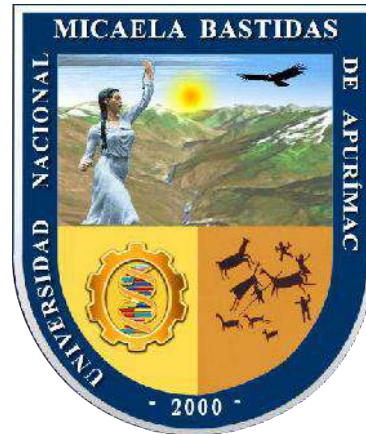


UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac –
2024

Presentado por:

Leydy Yanira Huamani Contreras

Fermín Flores Ccorisapra

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2024



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




TESIS

**Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de
agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de
Abancay, Apurímac - 2024**

Presentado por **Leydy Yanira Huamani Contreras** y **Fermín Flores Ccorisapra**,
para optar el título de Ingeniero Civil

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

Presidente:



Mtro. Diomedes Napoleon Ferrel Sarmiento

Primer miembro:



Mag. Saul Jose Chipa Cahuana

Segundo miembro:



Mtro. Americo Roldan Juarez

Asesor:



Mtro. Feliciano Escobedo Silva



Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 028-2026

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la tesis titulada: **Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac – 2024**, presentado por los Bachsrs: **LEYDY YANIRA HUAMANI CONTRERAS** y **FERMIN FLORES CCORISAPRA**, 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 (24%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 22 de enero del 2026

Atentamente,



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
Dra. Hesperalda Rojas Enriquez
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. N° 091

Agradecimiento

Antemano, agradecemos a Dios por guiarnos en el camino correcto y por darnos cada día, fortaleza para cumplir nuestro objetivo y sueños.

También agradecemos a nuestros padres por el apoyo incondicional que nos brindaron cada día para hacer realidad este objetivo.

A los ingenieros docentes de la carrera de Ingeniería Civil por sus aportes, conocimientos y por su tiempo dentro de las aulas universitaria y en el campo laboral.

De los autores



Dedicatoria

A Dios, por permitirme vivir, aprender y avanzar con fe en cada paso.

A mis padres, Wilson y Apolinaria, por su amor incondicional; a mis hermanos, Yosimi y Paúl, por su apoyo constante; y a Dong Won, por su compañía y motivación durante mi etapa universitaria.

Leydy Yanira Huamani Contreras

Dedico mi tesis en primer lugar, a Dios y a mis padres Cecilia Ccorisapra Huayta, David Flores Zuñiga y Jhesselin Anjhely Flores M., L.P.N., por brindarme su apoyo incondicional y la fortaleza necesaria para culminar este objetivo.

Fermín Flores Ccorisapra



Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac -

2024

Línea de investigación: Ingeniería de la construcción

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	6
1.2.1 Problema general	6
1.2.2 Problemas específicos	7
1.2.3 Justificación de la investigación	7
CAPÍTULO II	9
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	9
2.1 Objetivos de la investigación	9
2.1.1 Objetivo general	9
2.1.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis de la investigación	9
2.2.1 Hipótesis general	9
2.2.1 Hipótesis específicas	10
2.3 Operacionalización de variables	11
CAPÍTULO III	13
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	13
3.1 Antecedentes	13
3.2.1 Pavimentos	17
3.2.2 Suelos limo-gravosos: características y comportamiento	26
3.2.3 Concreto	36
3.2.4 Concreto reciclado en la construcción	50
3.2.5 Durabilidad de pavimentos de concreto	56
3.2.6 Impacto ambiental de la construcción con agregados reciclados	63
3.2.7 Técnicas de evaluación de desgaste en pavimentos	67
3.2.8 Estrategias para mejorar la integridad estructural en pavimentos conservación vial	78
3.3 Marco conceptual	81



CAPÍTULO IV	83
METODOLOGÍA	83
4.1 Tipo y nivel de investigación.	83
4.1.1 Tipo de investigación.	83
4.1.2 Nivel de investigación.	83
4.2 Diseño de la investigación	84
4.3 Descripción ética de la investigación	85
4.4 Población y muestra	86
4.4.1 Población	86
4.4.2 Muestra	86
4.5 Procedimiento	89
4.6 Técnicas e instrumentos	91
4.7 Análisis estadístico	91
4.7.1 Análisis de varianza de un factor	91
4.7.2 Prueba de una hipótesis estadística	92
CAPÍTULO V	94
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	94
5.1 Análisis de resultados	94
5.1.1 Características de los agregados	94
5.1.2 Diseño de mezcla	103
5.1.3 Controles de calidad del concreto en estado fresco	103
5.1.4 Controles de calidad del concreto en estado endurecido	106
5.1.5 Estudio de suelos	116
5.1.6 Cálculo del espesor estructural del pavimento rígido	118
5.2 Contratación de hipótesis	124
5.3 Discusión	141
CAPÍTULO VI	143
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
6.1 Conclusiones	143
6.2 Recomendaciones	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
ANEXOS	152



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variables	11
Tabla 2 — Número de calicatas para exploración de suelos	27
Tabla 3 — Número de Ensayos MR y CBR	28
Tabla 4 — Clasificación de suelos según tamaño de partículas	30
Tabla 5 — Clasificación de suelos según índice de plasticidad	31
Tabla 6 — Clasificación de suelos según equivalente de arena	32
Tabla 7 — Clasificación de suelos según índice de grupo	32
Tabla 8 — Correlación de tipos de suelos AASHTO – SUCS	33
Tabla 9 — Clasificación de los suelos método AASHTO	34
Tabla 10 — Categorías de sub rasante	36
Tabla 11 — Tamices standard ASMT	45
Tabla 12 — Requisitos de granulometría para el agregado fino	46
Tabla 13 — Requisitos Granulométricos para el agregado grueso	47
Tabla 14 — Límites permisibles para agua de mezcla y curado	49
Tabla 15 — Agua de lavado para su empleo en agua de mezcla	49
Tabla 16 — Granulado de concreto en función del uso previsto	52
Tabla 17 — Propiedades del agregado natural y reciclado	54
Tabla 18 — Rangos de clasificación del PCI	69
Tabla 19 — Tipos de Fallas para la metodología del Manual PCI	69
Tabla 20 — Longitudes de Unidades de Muestreo Asfálticas	70
Tabla 21 — Tipos de pavimentos	71
Tabla 22 — Categorías de fallas	72
Tabla 23 — Fallas consideradas por método VIZIR	75
Tabla 24 — Índice de fisuración (If)	77
Tabla 25 — Índice de deformación (Id)	77
Tabla 26 — Índice de deterioro superficial (Is)	77
Tabla 27 — Corrección por reparación	78
Tabla 28 — Rangos de calificación del método VIZIR	78
Tabla 29 — Guía para estimar la condición de pavimento	79
Tabla 30 — Tratamiento para vías urbanas	80
Tabla 31 — Diseño para evaluar el comportamiento mecánico del pavimento	84
Tabla 32 — Cantidad de muestras del grupo experimental 1 (G1)	87



Tabla 33 — Cantidad de muestras del grupo experimental 2 (G2)	87
Tabla 34 — Cantidad de muestras del grupo experimental 3 (G3)	87
Tabla 35 — Cantidad de muestras del grupo experimental 4 (G4)	88
Tabla 36 — Cantidad de muestras del grupo experimental 5 (G5)	88
Tabla 37 — Cantidad de muestras del grupo experimental 6 (G6)	88
Tabla 38 — PASO 01: Recolección y preparación de muestras	89
Tabla 39 — PASO 2: Caracterización física y mecánica de los materiales	90
Tabla 40 — PASO 03: Preparación del modelo experimental	90
Tabla 41 — PASO 4: Realización de pruebas y evaluación	90
Tabla 42 — Análisis granulométrico del agregado fino de cantera	94
Tabla 43 — Análisis granulométrico del agregado grueso de cantera	95
Tabla 44 — Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado	96
Tabla 45 — Contenido de humedad del agregado fino de cantera	97
Tabla 46 — Contenido de humedad del agregado grueso de cantera	98
Tabla 47 — Peso unitario suelto del agregado fino	98
Tabla 48 — Peso unitario compactado del agregado fino	98
Tabla 49 — Peso unitario suelto del agregado grueso	99
Tabla 50 — Peso unitario compactado del agregado grueso	99
Tabla 51 — Peso unitario suelto del agregado grueso reciclado	99
Tabla 52 — Peso unitario compactado del agregado grueso reciclado	100
Tabla 53 — Peso específico y absorción del agregado fino	100
Tabla 54 — Peso específico y absorción del agregado grueso	101
Tabla 55 — Peso específico y absorción del agregado grueso reciclado	101
Tabla 56 — Tipo de método de ensayo para abrasión al desgaste por el método B	102
Tabla 57 — Desgaste del agregado grueso de cantera	102
Tabla 58 — Desgaste de agregado grueso reciclado	102
Tabla 59 — Diseño de mezcla	103
Tabla 60 — Proporción de materiales para los grupos experimentales	103
Tabla 61 — Control de temperaturas del concreto $f'c=210$ kg/cm ²	104
Tabla 62 — Asentamiento del concreto $f'c=210$ kg/cm ²	105
Tabla 63 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el grupo experimental 1 (G1)	106
Tabla 64 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el grupo experimental 2 (G2)	107
Tabla 65 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el grupo experimental 3 (G3)	108
Tabla 66 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el grupo experimental 4 (G4)	109
Tabla 67 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el grupo experimental 5 (G5)	111
Tabla 68 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el grupo experimental 6 (G6)	112
Tabla 69 — Análisis granulométrico del suelo	116
Tabla 70 — Contenido de humedad del suelo	117



Tabla 71 — Límites de consistencia	117
Tabla 72 — Resultados del ensayo de proctor modificado	117
Tabla 73 — Resultado de CBR	118
Tabla 74 — Cálculo del número de ejes equivalentes (ESAL) para pavimento rígido	119
Tabla 75 — Rangos referenciales de la tasa anual de crecimiento del tránsito (r)	119
Tabla 76 — Factor de sentido (Fs) según condición de circulación	119
Tabla 77 — Factor carril	120
Tabla 78 — Rangos de confiabilidad	120
Tabla 79 — Desviación estándar según rango de confiabilidad	120
Tabla 80 — Error estándar combinado	121
Tabla 81 — Índice de servicio	121
Tabla 82 — Coeficiente de drenaje	122
Tabla 83 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 3 días	125
Tabla 84 — Prueba de Levene para la edad del concreto de 3 días	125
Tabla 85 — ANOVA para la edad del concreto de 3 días	125
Tabla 86 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 3 días	126
Tabla 87 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 3 días	126
Tabla 88 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 7 días	128
Tabla 89 — Prueba de Levene para la edad del concreto de 7 días	129
Tabla 90 — ANOVA para la edad del concreto de 7 días	129
Tabla 91 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 7 días	129
Tabla 92 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 7 días	130
Tabla 93 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 14 días	132
Tabla 94 — Igualdad de varianzas para la edad del concreto de 14 días	132
Tabla 95 — ANOVA para la edad del concreto de 14 días	132
Tabla 96 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 14 días	133
Tabla 97 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 14 días	133
Tabla 98 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 21 días	135
Tabla 99 — Igualdad de varianzas para la edad del concreto de 21 días	136
Tabla 100 — ANOVA para la edad del concreto de 21 días	136
Tabla 101 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 21 días	136
Tabla 102 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 21 días	137
Tabla 103 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 28 días	139
Tabla 104 — Igualdad de varianzas para la edad del concreto de 28 días	139
Tabla 105 — ANOVA para la edad del concreto de 28 días	139
Tabla 106 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 28 días	140
Tabla 107 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 28 días	140
Tabla 108 — Matriz de consistencia de la investigación	153



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Estructura del pavimento	17
Figura 2 — Método AASHTO	23
Figura 3 — Signos convencionales para perfil de calicatas según AASHTO	29
Figura 4 — Signos convencionales para perfil de calicatas según SUCS	30
Figura 5 — Proporciones en volumen de los componentes	36
Figura 6 — Esquema de la estructura del concreto	37
Figura 7 — Gráfica esfuerzo - deformación del concreto simple	38
Figura 8 — Componentes químicos principales	39
Figura 9 — Rocas y constituyentes minerales en agregados para concreto	41
Figura 10 — Estados de saturación del agregado	42
Figura 11 — Peso específico	42
Figura 12 — Características físicas y granulométricas del agregado fino	46
Figura 13 — Características físicas y granulométricas agregado grueso	48
Figura 14 — Diagrama de flujo para la obtención de concreto de demolición y granulado de concreto	50
Figura 15 — Diagrama de flujo de un posible tratamiento de concreto de demolición	51
Figura 16 — Absorción de agua en función de la densidad de los agregados reciclados	54
Figura 17 — Casos de tramos en proceso de evaluación de pavimentos	72
Figura 18 — Esquema del procedimiento de la investigación	89
Figura 19 — Curva granulométrica del agregado fino de cantera	95
Figura 20 — Curva granulométrica del agregado grueso de cantera	96
Figura 21 — Curva granulométrica del agregado grueso reciclado	97
Figura 22 — Temperaturas promedio del concreto $f'c=210$ kg/cm ²	104
Figura 23 — Asentamiento promedio del concreto $f'c=210$ kg/cm ²	105
Figura 24 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 0% de agregado grueso del concreto reciclado	106
Figura 25 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 15% de agregado grueso del concreto reciclado	108
Figura 26 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 30% de agregado grueso del concreto reciclado	109
Figura 27 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 45% de agregado grueso del concreto reciclado	110



Figura 28 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 75% de agregado grueso del concreto reciclado	111
Figura 29 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 90% de agregado grueso del concreto reciclado	113
Figura 30 — Resistencia a la compresión del concreto a 3 días	113
Figura 31 — Resistencia a la compresión del concreto a 7 días	114
Figura 32 — Resistencia a la compresión del concreto a 14 días	114
Figura 33 — Resistencia a la compresión del concreto a 21 días	115
Figura 34 — Resistencia a la compresión del concreto a 28 días	115
Figura 35 — Curva granulométrica del suelo	116
Figura 36 — Espesor de base y losa de concreto calculado según AASHTO (1993)	124
Figura 37 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 3 días	127
Figura 38 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 7 días	130
Figura 39 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 14 días	134
Figura 40 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 21 días	137
Figura 41 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días	141
Figura 42 — Reciclaje del concreto en el distrito de Abancay	155
Figura 43 — Preparación del agregado del concreto reciclado	155
Figura 44 — Cantera Murillo de Abancay	155
Figura 45 — Recolección de agregado grueso en la cantera Murillo	156
Figura 46 — Recolección de agregado fino en la Murillo	156
Figura 47 — Cuarteo de muestras del agregado grueso	156
Figura 48 — Cuarteo de muestras del agregado fino	157
Figura 49 — Tamizado de agregados	157
Figura 50 — Verificación de los pesos por tamices	157
Figura 51 — Verificación de la distribución de tamaños del agregado	158
Figura 52 — Distribución de tamaños del agregado grueso	158
Figura 53 — Tamizado del agregado grueso del concreto reciclado	158
Figura 54 — Tamizado de los agregados y verificación de los pesos por tamices	159
Figura 55 — Verificación del peso del material retenido en cada tamiz	159
Figura 56 — Prueba de abrasión del agregado grueso	159
Figura 57 — Preparación manual del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G1	160
Figura 58 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G1	160
Figura 59 — Verificación del asentamiento mediante el cono de Abrams	160

