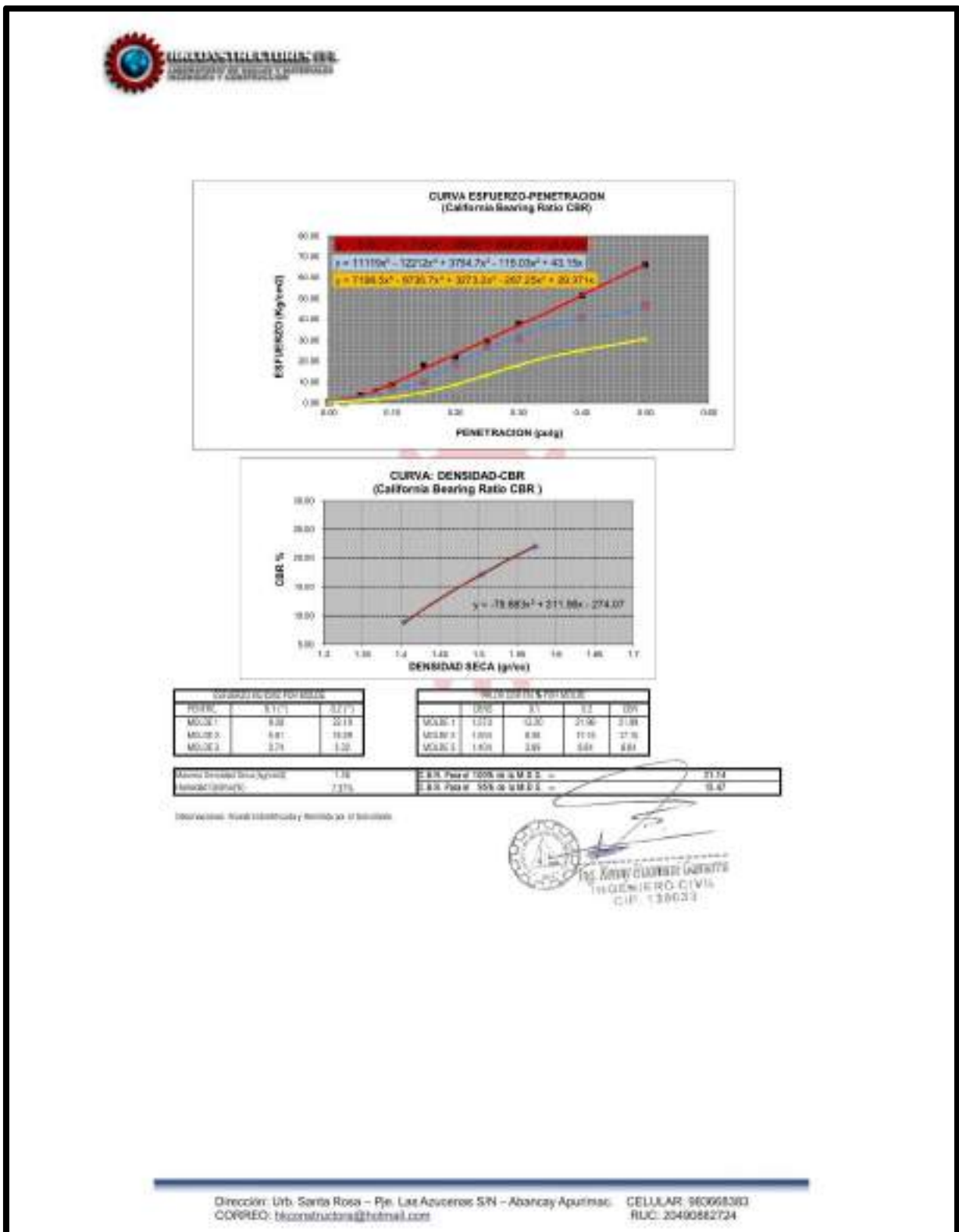


Figura 61 — CBR + 25% PET-R, repetición N°2



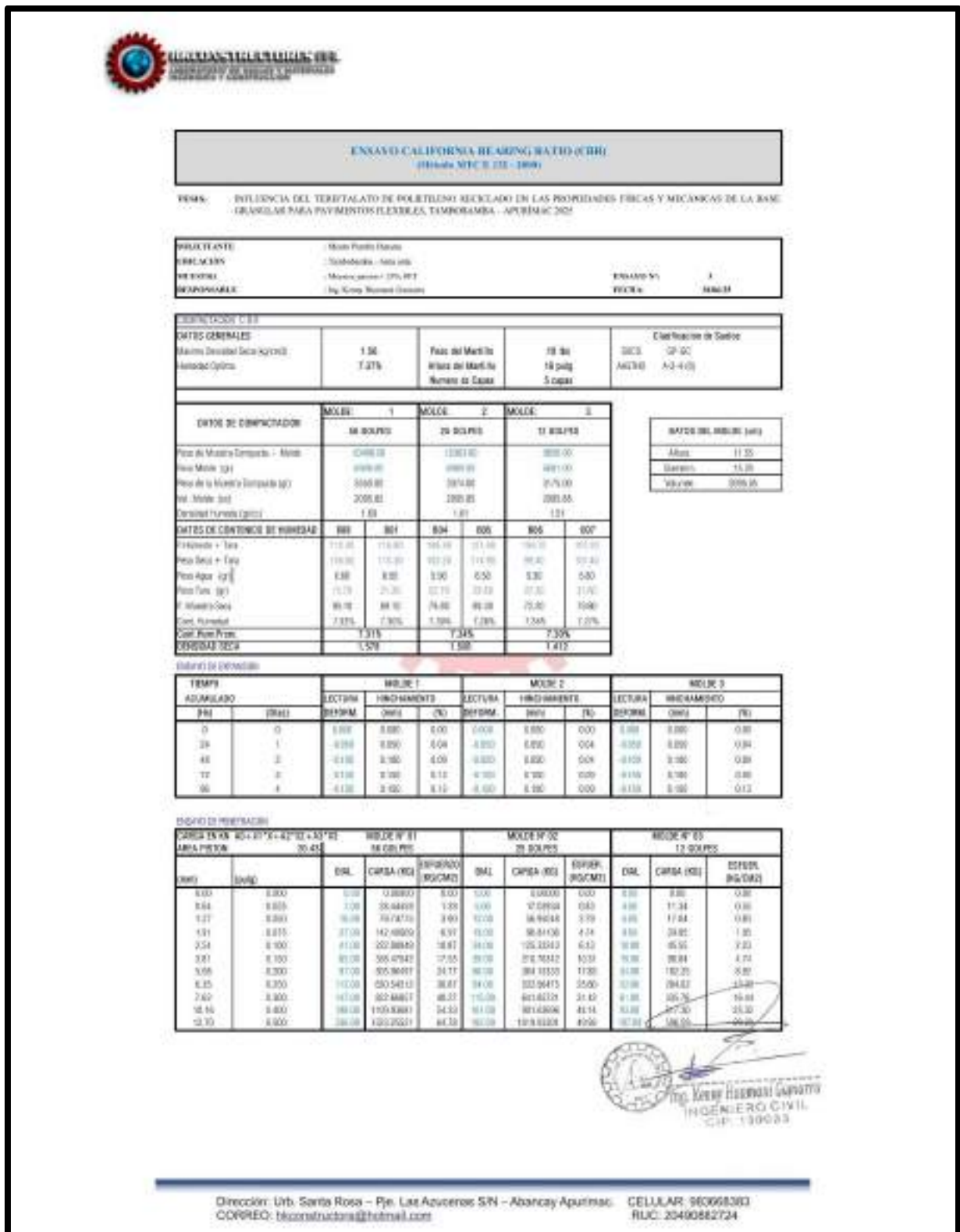


Figura 62 — CBR + 25% PET-R, repetición N°3



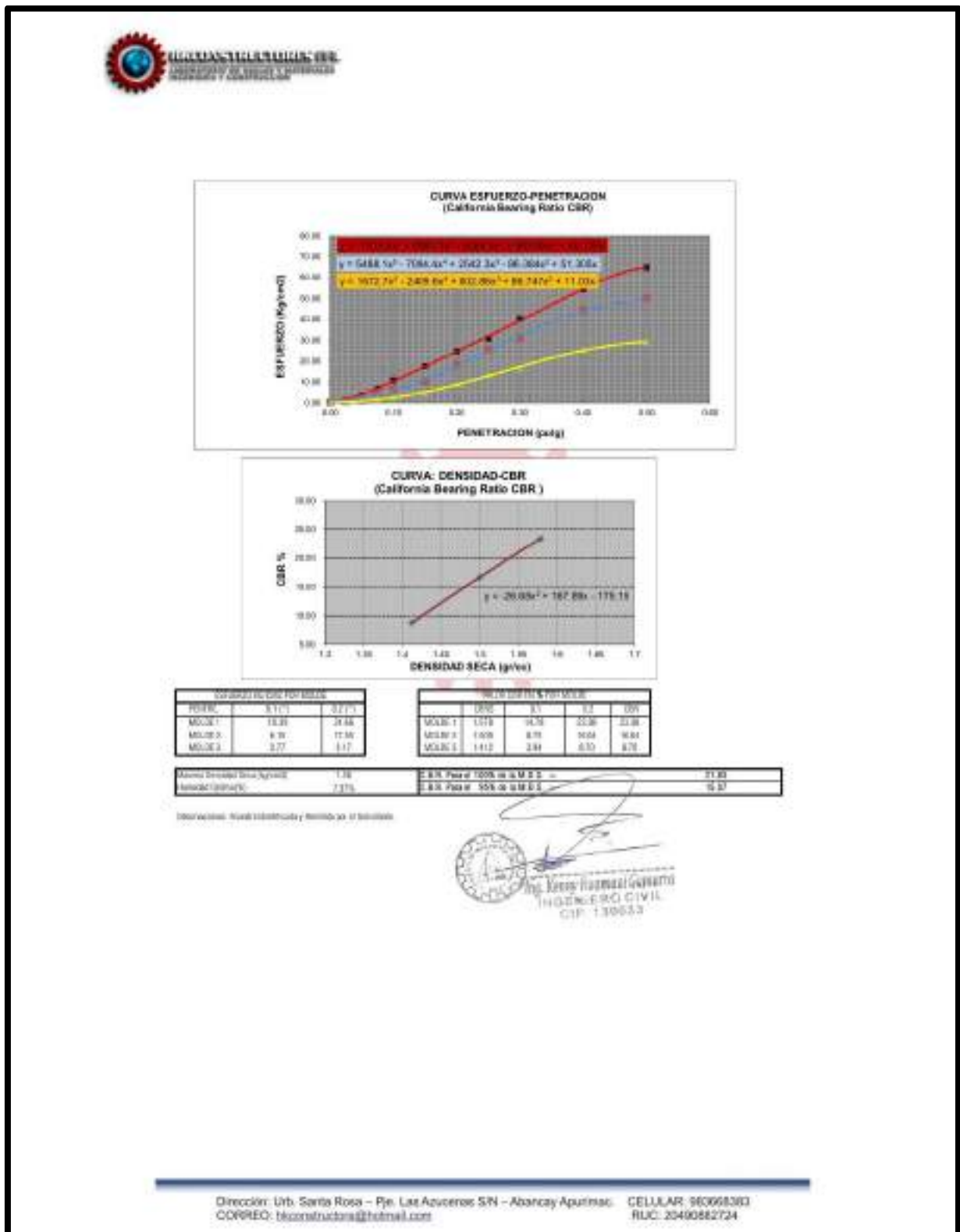


Figura 63 — CBR + 25% PET-R, repetición N°3





**SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS(S.U.C.S)**  
**ENSAYO DE ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO**  
 (Método MTC E - 107 - 96)

**TESIS:** INFLUENCIA DEL TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA BASE GRANULAR PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES, TAMBOBAMBA - APURÍMAC 2025

**SOLICITANTE:** Mauro Pereda Huayra  
**UBICACION:** Tambobamba - Arequipa  
**MUESTRA:** Muestra patrón + 35% PET  
**RESPONSABLE:** Ing. Kenny Huamani Gamateo      **FECHA:** 16/06/2025

TAMICES ASTM	ABERTURA mm	PESO RETENIDO(g)	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
3"	76.200	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.800	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	80.30	3.05	3.05	96.95
3"	25.400	484.70	17.95	21.00	78.98
3/4"	19.000	220.90	8.99	30.29	70.41
1/2"	12.500	202.50	7.50	35.89	63.11
3/8"	9.500	101.80	3.77	40.88	59.34
1/4"	6.350	151.90	5.70	46.38	53.64
No4	4.750	117.80	4.37	50.73	49.27
No10	2.000	539.70	19.96	70.71	29.29
No20	0.850	378.10	14.00	84.72	15.28
No30	0.600	62.50	3.07	87.79	12.21
No40	0.420	43.25	1.61	89.40	10.60
No60	0.250	30.40	1.13	90.53	9.47
No100	0.150	24.05	0.69	91.42	8.58
No200	0.075	26.70	1.10	92.52	7.48
<b>BASE</b>	<b>4.75</b>	<b>4.00</b>	<b>0.16</b>	<b>92.87</b>	<b>7.13</b>
W-400	100.000	100.000	7.50	100.00	9.50

**TAMAÑO MÁXIMO:** 1 1/2"

F.L. = 27.83  
 % Grava = 58.33  
 % Arena = 41.70  
 % Fines = 1.48

**LÍMITES DE CONSISTENCIA:**  
 L.L. = 27.83  
 L.P. = 18.88  
 C.P. = 6.14

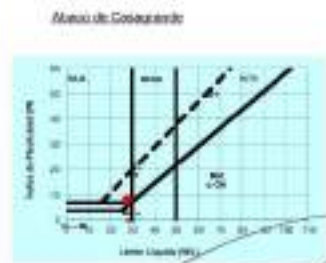
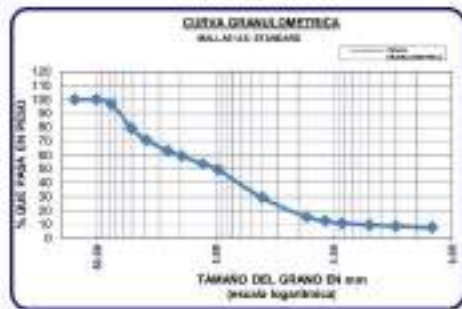
**CARACT. GRANULOMÉTRICAS:**  
 D<sub>15</sub> = Cu = 16%  
 D<sub>30</sub> = Cc = 16%  
 D<sub>60</sub> =

**Valor del Índice de Grupos (IG)**  
 (I)

**CLASIFICACIÓN:**  
**AASHTO:** A-2-4 (I)

Pasa tamiz N°4 (4.75mm): 49.27 %  
 Pasa tamiz N°200 (0.075mm): 7.48 %

**CLASIFICACIÓN (S.U.C.S)**  
 GP-GC



**Grava arenarcillosa pobremente gradada**      GP-GC      (S.U.C.S)

**Grava y arena limocillosa**      A-2-4 (I)      AASHTO



Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Las Asuncenas SIN - Abancay Apurímac.      CELULAR: 983060383  
 CORREO: ikonstruccion@hotmail.com      RUC: 20490982724