Figura 60 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G2	161
Figura 61 — Preparación manual del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G3	161
Figura 62 — Toma de temperatura del concreto en estado fresco	161
Figura 63 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G3	162
Figura 64 — Preparación manual del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G4	162
Figura 65 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G4	162
Figura 66 — Preparación manual del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G5	163
Figura 67 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G5	163
Figura 68 — Preparación manual del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G6	163
Figura 69 — Mezcla manual del concreto $f'c=210$ kg/cm ² para el G6	164
Figura 70 — Desencofrado de los testigos de concreto	164
Figura 71 — Escritura de la nomenclatura para los testigos de concreto	164
Figura 72 — Curado de los testigos concreto del grupo experimental 1 (G1)	165
Figura 73 — Curado de los testigos de concreto	165
Figura 74 — Curado de testigos de concreto (G3)	165
Figura 75 — Verificación del diámetro de los testigos de concreto G1	166
Figura 76 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G1	166
Figura 77 — Tipo de falla del testigo de concreto con prensa hidráulica G1	166
Figura 78 — Verificación del diámetro de los testigos de concreto G3	167
Figura 79 — Tipo de falla del testigo de concreto con prensa hidráulica G3	167
Figura 80 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G3	167
Figura 81 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G2	168
Figura 82 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G3	168
Figura 83 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G2	168
Figura 84 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G6	169
Figura 85 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G6	169
Figura 86 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G5	169
Figura 87 — Preparación del pavimento para la evaluación del desgaste	170
Figura 88 — Control del desgaste del pavimento con agregado de cantera	170
Figura 89 — Control del desgaste del pavimento con agregado reciclado	170
Figura 90 — Control de asentamiento de los grupos experimentales	171
Figura 91 — Control de temperatura de los grupos experimentales	172
Figura 92 — Resistencia a compresión del grupo experimental 6 (G6)	173
Figura 93 — Resistencia a compresión del grupo experimental 5 (G5)	174
Figura 94 — Resistencia a compresión del grupo experimental 4 (G4)	175
Figura 95 — Resistencia a compresión del grupo experimental 3 (G3)	176
Figura 96 — Resistencia a compresión del grupo experimental 2 (G2)	177
Figura 97 — Resistencia a compresión del grupo experimental 1 (G1)	178

Figura 98 — Desgaste del agregado grueso de cantera	179
Figura 99 — Desgaste del agregado grueso del concreto reciclado	180
Figura 100 — Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso de cantera	181
Figura 101 — Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso reciclado	182
Figura 102 — Peso unitario suelto y compactado del agregado fino de cantera	183
Figura 103 — Peso específico y absorción del agregado grueso reciclado	184
Figura 104 — Peso específico y absorción del agregado grueso de cantera	185
Figura 105 — Peso específico y absorción del agregado fino	186
Figura 106 — Contenido de humedad del suelo prueba 1	187
Figura 107 — Contenido de humedad del suelo prueba 2	188
Figura 108 — Contenido de humedad del suelo prueba 3	189
Figura 109 — Contenido de humedad del suelo prueba 4	190
Figura 110 — Contenido de humedad del suelo prueba 5	191
Figura 111 — Análisis granulométrico del agregado grueso de cantera	192
Figura 112 — Análisis granulométrico del agregado fino de cantera	193
Figura 113 — Certificado de calibración del equipo de esclerometría pág. 1	194
Figura 114 — Certificado de calibración del equipo de esclerometría pág. 2	195
Figura 115 — Certificado de calibración de la balanza pág. 1	196
Figura 116 — Certificado de calibración de la balanza pág. 2	197
Figura 117 — Certificado de calibración de la balanza pág. 3	198
Figura 118 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 1	199
Figura 119 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 2	200
Figura 120 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 1	201
Figura 121 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 2	202
Figura 122 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 3	203
Figura 123 — Estudio de tráfico vial	204
Figura 124 — Resumen del volumen de tráfico diario	205

INTRODUCCIÓN

Debido a su resistencia y capacidad para soportar cargas pesadas, el pavimento rígido, que se compone principalmente de concreto, es una solución ampliamente utilizada en la construcción de infraestructuras viales. Sin embargo, el comportamiento mecánico y el desgaste de estos pavimentos son factores importantes que determinan su rendimiento y vida útil. La búsqueda de materiales sostenibles y métodos de construcción más ecológicos que ha aumentado el interés en el uso de agregados reciclados en este contexto.

El (Consejo Mundial Empresarial para Desarrollo Sostenible, 2009) menciona que “para iniciar con el reciclaje de concreto es importante hacer un análisis del ciclo de vida. Sin embargo, en ocasiones se debe considerar el reciclaje en su totalidad, ya que el impacto global y la utilización de los materiales siempre deben ser considerados para los trabajos de ingeniería. Así mismo en la actualidad, el concreto reciclado es usado como sub base en las vías y en proyectos de construcción. Puesto que, desde la perspectiva de la sostenibilidad, actualmente estos usos de grados relativamente bajos proporcionan los mejores resultados”.

La durabilidad y resistencia del pavimento rígido son aspectos fundamentales para garantizar la vida útil de las infraestructuras viales (MTC, 2014), especialmente en regiones con suelos desafiantes como los limo-gravosos. La ciudad de Abancay, en la región de Apurímac, presenta una geografía y condiciones climáticas particulares que afectan significativamente el comportamiento de los pavimentos.

En este contexto, la incorporación de agregados gruesos reciclados de concreto en la mezcla del pavimento rígido surge como una solución sostenible que no solo busca mejorar las propiedades mecánicas del pavimento, sino también reducir el impacto ambiental asociado con la extracción de agregados naturales. El concreto reciclado se obtiene del reciclaje de estructuras de concreto demolidas, lo que contribuye a la economía circular en la construcción y a la reducción de residuos.

Esta tesis se enfocó en determinar el comportamiento mecánico y el desgaste del pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado en suelos limo-gravosos, específicamente en la ciudad de Abancay. Se analizaron variables como la resistencia a la compresión, la durabilidad frente a cargas repetitivas y el comportamiento ante el desgaste, comparando estas propiedades con las de pavimentos construidos con agregados tradicionales.



En la investigación se presenta cinco secciones:

El Capítulo I, presenta el planteamiento del problema, enunciado del problema y justificación de la investigación.

En el Capítulo II, se desarrollan los objetivos generales y específicos de la investigación, junto con las hipótesis planteadas.

El Capítulo III, se centra en el marco teórico, iniciando con la descripción de los antecedentes del estudio. Aquí se recopilan los objetivos y conclusiones de diversas tesis nacionales y extranjeras. Además, se desarrollan los conceptos más importantes que serán tratados en la investigación, proporcionando un sólido fundamento teórico.

El Capítulo IV detalla la metodología de la investigación, especificando el tipo y nivel de investigación, la población y muestra, el diseño metodológico, los procedimientos técnicos y los instrumentos empleados.

En el Capítulo V, refleja los resultados, la contrastación de hipótesis y las discusiones del proyecto analizando los datos obtenidos.

Finalmente, el Capítulo VI incluye las conclusiones y la recomendación de la investigación, así como las fuentes bibliográficas consultadas.



RESUMEN

La presente investigación titulada “Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso de concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac – 2024” tuvo como objetivo evaluar el comportamiento mecánico y el desgaste del pavimento rígido mediante la incorporación de agregado grueso de concreto reciclado, considerando las condiciones propias de los suelos limo-gravosos. La investigación fue de tipo aplicada, de nivel descriptivo y enfoque cuantitativo. Para el desarrollo experimental se conformaron seis grupos experimentales (G1, G2, G3, G4, G5 y G6), en los cuales se incorporó agregado grueso de concreto reciclado en proporciones de 0 %, 15 %, 30 %, 45 %, 75 % y 90 %, respectivamente.

Los ensayos de laboratorio evidenciaron que las propiedades físicas y mecánicas del agregado reciclado son inferiores a las del agregado natural, lo que influye en el comportamiento del concreto tanto en estado fresco como endurecido. En la evaluación de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, el grupo control G1 alcanzó una resistencia promedio de 271.63 kg/cm². Los grupos con agregado reciclado presentaron valores menores; sin embargo, el grupo G4, con una dosificación del 45 % de agregado reciclado, registró la mayor resistencia entre los grupos experimentales, con un valor promedio de 253.43 kg/cm² a los 28 días. A partir de este porcentaje, la resistencia disminuyó progresivamente, alcanzando el menor valor en el grupo G6 con 218.29 kg/cm².

El análisis estadístico mediante ANOVA confirmó que la incorporación del agregado grueso de concreto reciclado influye significativamente en las propiedades físico-mecánicas del concreto diseñado para una resistencia $f'c = 210$ kg/cm², evaluado a las edades de 3, 7, 14, 21 y 28 días. No obstante, se concluye que la incorporación de hasta un 45 % de agregado reciclado constituye una alternativa técnicamente viable para pavimentos rígidos, contribuyendo al aprovechamiento de residuos de concreto y a la sostenibilidad de la infraestructura vial.

Palabras clave: *Cemento, agregado reciclado, resistencia a compresión.*



ABSTRACT

This research, entitled “Mechanical Behavior and Wear of Rigid Pavement Incorporating Coarse Recycled Concrete Aggregate on Silt-Gravel Soils in the City of Abancay, Apurímac – 2024”, aimed to evaluate the mechanical behavior and wear of rigid pavement through the incorporation of coarse recycled concrete aggregate, considering the specific conditions of silt-gravel soils. The study was applied research with a descriptive level and quantitative approach. For the experimental phase, six test groups (G1, G2, G3, G4, G5, and G6) were formed, incorporating recycled coarse aggregate at proportions of 0%, 15%, 30%, 45%, 75%, and 90%, respectively.

Laboratory tests showed that the physical and mechanical properties of the recycled aggregate are inferior to those of natural aggregate, which influences the behavior of concrete in both fresh and hardened states. In the evaluation of compressive strength at 28 days of curing, the control group G1 achieved an average strength of 271.63 kg/cm². Groups containing recycled aggregate showed lower values; however, group G4, with a 45% recycled aggregate dosage, exhibited the highest strength among the experimental groups, with an average value of 253.43 kg/cm² at 28 days. Beyond this percentage, strength progressively decreased, reaching the lowest value in group G6 with 218.29 kg/cm².

Statistical analysis via ANOVA confirmed that the incorporation of coarse recycled concrete aggregate significantly affects the physical and mechanical properties of concrete designed for a characteristic strength $f'c = 210$ kg/cm², evaluated at ages of 3, 7, 14, 21, and 28 days. Nonetheless, it was concluded that incorporating up to 45% recycled aggregate represents a technically viable alternative for rigid pavements, contributing to the reutilization of concrete waste and promoting the sustainability of road infrastructure.

Keywords: *Cement, recycled aggregate, compressive strength*



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En las últimas décadas, la generación de residuos sólidos provenientes de la construcción y demolición de estructuras de concreto se ha incrementado de manera significativa a nivel mundial, convirtiéndose en una de las principales problemáticas ambientales asociadas al crecimiento urbano. El concreto es uno de los materiales más empleados en obras civiles debido a su durabilidad y versatilidad, siendo superado únicamente por el agua en términos de consumo global. No obstante, el constante reemplazo y renovación de infraestructuras genera enormes volúmenes de desechos, los cuales, en muchos casos, no reciben un tratamiento adecuado. Frente a esta situación, el reciclaje del concreto mediante su trituración y reutilización como agregado en nuevas mezclas surge como una alternativa sostenible, capaz de reducir el consumo de recursos naturales, minimizar la contaminación ambiental y disminuir los costos de construcción. Sin embargo, la incorporación de agregados reciclados plantea desafíos técnicos relacionados con el desempeño mecánico, la durabilidad y el comportamiento estructural del concreto, lo que demanda investigaciones orientadas a optimizar su diseño y aplicación.

En el contexto latinoamericano, el crecimiento acelerado de las ciudades y la expansión de la infraestructura vial han intensificado la generación de residuos de construcción y demolición. A pesar de ello, la reutilización de estos materiales aún es limitada, predominando prácticas como la disposición inadecuada en botaderos informales o rellenos sanitarios. Esta situación no solo genera impactos ambientales negativos, sino que también desaprovecha el potencial del concreto reciclado como material alternativo para la construcción de pavimentos rígidos. La escasa investigación aplicada y la limitada adopción de normativas técnicas específicas han dificultado su implementación generalizada en la región.

En el Perú, el sector construcción representa una de las principales fuentes de generación de residuos sólidos, especialmente durante las actividades de demolición, donde se producen volúmenes considerablemente mayores en comparación con las obras nuevas.



A pesar de las iniciativas orientadas a promover el uso de materiales sostenibles en la infraestructura vial, la aplicación del concreto reciclado en pavimentos rígidos continúa siendo incipiente. Asimismo, la falta de estudios detallados sobre el comportamiento mecánico de estos pavimentos y su interacción con distintos tipos de sub-rasante limita la toma de decisiones técnicas adecuadas. Un diseño deficiente, especialmente cuando no se evalúan correctamente las características del suelo de soporte, puede ocasionar fallas prematuras como fisuración, deformaciones y pérdida de capacidad estructural, reduciendo la vida útil de las vías.

A nivel local, la ciudad de Abancay, en la región Apurímac, no es ajena a esta problemática. El crecimiento urbano y la ejecución de obras viales han incrementado la generación de residuos de concreto, los cuales en su mayoría no son reutilizados ni reciclados de forma sistemática. Paralelamente, las vías urbanas se construyen sobre suelos de tipo limo-gravoso, cuyas propiedades influyen directamente en el desempeño estructural del pavimento rígido. La ausencia de investigaciones locales que evalúen el comportamiento mecánico y el desgaste del pavimento rígido al incorporar agregado grueso de concreto reciclado, considerando las condiciones específicas de la sub-rasante y las solicitaciones del tránsito, genera incertidumbre respecto a su durabilidad y resistencia. Como consecuencia, se continúa dependiendo del uso de agregados naturales, incrementando el impacto ambiental y la necesidad de mantenimiento frecuente de las vías urbanas.

En este sentido, el problema de investigación se centra en el desconocimiento del comportamiento mecánico y del desgaste del pavimento rígido al emplear agregado grueso de concreto reciclado sobre suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, lo cual limita la optimización de su desempeño estructural, su sostenibilidad ambiental y su vida útil en condiciones reales de servicio durante el año 2024.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es el comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?



1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso de concreto reciclado y cómo se comparan con las de los agregados tradicionales en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?
- ¿Cómo influirá la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado en la durabilidad y resistencia en concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para las vías de transporte en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?
- ¿Cómo influirá la incorporación del agregado grueso de concreto reciclado en la integridad estructural y la resistencia al desgaste del pavimento rígido con concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?

1.2.3 Justificación de la investigación

La presente investigación se justificó por la necesidad de evaluar de manera técnica y científica la viabilidad del uso de agregado grueso de concreto reciclado en el diseño de pavimentos rígidos construidos sobre suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay. La integración entre la selección del material reciclado y el análisis de la sub-rasante resultó determinante, ya que tanto la variabilidad del agregado reciclado como las características mecánicas del suelo influyen directamente en la resistencia, durabilidad y comportamiento estructural del pavimento frente a las cargas del tránsito. Un desconocimiento de estas variables puede generar diseños ineficientes y fallas prematuras.

Asimismo, el porcentaje de material granular reciclado incorporado en la mezcla de concreto constituyó un factor clave que condiciona sus propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a la compresión y el desempeño frente al desgaste. En ese sentido, el estudio permitió identificar rangos adecuados de incorporación del agregado reciclado, logrando un equilibrio entre sostenibilidad ambiental y desempeño estructural, sin comprometer la calidad ni la vida útil.

La evaluación de las características físicas y mecánicas del material granular reciclado, tales como la granulometría, estabilidad, resistencia y capacidad de drenaje, es fundamental para determinar su idoneidad como agregado grueso en la elaboración del concreto. Este análisis garantiza que el material reciclado cumpla con los requisitos técnicos exigidos para pavimentos rígidos y que su aplicación sea segura y eficiente en condiciones reales de servicio, especialmente en suelos limo-gravosos como los predominantes en Abancay.

Desde el punto de vista práctico, esta investigación beneficia directamente a los profesionales de la ingeniería civil, proyectistas y entidades responsables de la infraestructura vial, al proporcionar información técnica confiable para el diseño de pavimentos rígidos más durables y sostenibles. De manera indirecta, los resultados favorecen a las autoridades locales y regionales, al contribuir a una mejor toma de decisiones en proyectos viales, reduciendo costos de mantenimiento y rehabilitación. Asimismo, la población de la ciudad de Abancay se beneficia mediante la mejora de la calidad y durabilidad de sus vías urbanas.

Desde una perspectiva ambiental y social, el estudio promueve el aprovechamiento de residuos de concreto, reduciendo la disposición inadecuada de desechos de construcción y la explotación de agregados naturales, lo cual contribuye a la protección del medio ambiente y al desarrollo sostenible de la región. Adicionalmente, la investigación aporta al conocimiento científico en el campo de los materiales de construcción y pavimentos rígidos, constituyéndose en una referencia técnica para futuras investigaciones y para la formulación de normativas y políticas públicas orientadas al uso de materiales reciclados en la construcción vial.

En conjunto, esta investigación no solo responde a una problemática técnica y académica, sino que también tiene un impacto económico, ambiental y social, justificando su desarrollo en la ciudad de Abancay, Apurímac, durante el año 2024.



CAPÍTULO II OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo - gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.

2.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de agregado grueso del concreto reciclado y compararlas con las de los agregados tradicionales en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.
- Determinar cómo la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado afecta en la durabilidad y resistencia en concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para las vías de transporte en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.
- Evaluar el impacto de la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado en la integridad estructural y la resistencia al desgaste del pavimento rígido con concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

Se espera que la incorporación de agregado grueso de concreto reciclado influya significativamente en el comportamiento mecánico y el desgaste del pavimento rígido, la utilización de este tipo de agregado afectará la resistencia estructural, la durabilidad y la vida útil del pavimento en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.



2.2.2 Hipótesis específicas

- Las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso de concreto reciclado difieren de las de los agregados tradicionales utilizados en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024, lo cual influye en su desempeño estructural.
- La incorporación de agregado grueso del concreto reciclado disminuye ligeramente la durabilidad y resistencia del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ del pavimento rígido para las vías de transporte en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.
- La incorporación de agregado grueso del concreto reciclado reduce la integridad estructural y la resistencia desgaste del pavimento rígido con concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.



2.3 Operacionalización de variables

Tabla 1 — Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición	Instrumento
Independientes: Agregado grueso del concreto reciclado	Es material obtenido de la trituración de residuos de concreto de construcciones demolidas, utilizado como sustituto del agregado grueso natural en la elaboración de nuevo concreto. Este agregado varía en tamaño, típicamente de 5 a 40 mm, y contribuye a la sostenibilidad en construcción (Martínez Molina et al., 2015).	Se caracteriza por las pruebas de laboratorio normalizadas destinadas a evaluar las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso de concreto reciclado utilizando equipos y procedimientos estandarizados. (Hansen, 1983)	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades físicas mecánicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis granulométrico. • Peso unitario • Peso específico • Absorción. • Humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • (%) de partículas • Kg/m³ • g/cm³ • (%) • (%) 	Ficha de recolección de resultados.
Suelos limo-gravosos	Los suelos limo-gravosos corresponden a mezclas heterogéneas de partículas de limo y grava, donde ninguno de los componentes predomina totalmente, dichos suelos presentan variabilidad en textura, permeabilidad y retención de agua, lo que les confiere propiedades intermedias entre materiales más finos y suelos gravosos (MTC, 2013).	El análisis implica la realización de pruebas de campo y laboratorio para medir parámetros específicos del suelo, como su densidad, resistencia y capacidad de carga, con el fin de determinar su idoneidad como base para pavimentos. (MTC, 2013).	<ul style="list-style-type: none"> • Características geotécnicas del suelo • Capacidad Portante del Suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad • Expansión • Proctor • CBR 	<ul style="list-style-type: none"> • (%) • (%) • (%) • (%) 	Ficha de recolección de resultados.

<p>DEPENDIENTE</p> <p>Y:</p> <p>PAVIMENTO RÍGIDO</p>	<p>El pavimento rígido es una estructura de carretera compuesta por una losa de concreto, diseñada para soportar y distribuir las cargas del tráfico de manera uniforme sobre el terreno subyacente. Este tipo de pavimento se caracteriza por su durabilidad, resistencia a la deformación y mantenimiento relativamente bajo en comparación con otros tipos de pavimentos. Se utiliza comúnmente en autopistas, aeropuertos y otras vías de alto tráfico (Arroyo Hilton, 2010).</p>	<p>Se caracteriza por su losa de concreto, cuyas especificaciones incluyen el espesor y dimensiones de la losa, la resistencia a la compresión del concreto, la presencia de refuerzo, la instalación de juntas de expansión y contracción, y el tipo de acabado superficial, conforme a normativas y estándares de diseño y construcción (Arroyo Hilton, 2010).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades mecánicas • Desgaste de pavimento rígido 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador dial de la resistencia a la compresión • Resistencia a la fatiga bajo tráfico simulado • Aparición de pulimiento de agregados • Tiempo hasta inicio de desgaste visible 	<ul style="list-style-type: none"> • $f'c$ - Kg/cm² • Nominal (Observación) • Nominal (Observación) • Segundos 	<p>Ficha de recolección de resultados.</p>
--	---	--	---	--	--	--

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

Internacionales

- a) Según Pucha Aguiñaca y Zárate Torres (2020), en su investigación: “Evaluación superficial de pavimentos rígidos en carreteras mediante ortoimágenes obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado”, el objetivo fue evaluar la condición superficial del pavimento rígido de un tramo de carretera, empleando ortoimágenes obtenidas mediante un VANT y la metodología del índice de condición del pavimento. La investigación correspondió al tipo de diseño no experimental cuantitativo y transversal. Los autores llegaron a la conclusión que, el uso de la técnica VANT es adecuada para detectar y medir deterioros en la superficie de carreteras, porque se obtiene información detallada y precisa de su condición. En la ingeniería de carreteras, la inspección del estado de la carretera es un proceso riguroso que requiere una imagen detallada y completa antes de tomar las adecuadas medidas de mantenimiento o rehabilitación. Se evaluó la condición superficial del pavimento rígido de un tramo de la carretera Catamayo-San Pedro de la Bendita, empleando ortoimágenes obtenidas mediante VANT y la metodología del PCI, que dio como resultado un estado del pavimento promedio “Bueno”.
- b) Castro Vásquez y Castro Vásquez (2020), en su trabajo de investigación denominado: “Aplicación práctica del método AASHTO-93 para el diseño de pavimento rígido”, tuvo por objetivo plantear el diseño estructural de las capas del pavimento rígido, mediante la utilización del método AASHTO-93, explicando detalladamente todos sus pasos para proporcionar una correcta comprensión del método. Se basó en una investigación descriptiva, llegando a la conclusión que, con la aplicación de este método se logrará diseñar correctamente cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento rígido, obteniendo los niveles de seguridad, comodidad y serviciabilidad adecuados para los volúmenes de tránsito actuales y futuros, garantizando su funcionalidad mientras cumple su vida útil; proporcionando un confort a los usuarios, así como también influirá



en un mejor desarrollo económico y social para el sector en donde sea implementada la estructura del pavimento

Nacionales

- a) Jaramillo Abrego y Ríos Ponce (2023), en su tesis de investigación denominado: “Propuesta de concreto con agregado grueso y fino de concreto reciclado para pavimentos especiales con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ para zonas costeras en Lima Metropolitana”, tuvo por objetivo elaborar un concreto de resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con agregados de concreto reciclado para pavimentos especiales para zonas costeras en Lima Metropolitana para reducir la extracción de agregados naturales. El nivel de investigación fue de grado descriptivo y el diseño es de tipo experimental, llegaron a la conclusión que, por un lado, el AGN y el AGCR tuvieron el mismo tamaño máximo nominal ($3/4''$), la curva granulométrica de ambos estuvo dentro de los límites inferior y superior del Huso 67. Existió una variación de 0.38 entre los módulos de fineza del AGCR y el AGN. Por otro lado, la curva granulométrica de los agregados finos cumplió con lo establecido en la NTP 400.037 (INACAL, 2014) a excepción, para ambos casos, de la malla N°100 en la cual el porcentaje que pasa es mayor al 10% (límite superior de la NTP 400.037). Del mismo modo, concluyen que el peso específico y el peso unitario de los ACR fueron menores con respecto a los AN. Esta diferencia se debió principalmente a la presencia de mortero en los ACR, el mortero es menos denso que la piedra natural, lo que contribuyó que los ACR tenga un peso específico y un peso unitario más bajo en comparación a los AN y con respecto al AGN presentó un porcentaje de absorción menor comparado con el AGCR.
- b) Ruiz Flores (2024) en su tesis: “Propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ con sustitución parcial de agregado grueso por concreto reciclado, Piura 2023”, el objetivo propuesto fue determinar la variación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ con sustitución parcial de agregado grueso por concreto reciclado, se utilizó el método científico, tipo aplicado, nivel explicativo y de diseño experimental, el muestreo fue no probabilístico y la muestra estuvo constituida por 30 probetas y 30 vigas planteados para las dosificaciones de 0%, 20%, 30%, 35% y 40% de adición de concreto reciclado en base a la sustitución parcial de agregado. Se examinaron los impactos del uso de concreto reciclado en las propiedades físicas y mecánicas en la construcción de losas. Se concluyó que al combinar los materiales reciclados con CR30%, se lograron resultados satisfactorios en diversos ensayos físicas



y mecánicos. Estos ensayos incluyeron mediciones de absorción de agua, permeabilidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. La mezcla CR30% fue la óptima en comparación con otras dosificaciones.

- c) Chávez López (2021) en su tesis: “Evaluación superficial de las causas de deterioro del pavimento rígido de las calles de la lotización 22 de octubre, Cajamarca”, cuyo objetivo estuvo orientado a evaluar las causas de deterioro del pavimento rígido de las calles de la lotización 22 de octubre, Cajamarca. Utilizó la metodología del índice de condición de pavimento (PCI), realizando el levantamiento topográfico de las calles de la Lotización 22 de octubre de la Ciudad de Cajamarca, encontró una topografía llana, cuyo levantamiento sirvió para determinar la ubicación de las losas de las calles en estudio. Se realizó el estudio de tráfico del cual se pudo determinar que, a pesar de tener bastante tráfico, el tráfico de vehículos pesados es bajo con relación a los automóviles, camionetas y mototaxis, motivo por el cual este volumen de tráfico no incidió como causa para el deterioro del pavimento. Los deterioros encontrados en las calles de la Lotización 22 de octubre de la Ciudad de Cajamarca son: Blowup-Buckling (1) en un 2.05%, Grieta de esquina (2) en 9.97%, Losa dividida (3) con un 7.33%, Escala (5) con un 2.05%, Grietas Lineales (8) con un 9.67%, Parche grande (9) con un 47.80%, Punzonamiento (14) con un 0.29% y Desconchamiento (16) con un 20.82%. La serviciabilidad del pavimento rígido de la zona estudiada se califica como Regular, con un PCI ponderado de 49.58. En el cuadro se describió la condición de cada tramo concluyéndose lo siguiente: El PCI ponderado de 49.50, indicó de forma generalizada que el pavimento ya había comenzado a mostrar fallas localizadas, es decir en ese punto debían iniciarse acciones de mantenimiento correctivo y/o preventivo de forma inmediata o en corto plazo.

Locales

- a) Roman Castañeda (2023), en su investigación: “Evaluación de las características físico-mecánicas del concreto elaborado con agregado reciclado de pavimentos, para su uso en construcciones –Abancay, 2022”, tuvo como objetivo descubrir en qué medida se puede reutilizar el material reciclado proveniente del pavimento rígido en la resistencia y el porcentaje óptimo para construcciones. Utilizó el diseño experimental, con un enfoque cuantitativo, en base a los resultados que se obtuvieron en laboratorio, determinó que la integración de los agregados gruesos y finos reciclados provenientes de corte de pavimento rígido de las conexiones domiciliarias de agua y desagüe eran



aprovechables significativamente para la reutilización el uso de construcciones, debido a que las resistencias alcanzadas habían cumplido con los parámetros establecidos en la NTP.