**Figura 64 — Resultado granulometría + 35% PET-R**





Figura 65 — Resultado contenido de humedad + 35% PET-R

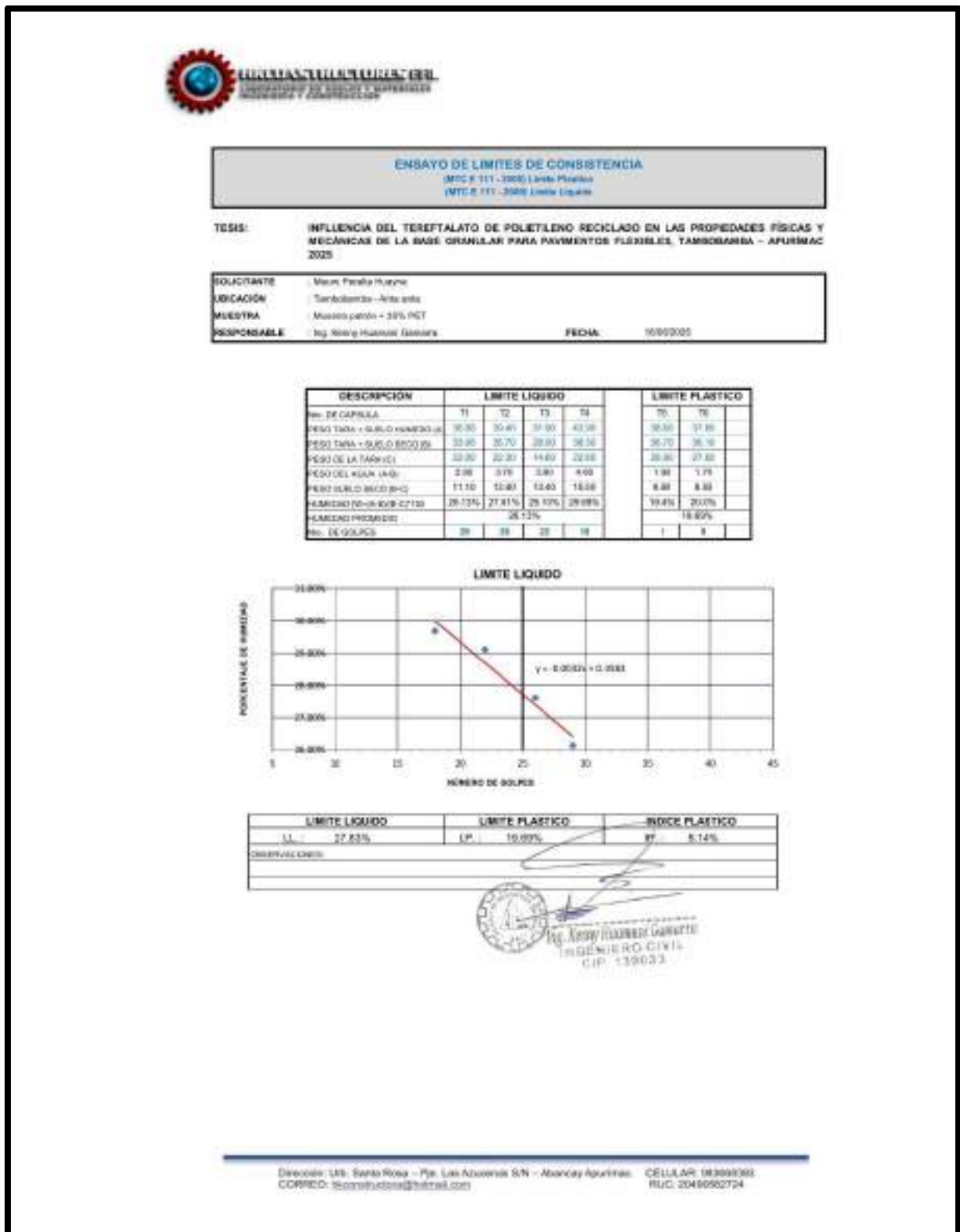


Figura 66 — Límites de consistencia + 35% PET-R



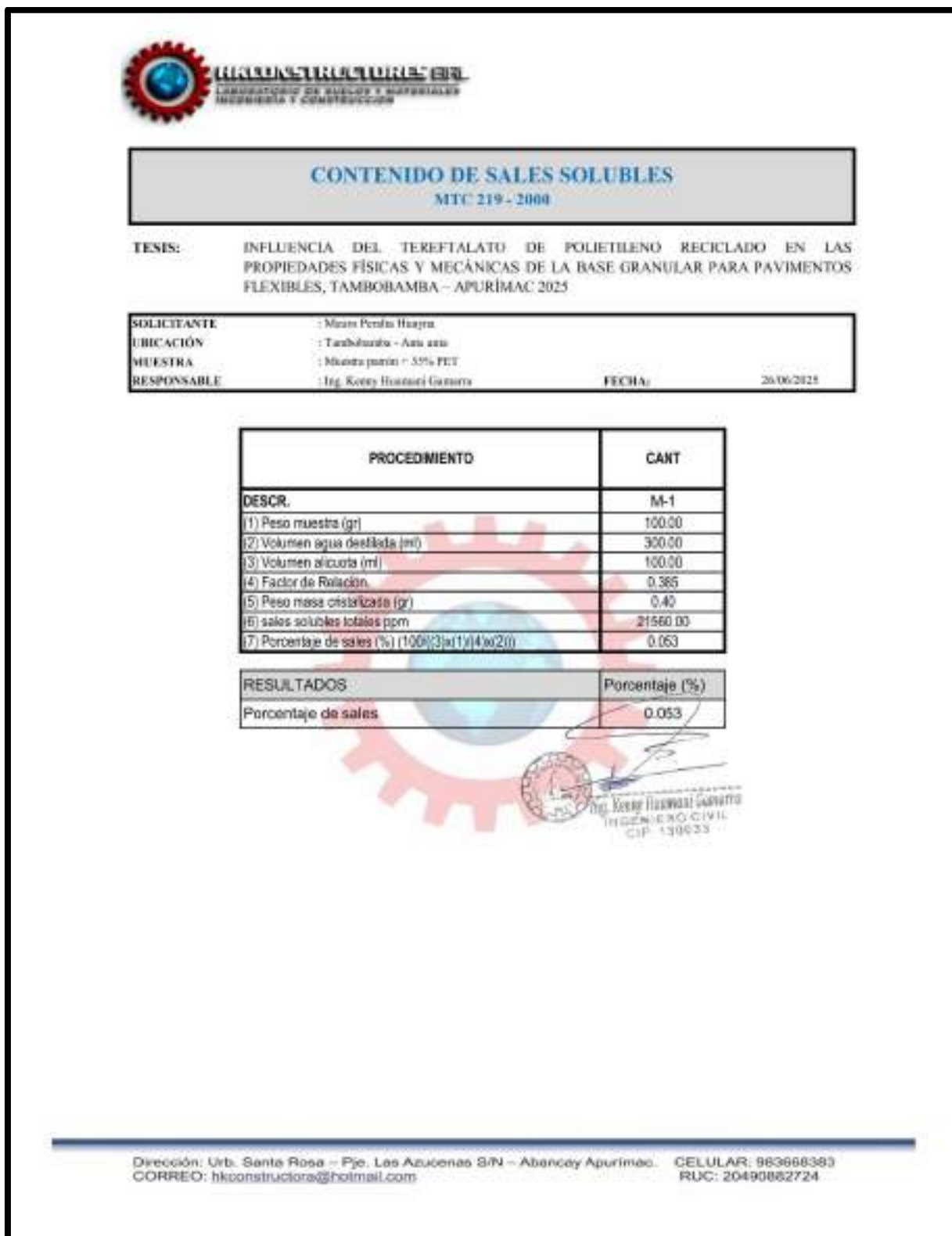


Figura 67 — Contenido de sales solubles + 35% PET-R



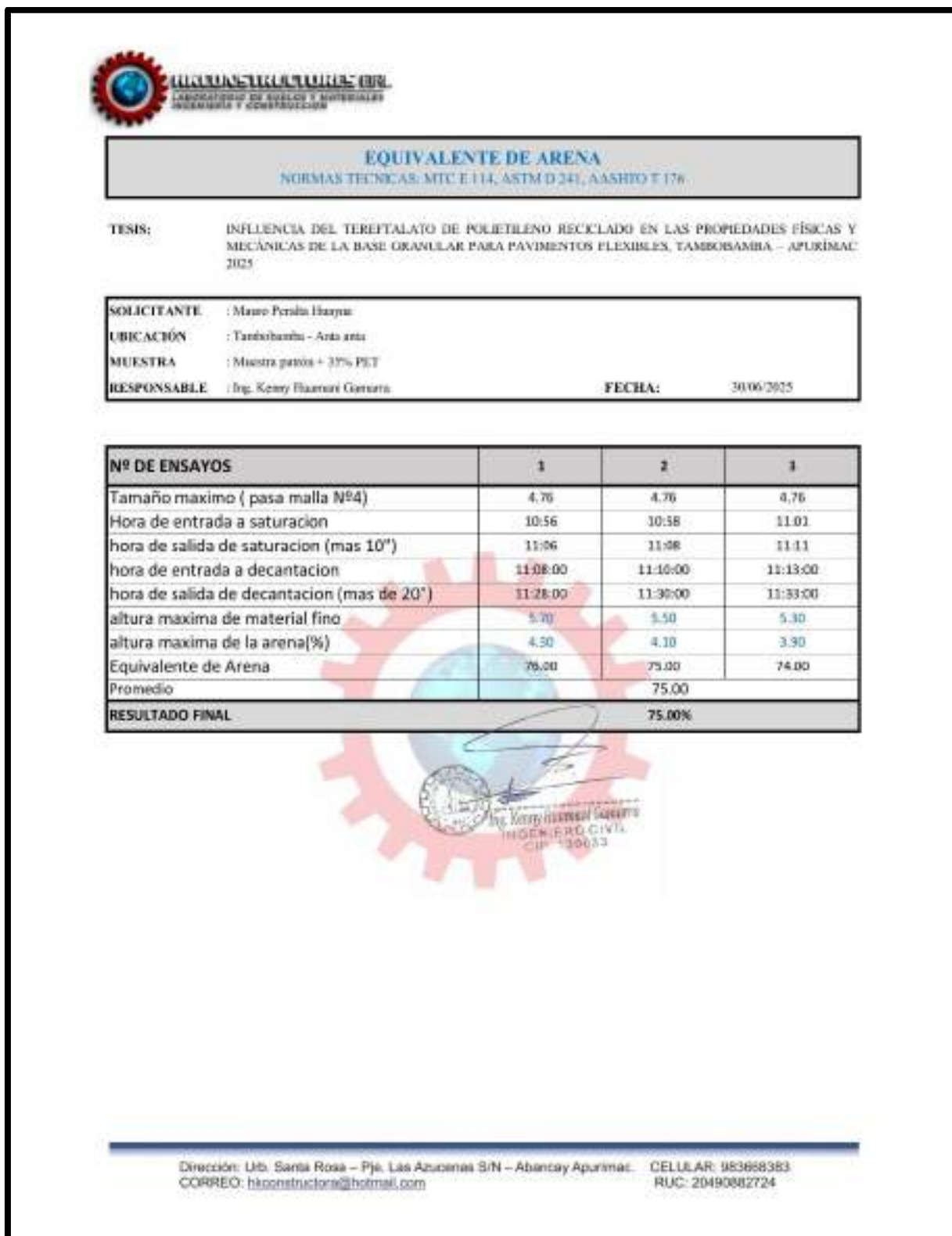


Figura 68 — Equivalente de arena + 35% PET-R



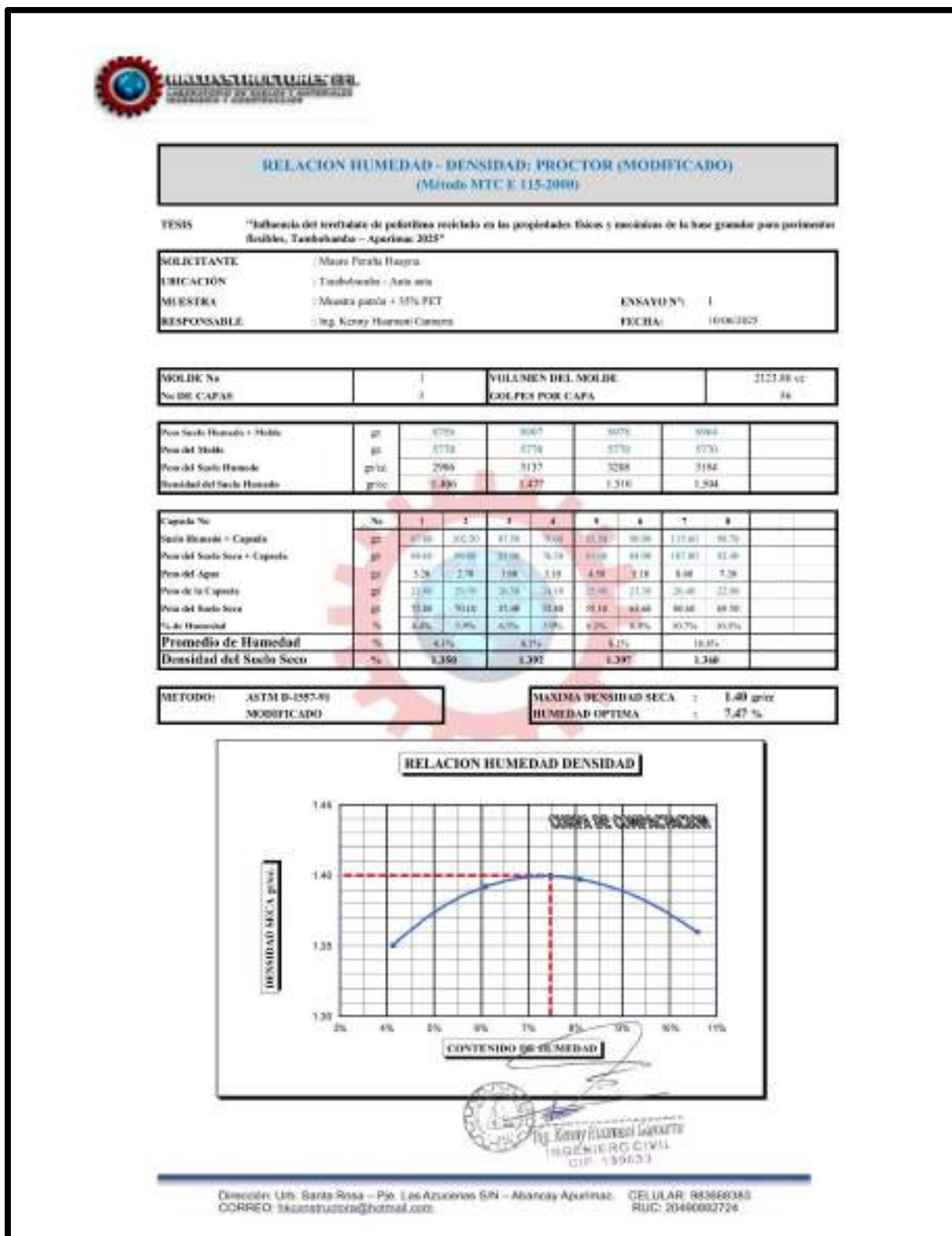


Figura 69 — Proctor modificado + 35% PET-R, repetición N°1





**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD; PROCTOR (MODIFICADO)**  
(Método NTC E 115-2000)

TESIS "Influencia del terfitato de pedetina reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobamba - Apurímac 2015"

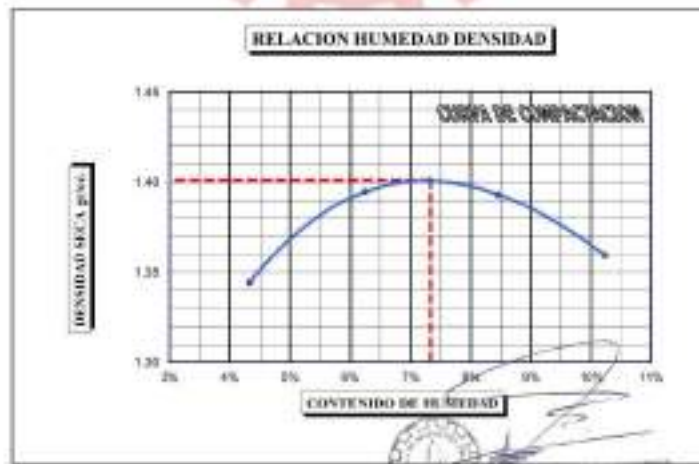
SOLICITANTE : Mauro Parala Huagra  
 UBICACIÓN : Tambobamba - Azuay  
 MUESTRA : Muestra pasta + 35% PET ENSAYO N° : 2  
 RESPONSABLE : Ing. Kenzo Huamán-Camero FECHA : 10/06/2015

MOLDE No	1	VOLUMEN DEL MOLDE	2123,88 cc
Nº DE CAPAS	3	COSES POR CAPA	36

Peso Suelo Humedo + Molde	gr	3749	3917	3979	3993
Peso del Molde	gr	5739	5739	5739	5739
Peso del Suelo Humedo	gr/ml	2979	3147	3299	3183
Densidad del Suelo Humedo	gr/cc	1,485	1,482	1,511	1,496

Capas No	No	1	2	3	4	5	6	7	8
Suelo Humedo + Capas	gr	114,20	113,43	121,66	126,76	132,29	136,20	141,19	142,89
Peso del Suelo Seco + Capas	gr	110,30	114,30	116,40	113,30	105,30	100,20	96,60	91,60
Peso del Agua	gr	4,18	1,58	4,28	3,48	3,58	7,00	6,38	7,58
Peso de la Capas	gr	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66	21,66
Peso del Suelo Seco	gr	89,58	89,58	91,68	91,68	81,66	78,58	74,60	71,66
% de Humedad	%	4,6%	1,8%	4,6%	3,9%	4,3%	8,1%	8,6%	9,9%
Promedio de Humedad	%	4,3%		4,2%		4,2%		8,5%	16,2%
Densidad del Suelo Seco	%	1,346		1,395		1,390		1,346	

METODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO  
 MAXIMA DENSIDAD SECA : 1,49 gr/cc  
 HUMEDAD OPTIMA : 7,33 %



Ing. Kenzo Huamán Camero  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP. 130033

Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Los Azuleños S/N - Abancay Apurímac. CELULAR: 843660348  
 CORREO: tkconstructora@hotmail.com RUC: 20490002724