- b) Valenzuela Rivas (2023) en su investigación: “Influencia de concreto reciclado de demoliciones de pavimentos rígidos como agregado grueso para la elaboración de buzones de alcantarillado, Abancay 2022”, tuvo como objetivo determinar la influencia del concreto reciclado de demoliciones de pavimento rígido como agregado grueso en la elaboración de buzones de alcantarillado, para la metodología utilizó la investigación aplicada-deductiva, llegando a la conclusión que, la sustitución parcial del agregado grueso producto del reciclado de concreto de demoliciones de pavimentos rígidos si influía en el comportamiento del concreto nuevo elaborado, para cada caso de sustitución del agregado grueso (20%, 30%, 40% y 50%) en el diseño de mezcla así como también en la resistencia a la compresión, la proporciones de AGR, agregado grueso natural, agregado fino y agua de mezcla, fueron diferente para cada del diseño de mezcla esto debido a sus propiedades físico-mecánicas de cada elemento. Se reflejó en la resistencia a la compresión alcanzada al día 28, que cada vez que el porcentaje de sustitución del AGR era mayor, la resistencia a la compresión promedio alcanzada al día 28 iba disminuyendo, pero a pesar de ello estas resistencias fueron mayores a la resistencia promedio requerida (f'_{cr}), lo cual concluye que estaban dentro de lo establecido para el diseño del concreto $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$.



3.2 Marco teórico

3.2.1 Pavimentos

La configuración completa de las capas que componen la subrasante, sub-base, base y capa superior, ubicadas sobre la superficie del terreno y diseñadas para soportar el peso de los vehículos que transitan sobre ella (Coronado Iturbide, 2002).

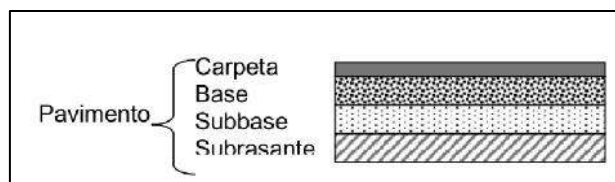


Figura 1 — Estructura del pavimento

FUENTE: Manual centroamericano para diseño de pavimentos (Coronado Iturbide, 2002)

Un pavimento se refiere a la estructura integral de las capas de subrasante, sub-base, base y carpeta colocadas sobre la superficie del terreno, diseñadas para soportar las cargas vehiculares y proporcionar una superficie de rodadura adecuada (VERGARA, 2010).

3.2.1.1 Elementos estructurales que integra un pavimento

Vergara (2010) en su libro: Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos, identifica los elementos estructurales que integran un pavimento, los cuales incluyen:

a) Carpeta de rodadura

Es la capa superficial del pavimento que está en contacto directo con los neumáticos de los vehículos y que proporciona la superficie de rodadura. Esta capa se diseña para resistir el desgaste, proporcionar adherencia y garantizar la comodidad y seguridad del tránsito vehicular (Vergara, 2010).

b) Base

La base del pavimento es una capa estructural diseñada para distribuir las cargas del tráfico de manera uniforme sobre el suelo subyacente. Proporciona resistencia estructural al pavimento y contribuye a la estabilidad y durabilidad del sistema de pavimentación (Vergara, 2010).



c) Sub - Base

La subbase es una capa ubicada debajo de la base del pavimento que actúa como soporte para la base y la carpeta de rodadura. Su función principal es mejorar las características de soporte del suelo subyacente, proporcionar drenaje adecuado y reducir el riesgo de deformaciones del pavimento (Vergara, 2010).

d) Sub-rasante.

La sub-rasante es la capa de suelo natural ubicada debajo de la sub-base. Constituye el terreno original sobre el cual se construye el pavimento y debe tener la capacidad de soportar las cargas del tráfico sin deformaciones excesivas. La calidad y las propiedades del suelo de la sub-rasante influyen significativamente en el rendimiento y la vida útil del pavimento (Vergara, 2010).

3.2.1.2 Tipos de pavimentos

a) Pavimento flexible

El pavimento flexible se compone de múltiples capas de materiales bituminosos, como asfalto o concreto asfáltico. Estas capas, que incluyen una carpeta de rodadura, base y sub-base, se diseñan para proporcionar flexibilidad y capacidad de deformación bajo cargas vehiculares. La flexibilidad de este tipo de pavimento permite una distribución más uniforme de las cargas a lo largo de la estructura, lo que lo hace adecuado para áreas sujetas a asentamientos del suelo y variaciones climáticas (Vergara, 2010).

Ventajas:

- **Adaptabilidad:** El pavimento flexible puede adaptarse mejor a terrenos con movimientos y asentamientos del suelo, lo que lo hace ideal para áreas con suelos no uniformes.
- **Costo inicial:** Por lo general, el pavimento flexible tiene un costo inicial de construcción más bajo en comparación con el pavimento rígido, lo que lo convierte en una opción económica para proyectos de carreteras y calles.



- **Mantenimiento:** Aunque requiere mantenimiento regular, como sellado de grietas y recubrimiento de la capa de rodadura, el mantenimiento del pavimento flexible tiende a ser menos costoso y más fácil de realizar que el del pavimento rígido.

Desventajas:

- **Durabilidad:** El pavimento flexible tiende a tener una vida útil más corta en comparación con el pavimento rígido, ya que la capa de rodadura puede desgastarse con rapidez, especialmente en áreas de tráfico intenso.
- **Sensibilidad climática:** Las condiciones climáticas extremas, como cambios de temperatura y humedad, pueden afectar la durabilidad y el rendimiento del pavimento flexible, aumentando la necesidad de mantenimiento y reparación.

b) Pavimento rígido.

El pavimento rígido se compone principalmente de losas de concreto, que se colocan sobre una base sólida de material granular. Estas losas de concreto son reforzadas con barras de acero, proporcionando una superficie de rodadura resistente y duradera que puede soportar cargas pesadas y tráfico intenso. El pavimento rígido se utiliza comúnmente en autopistas, carreteras principales y aeropuertos debido a su alta resistencia y durabilidad (Vergara, 2010).

Ventajas:

- **Durabilidad:** El pavimento rígido es conocido por su durabilidad excepcional y su capacidad para soportar cargas pesadas sin deformarse permanentemente.
- **Bajo mantenimiento:** Requiere menos mantenimiento que el pavimento flexible, ya que las losas de concreto tienen una vida útil más larga y son menos propensas a agrietarse y deformarse.
- **Resistencia:** Es menos susceptible al daño causado por cambios climáticos y condiciones ambientales adversas, lo que lo hace ideal para áreas con climas extremos y tráfico intenso.

Desventajas:

- **Costo inicial:** El pavimento rígido tiende a tener un costo inicial de construcción más alto en comparación con el pavimento flexible, debido al uso de concreto y refuerzo de acero.
- **Reparaciones complejas:** Las reparaciones en el pavimento rígido pueden ser más complicadas y costosas que en el pavimento flexible, especialmente cuando se trata de reemplazar losas dañadas o reparar grietas y juntas.

3.2.1.3 Elementos estructurales que integran un pavimento flexible

(Coronado Iturbide, 2002) en su libro Manual centroamericano para diseño de pavimentos toma las siguientes consideraciones para el diseño:

- **Clasificación de calles y carreteras:**
En esta etapa, se clasifican las calles y carreteras en función de su función, tráfico esperado y características geométricas. Esto permite establecer diferentes estándares y requisitos de diseño para cada tipo de vía, asegurando que se adapten adecuadamente a su propósito y nivel de servicio requerido (Coronado Iturbide, 2002).
- **Criterios de diseño:**
Son las reglas y estándares que guían el proceso de diseño del pavimento, estableciendo los requisitos mínimos de resistencia, durabilidad, seguridad y funcionalidad que deben cumplir las estructuras pavimentadas. Estos criterios pueden variar según la clasificación de la vía y las condiciones locales, pero generalmente se basan en normativas y prácticas de ingeniería reconocidas (Coronado Iturbide, 2002).
- **Características de los materiales:**
Implica la evaluación de las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del pavimento, como el asfalto, el concreto, los agregados y los materiales de base y sub-base. Se consideran aspectos como la resistencia, la durabilidad, la adherencia, la deformabilidad y la disponibilidad de los materiales para obtener un rendimiento óptimo del pavimento (Coronado Iturbide, 2002).



- Efectos de la temperatura en la estructura de pavimento:
Este aspecto se refiere al estudio de cómo las fluctuaciones de temperatura afectan el comportamiento y la integridad del pavimento. Las variaciones de temperatura pueden causar expansiones y contracciones en los materiales del pavimento, lo que puede provocar grietas, deformaciones y otros deterioros si no se tienen en cuenta adecuadamente durante el diseño y la construcción (Coronado Iturbide, 2002).
- Costos del ciclo de vida:
Se refiere a la evaluación de los costos totales asociados con el pavimento durante su vida útil, incluidos los costos de construcción, mantenimiento, rehabilitación y reemplazo. Esta consideración ayuda a tomar decisiones informadas sobre la selección de materiales y diseños que optimicen los costos a largo plazo y maximicen la eficiencia y la durabilidad del pavimento (Coronado Iturbide, 2002).

3.2.1.4 Diseño de espesores

(Coronado Iturbide, 2002) en su libro Manual centroamericano para diseño de pavimentos plantea lo siguiente:

El diseño de pavimentos, tanto flexibles como rígidos, implica inicialmente la determinación del grosor de la estructura, considerando tanto el nivel de tráfico como las características de los materiales utilizados. La duración de un pavimento está influenciada por la pérdida de su capacidad para proporcionar un servicio adecuado a lo largo del tiempo.

Pavimentos rígidos

Para el diseño de espesores de pavimentos rígidos según (Coronado Iturbide, 2002), se usarán dos tipos de métodos, los cuales son los siguientes:

a) Método de AASHTO

La AASHTO proporciona clasificaciones específicas para diferentes tipos de pavimentos, considerando factores como el tipo de tráfico, el clima y las características del terreno. (Coronado Iturbide, 2002) Plantea las siguientes consideraciones:



- **Análisis de tránsito:** Se realiza un análisis detallado del volumen y tipo de tráfico que experimentará el pavimento durante su vida útil, lo que ayuda a determinar los espesores necesarios de las capas de pavimento.
- **Propiedades del suelo:** Se consideran las propiedades del suelo subyacente para evaluar su capacidad de soporte y su respuesta a las cargas del tráfico, lo que influye en el diseño de la estructura del pavimento.
- **Materiales de construcción:** Se seleccionan cuidadosamente los materiales para cada capa del pavimento, teniendo en cuenta su resistencia, durabilidad y disponibilidad local.
- **Espesor de pavimento:** Se determina el espesor adecuado de cada capa del pavimento utilizando métodos específicos de la AASHTO, que tienen en cuenta las características del tráfico, las propiedades de los materiales y otros factores de diseño.
- **Drenaje:** Se considera el drenaje adecuado del pavimento para evitar problemas como la acumulación de agua y el deterioro prematuro del material.
- **Evaluación de la vida útil:** Se realiza una evaluación de la vida útil esperada del pavimento en función de las condiciones de diseño y las cargas previstas, lo que ayuda a determinar la necesidad de mantenimiento futuro.

Estas consideraciones son fundamentales para desarrollar un diseño de pavimento robusto y resistente que cumpla con los estándares de rendimiento y seguridad establecidos por la AASHTO.

$$\text{Log}_{10}W_{82} = Z_r S_o + 7.36 \text{Log}_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\text{Log}_{10} \left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{10}}{(D + 25.4)^{1.48}}} + (4.22 - 0.32P_i) \times \text{Log}_{10} \left[\frac{M_r C_{dr} (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J \left(\frac{0.09D^{0.75}}{(E_c/k)^{0.26}} - \frac{7.38}{(E_c/k)^{0.26}} \right)} \right]$$

En donde:

- W_{82} = Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas⁵, a lo largo del periodo de diseño.
- Z_r = Desviación normal estándar
- S_o = Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento
- D = Espesor de pavimento de concreto, en milímetros
- ΔPSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial y final
- P_i = Índice de serviciabilidad o servicio final
- M_r = Resistencia media del concreto (en Mpa) a flexotracción a los 28 días (método de carga en los tercios de la luz)
- C_{dr} = Coeficiente de drenaje
- J = Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas
- E_c = Módulo de elasticidad del concreto, en Mpa
- k = Módulo de reacción, dado en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante) en la que se apoya el pavimento de concreto

Figura 2 — Método AASHTO

FUENTE: Manual centroamericano para diseño de pavimentos (Coronado Iturbide, 2002)

b) Método del PCA

El método del Portland cement association (PCA) se aplica a varios tipos de pavimentos rígidos, incluyendo el concreto simple, con varillas de transferencia de carga, reforzado y de refuerzo continuo. Las especificaciones para el diseño consideran la transferencia de cargas, el uso de hombros de concreto o asfalto, y criterios de fatiga y erosión. Se evalúan factores como la resistencia a la flexión del concreto y la capacidad de soporte de la subrasante o subbase. La selección del espesor del pavimento depende de diversos factores del sitio y las condiciones de carga. (Coronado Iturbide, 2002) plantea las siguientes consideraciones:

- **Tipo de pavimento:** Se consideran varios tipos de pavimentos rígidos, como concreto simple sin refuerzo, concreto simple con varillas de transferencia de carga (dovelas), concreto reforzado con acero de refuerzo y pavimentos de refuerzo continuo.
- **Transferencia de carga:** Se evalúa cómo se logra la transferencia de carga en función del tipo de pavimento, ya sea a través del corte de juntas entre losas contiguas, el uso de varillas lisas en las juntas de contracción o el refuerzo de acero dentro de las losas.



- **Consideraciones de diseño:** Se deben tener en cuenta factores como el uso de hombros de concreto o asfalto para reducir esfuerzos de flexión y deflexiones en los bordes de las losas, así como la necesidad de subbases estabilizadas para minimizar esfuerzos en juntas y fisuras.
- **Cargas vehiculares:** Se consideran diferentes tipos de carga vehicular, incluyendo camiones con ejes tridem, para asegurar que el pavimento pueda soportar cargas de manera efectiva.
- **Objetivo del diseño:** El diseño se orienta a garantizar la durabilidad y el desempeño óptimo del pavimento a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta las condiciones específicas del sitio y las necesidades de tráfico.
- **Criterios de diseño:** Se establecen criterios de diseño para la fatiga y la erosión, con el fin de mantener los esfuerzos dentro de los límites de seguridad y limitar los efectos de las deflexiones en el pavimento.

3.2.1.5 Tipos de fallas y deterioro en pavimentos rígidos

(Vergara 2010) en su libro: Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos, identifica las fallas de la siguiente manera:

a) Juntas:

Deficiencias del sellado: El deterioro del sello de las juntas puede permitir la entrada de materiales incompresibles y/o una cantidad significativa de agua superficial. Los problemas comunes son el endurecimiento, el despegado de las paredes, la fluencia fuera de la caja, la falta de sellado, la incrustación de materiales extraños y el crecimiento de vegetación. Las posibles causas incluyen el uso de productos de mala calidad, envejecimiento, colocación incorrecta del sellado, diseño deficiente de la caja, procedimientos de instalación inadecuados, bermas sin pavimentar y materiales caídos de vehículos.

Los niveles de severidad se clasifican en:

Baja: Menos del 5% de la longitud de la junta con problemas de sellado.

Media: Entre el 5% y el 25% de la longitud de la junta con problemas de sellado.

Alta: Más del 25% de la longitud de la junta con problemas de sellado.



Para medir el deterioro:

- Juntas transversales: Identificar cuántas están deterioradas y el nivel de severidad de cada una.
- Juntas longitudinales: Contar los tramos deteriorados (mínimo 1 m de longitud cada uno) y medir su longitud total y la longitud deteriorada, especificando el nivel de deterioro.

b) Grietas.

Las grietas de losa se forman en la superficie de las placas de concreto debido a la contracción, expansión y cargas del tráfico. Además, las juntas mal selladas permiten la infiltración de agua y otros materiales dañinos. Entre los tipos de grietas tenemos las longitudinales y transversales.

c) Deterioro superficial.

El deterioro superficial en el pavimento rígido se refiere a los daños que afectan la capa de rodadura sin degradar el material de la capa base. En otras palabras, es cuando la superficie del pavimento muestra signos de desgaste, como pérdida de textura, fisuras o pequeñas irregularidades, pero la estructura subyacente no está comprometida. Este tipo de deterioro puede afectar la fricción entre los neumáticos y la carretera, lo que influye en la seguridad y comodidad al conducir.

d) Otros deterioros

A continuación, se tiene una lista de otros posibles deterioros correspondientes al desgaste del pavimento rígido.

- Levantamiento localizado.
- Escalonamiento de juntas y grietas.
- Descenso de la berma.
- Separación entre berma y pavimento.
- Parches deteriorados.
- Surgencia de finos.
- Textura inadecuada.
- Fracturación múltiple



3.2.2 Suelos limo-gravosos: características y comportamiento

El análisis y estudio del suelo son esenciales tanto para identificar sus propiedades para el adecuado diseño de la estructura del pavimento (MTC, 2014).

a) Exploración de suelos y rocas

El (MTC, 2014) indica que AASHTO para la investigación y muestreo de suelos y rocas recomienda la aplicación de la norma T 86-90 que equivale a la ASTM D420-69; para el presente manual, se aplicará para todos los efectos el procedimiento establecido en las normas MTC E 101, MTC E 102, MTC E 103 y MTC E 104, que recoge los mencionados alcances de AASHTO y ASTM.

Para la exploración de suelos y rocas se deberá efectuarse lo siguiente:

- Reconocimiento del terreno: Se realiza un reconocimiento del terreno a lo largo de la vía y en las zonas de préstamo, esto ayuda a identificar diferentes tipos de suelo y a definir los estratos superficiales.
- Programa de exploración e investigación de campo: Incluirá la ejecución de calicatas o pozos exploratorios, cuyo espaciamiento dependerá fundamentalmente de las características de los materiales subyacentes en el trazo de la vía. Generalmente están espaciadas entre 250 m y 2,000 m, pero pueden estar más próximas dependiendo de puntos singulares.
- Obtención de muestras representativas: Se extraen muestras de suelo o roca de cada estrato. El tamaño y tipo de muestra dependen de los ensayos a realizar y del equipo de ensayo (MTC E 101).
- Ensayos en laboratorio: Se realizan pruebas en las muestras obtenidas, para consignar en forma gráfica y escrita los resultados obtenidos, asimismo se determinará un perfil estratigráfico de los suelos (eje y bordes), debidamente acotado en un espesor no menor a 1.50 m, teniendo como nivel superior la línea de sub rasante del diseño geométrico vial y debajo de ella, espesores y tipos de suelos del terraplén y los del terreno natural, con indicación de sus propiedades o características y los parámetros básicos para el diseño de pavimentos (MTC, 2014).
- Perfil estratigráfico: Para obtener el perfil estratigráfico en zonas donde existirán cortes cerrados, se efectuarán métodos geofísicos de prospección que permitan determinar la naturaleza y características de los suelos y/o roca subyacente (MTC, 2014).



b) Caracterización de la sub rasante

Para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales en la subrasante, se llevarán mediante calicatas con una profundidad mínima de 1.5 metros. El número mínimo de calicatas se determinará según lo indicado en la Tabla 2. Estas calicatas se ubicarán longitudinalmente y de manera alternada dentro de la franja que abarca el ancho de la calzada, a distancias aproximadamente iguales. Además, si es necesario, se intensificará la exploración en puntos específicos a lo largo del trazado de la vía, según se describe en el numeral Tabla 2 según (MTC, 2016)

Tabla 2— Número de calicatas para exploración de suelos

Tipo de carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km • Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km • Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km 	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras duales o multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km • Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km • Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km 	
Carreteras de primera clase: IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	4 calicatas x km	
Carreteras de segunda clase: IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	3 calicatas x km	
Carreteras de tercera clase: IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	2 calicatas x km	
Carreteras de bajo volumen de tránsito: carreteras con un IMDA ≤ 200 veh/día	1.50 m respecto al nivel de sub rasante del proyecto	1 calicata x km	

Fuente: Manual de ensayo de materiales del MTC (MTC 2016)



La Tabla 2 establece el número de calicatas necesarios para la construcción de nuevos pavimentos, reconstrucción y mejoramiento.

Registros de excavación

(MTC, 2014) indica que de los estratos encontrados en cada una de las calicatas se obtendrán muestras representativas, las que deben ser descritas e identificadas mediante una tarjeta con la ubicación de la calicata con coordenadas y luego colocadas en bolsas de polietileno para su traslado al laboratorio. Se extraerán muestras representativas para realizar ensayos de Módulos de Resiliente (MR) o ensayos de CBR para correlacionarlos con ecuaciones de MR, la cantidad de ensayos dependerá del tipo de carretera (ver Tabla 3).

Tabla 3— Número de Ensayos MR y CBR

Tipo de carretera	N° MR y CBR
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	- Calzada 2 carriles por sentido: 1 MR cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido. - Calzada 3 carriles por sentido: 1 MR cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido. - Calzada 4 carriles por sentido: 1 MR cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido.
Carreteras duales o multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	- Calzada 2 carriles por sentido: 1 MR cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido. - Calzada 3 carriles por sentido: 1 MR cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido. - Calzada 4 carriles por sentido: 1 MR cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido.
Carreteras de primera clase: carreteras con un IMDA entre 4000 - 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	- 1 MR cada 3 km y 1 CBR cada 1 km
Carreteras de segunda clase: carreteras con un IMDA entre 2000 - 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	- 1 MR cada 3 km y 1 CBR cada 1 km
Carreteras de segunda clase: carreteras con un IMDA entre 2000 - 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	- Cada 1.5 km se realizará un CBR.
Carreteras de tercera clase: carreteras con un IMDA entre 400 - 201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	- Cada 2 km se realizará un CBR.
Carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	- Cada 3 km se realizará un CBR

Fuente: Manual de ensayo de materiales del MTC (MTC 2016)



La Tabla 3 establece el número de ensayos necesario para la construcción de nuevos pavimentos, mejoramiento y rehabilitación. Sin embargo, en estudios de factibilidad, se realizarán el doble de los ensayos indicados en ese cuadro, considerando una longitud mayor (MTC, 2016).

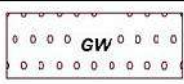


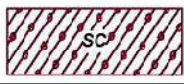




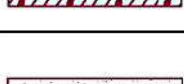
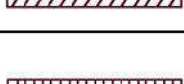


Para el caso de refuerzo o rehabilitación de pavimentos, se tendrá en cuenta las mediciones deflectométricas y la sectorización de comportamiento homogéneo, efectuando por cada sector homogéneo (mínimo dos CBR) en correspondencia con los puntos de ensayo, un CBR donde la deflexión ha sido máxima y el segundo CBR donde la deflexión es cercana a la deflexión característica. Los ensayos de MR o de CBR efectuados en los estudios de preinversión, formarán parte del estudio definitivo, resultando que para el definitivo será sólo necesario efectuar ensayos complementarios a los de estudios de preinversión, los mismos que sirven eventualmente, además como comprobatorios. En caso el tramo tenga una longitud menor a la indicada, en la Tabla 3, para el número de MR o de CBR a realizar, la cantidad de ensayos indicada en el cuadro debe ser tomada como mínima. Se podrán realizar ensayos in situ, como el CBR en el terreno según ensayo MTC E 133-2000 y el ensayo mediante Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC), cuya principal limitación se presenta en las mediciones de suelos con bolonería, pero resulta muy útil en suelos finos o blandos, donde precisamente se requiere de mayores evaluaciones del suelo y sus estratos, por lo que en este caso debe efectuarse este tipo de ensayos que permitirá tramificar mejor la capacidad soporte de la sub rasante. La clasificación se efectuará necesariamente por AASHTO y SUCS, se utilizarán los signos convencionales establecidas en la Figura 3 y Figura 4:

Simbología	Clasificación	Simbología	Clasificación
	A - 1 - a		A - 5
	A - 1 - b		A - 6
	A - 3		A - 7 - 5
	A - 2 - 4		A - 7 - 6
	A - 2 - 5		Materia Orgánica
	A - 2 - 6		Roca Sana
	A - 2 - 7		Roca Desintegrada
	A - 4		

Figura 3 — Signos convencionales para perfil de calicatas según AASHTO

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)



	Grava bien graduada, mezcla de grava con poco o nada de materia fina, variación en tamaños granulares		Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy bajo
	Grava mal granulada, mezcla de arena-grava con poco o nada de material fino		Arena arcillosa, mezcla de arena-arcillosa
	Grava limosa, mezcla de grava, arena limosa		Limo orgánico y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa o arcillosa o limo arcilloso con ligera plasticidad
	Grava arcillosa, mezcla de grava-arena-arcilla; grava con material fino cantidad apreciable de material fino		Limo orgánico de plasticidad baja o mediano, arcilla grava, arcilla arenosa, arena limosa, arcilla magra
	Arena bien graduada, arena con grava, poco o nada de material fino. Arena limpia poco o nada de material fino, amplia variación en tamaños granulares y cantidades de partículas en tamaños intermedios		Limo orgánico y arcilla limosa orgánica, baja plasticidad
	Arena mal graduada con grava poco o nada de material fino. Un tamaño predominante o una serie de tamaños con ausencia de partículas intermedias		Limo inorgánico, suelo fino gravoso o limoso, micacea o diatometacea, limo elástico


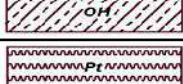
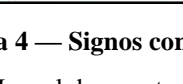
	Arcilla inorgánica de elevada plasticidad, arcilla gravosa
	Arcilla orgánica de mediana o elevada plasticidad, limo orgánico
	Turba, suelo considerablemente orgánico

Figura 4 — Signos convencionales para perfil de calicatas según SUCS

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)

Propiedades por tomar en cuenta:

a) Granulometría:

El análisis granulométrico tiene la finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño de acuerdo con el tamaño de las partículas de suelo, se definen los siguientes términos (MTC, 2013).

Tabla 4— Clasificación de suelos según tamaño de partículas

Tipo de material	Tamaño de las partículas
Grava	75 mm – 4.75 mm
Arena - gruesa	4.75 mm – 2.00 mm
Arena - media	2.00 mm – 0.425 mm
Arena - fina	0.425 mm – 0.075 mm
Limo	0.075 mm – 0.005 mm
Arcilla	Menor a 0.005 mm

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)



b) La plasticidad:

Es la característica que permite a los suelos mantenerse hasta un cierto nivel de humedad sin descomponerse. Por lo cual, la plasticidad de un suelo no se basa en los componentes gruesos que posee, sino exclusivamente en sus componentes finos, por lo que es necesario determinar los límites de Atterberg (MTC, 2013).

Estos límites de Atterberg que miden la cohesión del suelo son: el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción, se define límite líquido (LL), cuando el suelo pasa del estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse, límite plástico (LP), cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe (MTC, 2013).

Límite de contracción (retracción), cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad. Además del LL y del LP, una característica a obtener es el índice de plasticidad IP que se define como la diferencia entre LL y LP (MTC, 2013c):

$$IP = LL - LP$$

El índice de plasticidad nos permite identificar la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica y permite clasificar bastante bien un suelo, como se visualiza en la Tabla 5:

Tabla 5— Clasificación de suelos según índice de plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20	Media	Suelos arcillosos
IP > 7		
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No plástico	Suelos exentos de arcilla

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)

c) Equivalente de arena:

Es la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso en los suelos o agregados finos (ensayo MTC E 114). Es el ensayo que da resultados parecidos a los obtenidos mediante la determinación de los límites de Atterberg, aunque menos preciso. Tiene la ventaja de ser muy rápido y fácil de efectuar. El valor de Equivalente de Arena (EA) es un indicativo de la plasticidad del suelo.



Tabla 6— Clasificación de suelos según equivalente de arena

Equivalente de arena	Característica
si EA > 40	El suelo no es plástico, es arena
Si 40 > EA > 20	El suelo es poco plástico y no heladizo
si EA < 20	El suelo es plástico y arcilloso

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)

d) Índice de grupo:

El índice de grupo está definido con la siguiente fórmula:

$$IG = 0.2(a) + 0.005(ac) + 0.01(bd)$$

Donde:

- a = F-35 (F: Fracción del porcentaje que pasa el tamiz N°200 - 74 micras)
- b = F-15 (F: Fracción del porcentaje que pasa el tamiz N°200 - 74 micras)
- c = LL - 40 (LL: límite líquido)
- d = IP-10 (IP: índice plasticidad)

El valor del índice de grupo es entero positivo, que está comprendido entre 0 y 20 o más. Cuando el IG es negativo, se toma como cero (MTC 2013c).