Figura 70 — Proctor modificado + 35% PET-R, repetición N°2



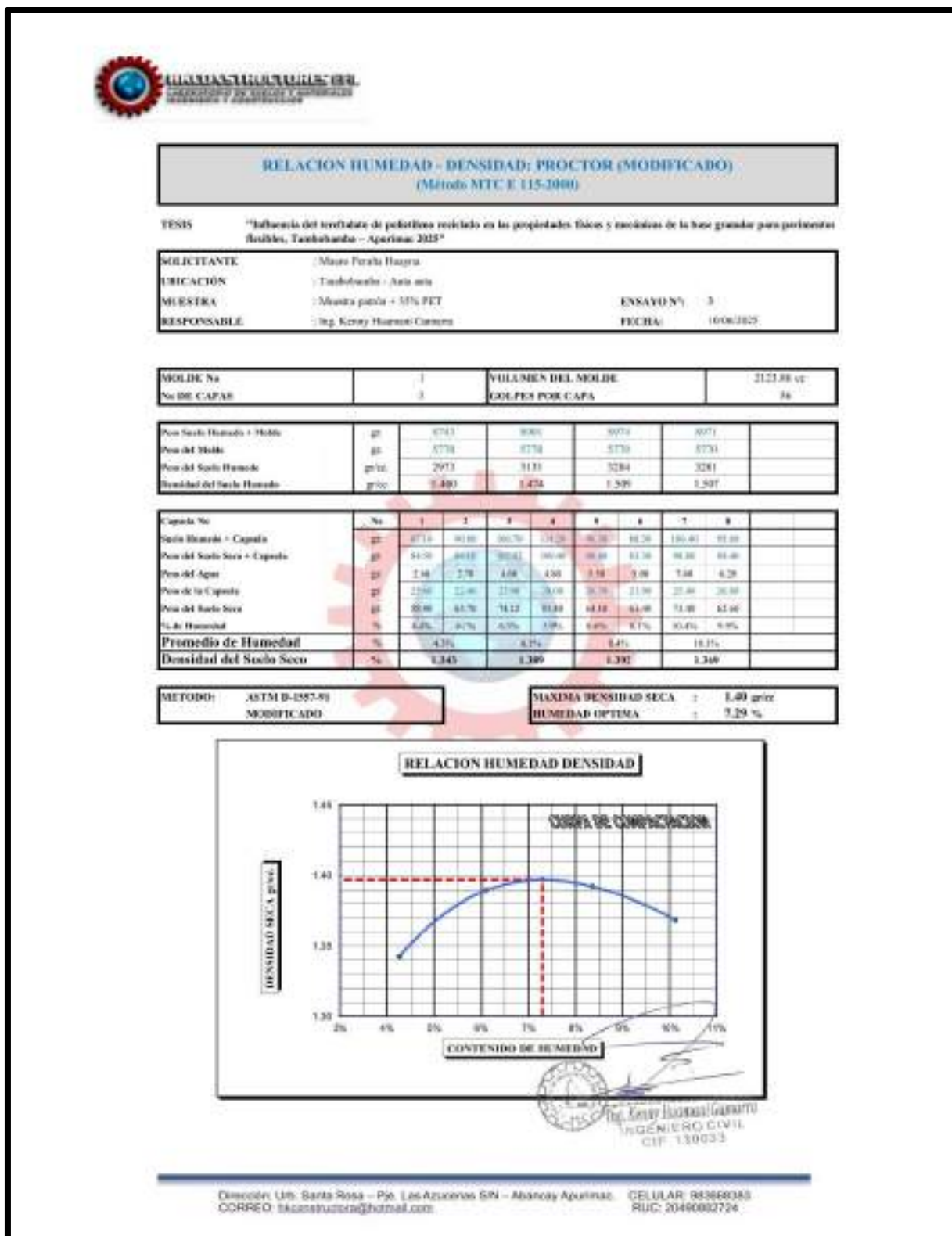


Figura 71 — Proctor modificado + 35% PET-R, repetición N°3



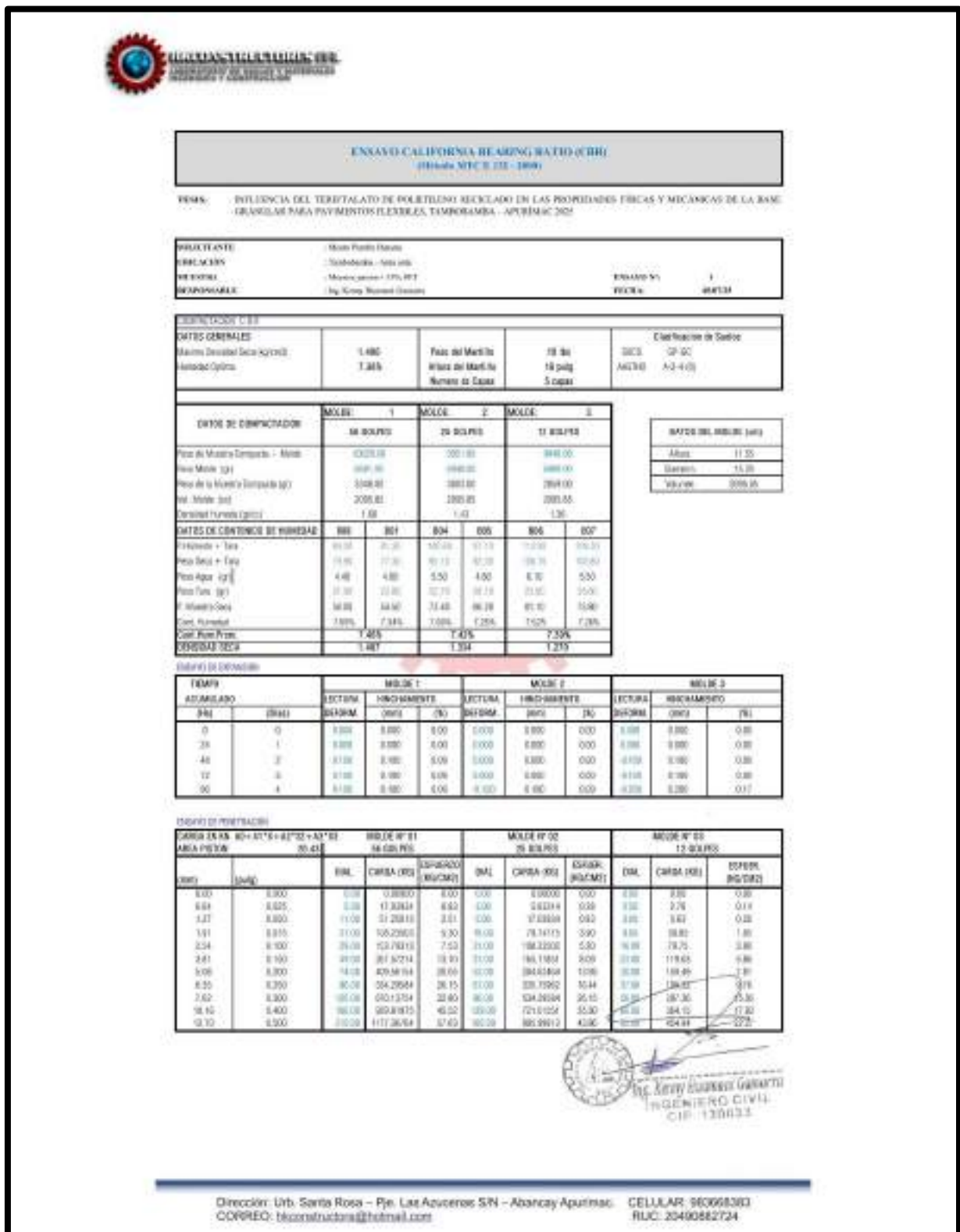


Figura 72 — CBR + 35% PET-R, repetición N°1



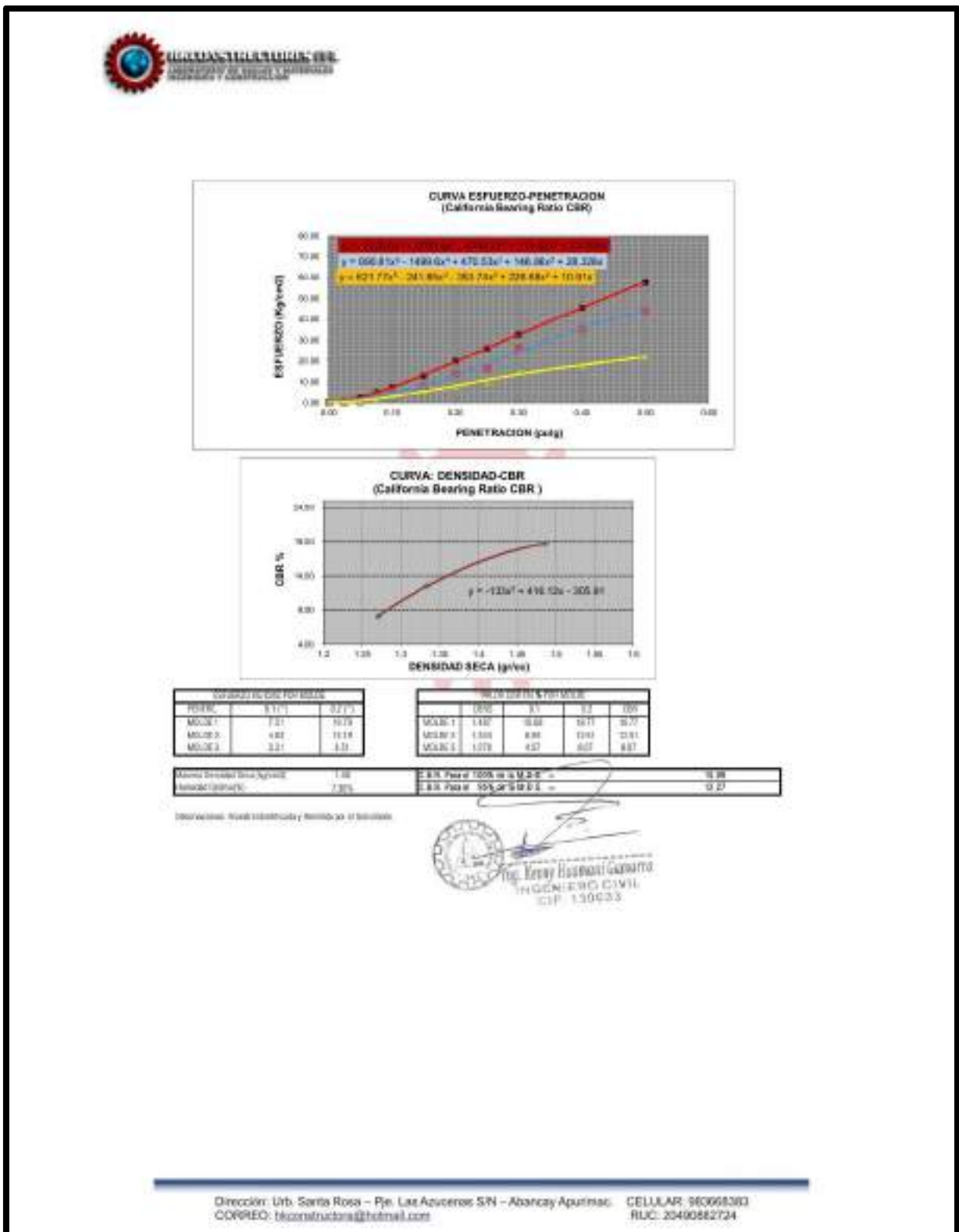


Figura 73 — CBR + 35% PET-R, repetición N°1



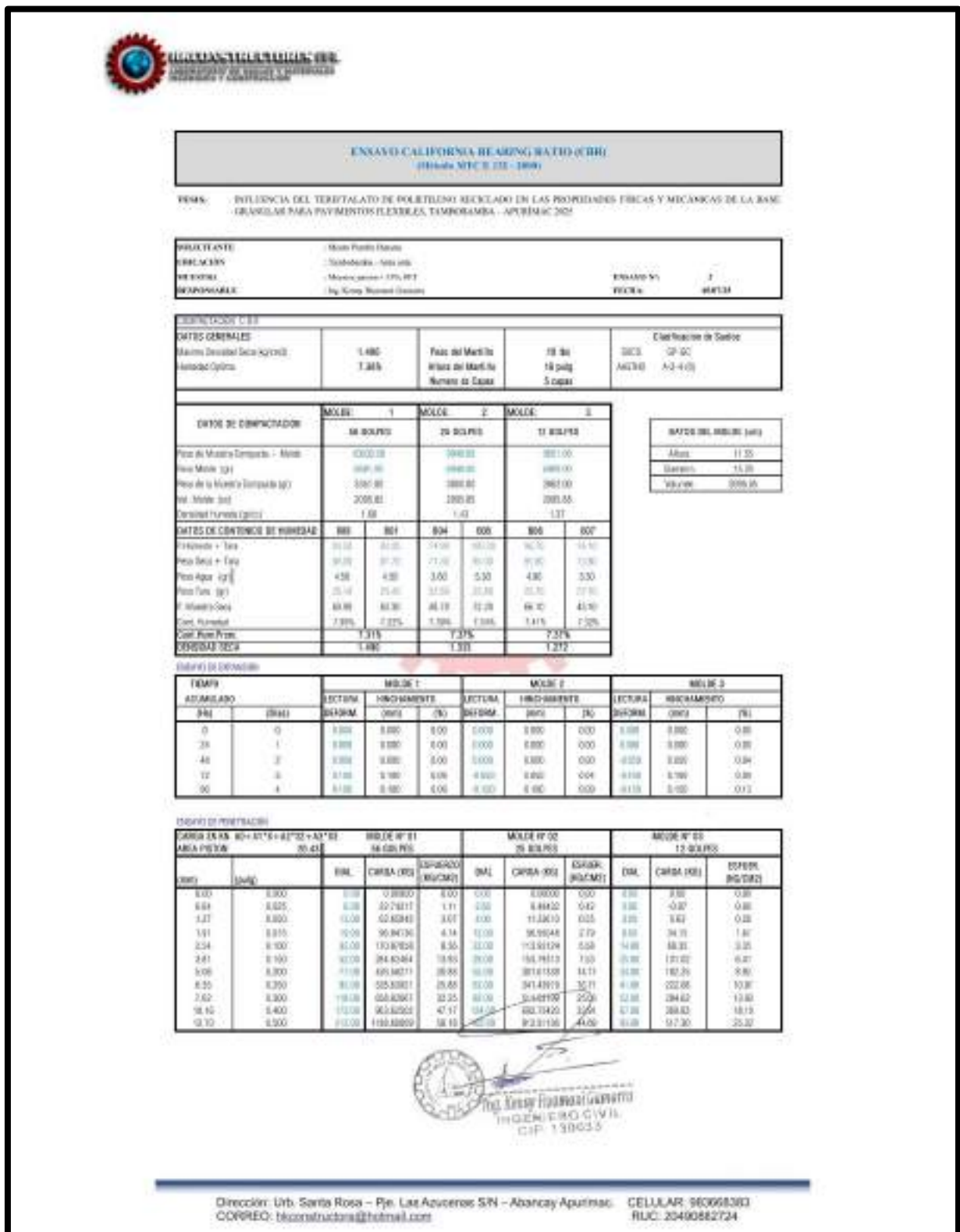


Figura 74 — CBR + 35% PET-R, repetición N°2



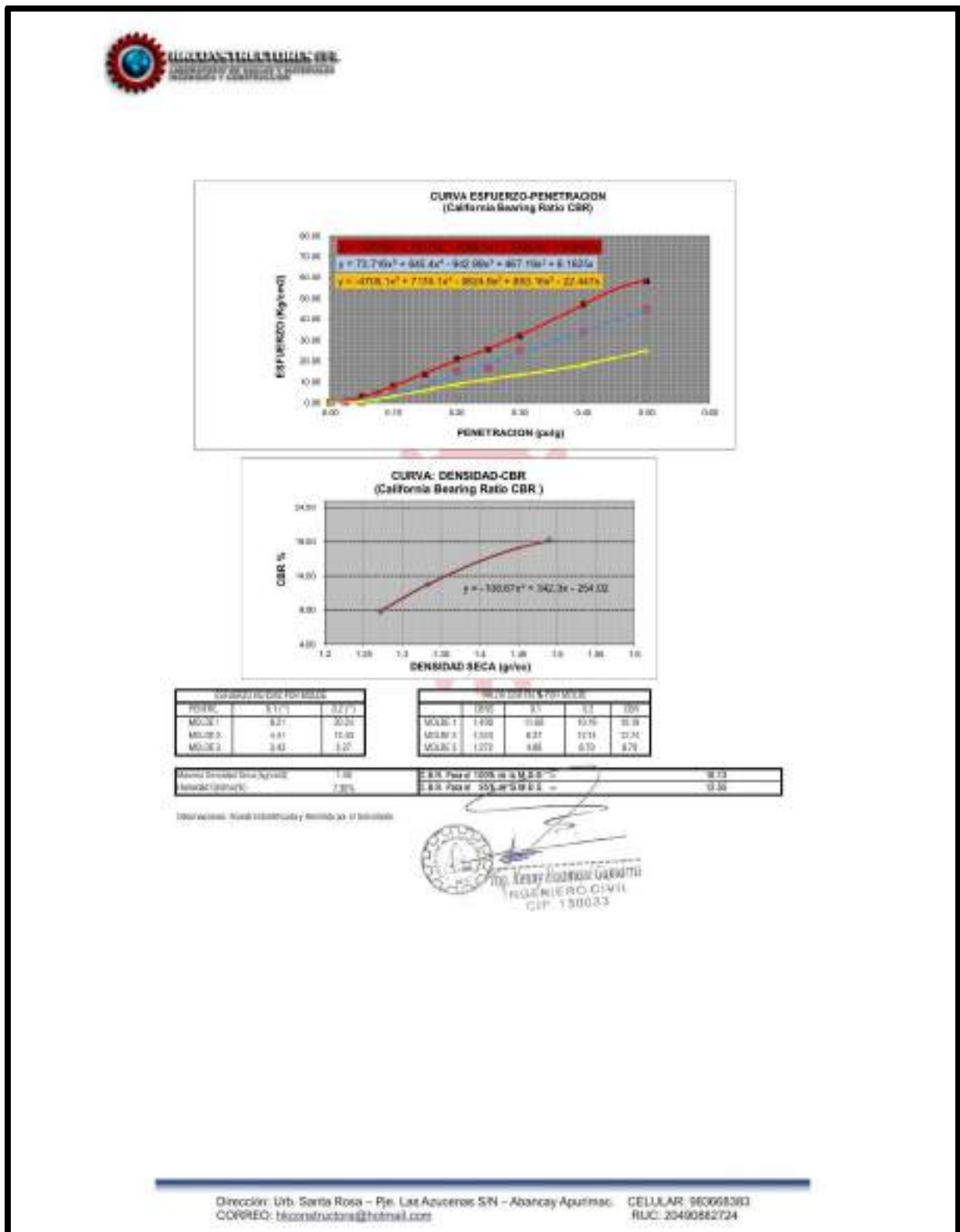


Figura 75 — CBR + 35% PET-R, repetición N°2



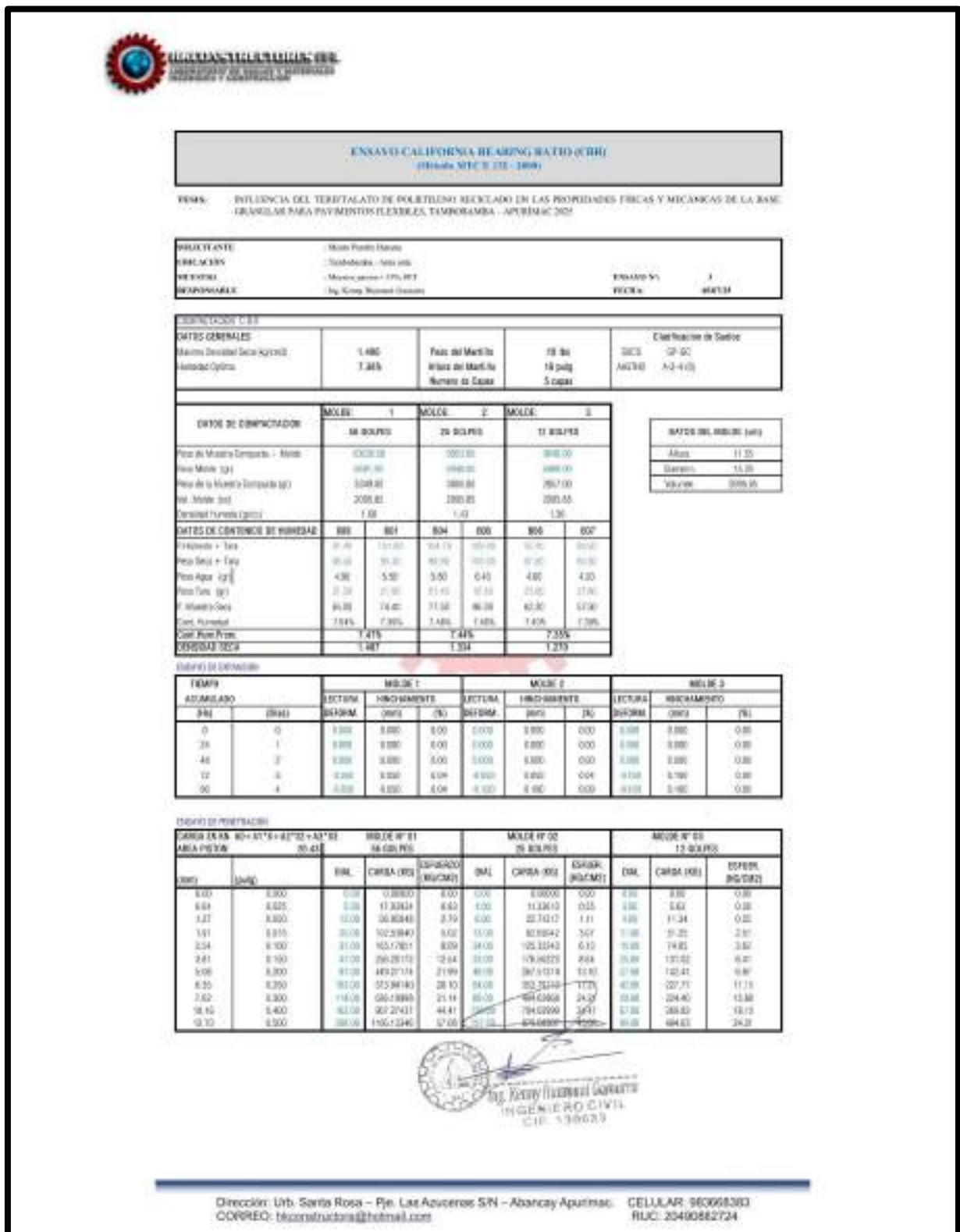


Figura 76 — CBR + 35% PET-R, repetición N°3



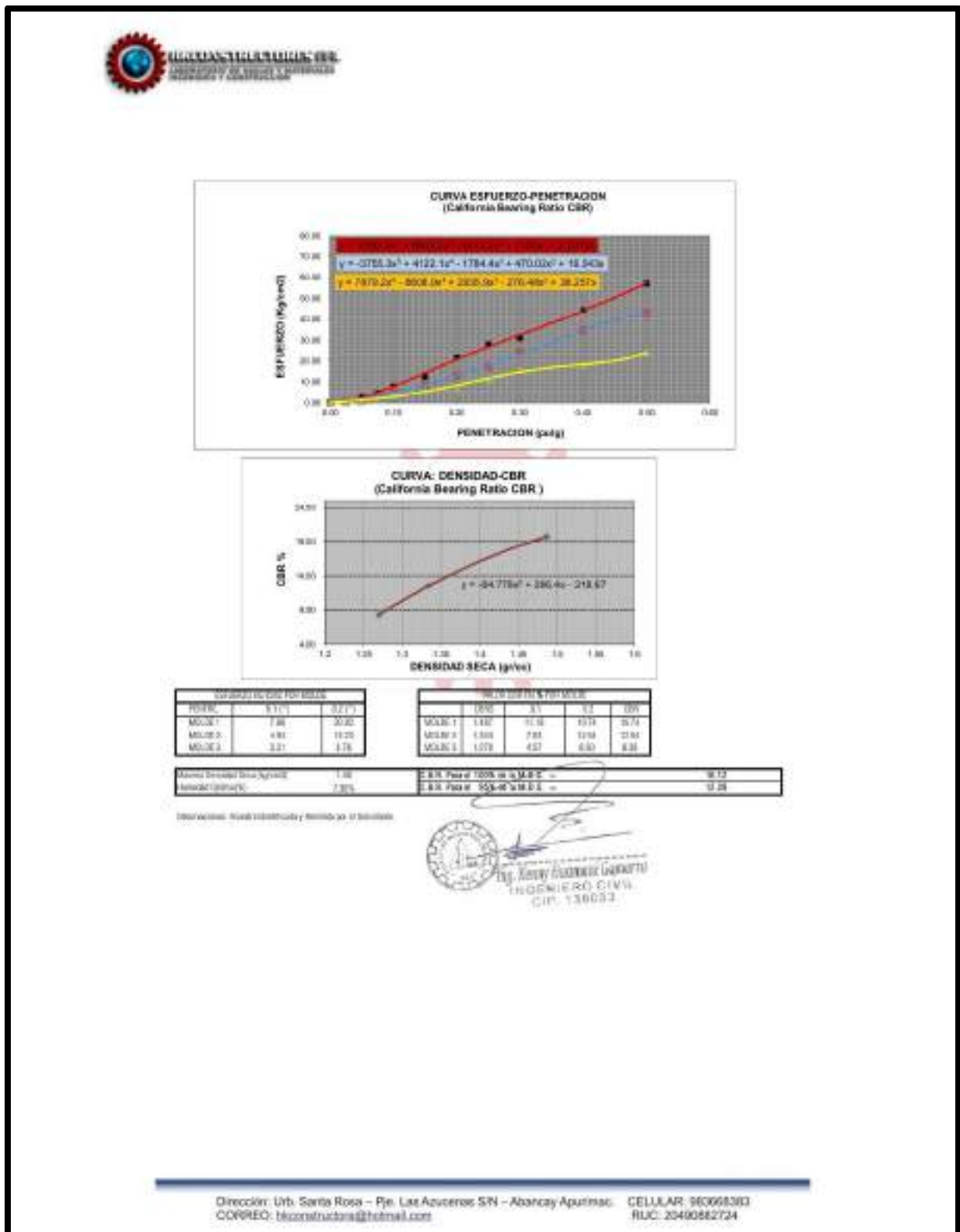


Figura 77 — CBR + 35% PET-R, repetición N°3





**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD; PROCTOR (MODIFICADO)**  
(Método NTC E 115-2000)

TESIS: "Influencia del terofato de pedetina reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tumbabamba - Apurímac 2015"

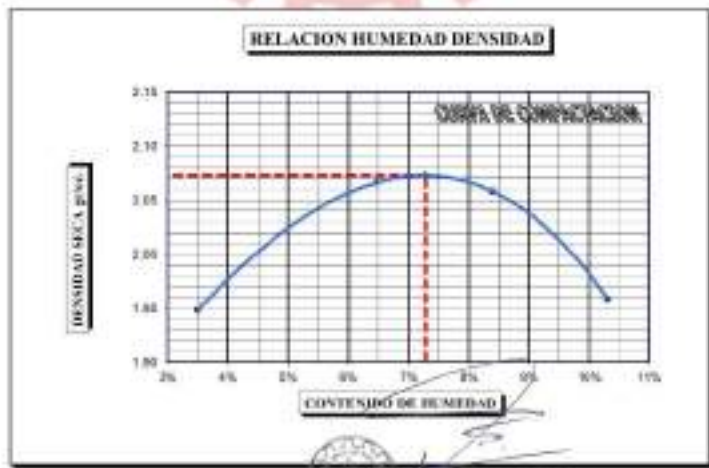
SOLICITANTE: Mauro Parala Huayra  
 UBICACIÓN: Tumbabamba - Azuay  
 MUESTRA: Muestra pasera + 2.5% PET  
 RESPONSABLE: Ing. Kenzo Huarmancamano      FECHA: 11/12/2015

MOLDE No	1	VOLUMEN DEL MOLDE	2123.88 cc
No DE CAPAS	3	COSES POR CAPA	36

Peso Saco Humedo + Molde	gr	19371	18441	19126	18317
Peso del Molde	gr	5768	5768	5768	5768
Peso del Saco Humedo	gr/gr	4283	4073	4738	4509
Gravidad del Saco Humedo	gr/cc	2.817	2.300	2.231	2.351

Capas No	No	1	2	3	4	5	6	7	8
Saco Humedo + Capas	gr	19371	18441	19126	18317	18620	18120	18120	18120
Peso del Saco Seco + Capas	gr	14200	13900	14100	14100	14100	14100	14100	14100
Peso del Agua	gr	296	296	428	428	428	428	428	428