Tabla 7— Clasificación de suelos según índice de grupo

Índice de grupo	Suelo de subrasante
IG > 9	Muy pobre
IG está entre 4 a 9	Pobre
IG está entre 2 a 4	Regular
IG está entre 1 - 2	Bueno
IG está entre 0 - 1	Muy bueno

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)

e) Humedad natural:

Otra característica importante de los suelos es su humedad natural; puesto que la resistencia de los suelos de sub rasante, en especial de los finos, se encuentra directamente asociada con las condiciones de humedad y densidad que estos suelos presenten. La determinación de la humedad natural (ensayo MTC E 108) permitirá comparar con la humedad óptima que se obtendrá en los ensayos Proctor para obtener el CBR del suelo (ensayo MTC E 132). Sí la humedad natural resulta igual o inferior a la humedad óptima, el Proyectista propondrá la compactación normal del suelo y el aporte de la cantidad conveniente de agua. Sí la humedad natural es superior a la humedad óptima y según la

saturación del suelo, se propondrá, aumentar la energía de compactación, airear el suelo, o reemplazar el material saturado.

f) Clasificación de los suelos:

Determinadas las características de los suelos, según los acápites anteriores, se podrá estimar con suficiente aproximación el comportamiento de los suelos, especialmente con el conocimiento de la granulometría, plasticidad e índice de grupo; y, luego clasificar los suelos. La clasificación de los suelos se efectuará bajo el sistema mostrado en el cuadro 4.9. Esta clasificación permite predecir el comportamiento aproximado de los suelos, que contribuirá a delimitar los sectores homogéneos desde el punto de vista geotécnico. A continuación, se presenta una correlación de los dos sistemas de clasificación más difundidos, AASHTO y ASTM (SUCS):

Tabla 8— Correlación de tipos de suelos AASHTO – SUCS

CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO AASHTO M-145	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS ASTM D-2487
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)



Tabla 9— Clasificación de los suelos método AASHTO

Clasificación general	Suelos granulosos 35% máximo que pasa por tamiz de 0.08 mm							Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0.08 mm				
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
Símbolo	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6
Análisis granulométrico												
% que pasa por el tamiz de: 2 mm	máx. 50											
% que pasa por el tamiz de: 0.5 mm	máx. 30	máx. 50	mín. 50									
% que pasa por el tamiz de: 0.08 mm	máx. 15	máx. 25	máx. 10	máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35
Límites Atterberg												
Límite líquido			-	máx. 40	mín. 40	máx. 40	mín. 40	máx. 40	mín. 40	máx. 40	mín. 40	mín. 40
Índice de plasticidad	máx. 6	máx. 6		máx. 10	máx. 10	mín. 10	mín. 10	máx. 10	IP>LL-30	mín. 10	IP<LL-30	IP>LL-30
Índice de grupo	0	0	0	0	0	máx. 4	máx. 4	máx. 8	máx. 12	máx. 16	máx. 20	máx. 20
Tipo de material	Piedras, gravas y arena	Piedras, gravas y arena	Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas	Gravas y arenas limosas o arcillosas	Gravas y arenas limosas o arcillosas	Gravas y arenas limosas o arcillosas	Suelos limosos	Suelos limosos	Suelos arcillosos	Suelos arcillosos	Suelos arcillosos
Estimación general del suelo como subrasante	De excedente a bueno						De pasable a malo					

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2013)

g) Ensayo CBR

(MTC, 2014) menciona que la prueba CBR mide la resistencia al corte del subsuelo y puede evaluar la calidad de la base del pavimento, la subbase y la subrasante. Una vez que los suelos hayan sido clasificados por los sistemas AASHTO y SUCS, los métodos descritos producirán perfiles estratigráficos para cada homogéneo o área de estudio a partir de los cuales se determinarán los procedimientos de prueba prescritos como los valores de soporte o resistencia de tierra reducidos al 95% MDS (Máxima densidad seca) y percepción de carga 2,54 mm (MTC, 2014). Para obtener información sobre la recolección de valores de CBR para el diseño de la subrasante, se debe considerar lo siguiente:

- En los sectores con 6 o más valores de CBR realizados por tipo de suelo representativo o por sección de características homogéneas de suelos, se determinará el valor de CBR de diseño de la sub rasante considerando el promedio del total de los valores analizados por sector de características homogéneas (MTC, 2014).
- En las áreas con menos de 6 valores de CBR realizados por tipo de suelo representativo o por sección de características similares de suelos, se establecerá el valor de CBR de diseño de la sub rasante basándose en los siguientes criterios:
Si los valores se asemejan, considerar el valor promedio.
Si los valores no se asemejan, considerar valor crítico o en todo caso subdividir la sección a fin de agrupar subsectores con valores de CBR similares y definir el valor promedio. La longitud de los subsectores no será menor a 100 m. Son valores de CBR similares los que se encuentran dentro de un determinado rango de categoría de sub rasante, según Tabla 10 (MTC, 2014).
- Una vez establecido el valor del CBR de diseño para cada sector con características similares, se determinará a qué categoría de subrasante corresponde dicho sector o subtramo, de acuerdo con la siguiente Tabla 10.



Tabla 10 — Categorías de sub rasante

Categorías de sub rasante	CBR
S0: Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S2: Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S3: Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S4: Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S5: Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

FUENTE: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC 2014)

3.2.3 Concreto

El concreto consiste en proporciones adecuadas de agregado fino, agregado grueso y cemento. Además de obtener materiales de alta calidad y, de manera adecuada, la producción de concreto de alta calidad también depende de una serie de factores, como transporte, mezcla, descarga y finalmente, el proceso de curado (Harmsen, 2002).

(Pasquel, 1999) nos da a conocer, que es un error pensar que la Tecnología del Concreto está limitada únicamente a los profesionales que trabajan en laboratorios o diseñan mezclas. En realidad, esta disciplina involucra a todos los profesionales de la Ingeniería Civil en el proceso de construcción.

Aire = 1 % a 3 %
Cemento = 7 % a 15 %
Agua = 15 % a 22 %
Agregados = 60 % a 75 %

Figura 5 — Proporciones en volumen de los componentes

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág. 14)

3.2.3.1 Estructura interna del concreto

“En la imagen se observar el esquema de la estructura interna del concreto, básicamente está conformada por el cemento y agua, que llega a mezclarse con los agregados finos, grueso, así como también aire y vacíos. Un concepto que surge a partir del esquema descrito es que la estructura del concreto no es homogénea, y en por lo tanto no es isotrópica, lo cual no mantiene sus mismas propiedades en diferentes direcciones” (Pasquel, 1999).

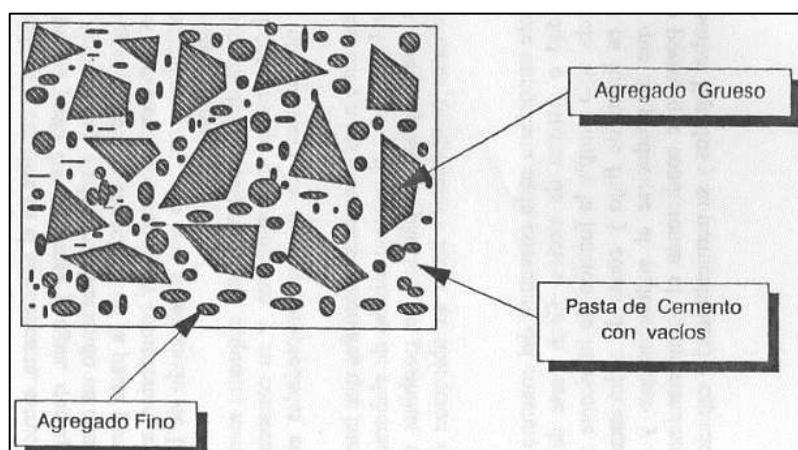


Figura 6 — Esquema de la estructura del concreto

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág. 130).

3.2.3.2 Propiedades principales del concreto endurecido

a) Elasticidad.

“Es la capacidad de deformarse que tiene el concreto bajo carga, sin que este llegué a deformarse permanentemente. Así mismo podemos mencionar que el concreto no es un material elástico, ya que este no tiene un comportamiento lineal según el diagrama carga vs deformación en compresión, sin embargo, normalmente lo definimos como el módulo de elasticidad estático del concreto” (Pasquel, 1999).

b) Resistencia a compresión.

“Es la capacidad de soportar cargas y esfuerzos, en donde tiene un mejor comportamiento cuando trabaja a compresión que a tracción, debido a las características adherentes de la pasta de cemento. Esto se da en cuando existe una adecuada relación agua/cemento” (Pasquel, 1999).



c) Extensibilidad.

“Es la propiedad que tiene el concreto de deformarse sin llegar a agrietarse. Así mismo este se define según la deformación unitaria máxima que puede tomar el concreto sin que ocurran asunciones. Depende de la elasticidad y del denominado flujo plástico, constituido por la deformación que tiene el concreto bajo carga constante en el tiempo” (Pasquel, 1999).

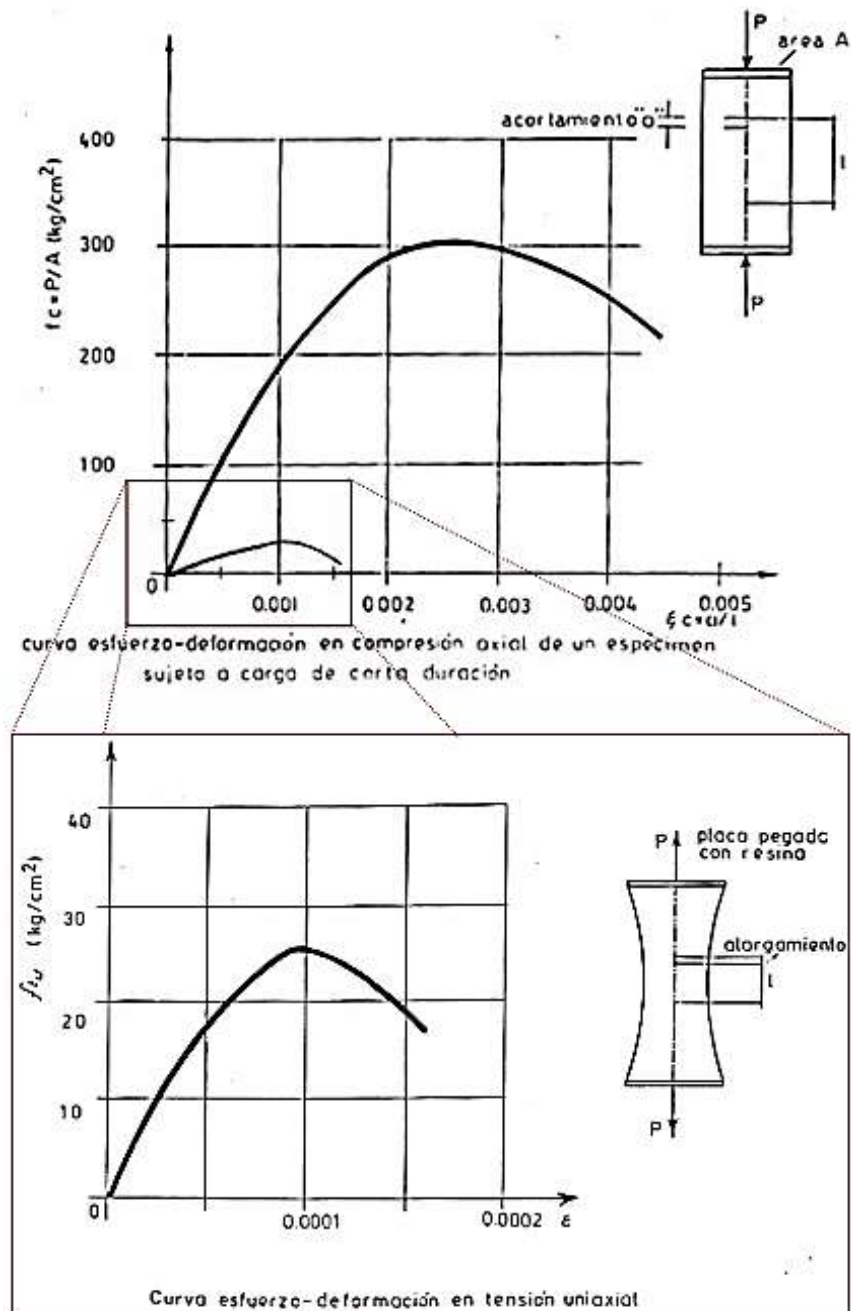


Figura 7 — Gráfica esfuerzo - deformación del concreto simple
 FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel, 1999)



3.2.3.3 Cemento

Según (Harmsen, 2002) “Para obtener el cemento se hace la pulverización del clinker el cual es producido por la calcinación hasta la fusión incipiente de materiales calcáreos y arcillosos”. Existen distintos tipos de cemento, ellos son:

- Tipo I, son de uso general y no tienen características específicas.
- Tipo II, proporcionan un moderado calor de hidratación y resistencia ante el ataque de los sulfatos.
- Tipo III, ofrece un resistencia temprana y elevado calor de hidratación.
- Tipo IV, cuentan con un bajo calor de hidratación.
- Tipo V, proporcionan una elevada resistencia ante el ataque de sulfatos.

Componente Químico		Procedencia Usual
95%	Oxido de Calcio (CaO)	Rocas Calizas
	Oxido de Silice (SiO ₂)	Areniscas
	Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	Arcillas
	Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	Arcillas, Mineral de Hierro, Pirita
5%	Oxidos de Magnesio, Sodio,	Minerales Varios
	Potasio, Titanio, Azufre,	
	Fósforo y Manganeso	

Figura 8 — Componentes químicos principales

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág.18)

3.2.3.4 Agregados para concreto

“Estos son los elementos inertes del concreto que son mezclados por la pasta de cemento para formar la estructura resistente. Así mismos estos ocupan alrededor de las 3/4 partes del volumen total” (Pasquel, 1999).

Así mismo (Pasquel, 1999) menciona que “la distribución volumétrica de las partículas es de gran importancia en el concreto ya que se puede obtener una estructura eficiente y densa como una buena trabajabilidad”.

Clasificación de los agregados para concreto

a) Por su procedencia

- **Agregados naturales:** “Son los formados por los procesos geológicos naturales que son extraídos, seleccionados y procesados para mejorar su uso en la elaboración de concreto. Estos agregados son los de uso



más frecuente a nivel mundial y particularmente en nuestro país ya que su amplia disponibilidad los hace ideales para producir concreto” (Pasquel, 1999).

- **Agregados artificiales:** “Proviene de un proceso de transformación. Algunos agregados de este tipo los constituyen la escoria, la arcilla horneada, el concreto reciclado, la micro sílice etc. El uso de estos materiales es muy amplio, por lo que a nivel mundial hay una tendencia hacia mejorar y obtener agregados artificiales de alta calidad” (Pasquel, 1999).

b) Por su gradación.

Según (Pasquel, 1999) “La gradación es la distribución volumétrica de las partículas que como ya hemos mencionado tiene suma importancia en el concreto. Se ha establecido convencionalmente la clasificación entre agregado grueso y agregado fino en función de las partículas mayores y las menores de 4.75 mm (Malla Standard ASTM # 4)”.

“Esta clasificación responde además a consideraciones de tipo práctico ya que las técnicas de procesamiento de los agregados (zarandeo, chancado) propenden a separarles en esta forma con objeto de poder establecer un control más preciso en su procesamiento y empleo” (Pasquel, 1999).

c) Por su densidad.

“Entendiendo densidad como la Gravedad específica, es decir el peso entre el volumen de sólidos referido a la densidad del agua, se acostumbra a clasificarlos en normales con $G_e = 2.5$ a 2.75 , ligeros con $G_e < 2.5$ y pesados con $G_e > 2.75$ ” (Harmsen, 2002).



MINERALES	ROCAS IGNEAS	ROCAS METAMORFICAS
SILICE	Granito	Mármol
Cuarzo	Sienita	Metacuarcita
Opalo	Diorita	Pizarra
Calcedonia	Gabro	Filita
Tridimita	Pendotita	Esquisto
Cristobalita	Pegmatita	Anfibolita
SILICATOS	Vidrio Volcánico	Hornfelsa
Feldespatos	Obsidiana	Gneiss
Ferromagnesianos	Pumicita	Serpentina
Hornblenda	Tufo	
Augita	Escoria	
Arcillas	Perlita	
Illitas	Fetsita	
Caolinas	Basalto	
Mortmorillonita	ROCAS SEDIMENTARIAS	
Mica	Conglomerados	
Zcolita	Arenas	
CARBONATOS	Cuarcita	
Calcita	Arenisca	
Dolomita	Piedra Arcillosa	
SULFATOS	Piedra Aluvional	
Yeso	Argillita y Pizarra	
Anhidrita	Carbonatos	
SULFUROS DE HIERRO	Calizas	
Pirita	Dolomitas	
Marcasita	Marga	
Pirotita	Tiza	
OXIDOS DE HIERRO	Horsteno	
Magnetita		
Hematita		
Geotita		
Ilmenita		
Limonita		

Figura 9 — Rocas y constituyentes minerales en agregados para concreto
 FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág.71)

3.2.3.5 Características físicas del concreto

“En general son primordiales en los agregados las características de densidad, resistencia, porosidad, y la distribución volumétrica de las partículas, que se acostumbra a denominar granulometría o gradación. Asociadas a estas características se encuentran una serie de ensayos o pruebas standard que miden estas propiedades para compararlas con valores de referencia establecidos o para emplearlas en el diseño de mezclas” (Pasquel, 1999).

Es imprescindible evaluar las características físicas o condiciones en el cual se encuentran los agregados.

a) Condiciones de saturación

Las condiciones de saturación de una partícula ideal de agregado se han estructurado, desde su estado seco hasta alcanzar su humedad superficial,



permitiendo una asimilación visual de los conceptos de saturación en sus distintas etapas (Pasquel, 1999).

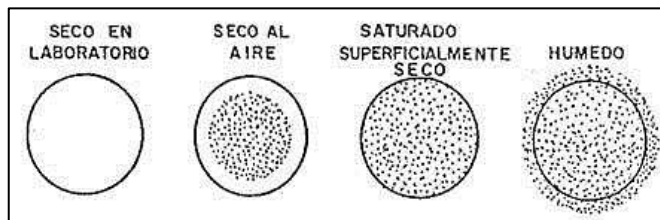


Figura 10 — Estados de Saturación del agregado

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág.73)

b) Peso específico

Según (Pasquel, 1999) define que el peso específico “Es el cociente de dividir el peso de las partículas entre el volumen sin considerar los vacíos que existe entre ellas”.

V_v
 V_p
 V_s
 V_{ag}

D_a = Densidad del agua.
 V_s = Volúmen de los sólidos en las partículas.
 V_p = Volúmen de poros en las partículas.
 V_v = Volúmen de vacíos entre partículas.
 V_{ag} = Volúmen agregados = $V_s + V_p$ (Sin vacíos entre partículas)
 A = Peso de los sólidos.
 B = Peso en el aire saturado superficialmente = $A + V_p \times D_a$.
 C = Peso saturado superficialmente seco sumergido en agua = $A - V_s \times D_a$.

1) *Peso específico de masa seca (BULK SPECIFIC GRAVITY)*

$$G_b = \frac{A}{B-C} = \frac{A}{A+V_p \times D_a - A - V_s \times D_a} = \frac{A}{(V_p + V_s) D_a} = \frac{A}{V_{ag} \times D_a}$$

2) *Peso específico saturado superficialmente seco (S.S.S. SPECIFIC GRAVITY)*

$$G_{sss} = \frac{B}{B-C} = \frac{B}{V_{ag} \times D_a}$$

3) *Peso específico aparente (APPARENT SPECIFIC GRAVITY)*

$$G_a = \frac{A}{A-C} = \frac{A}{A - A - V_s \times D_a} = \frac{A}{V_s \times D_a}$$

Figura 11 — Peso específico

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág.75)

c) Peso unitario

Se calcula como la relación entre el peso de las partículas y el volumen total, considerando también los espacios entre partículas, la forma en que estas partículas se acomodan influye en este cálculo (Pasquel, 1999).



d) Porcentaje de vacíos

Según (Pasquel, 1999) define que el porcentaje de vacíos “Es la medida del volumen lo cual se expresa en porcentaje. Así mismo depende también del acomodo entre partículas, por lo que su valor es relativo como en el caso del peso unitario”.

$$\% \text{ de Vacíos} = 100 \left[\frac{(S * W) - M}{S * W} \right]$$

Dónde:

S = Peso específico de masa

W = Densidad del agua

M = Peso unitario compactado seco

e) Absorción

“Es la capacidad de tienen los agregados de llenar con agua los vacíos. Esto se produce por capilaridad no llegándose a llenar absolutamente los poros indicados pues siempre queda aire atrapado. Tiene importancia ya que reduce el agua de la mezcla, modificando las propiedades de trabajabilidad y resistencia. por lo que es necesario tenerla siempre en cuenta para hacer las correcciones necesarias” (Pasquel, 1999).

$$\% \text{ Absorción} = \frac{\text{Peso S.S.S.} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}}$$

f) Porosidad

“Tiene una gran importancia en todas las demás propiedades de los agregados, pues es parte de la estructura interna de las partículas” (Pasquel, 1999).

g) Humedad

“Es la cantidad de agua superficial retenida en un momento determinado por las partículas de agregado. Este es una característica muy importante ya que contribuye a incrementar el agua de mezcla en el concreto. La humedad se expresa de la siguiente manera según ASTM C-566” (Pasquel, 1999).



$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso original de la muestra} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} * 100$$

3.2.3.6 Características y componentes

a) Resistencia

“Capacidad de asimilar la aplicación de fuerzas de compresión, corte, tracción y flexión. Comúnmente se mide a través de la resistencia de compresión, para lo cual es necesario ensayar testigos cilíndricos, que se perforan o cortan de una muestra lo suficientemente grande” (Pasquel, 1999).

b) Tenacidad

En términos generales, se refiere a la resistencia al impacto. “Está más relacionada con la sollicitación en flexión que en compresión, así como con la angularidad y aspereza de la superficie. Tiene trascendencia en las propiedades del concreto ante impactos, que son importantes en términos prácticos, al momento de evaluar las dificultades en el procesamiento por chancado del material. Su estimación es más cualitativa que cuantitativa” (Pasquel, 1999).

c) Dureza

“Es la resistencia al desgaste por la acción de unas partículas sobre otras o por agentes externos. En los agregados para concreto se cuantifica por medio de la resistencia a la abrasión en la Máquina de Los Ángeles, que consta de un cilindro metálico donde se introduce el agregado conjuntamente con 12 esferas de acero de 46.8 mm. de diámetro y entre 390 y 445 gr. de peso cada una, con un peso total de $5,000 \pm 25$ gr. haciéndose girar el conjunto un cierto número de revoluciones (100 o 500) que provocan el roce entre partículas, y de las esferas sobre la muestra provocando el desprendimiento superficial de material el cual se mide y expresa en porcentaje” (Pasquel, 1999).

d) Análisis granulométrico

“Tomando en cuenta lo que ya hemos hablado sobre la forma irregularmente geométrica de las partículas de agregados, es obvio que



no es simple establecer un criterio numérico individual para definir el tamaño de cada partícula midiendo sus dimensiones. Como sería sumamente difícil medir el volumen de los diferentes tamaños de partículas, se usa una manera indirecta, cual es tamizarlas por una serie de mallas de aberturas conocidas y pesar los materiales retenidos refiriéndolos en % con respecto al peso total” (Pasquel, 1999).

Tabla 11— Tamices standard ASMT

Denominación del Tamiz	Abertura en pulgadas	Abertura en mm
3"	3	75
1 1/2"	1.5	37.5
3/4"	0.75	19
3/8"	0.375	9.5
N° 4	0.187	4.75
N° 8	0.0937	2.36
N° 16	0.0469	1.18
N° 30	0.0234	0.59
N° 50	0.0117	0.295
N° 100	0.0059	0.1475
N° 200	0.0029	0.0737

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág.75)

e) El módulo de fineza

“Es un criterio que se aplica tanto a la piedra como a la arena, pues es general y sirve para caracterizar cada agregado independientemente o la mezcla de agregados en conjunto” (Pasquel, 1999).

f) La superficie específica.

“Es otra manera de caracterización numérica de la granulometría, es importante desde el punto de vista que permite comprender relaciones y propiedades entre los agregados y el cemento” (Pasquel, 1999).

g) Agregado fino o arena

“El agregado fino y grueso son los componentes inertes del cemento, ya que no participan en las reacciones químicas entre el agua y el cemento. El agregado fino debe ser resistente, sólido, limpio y exento de contaminantes como polvo, limo, pizarra, álcalis y elementos orgánicos.



No tiene que incluir más del 5% de arcilla o limo ni más del 1.5% de elementos orgánicos. Las partículas deben tener un tamaño que no exceda 1/4” y su graduación debe ajustarse a los estándares definidos en la norma ASTM-C-33-99” (Harmsen, 2002).

Tabla 12— Requisitos de granulometría para el agregado fino

Tamiz estándar	% en peso del material que pasa el tamiz
3/8"	100
#4	95 a 100
#8	80 a 100
#16	50 a 85
#30	25 a 60
#50	10 a 30
#100	2 a 10

FUENTE: Diseño de estructuras de concreto armado (Harmsen 2002, Pág.12)

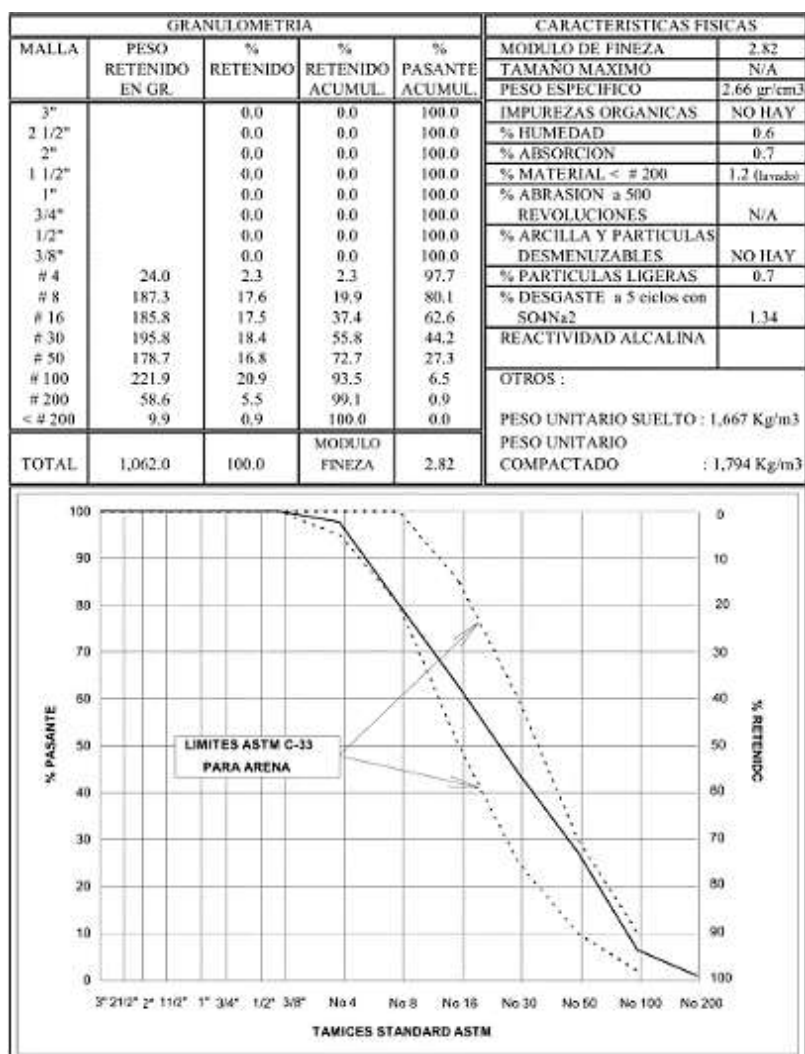


Figura 12 — Características físicas y granulométricas del agregado fino
 FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág. 93)



h) Agregado grueso

Según (Harmsen, 2002)“El agregado grueso está constituido por rocas graníticas, dioríticas y sieníticas. Puede usarse piedra partida en chancadora o grava zarandeada de los lechos de los ríos o vaciamientos naturales. Al igual que el agregado fino, no deben contener más de un 5% de arcillas y finos ni más de 1.5% de materias orgánicas, carbón, etc. Es conveniente que su tamaño máximo sea menor que 1/5 de la distancia entre las paredes del encofrado, 3/4 de la distancia libre entre armaduras y 1/3 del espesor de las losas (ACI-3.3.2)”.

Para los concretos ciclópeos se emplea piedras de 15cm hasta 20 cm. Es factible usar tamaños superiores previa evaluación del ingeniero. De la misma forma que para la arena, la norma la norma ASTM-C-33-99a establece una serie de requisitos para su gradación. Los cuales de visualiza en la Tabla 13 (Harmsen 2002).