Peso de la Capas	gr	2124	2124	2124	2124	2124	2124	2124	2124
Peso del Saco Seco	gr	1128	1128	1128	1128	1128	1128	1128	1128
% de Humedad	%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
Promedio de Humedad	%	2.5%		2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
Densidad del Saco Seco	%	2.849		2.866	2.866	2.866	2.866	2.866	2.866

METODO: ASTM D-1557-91 MODIFICADO      MAXIMA DENSIDAD SECA : 2.07 gr/cc  
 HUMEDAD OPTIMA : 7.28 %



Ing. Kenzo Huarmancamano  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP 13003

Director: Urb. Santa Rosa - Pje. Los Azuleños S/N - Abancay Apurímac. CELULAR: 983660348  
 CORREO: tkconstructora@hotmail.com RUC: 20490002724

Figura 78 — Resultado proctor modificado + 2.5% PET reciclado



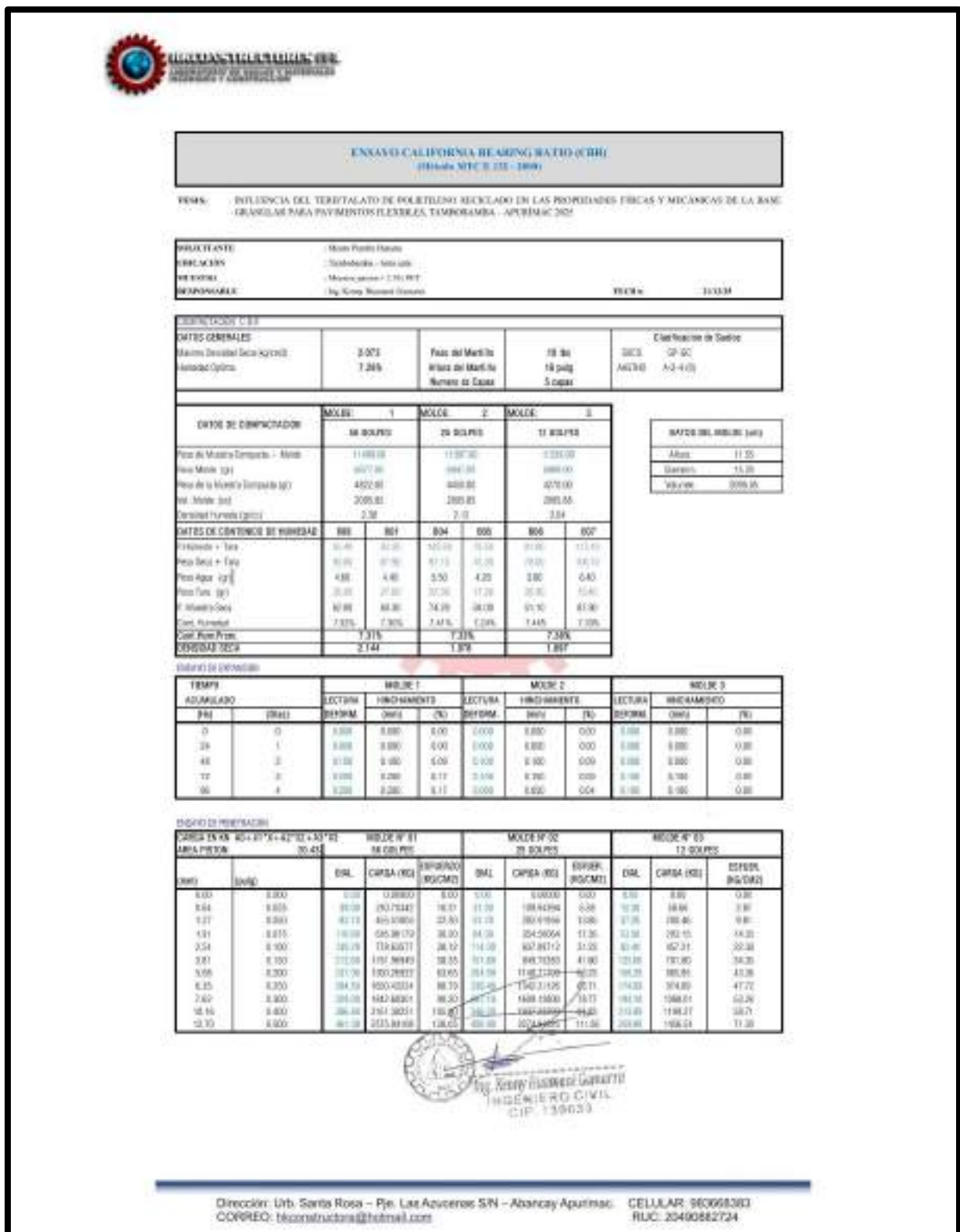


Figura 79 — Resultado CBR + 2.5% PET reciclado



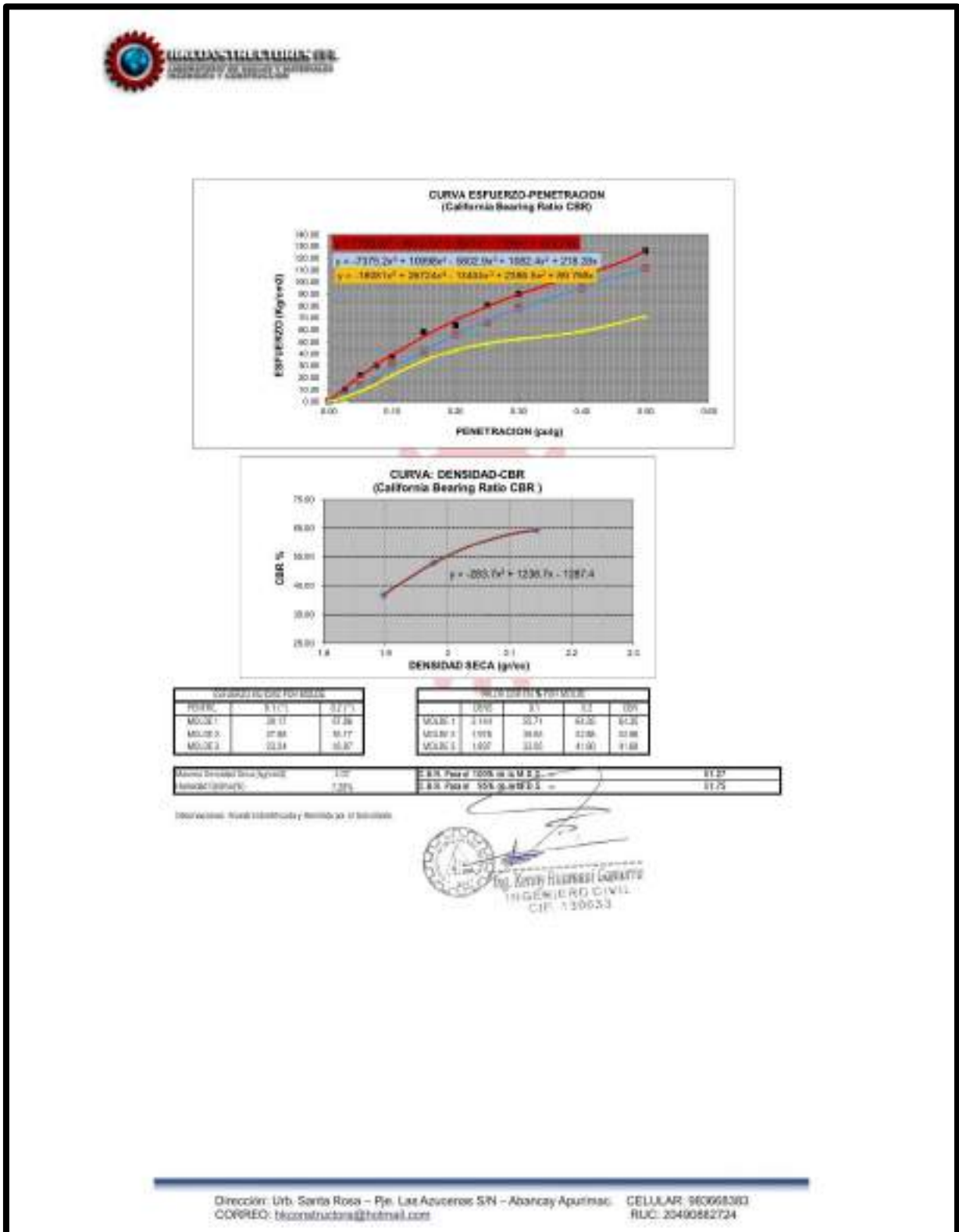


Figura 80 — Resultado CBR + 2.5% PET reciclado





**RELACION HUMEDAD - DENSIDAD: PROCTOR (MODIFICADO)**  
(Método NTC E 115-2000)

TESIS "Influencia del porcentaje de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tumbabamba - Apurímac 2025"

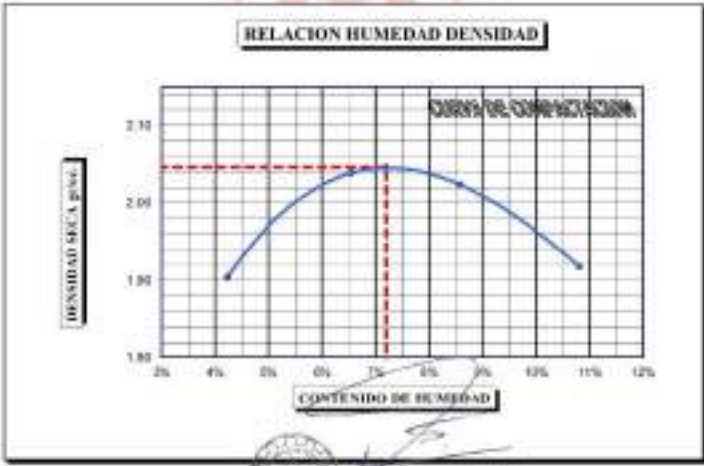
SOLICITANTE	: Misra Perla Huayra
UBICACIÓN	: Tumbabamba - Azuay
MUESTRA	: Muestra para + 5% PET
RESPONSABLE	: Ing. Kenay Huamani Carrasco
FECHA:	05.01.2025

MOLDE No	: 1	VOLUMEN DEL MOLDE	: 2123.00 cc
No DE CAPAS	: 3	COUPES POR CAPA	: 36

Peso Suelo Humedo + Molde	g	9963	10393	10436	10282
Peso del Molde	g	5739	5738	5739	5739
Peso del Suelo Humedo	g/te	4215	4653	4696	4542
Densidad del Suelo Humedo	g/cc	2.005	2.202	2.197	2.124

Capas No	No	1	2	3	4	5	6	7	8
Peso Blotado + Capas	g	117.30	81.39	111.79	107.79	85.38	111.70	124.80	100.20
Peso del Suelo Seco + Capas	g	101.80	84.08	106.40	99.68	81.19	107.30	114.40	100.30
Peso de la Agua	g	4.78	2.98	7.48	7.10	6.28	7.40	10.20	7.90
Peso de la Capas	g	16.30	15.30	11.00	8.38	9.40	13.60	21.20	20.40
Peso del Suelo Seco	g	85.00	71.10	97.00	91.38	64.78	88.70	91.18	74.80
% de Humedad	%	4.6%	5.8%	6.9%	6.2%	6.9%	8.2%	11.2%	10.6%
Promedio de Humedad	%		4.2%		6.3%		6.0%		10.0%
Densidad del Suelo Seco	%		1.986		2.039		2.023		1.917

METODO:	ASTM D-1557-91	MAXIMA DENSIDAD SECA	: 2.05 g/cc
	MODIFICADO	HUMEDAD OPTIMA	: 7.20 %



  
 Ing. Kenay Huamani Carrasco  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP: 130023

Dirección: Urb. Santa Rosa - Pje. Las Azuleiras S/N - Abancay Apurímac. CELULAR: 983660385  
 CORREO: inkaconstruccion@hotmail.com RUC: 20480002724

Figura 81 — Resultado proctor modificado + 5% PET reciclado



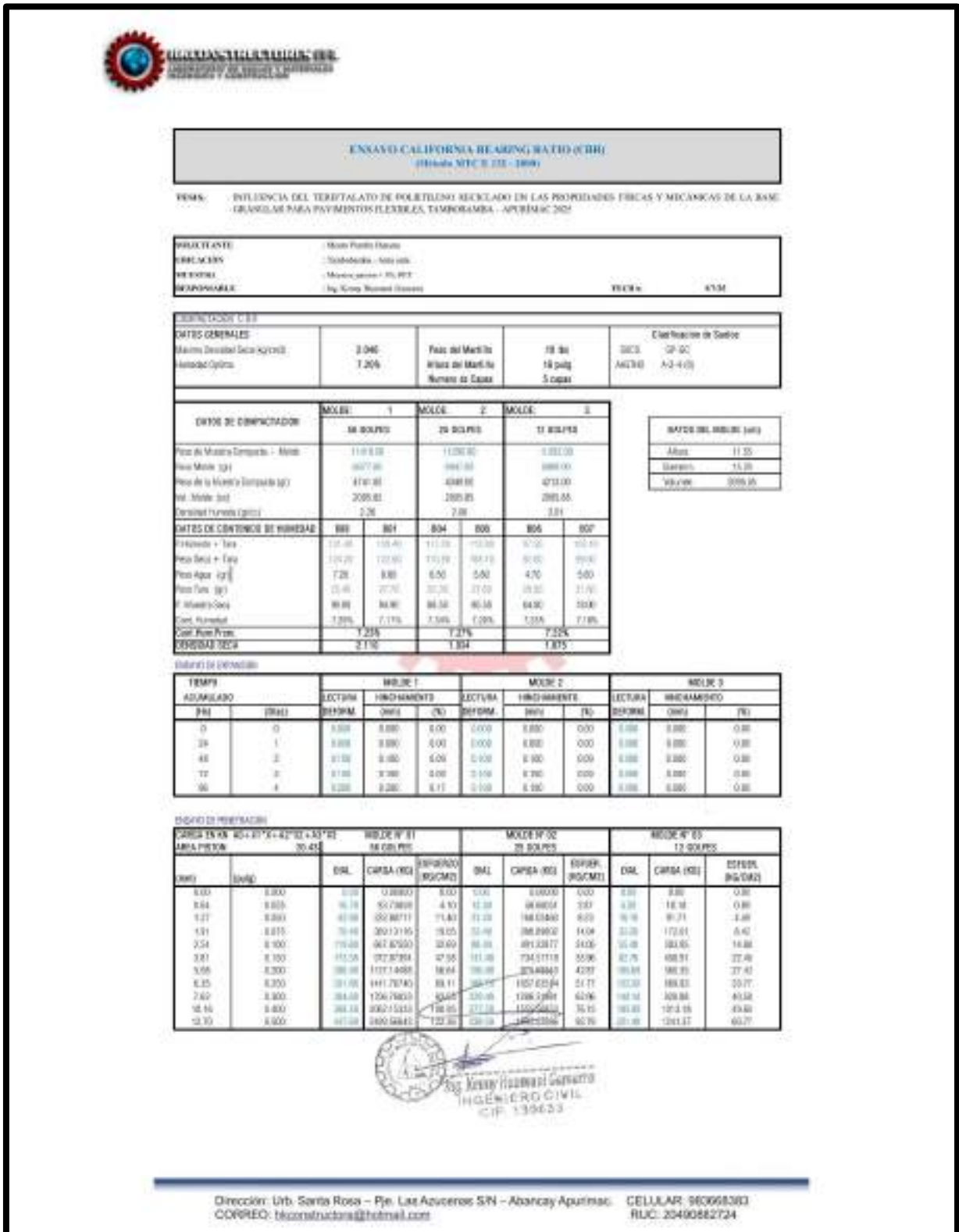


Figura 82 — Resultado CBR + 5% PET reciclado



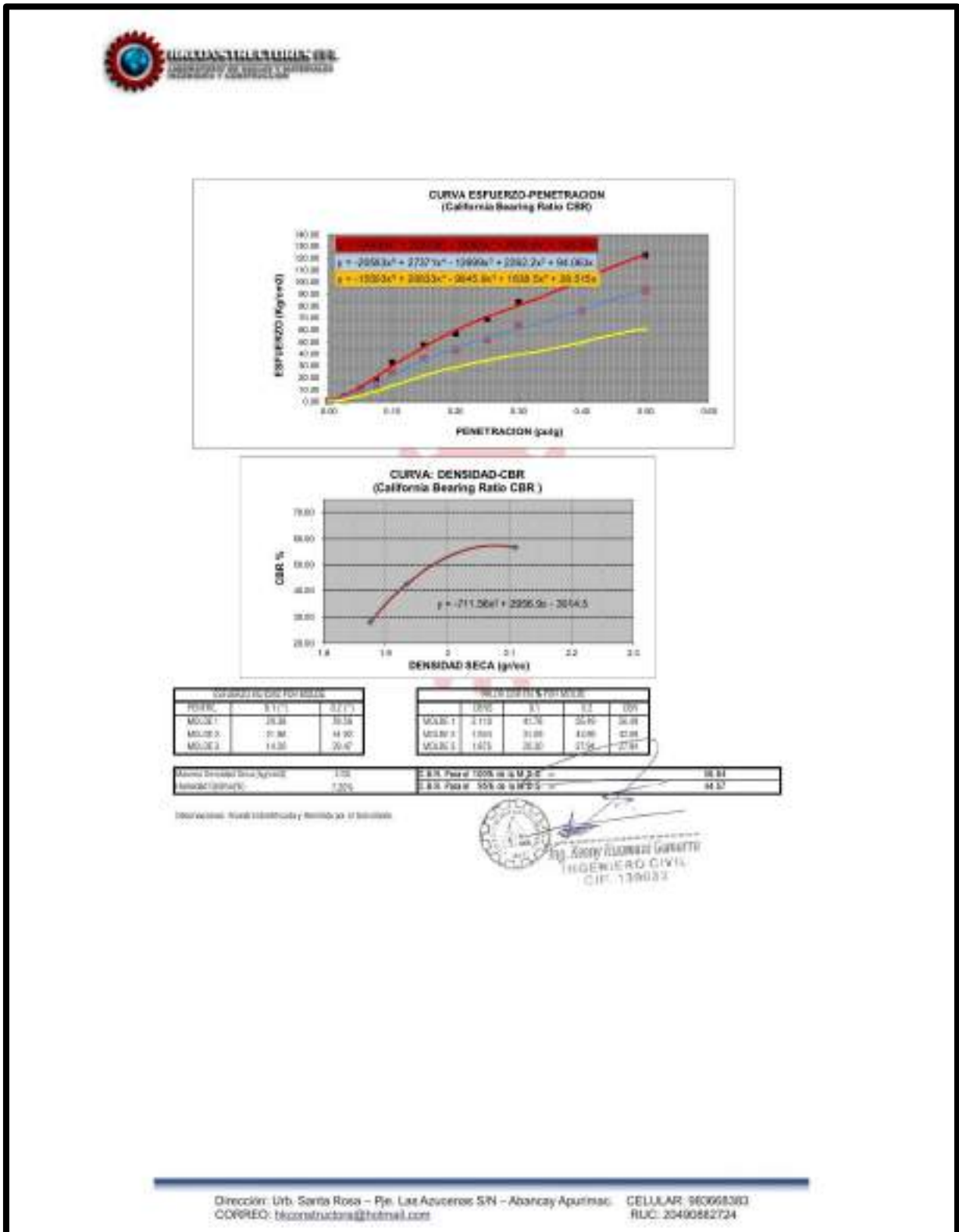


Figura 83 — Resultado CBR + 5% PET reciclado



### Anexo C Formatos de validación de instrumentos

**FORMATO DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

1.1 Investigador:	Red. Miro M. Perilla Itasca
1.2 Título de Investigación:	Influencia del beneficio de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tumbabamba — Apuríac, 2023
1.3 Universidad:	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apuríac
1.4 Experto:	Dr. Wilfredo Soto Palomino
1.5 Grado académico:	Ingeniería Civil con Especialidad en Gestión Pública y Gobernabilidad
1.6 Referencias:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de humedad</li> <li>• Índice de plasticidad</li> <li>• Brújula</li> <li>• Partículas chatas y alargadas</li> <li>• Partículas con caras fracturadas</li> <li>• Esqueleto de arena</li> <li>• Sales solubles</li> <li>• Abrasión Los Angeles</li> <li>• Proctor modificado</li> <li>• CBR</li> </ul>

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

Revisar cada uno de los "Ítems del Instrumento" y marcar con un signo (X) el resultado correspondiente, según la clasificación que asigna a cada uno de los indicadores.

1. Deficiente: Menos del 30% cumple con el criterio  
 2. Regular: Entre 30% y 70% cumple con el criterio  
 3. Buena: Más del 70% cumple con el criterio  
 4. Muy buena: Más del 85% cumple con el criterio  
 5. Excelente: Cumple al 100% con el criterio

**III. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO**

CRITERIOS	INDICADORES	ASPECTOS DE VALIDACIÓN	ASPECTOS DE VALIDACIÓN				
			1	2	3	4	5
			D	R	B	MB	E
PERTINENCIA DE LOS ENSAYOS	Relevancia	Los ensayos son adecuados para medir la influencia del PET-R en la base granular.				X	
	Alineación	Los parámetros medidos están alineados con los objetivos de la tesis.				X	
	Normatividad	Los ensayos siguen las normas aplicables (ASTM, AASHTO/T99, NYC 303.02)					X
COHERENCIA METODOLÓGICA	Procedimientos	Los ensayos siguen procedimientos estandarizados y son coherentes con las prácticas usuales en ingeniería.				X	
	Variables	Las variables medidas están correctamente relacionadas con el comportamiento del PET-R.				X	
	Resultados	Los resultados obtenidos muestran una relación clara y lógica entre las propiedades evaluadas e los efectos del PET-R.					X
SUFICIENCIA DE ENSAYOS	Cobertura	Los ensayos cubren todos los aspectos necesarios para evaluar las propiedades físico-mecánicas del material granular con PET-R.					X
	Muestra	La muestra sujeta de la cámara Anís Anís es suficiente y representativa para los análisis realizados.					X
	Repeticiones	El número de repeticiones es adecuado para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos.				X	
PRECISIÓN Y CONFIABILIDAD DE RESULTADOS	Reproducibilidad	Los resultados obtenidos en las repeticiones de los ensayos son consistentes y reproducibles.					X
	Exactitud	Los resultados reflejan con precisión las propiedades físico-mecánicas del material granular evaluado.				X	
	Variación	Las variaciones en los resultados obtenidos en diferentes repeticiones son mínimas y dentro de un rango aceptable.				X	
<b>COUNT TOTAL</b>			<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
						23	25

Coefficiente de validez  $\frac{A+B+C+D+E}{50} = 0.88$

Calificación: Valdes buena

**IV. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

El instrumento puede ser aplicado    
 El instrumento debe ser mejorado

**V. OBSERVACIONES / SUGERENCIAS**

FECHA: Abancay 12 de Enero del 2023

Firma y sello del experto:


  
**Dr. Wilfredo Soto Palomino**  
 INGENIERO CIVIL

Figura 84 — Valoración experto N°1



**FORMATO DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

1.1 Investigador:	Bach. Maura M. Peralta Huayra
1.2 Título de Investigación:	Influencia del tamaño de partículas pasadas en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tumbes - 2020
1.3 Universidad:	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
1.4 Experto:	<b>SAUL JOSÉ CHIPA CAHUANA</b>
1.5 Grado académico:	<b>ING. CIVIL CON MAESTRÍA EN GERENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN.</b>
1.6 Instrumentos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de humedad</li> <li>- Índice de plasticidad</li> <li>- Brindlemeter</li> <li>- Partículas chatas y alargadas</li> <li>- Partículas con caras fracturadas</li> <li>- Equivalente de arena</li> <li>- Sésosolúes</li> <li>- Abrasión Los Angeles</li> <li>- Proctor modificado</li> <li>- CBR</li> </ul>

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

Revisar cada uno de los "temas del instrumento" y marcar con un signo (X) el recuadro correspondiente, según la clasificación que asigna a cada una de las indicaciones.

1. Deficiente: Menos del 30% cumple con el criterio  
 2. Regular: Entre 31% y 70% cumple con el criterio  
 3. Buena: Mas del 70% cumple con el criterio  
 4. Muy Buena: Más del 80% cumple con el criterio  
 5. Excelente: Cumple al 100% con el criterio

**III. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO**

CRITERIOS	INDICADORES	ASPECTOS DE VALIDACIÓN	ASPECTOS DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO				
			1	2	3	4	5
			D	R	B	MB	E
PERTINENCIA DE LOS ENSAYOS	Relevancia	Los ensayos son adecuados para medir la influencia del PET-R en la base granular.				X	
	Alineación	Los parámetros medidos están alineados con los objetivos de la tesis.				X	
	Normatividad	Los ensayos siguen las normas aplicables (ASTM, AASHTO, NTP, MITC 10 2003)					X
COHERENCIA METODOLÓGICA	Procedimientos	Los ensayos siguen procedimientos estandarizados y son coherentes con las prácticas usuales en geotecnia.					X
	Variables	Las variables medidas están correctamente relacionadas con el comportamiento del PET-R.				X	
	Resultados	Los resultados obtenidos muestran una relación clara e lógica entre las propiedades ensayadas y los efectos del PET-R.				X	
SUFICIENCIA DE ENSAYOS	Cobertura	Los ensayos cubren todos los aspectos necesarios para evaluar las propiedades físico-mecánicas del material granular con PET-R.				X	
	Muestra	La muestra evaluada de la cancheta Árida Árida es suficiente y representativa para los análisis realizados.					X
PRECISIÓN Y CONFIABILIDAD DE RESULTADOS	Repetición	El número de repeticiones es adecuado para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos.				X	
	Reproducibilidad	Los resultados obtenidos en las repeticiones de los ensayos son consistentes y reproducibles.				X	
	Diagnóstico	Los resultados reflejan con precisión las propiedades físico-mecánicas del material granular evaluado.					X
	Variación	Las variaciones en los resultados obtenidos en diferentes repeticiones son mínimas y dentro de un rango aceptable.					X
<b>CONTEO TOTAL</b>			<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
						<b>28</b>	<b>25</b>

Coefficiente de validez:  $\frac{A+B+C+D+E}{N}$  = **0.88**

Calificación: **VALIDEZ BUENA**

**IV. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

El instrumento puede ser aplicado

El instrumento debe ser mejorado


**V. OBSERVACIONES / SUGERENCIAS**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Firma y sello del experto:

FEDIA: Abasco 12 de ENERO del 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 E. I. DE INGENIERÍA CIVIL

*Saul J. Chipa Cahuana*  
**Mtro. Saul J. Chipa Cahuana**  
 DOCENTE

Figura 85 — Valoración experto N°2



### FORMATO DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

1.1 Investigador:	Beth, Misael M. Peralta Huayra
1.2 Título de Investigación:	Influencia del tamaño de partícula residual en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tumbucayán - Apurímac 2021
1.3 Universidad:	Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
1.4 Docente:	Dr. Edgar Anibal Pérez Olaguivel
1.5 Grado académico:	Ingeniero Estadístico con doctorado en Gestión Pública y Gobernabilidad
1.6 Instrumentos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactador de laboratorio</li> <li>- Balanza de precisión</li> <li>- Granulometría</li> <li>- Partículas chafas y Angulos</li> <li>- Partículas con caras frías/abras</li> <li>- Equipamiento de arena</li> <li>- Balas solubles</li> <li>- Atenuación los Angeles</li> <li>- Proctor modificado</li> <li>- CBR</li> </ul>

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

Realizar cada uno de los "Ítems del Instrumento" e indicar con una (X) el recuadro correspondiente, según la clasificación que entrega a cada uno de los indicadores.

1. Excelente: Más del 90% cumple con el criterio	4. Muy Buena: Más del 85% cumple con el criterio
2. Buena: Entre 75% y 79% cumple con el criterio	3. Regular: Entre 60% y 74% cumple con el criterio
3. Buena: Más del 70% cumple con el criterio	5. Excelente: Cumple al 100% con el criterio

**III. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO**

CRITERIOS	INDICADORES	ASPECTOS DE VALIDACIÓN	ASPECTOS DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO				
			1	2	3	4	5
			D	B	R	MB	E
PERTINENCIA DE LOS ENSAYOS	Relevancia	Los ensayos son adecuados para medir la influencia del PET-R en la base granular.					X
	Alineación	Los parámetros medidos están alineados con los objetivos de la tesis.				X	
	Normatividad	Los ensayos siguen las normas aplicables (ASTM, AASHTO, NTP, NTC 60 3014)					X
COHERENCIA METODOLÓGICA	Predefinidas	Los ensayos siguen procedimientos estandarizados y son pertinentes con los objetivos de la tesis.					X
	Variables	Las variables medidas están correctamente relacionadas con el comportamiento del PET-R.				X	
	Resultados	Los resultados obtenidos muestran una relación clara y lógica entre las propiedades medidas y los efectos del PET-R.					X
SUFICIENCIA DE SERVICIOS	Cobertura	Los ensayos cubren todos los aspectos necesarios para evaluar las propiedades físico-mecánicas del material granular con PET-R.				X	
	Muestra	La muestra es válida de la carrera hasta hasta es suficiente y representativa para los análisis realizados.					X
	Repeticiones	El número de repeticiones es adecuado para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos.				X	
PRECISIÓN Y CONFIABILIDAD DE RESULTADOS	Reproducibilidad	Los resultados obtenidos en las repeticiones de los ensayos son consistentes y reproducibles.				X	
	Exactitud	Los resultados reflejan con precisión las propiedades físico-mecánicas del material granular mediano.				X	
	Varianza	Las variaciones en los resultados obtenidos en diferentes repeticiones son mínimas y dentro de un rango aceptable.				X	
<b>CANTO TOTAL</b>						<b>28</b>	<b>25</b>

Coefficiente de validez:  $\frac{A+B+C+D+E}{N}$  = **0.88**

Calificación: Validez buena

**IV. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**


El instrumento puede ser aplicado

El instrumento debe ser revalorado

**V. OBSERVACIONES / SUGERENCIAS**

FECHA: Arequipa 07 de Enero del 2020

Firma y sello del experto:




Dr. Edgar Anibal Pérez Olaguivel  
DIR. DE GESTIÓN ACADÉMICA


Figura 86 — Valoración experto N°3



## Anexo D Constancia de autenticidad



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL




### CONSTANCIA DE AUTENTICIDAD

Yo, Bach. Mauro Mamerto Peralta Huayna, identificado con DNI N°72234334 egresado de la carrera profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, en mi calidad de autor de la tesis titulada: **"Influencia del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular para pavimentos flexibles, Tambobamba – Apurímac 2025"**

Declaro bajo juramento que la presente tesis es un trabajo original, desarrollado de manera independiente, reflejando el esfuerzo y la dedicación invertidos en su realización. Las fuentes consultadas han sido correctamente citadas y referenciadas conforme a las normativas ISO 690, asegurando que se les ha otorgado el crédito adecuado por su contribución al desarrollo de la investigación. Además, el contenido ha sido verificado mediante herramientas de detección de plagio, obteniendo resultados dentro de los márgenes permitidos por la universidad, lo que garantiza la autenticidad de la investigación.

Firmo la presente constancia para su debido conocimiento y a los fines académicos correspondientes.

28 de enero de 2026



---

Bach. Mauro M. Peralta Huayna  
Tesista

Figura 87 — Constancia de autenticidad

Anexo E  
Acta de autorización de cantera


"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"


**ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE MATERIAL DE CANTERA**

Mediante la presente yo, Cristiano Ccohuana Ledo..... presidente de la comunidad de Anta Anta perteneciente al distrito de Tambobamba, provincia de Cotabambas y región Apurímac, autorizo la extracción de material de la cantera denominada Anta Anta al St. Mauro Peralta Huayna, para el uso en su proyecto de investigación denominado: Influencia del tereftalato de polietileno reciclado en las propiedades físicas y mecánicas de una base granular para pavimentos flexibles.

Otros:.....  
.....  
.....

Tambobamba, junio 2025

  
Firma



Nombre: Cristiano Ccohuana Ledo.....  
DNI N° 42747629.....

Figura 88 — Acta de autorización de cantera



Anexo F  
Certificados de calibración



**LABORATORIO DE METROLOGÍA**  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD**  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 1HQ0-2024 GLM

Página 1 de 3

<p>FECHA DE EMISIÓN : 2024-05-23</p> <p><b>1. SOLICITANTE</b> : HK CONSTRUCTORES E.I.R.L.</p> <p><b>DIRECCIÓN</b> : JR. LAS AZUCENAS NRO. 5/N ASC. SANTA ROSA APURIMAC - ABANCAY - ABANCAY</p> <p><b>2. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN</b> : BALANZA</p> <p><b>MARCA</b> : CHAUS</p> <p><b>MODELO</b> : R21PE30ZH</p> <p><b>NÚMERO DE SERIE</b> : 8354661448</p> <p><b>ALCANCE DE INDICACIÓN</b> : 30000 g</p> <p><b>DIVISIÓN DE ESCALA / RESOLUCIÓN</b> : 1 g</p> <p><b>DIVISIÓN DE VERIFICACIÓN (e)</b> : 10 g</p> <p><b>PROCEDENCIA</b> : NO INDICA</p> <p><b>IDENTIFICACIÓN</b> : NO INDICA</p> <p><b>TIPO</b> : ELECTRÓNICA</p> <p><b>UBICACIÓN</b> : LABORATORIO</p> <p><b>FECHA DE CALIBRACIÓN</b> : 2024-05-21</p> <p><b>3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN</b> La calibración se realizó mediante el método de comparación según el PC 001 1ra Edición, 2019: "Procedimiento para la calibración de balanzas de funcionamiento no automático clase III y clase III" del INACAL-DM.</p> <p><b>4. LUGAR DE CALIBRACIÓN</b> LAB. DE MASA DE G&amp;L LABORATORIO S.A.C AV. MIRAFLORES MZA. E LOTE. 60 URB. SANTA ELISA II ETAPA - LIMA - LOS OLIVOS</p>	<p>La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura <math>k=2</math>. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.</p> <p>Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.</p> <p>G &amp; L LABORATORIO S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.</p>
--	---





Av. Miraflores Mz. E Ll. 60 Urb Santa Elisa II Etapa. Los Olivos - Lima

**Correos:**  
certificados@gslcorporation.com / laboratorio@gslcorporation.com  
laboratorio.gslcorporation@gmail.com


**Teléfono:** (01) 622 - 58 - 34      **Celular:** 992 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

Firmado digitalmente por:  
YOPAC VILLANUEVA JHON  
JEFFERSON FIR: 70812584 hard  
Motivo: JEFE DEPARTAMENTO DE METROLOGÍA  
Fecha: 23/05/2024 16:07:13-0500


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 89 — Certificado de calibración balanza electrica





**G&L**  
LABORATORIO S.A.C.  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA**

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 1HQ0-2024 GLM  
Página 2 de 3

**5. CONDICIONES AMBIENTALES**

	Inicial	Final
Temperatura	22,8 °C	22,9 °C
Humedad Relativa	62 %	62 %

**6. TRAZABILIDAD**

Los resultados de la calibración realizada tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL-DM, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) y el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
Patrones de referencia de <b>TOTAL WEIGHT</b>	Termohigrómetro	CT - 1024 - 2024 CT - 1022 - 2024
Patrones de referencia de <b>DM - INACAL</b>	Pesas (Exactitud E2)	LM - C - 432 - 2023
Patrones de referencia de <b>TOTAL WEIGHT</b>	Pesas (Exactitud M2)	CM - 1988 - 2023 CM - 1989 - 2023 CM - 1990 - 2023

**7. OBSERVACIONES**


Para 30000 g, la balanza indicó 30006 g. Se ajustó y se procedió a su calibración.  
Los errores máximos permitidos (e.m.p.) para esta balanza corresponden a los e.m.p. para balanzas en uso de funcionamiento no automático de clase de exactitud III, según la Norma Metroológica Peruana 003 - 2009. Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento no Automático.  
Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación de "CALIBRADO"

**8. RESULTADOS DE MEDICIÓN**

INSPECCIÓN VISUAL			
AJUSTE DE CERO	TIENE	ESCALA	NO TIENE
OSCILACIÓN LIBRE	TIENE	CURSOR	NO TIENE
PLATAFORMA	TIENE	NIVELACIÓN	TIENE
SISTEMA DE TRABAJO	TIENE		

ENSAYO DE REPETIBILIDAD						
Medición	Carga L1=	Temp. °C		Carga L2=		
		Inicial	Final	g	(Δ)g	E(g)
	15 000 g	22,8	22,8	30 000	30 000 g	
1	15 000	0,4	0,1	30 000	0,7	-0,2
2	15 000	0,6	-0,1	30 000	0,2	0,3
3	15 000	0,5	0,0	30 000	0,3	0,2
4	15 000	0,5	0,0	30 000	0,6	-0,1
5	15 000	0,5	0,0	30 000	0,2	0,3
6	15 000	0,5	0,0	30 000	0,7	-0,2
	15 000	0,5	0,0	30 000	0,8	-0,3
	15 000	0,6	-0,1	30 000	0,3	0,2
	15 000	0,5	0,0	30 000	0,7	-0,2
	15 000	0,6	-0,1	30 000	0,2	0,3
			0,2			0,6
				20 g		30 g





PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

**Correos:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com

**Teléfono:** (01) 622 - 58 - 14      **Celular:** 992 - 302 - 883 / 927 - 605 - 430

Av. Miraflores Mz. E Lt. 60  
Urb. Santa Elisa II Etapa  
Les Olivos - Lima

Figura 90 — Certificado de calibración balanza eléctrica



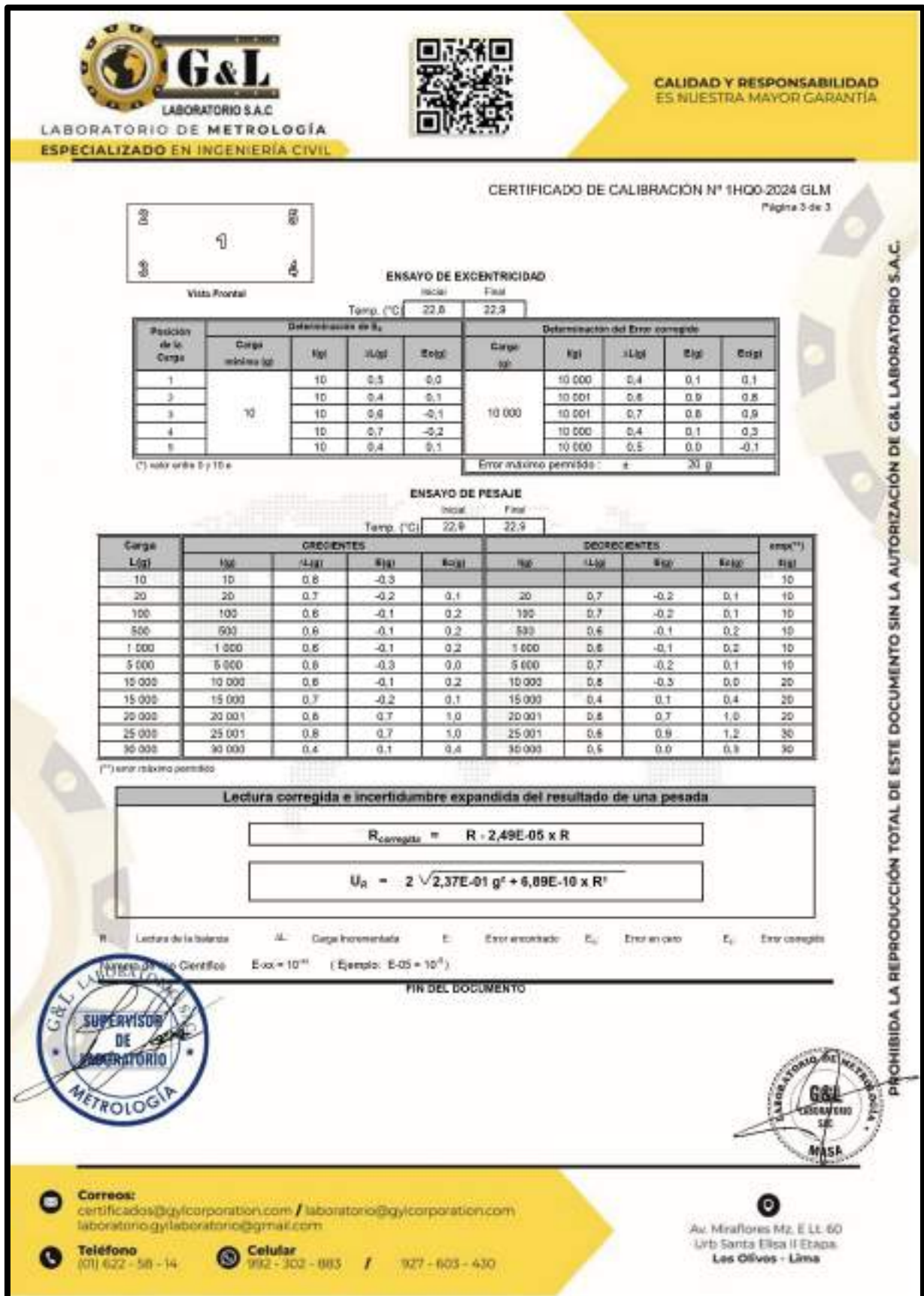


Figura 91 — Certificado de calibración balanza





**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA**

**Certificado de Calibración - Laboratorio de Fuerza**  
Calibration Certificate - Laboratory of Force

**20US-2024 GLF**

Pag. / Tot. 1 de 2

<b>Objeto de Prueba</b> Test Object	MÁQUINA DE ENSAYOS A COMPRESIÓN	<p>Los resultados emitidos en este Certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados solo corresponden al ítem que se relaciona en esta página. El laboratorio que lo emite no es responsable de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el usuario.</p> <p>Este Certificado de Calibración documenta y asegura la trazabilidad de los resultados a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).</p> <p>El usuario es responsable de la Calibración de los instrumentos en apropiados intervalos de tiempo.</p> <p>The results issued in this Certificate refer to the time and conditions under which the measurements. These results correspond to the item that relates to page number one.</p> <p>The laboratory, which will not be liable for any damages that may arise from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.</p> <p>The Calibration Certificate documents and ensures the traceability of the reported results to national and international standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).</p> <p>The user is responsible for Calibration of measuring instruments at appropriate time intervals.</p>
<b>Instrumento</b> Instrument	MÁQUINA MANUAL PARA ENSAYOS CBR CON ANILLO DE CARGA	
<b>Fabricante</b> Manufacturer	NO INDICA (ANILLO DE CARGA) / BAKER (DIAL) / PRIZUM (MARCO)	
<b>Modelo</b> Model	NO INDICA (ANILLO DE CARGA) / KSD (DIAL) / PS-8 (MARCO)	
<b>Número de Serie</b> Serial Number	NO INDICA (ANILLO DE CARGA) / ESCAMA (DIAL) / PE-1001 (MARCO)	
<b>Identificación Interna</b> Internal Identification	NO INDICA	
<b>Capacidad Máxima</b> Maximum Capacity	4000 kgf	
<b>Señalante</b> Customer	HC CONSTRUCTORES S.R.L.	
<b>Dirección</b> Address	JL LAS AZUCENAS 1800 - SN ASC. SANTAROSA APURIMAC - ABAWCAJAY - ABAWCAJAY	
<b>Ciudad</b> City	ABAWCAJAY	
<b>Fecha de calibración</b> Date of calibration	2024-10-25	
<b>Fecha de Emisión</b> Date of Issue	2024-10-21	

**Número de páginas del certificado, incluye anexos** 9  
Number of pages of the certificate and documents attached

Sin la aprobación del Laboratorio de Metrología G&L Laboratorio no se puede reproducir el Certificado, excepto cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que los partes del Certificado no se sacan de contexto. Los certificados de calibración en firma no son válidos.

Without the approval of the G&L Laboratory Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety, since it provides the security that the parts of the certificate are not taken out of context. Unsigned calibration certificates are not valid.

**Firmas que Autorizan el Certificado**  
Signatures Authorizing the Certificate



Av. Miraflores Mz. E LL. 60 Urb Santa Elisa II Etapa. Los Olivos - Lima

**Correos:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com


**Teléfono:** (01) 622 - 58 - 14      **Celular:** 992 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

**Firmado Digitalmente por:**  
YOPLAC VILLANUEVA JHON  
JEFFERSON PIR 70512584 hard  
Motivo: JEFE DEPARTAMENTO DE METROLOGÍA  
Fecha: 01/10/2024 17:52:06-0500


**PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.**

Figura 92 — Certificado de calibración maquina CBR





**LABORATORIO DE METROLOGÍA**  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD**  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA

**20US-2024 GLF**

Page / Pág. 2 de 9

**DATOS TÉCNICOS**

**Instrumento Bajo Calibración (IBC)**

Clase según ISO 7500-1: 1

Clase según ISO 375: No Identificable

Dirección de Carga: Compresión

Tipo de Indicación: Analógica

División de Escala: 1 UNIDADES

Resolución: 1 UNIDADES

Intervalo de Medición: Del 10% al 100% de la carga máxima

Calibrado: ---

Límite Superior de Calibración: 800 UNIDADES

**Instrumento(s) de Referencia**

Instrumento: Celda de Carga Tipo "S" 5T

Marca: OHAUS VIKELI

Modelo: T71P y A/FED

Clase ISO 7500-1: 0.5

Número de Serie: B504530208 y AGB8505

Certificado de Calibración: CC - 0195 - 2023

Fecha Calibración: 2023 - 11 - 07

Termómetro: EUROTECH POL-TH001

CT-1022-2024 y CT-1024-2024

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN**

La calibración se efectuó siguiendo los lineamientos establecidos en el documento de referencia AS/NZS NBR 8107:2021 "Materiales Metálicos - Calibración de Instrumentos de Medición de Fuerza de Uso General", en donde se especifica un intervalo de temperatura comprendido entre 10°C a 35°C, con una variación máxima de 3°C durante cada serie de medición.

Se utilizó el método de comparación directa aplicando Fuerza Indicada Constante.

Se realizó una inspección general del equipo y se determinó que: El equipo requiere ajuste de la indicación.

**Tabla 1.**  
Indicaciones como se encuentra el equipo previo al ajuste


Indicación del IBC	Indicaciones Registradas del Patrón			Promedio $S_{n,2y,3}$	Errores Relativos	
	$S_1$ No Aplica	$S_2$ No Aplica	$S_3$ No Aplica		Indicación a	Repetibilidad b
% UNIDADES	---	---	---	---	%	%
20 160	---	---	---	---	---	---
50 400	---	---	---	---	---	---
100 800	---	---	---	---	---	---

**Tabla 2.**  
Indicaciones como se entrega el equipo posterior al ajuste


Indicación del IBC	Indicaciones Registradas del Equipo Patrón para Cada Serie						Promedio $S_{n,2y,3}$
	$S_1$ Acuerda	$S_2$ Acuerda	$S_3$ No Aplica	$S_4$ Acuerda	$S_5$ No Aplica	kgf	
% UNIDADES	kgf	kgf	---	kgf	---	kgf	
10 80	441.3	442.0	---	442.1	---	441.8	
20 160	896.5	895.6	---	895.6	---	896.6	
30 240	1350.8	1349.9	---	1350.3	---	1350.3	
40 320	1788.6	1788.5	---	1786.4	---	1794.8	
50 400	2225.7	2227.6	---	2226.3	---	2226.5	
60 480	2678.5	2685.2	---	2680.4	---	2680.8	
70 560	3116.8	3117.0	---	3116.9	---	3116.9	
80 640	3548.6	3555.2	---	3550.8	---	3551.5	
90 720	3984.6	3981.0	---	3987.3	---	3987.6	
100 800	4420.0	4413.4	---	4411.2	---	4411.2	
Incl. después de Carga	0.0	0.0	---	0.0	---	---	

Técnico de Calibración: Luis Villanueva Chappa

**Firmas que Autorizan el Certificado**  
Signatures Authorizing the Certificate



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
SUPERVISOR DE LABORATORIO  
Joaquín Vociac Villanueva  
Ingeniero de Metrología



**Correos:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com

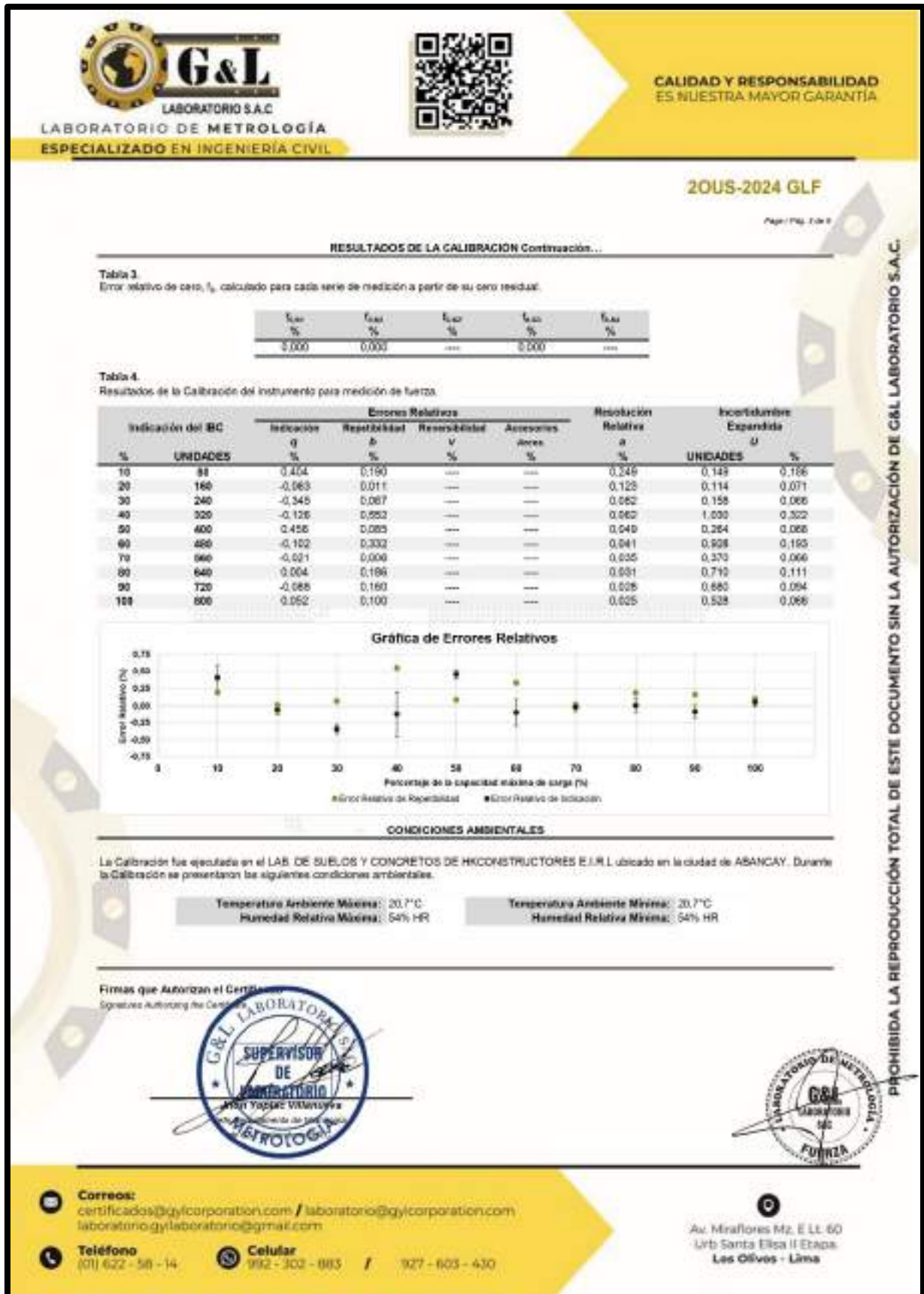
**Teléfono:** (01) 622 - 58 - 14    **Celular:** 992 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

Av. Miraflores Mz. E LL 60  
Urb. Santa Elisa II Etapa  
Los Olivos - Lima

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 93 — Certificado de calibración maquina CBR







PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 94 — Certificado de calibración maquina CBR





**G&L**  
LABORATORIO S.A.C.  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA**

**20US-2024 GLF**  
Page / Pág. 1 de 9

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN** Continuación...

**Tabla 5.**  
Coeficientes para el cálculo de la fuerza en función de su deformación y su R<sup>2</sup>, el cual refleja la bondad del ajuste del modelo a la variable.

A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	---	R <sup>2</sup>
-1.1461E+01	5.7051E+00	-2.0622E-04	-1.3828E-08		0.9999E-01

Equación 1: donde F (kgf) es la fuerza calculada y X (UNIDADES) es el valor de deformación evaluado.  

$$F = A_0 + (A_1 * X) + (A_2 * X^2) + (A_3 * X^3)$$


**Tabla 6.**  
Valores calculados en función de la fuerza aplicada (kgf)

Indicación UNIDADES	0	8	16	24	32
88	443.6	499.0	534.3	579.6	624.9
120	670.1	715.4	760.6	805.7	850.9
160	896.0	941.1	986.1	1031.2	1076.2
200	1121.2	1166.1	1211.1	1256.0	1300.8
240	1345.7	1390.5	1435.3	1480.0	1524.8
280	1569.5	1614.1	1658.8	1703.4	1748.0
320	1792.6	1837.1	1881.6	1926.1	1970.5
360	2015.0	2059.4	2103.7	2148.1	2192.4
400	2236.7	2280.9	2325.1	2369.3	2413.5
440	2457.6	2501.8	2545.6	2589.9	2633.9
480	2677.9	2721.9	2765.6	2809.7	2853.6
520	2897.4	2941.3	2985.1	3028.8	3072.6
560	3116.3	3159.9	3203.6	3247.2	3290.8
600	3334.3	3377.9	3421.4	3464.8	3508.9
640	3551.7	3595.0	3638.4	3681.7	3725.0
680	3768.3	3811.5	3854.7	3897.9	3941.0
720	3984.1	4027.2	4070.2	4113.2	4196.2
760	4199.2	4242.1	4285.0	4327.9	4370.7
800	4413.5				


**Tabla 7.**  
Valores Residuales

Indicación del IRC UNIDADES	Procedido S <sub>1,2,3,4</sub> kgf	Por Interpolación kgf	Residuales kgf
80	441.8	443.6	1.8
160	896.6	896.0	-0.6
240	1350.3	1345.7	-4.7
320	1794.8	1792.6	-2.3
400	2239.5	2236.7	-2.8
480	2684.0	2677.9	-6.1
560	3128.9	3118.3	-10.6
640	3573.5	3551.7	-21.8
720	3987.5	3984.1	-3.4
800	4411.2	4413.5	2.3

**Firmas que Autorizan el Certificado**  
Signatures Authorizing the Certificate



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
SUPERVISOR DE LABORATORIO  
Andrés Yopel Vilaverde



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
FUERZA

**Correos:**  
[certificados@gylcorporation.com](mailto:certificados@gylcorporation.com) / [laboratorio@gylcorporation.com](mailto:laboratorio@gylcorporation.com)  
[laboratorio.gylaboratorio@gmail.com](mailto:laboratorio.gylaboratorio@gmail.com)


**Teléfono** (01) 622 - 58 - 14    **Celular** 982 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

**Av. Miraflores Mz. E LL 60**  
Urb. Santa Elisa II Etapa.  
Los Olivos - Lima


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 95 — Certificado de calibración





**G&L**  
LABORATORIO S.A.C.  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA**

**20US-2024 GLF**  
Page / Pág. 3 de 9

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN** Continuación...

La Tabla 8 y Tabla 9 de este Certificado de Calibración se generan debido a que las unidades de la indicación del equipo bajo Calibración no coinciden con las Newton que son las unidades definidas en el Sistema Internacional de Unidades para la magnitud derivada fuerza. Los valores aquí presentados corresponden a la multiplicación de los resultados mostrados en la Tabla 2 y Tabla 4 de este Certificado de Calibración por el factor de conversión correspondiente. Cabe aclarar que los resultados mostrados como valores relativos no se modifican al realizar la conversión de unidades.

El factor de conversión utilizado para los cálculos fue: (kgf) a (kN) = 0,00980665, tomado del documento NIST SPECIAL PUBLICATION 811: Guide for the Use of the International System of Units (SI) - Anexo B3.


**Tabla 8.**  
Indicaciones obtenidas durante la Calibración para cada valor de carga aplicado en UNIDADES.

Indicación del IBC	Indicaciones Registradas del Equipo Patrón para Cada Serie						Promedio S <sub>1</sub> ± 2 s kN
	S <sub>1</sub> Acuerdante	S <sub>2</sub> Acuerdante	S <sub>1</sub> No aplica	S <sub>2</sub> Acuerdante	S <sub>3</sub> No aplica		
10	80	4,33	4,33	---	4,34	---	4,33
20	160	8,79	8,79	---	8,79	---	8,79
30	249	13,23	13,24	---	13,24	---	13,24
40	320	17,55	17,65	---	17,61	---	17,60
50	400	21,83	21,85	---	21,83	---	21,83
60	480	26,25	26,33	---	26,29	---	26,29
70	560	30,57	30,57	---	30,57	---	30,57
80	640	34,80	34,66	---	34,62	---	34,63
90	720	39,08	39,14	---	39,10	---	39,11
100	800	43,24	43,28	---	43,26	---	43,26
Inst. después de Carga	0,00	0,00	---	0,00	---	---	---


**Tabla 9.**  
Resultados de la Calibración del instrumento para medición de fuerza.

Indicación del IBC	Errores Relativos				Resolución Relativa a	Incertidumbre Expandida U	
	Indicación q	Repetibilidad b	Reproducibilidad v	Accesorios Acces.		UNIDADES	%
10	80	0,454	0,190	---	0,249	0,15	0,166
20	160	-0,063	0,011	---	0,129	0,11	0,071
30	240	-0,345	0,067	---	0,062	0,16	0,066
40	320	-0,126	0,052	---	0,062	1,03	0,322
50	400	0,456	0,089	---	0,049	0,26	0,066
60	480	-0,102	0,332	---	0,041	0,93	0,193
70	560	-0,021	0,006	---	0,036	0,37	0,066
80	640	0,004	0,106	---	0,031	0,71	0,111
90	720	-0,086	0,160	---	0,028	0,68	0,094
100	800	0,052	0,100	---	0,025	0,55	0,066

Firmas que Autorizan el Certificado  
Signatures Authorizing the Certificate



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
SUPERVISOR DE LABORATORIO  
Cristian Yagelac Villarejo  
LABORATORIO DE METROLOGÍA



**Correos:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com

**Teléfono:**  
(01) 622 - 58 - 14

**Celular:**  
992 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

Av. Miraflores Mz. E LL 60  
Urb. Santa Elisa II Etapa.  
Los Olivos - Lima

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 96 — Certificado de calibración





**G&L**  
LABORATORIO S.A.C.  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA**

**20US-2024 GLF**

Page 1 Page 3 de 3

---

**INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN**

La incertidumbre expandida de la medición reportada se establece como la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura  $k=2,013$  y la probabilidad de cobertura, la cual debe ser aproximada al 95% y no menor a este valor. La incertidumbre expandida fue estimada bajo los lineamientos del documento: JOGIM 100-2008, GLM 1035 with minor corrections. Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement, First Edition, September 2008.

---

**CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DEL EQUIPO**

La siguiente Tabla proporciona los valores máximos permitidos, para los diferentes errores relativos del sistema de medición de fuerza y para la resolución relativa del indicador de fuerza que caracteriza una clase de instrumento de medición de fuerza de acuerdo con la sección 7 de la Norma ISO 7500-1:2018 y la sección 8 de la Norma ISO 376:2011.

ERRORES MÁXIMOS PERMITIDOS SEGÚN NORMA ISO 7500-1:2018					
Clase	Indicación	Repetibilidad	Cero	Reversibilidad	Resolución Relativa
0,5	0,50	0,50	0,05	0,75	0,25
1	1,00	1,00	0,10	1,50	0,50
2	2,00	2,00	0,20	3,00	1,00
3	3,00	3,00	0,30	4,50	1,50

ERRORES MÁXIMOS PERMITIDOS SEGÚN NORMA ISO 376:2011				
Clase	Reproducibilidad	Repetibilidad	Cero	Reversibilidad
0	0,05	0,025	0,012	0,07
0,5	0,10	0,050	0,025	0,15
1	0,20	0,100	0,050	0,30
2	0,40	0,200	0,100	0,60

---

**OBSERVACIONES**

1. Se realizó una inspección general de la máquina encontrándose en buen estado de funcionamiento.
2. Los certificados de calibración sin las firmas no tienen validez.
3. El usuario es responsable de la recalibración de los instrumentos de medición. "En circunstancias normales, la calibración debe realizarse a intervalos de no más de 12 meses. Este rango puede variar según el tipo de instrumento de medición de fuerza de propósito general, el mantenimiento y la severidad del uso." (ABNT NBR 8197:2021)
4. En cualquier caso, la máquina debe calibrarse si se realiza un cambio de ubicación que requiera desmontaje, o si se somete a ajustes o reparaciones importantes.
5. Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No podrá ser reproducido parcialmente, excepto cuando se haya obtenido permiso previamente por escrito del laboratorio que lo emite.
6. Los resultados contenidos parcialmente en este certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que pueden derivarse del uso inadecuado de los instrumentos.
7. Se emplea la coma (,) como separador decimal.
8. Con el presente Certificado de Calibración se adjunta la etiqueta de Calibración No. 20US-2024 GLF

---

**Firmas que Autorizan el Certificado**  
Signatures Authorizing the Certificate



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
**SUPERVISOR DE LABORATORIO**  
John Yaglac Villalobos  
**METROLOGÍA**



**Correos:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com

**Teléfono:** (01) 622 - 58 - 14     **Celular:** 982 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430


Av. Miraflores Mz. E LL 60  
Urb. Santa Elisa II Etapa.  
Los Olivos - Lima

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.


Figura 97 — Certificado de calibración







**G&L**  
LABORATORIO S.A.C.  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA**


**20US-2024 GLF**  
Página: 194 de 194

**Tabla de Calibración**


308	1681,1	3085,7	3080,3	1897,8	1703,4	1700,0	1714,6	1726,1	1725,7	1731,3
318	1736,9	3142,4	1748,0	1753,6	1759,2	1764,7	1770,3	1775,9	1781,4	1787,0
328	1792,6	3198,1	1803,7	1809,3	1814,8	1820,4	1826,0	1831,5	1837,1	1842,7
338	1848,2	3253,8	1859,4	1864,9	1870,5	1876,1	1881,6	1887,2	1892,7	1898,3
348	1903,9	3309,4	1915,0	1920,5	1926,1	1931,7	1937,2	1942,8	1948,3	1953,9
358	1959,4	3365,0	1970,5	1976,1	1981,7	1987,2	1992,8	1998,3	2003,9	2009,4
368	2015,0	3420,5	2026,1	2031,6	2037,2	2042,7	2048,3	2053,8	2059,4	2064,9
378	2070,5	3476,0	2081,6	2087,1	2092,6	2098,2	2103,7	2109,3	2114,8	2120,4
388	2125,9	3531,5	2137,0	2142,5	2148,1	2153,6	2159,2	2164,7	2170,2	2175,8
398	2181,3	3587,0	2192,4	2197,9	2203,5	2209,0	2214,5	2220,1	2225,6	2231,1
408	2236,7	3642,2	2247,7	2253,3	2258,8	2264,3	2269,9	2275,4	2280,9	2286,4
418	2292,0	3697,4	2303,0	2308,6	2314,1	2319,6	2325,1	2330,7	2336,2	2341,7
428	2347,2	3752,8	2358,5	2363,8	2369,3	2374,8	2380,4	2385,9	2391,4	2396,9
438	2402,5	3808,0	2413,5	2419,0	2424,5	2430,1	2435,6	2441,1	2446,6	2452,1
448	2457,6	3863,2	2468,7	2474,2	2479,7	2485,2	2490,7	2496,2	2501,8	2507,3
458	2512,8	3918,3	2523,8	2529,3	2534,8	2540,3	2545,8	2551,3	2556,8	2562,3
468	2567,9	3973,4	2578,9	2584,4	2589,9	2595,4	2600,9	2606,4	2611,9	2617,4
478	2622,9	4028,4	2633,9	2639,4	2644,9	2650,4	2655,9	2661,4	2666,9	2672,4
488	2677,9	4083,4	2688,9	2694,4	2699,9	2705,4	2710,9	2716,4	2721,9	2727,4
498	2732,9	4138,4	2743,8	2749,3	2754,8	2760,3	2765,8	2771,3	2776,8	2782,3
508	2787,8	4193,3	2798,7	2804,2	2809,7	2815,2	2820,7	2826,2	2831,7	2837,1
518	2842,0	4248,1	2853,6	2859,1	2864,6	2870,0	2875,5	2881,0	2886,5	2892,0
528	2897,4	4302,9	2908,4	2913,9	2919,4	2924,8	2930,3	2935,8	2941,3	2946,7
538	2952,2	4357,7	2963,2	2968,6	2974,1	2979,6	2985,1	2990,5	2996,0	3001,5
548	3006,9	4412,4	3017,9	3023,4	3028,9	3034,3	3039,8	3045,2	3050,7	3056,2
558	3061,6	4467,1	3072,6	3078,0	3083,5	3088,9	3094,4	3099,8	3105,3	3110,8
568	3116,3	4521,7	3127,2	3132,6	3138,1	3143,5	3149,0	3154,4	3159,9	3165,4
578	3170,8	4576,2	3181,8	3187,2	3192,7	3198,1	3203,6	3209,0	3214,5	3219,9
588	3225,4	4630,8	3236,3	3241,7	3247,2	3252,6	3258,1	3263,5	3269,0	3274,4
598	3279,9	4685,3	3290,8	3296,2	3301,7	3307,1	3312,6	3318,0	3323,4	3328,9
608	3334,3	4739,8	3345,2	3350,7	3356,1	3361,5	3367,0	3372,4	3377,9	3383,3
618	3388,7	4794,2	3399,6	3405,0	3410,4	3415,9	3421,3	3426,8	3432,2	3437,7
628	3443,1	4848,5	3454,0	3459,4	3464,8	3470,3	3475,7	3481,1	3486,5	3492,0
638	3497,4	4902,8	3508,3	3513,7	3519,1	3524,5	3529,9	3535,3	3540,7	3546,2
648	3551,7	4957,1	3562,5	3567,9	3573,3	3578,7	3584,1	3589,5	3594,9	3600,3
658	3605,9	5011,3	3616,7	3622,1	3627,5	3632,9	3638,3	3643,7	3649,1	3654,5
668	3660,1	5065,5	3670,9	3676,3	3681,7	3687,1	3692,5	3697,9	3703,3	3708,7
678	3714,2	5119,8	3725,0	3730,4	3735,8	3741,2	3746,6	3752,0	3757,4	3762,8
688	3768,3	5173,7	3779,1	3784,5	3789,9	3795,3	3800,7	3806,1	3811,5	3816,9
698	3822,3	5227,7	3833,1	3838,5	3843,9	3849,3	3854,7	3860,1	3865,5	3870,9

Firmas que Autorizan el Documento

Signature Authorizing the Document



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
SUPERVISOR DE LABORATORIO  
Juan Yngles Villegas  
METROLOGÍA



**Correos:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com

**Teléfono:** (01) 622 - 58 - 14


**Celular:** 992 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

Av. Miraflores Mz. E LL 60  
Urb Santa Elisa II Etapa.  
Los Olivos - Lima


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 99 — Certificado de calibración de equipos





**G&L**  
LABORATORIO S.A.C.  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL




**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA**


**20US-2024 GLF**  
Página: Pág. 2 de 8

**Tabla de Calibración**


708	3876.3	3981.7	3887.1	3802.5	3897.9	3903.3	3908.8	3914.0	3919.4	3924.6
718	3930.2	3935.6	3941.0	3946.4	3951.8	3957.2	3962.6	3967.9	3973.3	3978.7
728	3984.1	3989.5	3994.9	4000.3	4005.6	4011.0	4016.4	4021.8	4027.2	4032.6
738	4037.9	4043.3	4048.7	4054.1	4059.5	4064.8	4070.2	4075.6	4081.0	4086.4
748	4091.7	4097.1	4102.5	4107.9	4113.2	4118.6	4124.0	4129.4	4134.7	4140.1
758	4145.5	4150.9	4156.2	4161.6	4167.0	4172.3	4177.7	4183.1	4188.5	4193.8
768	4199.2	4204.6	4209.9	4215.3	4220.7	4226.0	4231.4	4236.8	4242.1	4247.5
778	4252.8	4258.2	4263.6	4268.9	4274.3	4279.6	4285.0	4290.4	4295.7	4301.1
788	4306.4	4311.8	4317.2	4322.5	4327.9	4333.2	4338.6	4343.9	4349.3	4354.7
798	4368.0	4373.4	4378.7	4384.1	4389.4	4394.8	4399.1	4404.5	4409.8	4415.2
808	4413.5									



**Firmas que Autorizan el Certificado**  
Signatures Authorizing the Certificate



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
**SUPERVISOR DE LABORATORIO**  
Enon Yopac Vilalva  
Ingeniero de Instrumentación de Medición



**G&L LABORATORIO S.A.C.**  
**LABORATORIO DE METROLOGÍA**  
**FUERZA**

**Correos:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com

**Teléfono:**  
(01) 622 - 58 - 14

**Celular:**  
912 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

**Av. Miraflores Mz. E LL 60  
Urb. Santa Elisa II Etapa.  
Los Olivos - Lima**

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 100 — Certificado de calibración de equipos





**LABORATORIO DE METROLOGÍA**  
ESPECIALIZADO EN INGENIERÍA CIVIL



**CALIDAD Y RESPONSABILIDAD**  
ES NUESTRA MAYOR GARANTÍA

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° CA6F-2023 GLM

Página 1 de 3

<b>FECHA DE EMISIÓN</b>	: 2023-10-04	
<b>1. SOLICITANTE</b>	: <b>HKCONSTRUCTORES EMPRESA INDIVIDUAL DE RESP. LTDA</b>	<p>La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura <math>k=2</math>. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.</p> <p>Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.</p> <p>G &amp; L LABORATORIO S.A.C no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.</p>
<b>DIRECCIÓN</b>	: JR. LAS AZUCENAS NRO. 519 ASC. SANTA ROSA APURIMAC - ABANCAY - ABANCAY	
<b>2. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN</b>	: <b>BALANZA</b>	
<b>MARCA</b>	: POCKET SCALE	
<b>MODELO</b>	: MH-500	
<b>NÚMERO DE SERIE</b>	: MH5-7B	
<b>ALCANCE DE INDICACIÓN</b>	: 500 g	
<b>DIVISIÓN DE ESCALA / RESOLUCIÓN</b>	: 0.1 g	
<b>DIVISIÓN DE VERIFICACIÓN ( e )</b>	: 0.1 g	
<b>PROCEDENCIA</b>	: NO PRESENTA	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	: NO PRESENTA	
<b>TIPO</b>	: ELECTRÓNICA	
<b>UBICACIÓN</b>	: LABORATORIO	
<b>FECHA DE CALIBRACIÓN</b>	: 2023-09-29	
<b>3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN</b>	<p>La calibración se realizó mediante el método de comparación según el PC 011 4ta Edición, 2010: "Procedimiento para la calibración de balanzas de funcionamiento no automático clase I y clase II" del INDECOPI.</p>	
<b>4. LUGAR DE CALIBRACIÓN</b>	<p>LAB. DE MASA DE G&amp;L LABORATORIO S.A.C AV. MIRAFLORES MZ. E LT. 60 URB. SANTA ELISA II ETAPA LOS OLIVOS - LIMA</p>	



Gilmer Antonio Huamán Pocuoma  
Responsable del Laboratorio de Metrología



**Av. Miraflores Mz. E Lt. 60 Urb Santa Elisa II Etapa. Los Olivos - Lima**

**Correo:**  
certificados@gylcorporation.com / laboratorio@gylcorporation.com  
laboratorio.gylaboratorio@gmail.com

**Teléfono:** (01) 622 - 58 - 14      **Celular:** 992 - 302 - 883 / 927 - 603 - 430

Firmado digitalmente por:  
**HUAMAN POCUOMA GILMER ANTONIO FIR 44372719 hard**  
Motivo: RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA  
Fecha: 04/10/2023 09:40:35-0500

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE G&L LABORATORIO S.A.C.

Figura 101 — Certificado de calibración balanza 0.1g



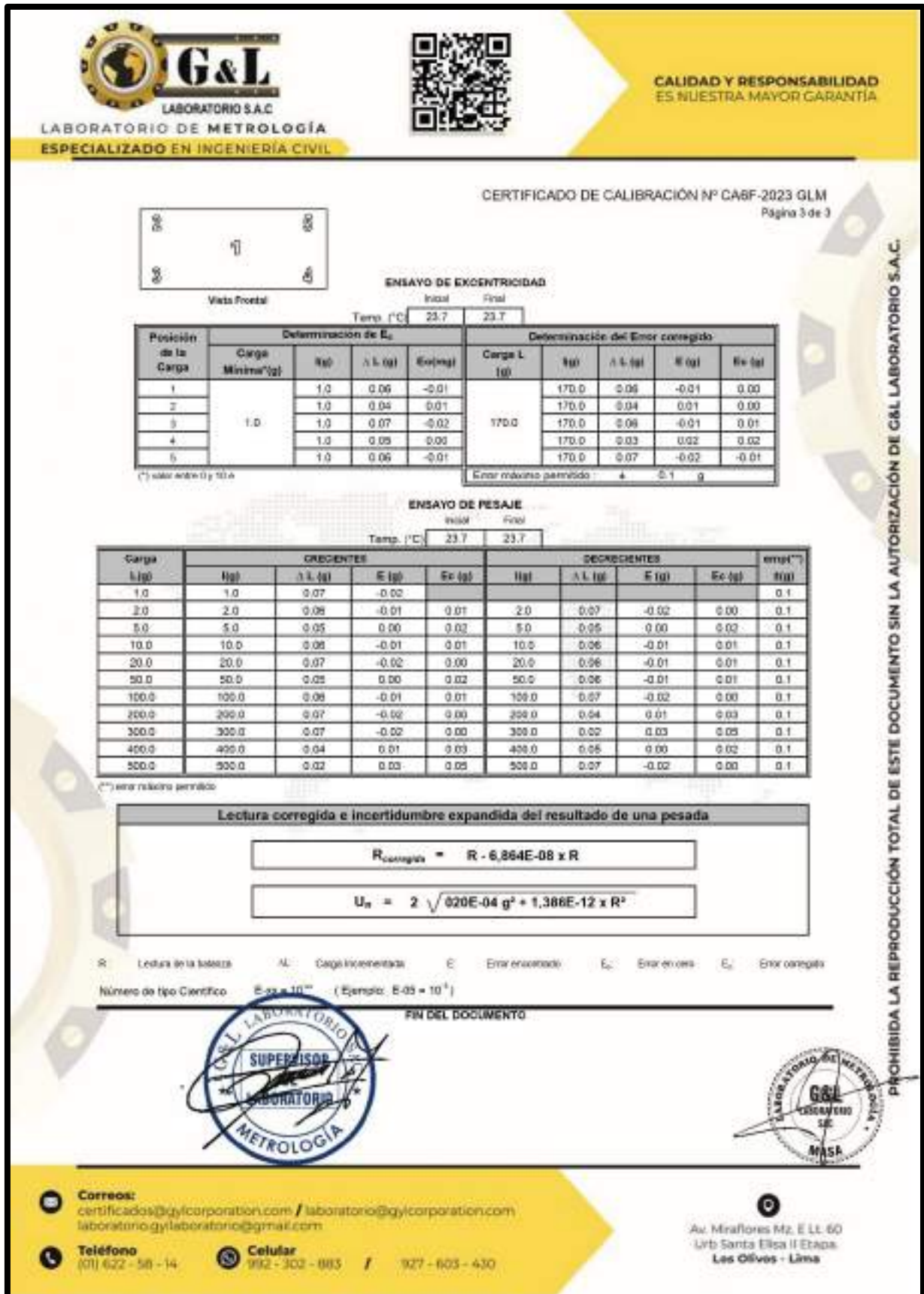


Figura 103 — Certificado de calibración balanza



## Anexo G Panel fotográfico



Figura 104 — Vista cantera Anta Anta en explotación.



Figura 105 — Ensayo caras fracturadas.



Figura 106 — Abrasión de los Ángeles.



Figura 107 — Ensayo de granulometría por tamizado.

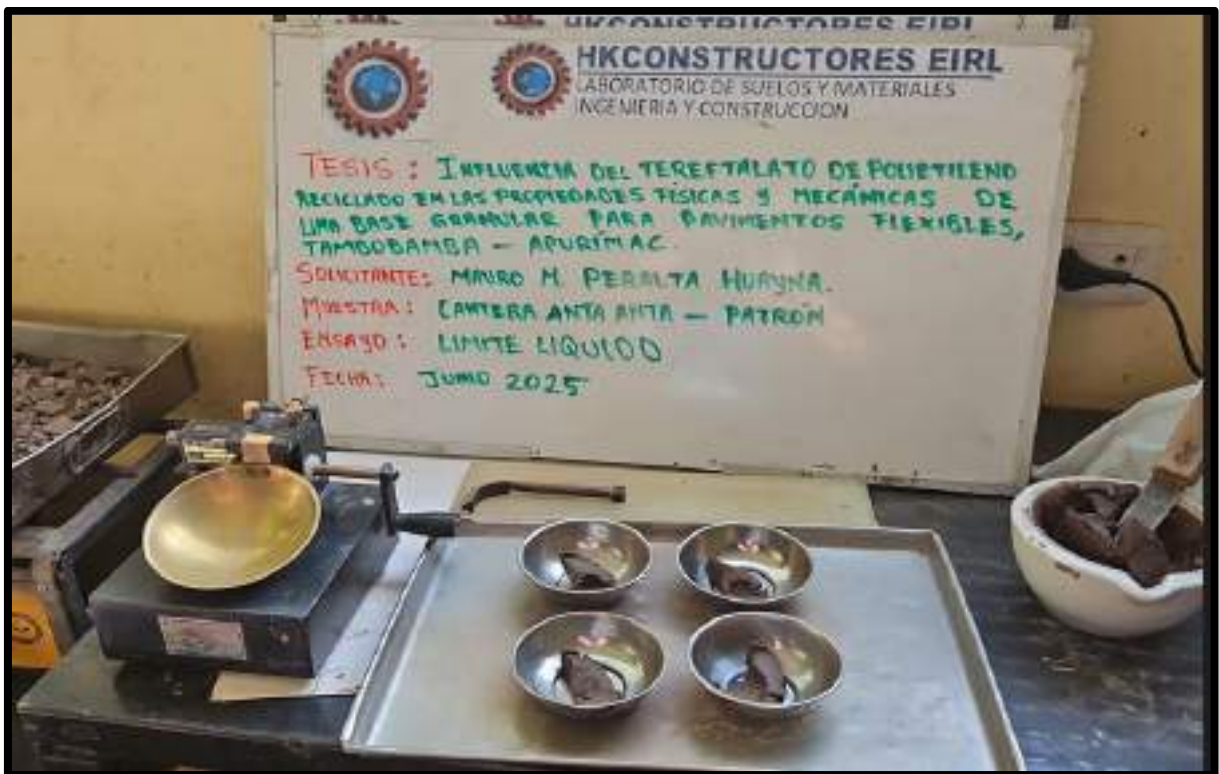


Figura 108 — Ensayo de límites de consistencia.



Figura 109 — Ensayo de Proctor modificado.



Figura 110 — Ensayo proctor modificado + 15% PET-R.



Figura 111 — Ensayo equivalente de arena.



Figura 112 — Ensayo CBR de la muestra patrón.



Figura 113 — Ensayo de expansión y contracción.

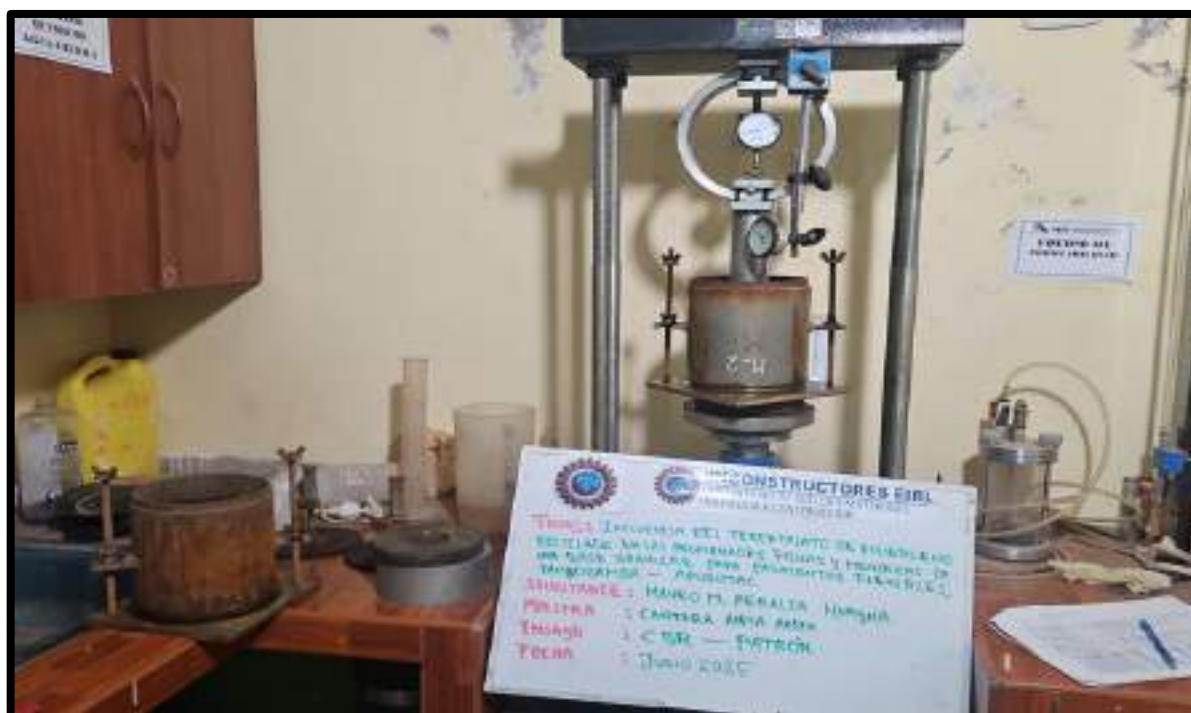


Figura 114 — Ensayo de penetración CBR.



Figura 115 — Ensayo de límites de consistencia LL + PET reciclado.



Figura 116 — Ensayo CBR + 35% PET-R



Figura 117 — Granulometría de muestra patrón + PET reciclado.



Figura 118 — Abrasión los angeles, tamizado.



Figura 119 — Ensayo CBR + 2.5% PET-R.