Tabla 13— Requisitos Granulométricos para el agregado grueso

Tamaño Nominal (mm)	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados												
	100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
90.0 a 37.5 (3 1/2" a 1 1/2")	100	90-100		25-60		0-15		0-5					
63.0 a 37.5 (2 1/2" a 1 1/2")			100	90-100	35-70	0-15		0-5					
50.0 a 25.0 (2" a 1")				100	90-100	35-70	0-15		0-5				
50.0 a 4.75 (2" a #4)				100	95-100		35-70		10-30		0-5		
37.5 a 19.0 (2 1/2" a 3/4")					100	90-100	20-55	0-15		0-5			
37.5 a 4.75 (1 1/2" a #4)					100	95-100		35-70		10-30	0-5		
25.0 a 12.50 (1" a 1 1/2")						100	90-100	20-55	0-10	0-5			
25.0 a 9.50 (1" a 3/8")						100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5		
25.0 a 4.75 (1" a #4)						100	95-100		25-60		0-10	0-5	



19.0 a 9.50 (3/4" a 3/8")						100	90- 100	20- 55	0-15	0-5		
19.0 a 4.75 (3/4" a #4)						100	90- 100		20- 55	0-10	0-5	
12.5 a 4.75 (1/2" a #4)							100	90- 100	40- 70	0-15	0-5	
9.50 a 2.36 (3/8" a #8)								100	85- 100	10- 30	0-10	0-5

FUENTE: Diseño de estructuras de concreto armado (Harmsen 2002)

MALLA	PESO RETENIDO EN GR.	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMUL.	% PASANTE ACUMUL.	MODULO DE FINEZA	6.64
3"		0.0	0.0	100.0	TAMAÑO MAXIMO	3/4"
2 1/2"		0.0	0.0	100.0	PESO ESPECIFICO	2.65 gr/cm ³
2"		0.0	0.0	100.0	IMPUREZAS ORGANICAS	NO HAY
1 1/2"		0.0	0.0	100.0	% HUMEDAD	0.4
1"		0.0	0.0	100.0	% ABSORCION	1.0
3/4"	534.0	4.7	4.7	95.3	% MATERIAL < # 200	0.3 (trado)
1/2"	3,325.0	29.1	33.8	66.2	% ABRASION a 500 REVOLUCIONES	23.5
3/8"	3,032.0	26.6	60.3	39.7	% ARCILLA Y PARTICULAS DESMENUZABLES	NO HAY
# 4	4,374.0	38.3	98.7	1.3	% PARTICULAS LIGERAS	NO HAY
# 8	148.5	1.3	100.0	0.0	% DESGASTE a 5 ciclos con SO4Na2	1.90
# 16	5.0	0.0	100.0	0.0	REACTIVIDAD ALCALINA	
# 30	0.0	0.0	100.0	0.0	OTROS :	
# 50	0.0	0.0	100.0	0.0	PESO UNITARIO SUELTO :	1,491 Kg/m ³
# 100	0.0	0.0	100.0	0.0	PESO UNITARIO COMPACTADO :	1,589 Kg/m ³
# 200	0.0	0.0	100.0	0.0		
< # 200	0.0	0.0	100.0	0.0		
TOTAL	11,418.5	100.0	MODULO FINEZA	6.64		

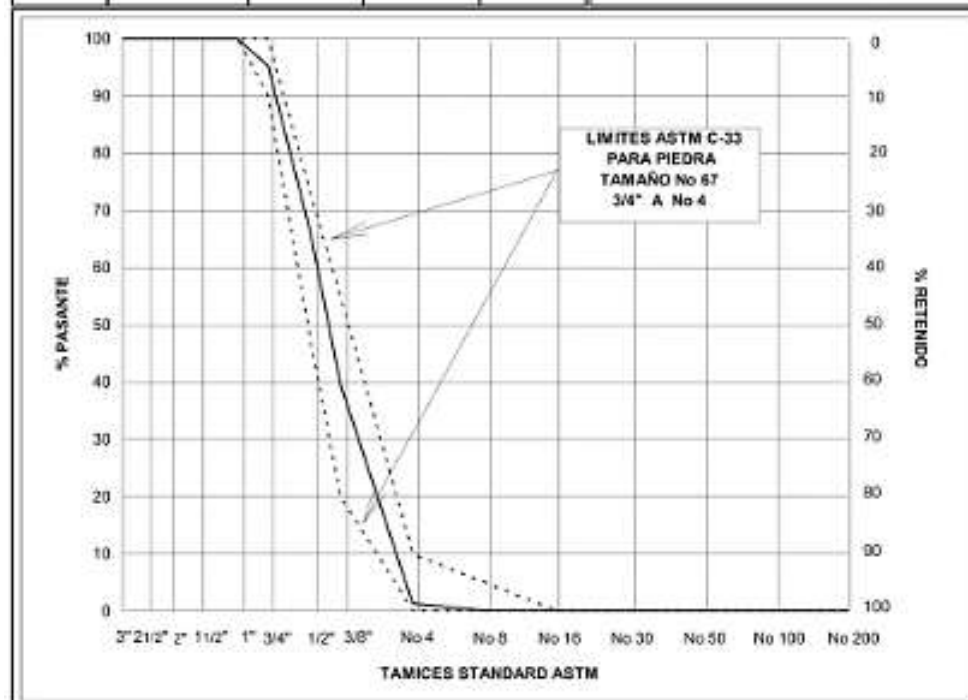


Figura 13 — Características Físicas y granulométricas agregado grueso
FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág. 93)



3.2.3.7 Agua en el concreto

“El agua es el elemento importante para la combinación con el cemento, por lo tanto, este debe cumplir algunos requisitos, sin ocasionar problemas al momento de la elaboración del concreto” (Pasquel, 1999).

“No existe un patrón definitivo en cuanto a las limitaciones en composición química que debe tener el agua. Los efectos más perjudiciales que se pueden dar al mezclarse aguas con impurezas son: retardo en el endurecimiento, reducción de la resistencia, manchas en el concreto endurecido, eflorescencias, contribución a la corrosión del acero, cambios volumétricos etc.” (Pasquel, 1999).

Tabla 14— Límites permisibles para agua de mezcla y curado

Descripción		Límite permisible		
1	Sólidos en suspensión	5000	p.p.m	máximo
2	Materia orgánica	3	p.p.m.	máximo
3	Alcalinidad (NaHCO ₃)	1000	p.p.m.	máximo
4	Sulfato (Ion SO ₄)	600	p.p.m.	máximo
5	Cloruros (Ion Cl)	1000	p.p.m.	máximo
6	PH	5 a 8		

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág. 61)

Agua en el curado

“Los mismos requisitos que se exigen para el agua en la elaboración del concreto deben cumplir de la misma manera para el curado de este” (Pasquel, 1999).

Tabla 15— Agua de lavado para su empleo en agua de mezcla

Elemento	Limitación		
Cloruros (Ion Cl) - En concreto pretensado o losas de puentes	500	ppm	máximo
Cloruros (Ion Cl) - Concreto armado en ambiente húmedo o con elementos metálicos	1000	ppm	máximo
Sulfatos (Ion SO ₄)	3000	ppm	máximo
Alkalis (NaO + 0.658 K ₂ O)	600	ppm	máximo
Sólidos disueltos totales	50000	ppm	máximo

FUENTE: Tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Pasquel 1999, Pág. 66)



Slump de concreto

“El asentamiento es el “slump” que constituye la resistencia del concreto a sufrir desproporciones, midiéndose por medio de un ensayo sencillo de campo y laboratorio, denominada “cono de Abraham”. La prueba de slump provee información importante correspondiente a la uniformidad de la mezcla y es un instrumento indispensable para el control de calidad del concreto fresco. Las variabilidades del slump en diversas mezclas de una equivalente dosificación señalan que ha sucedido cambios que han modificado alguna característica física, granulométrica de agregados, contenido de aire, T° o uso de aditivos” (Santos, 2019).

3.2.4 Concreto reciclado en la construcción

3.2.4.1 Obtención y tratamiento del concreto de demolición

La obtención del concreto de demolición se hace mediante demolición manual, mecánica o mediante fresado de las construcciones civiles de concreto simple, armado o tensado. Como por ejemplo los que provienen de elementos estructurales de edificaciones, muros de contención y/o sostenimiento, fundaciones, puentes, alcantarillas, canales, tuberías, losas de pavimentos de concreto, etc. (NTP 400.053, 1999).

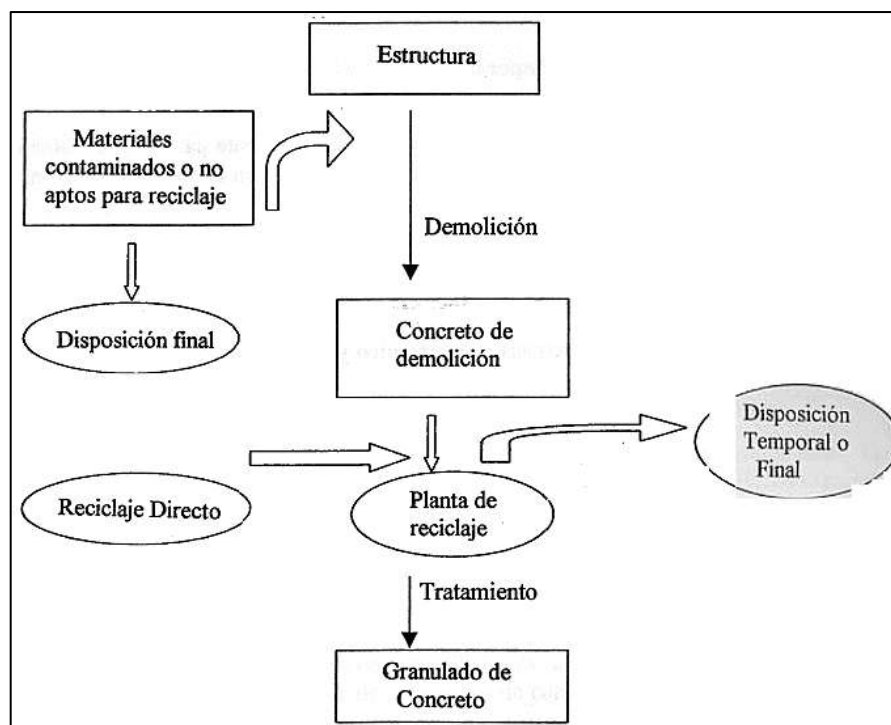


Figura 14 — Diagrama de flujo para la obtención de concreto de demolición y granulado de concreto

FUENTE: Manejo de residuos de la actividad de la construcción (NTP 400.053, 1999)

El tratamiento en una planta de reciclaje, previo control de ingreso por inspección ocular consistirá en los siguientes pasos: trituración, separación de partes metálicas y materiales extraños y clasificación.

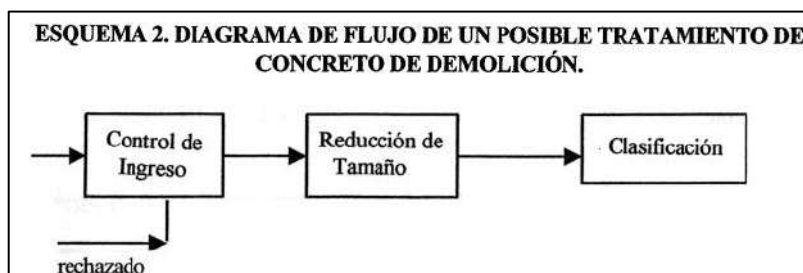


Figura 15 — Diagrama de flujo de un posible tratamiento de concreto de demolición
FUENTE: Manejo de residuos de la actividad de la construcción (NTP 400.053, 1999)

Almacenamiento temporal: Los materiales generados a partir del concreto de demolición deben almacenarse de ser posible separadamente de acuerdo con su procedencia y uso posterior.

3.2.4.2 Material granular reciclado

“El agregado reciclado es procedente de la trituración de cilindros de concreto descartados. El proceso de trituración escogido, luego de sondeos previos, consistió inicialmente en la reducción de tamaño del cilindro de concreto original (trituración primaria), mediante la trituradora de quijadas, luego se pasó el material en la trituradora de rodillos dos veces (trituración secundaria), con lo cual se obtuvo una granulometría satisfactoria; sin embargo, dado que se obtiene un porcentaje considerable de polvo fino (pasante malla N.º 200), se optó por eliminar este último material, puesto que aumenta la absorción del agregado y por consiguiente la cantidad de agua requerida para una consistencia determinada” (Henao y López, 2012).

(NTP 400.053, 1999) La utilización del granulado de concreto se regulará por las normas técnicas del uso correspondiente.

Los ensayos por realizar para la determinación de la aptitud del granulado y de los minerales y aglutinantes contenidos, dependerán del diseño del producto final, por lo que estos ensayos se realizarán sobre el producto final por el consumidor antes de utilizar el granulado de concreto.



Eventualmente si el productor de granulado de concreto realizase ensayos que considere necesarios o importantes, deberá realizar ensayos por lote y se deberá indicar la fecha de realización del ensayo, así como la antigüedad del producto.

Importante para el uso, es la procedencia de la fracción de concreto de demolición, la Tabla 16 muestra los usos posibles de acuerdo con la procedencia del concreto de demolición.

Tabla 16— Granulado de concreto en función del uso previsto

USOS	Concretos de mediana y baja resistencia	Losas de Pavimentos	Concretos estructurales
Pavimento de tráfico ligero	-	✓	✓
Ciclovías	✓	✓	✓
Losas deportivas	✓	✓	✓
Veredas	✓	✓	✓
Patios	✓	✓	✓
Cimientos	✓	✓	✓
Concreto simple masivo	✓	✓	✓
Rellenos no Portantes	✓	✓	✓

FUENTE: Manejo de residuos de la actividad de la construcción (NTP 400.053, 1999)

La (NTP 400.053, 1999) denomina al concreto reciclado como granulado de concreto o aquel concreto cuyos agregados provengan parcial o completamente de granulados de concreto, gravas y arenas de reciclaje y lo delimita como el material secundario de construcción proveniente del tratamiento del concreto y mortero de demolición hasta llevarlo a partículas de tamaño similar al de los agregados.

Según los análisis realizados en Europa la pasta Adherida y Mortero en los agregados reciclados utilizados siempre están presentes. En Japón, algunos investigadores desarrollaron un método basado en la "cyclite", que muele concreto triturado y agrupa utilizando un método de procesamiento recién desarrollado, que consiste en la eliminación de mortero de la superficie de los agregados sin triturarlos agregados (Yanagibashi et al., 2009).

Los principales factores que influyen en la cantidad de mortero adherido en el agregado reciclado triturado son el agua, cemento, la resistencia del



concreto original y el tamaño agregado. Hay que mencionar que también el proceso de molienda también tiene una influencia sobre la cantidad de mortero adherido y la calidad de los agregados reciclados.

3.2.4.3 Propiedades de los agregados reciclados

a) Densidad en general

La densidad de superficie saturada (SSD) de los agregados gruesos reciclados es inferior al de los agregados naturales, a causa de la baja densidad del mortero que se une a la mezcla inicial, que se determina por lo siguiente:

La fuerza del concreto original concluye que, con la misma cantidad de mortero, un agregado reciclado que se ha obtenido a partir de un concreto de mayor resistencia tendrá una mayor densidad (Hansen y Narud, 1983).

El tamaño de agregado: Según (Bedoya y Dzulm, 2015) los cambios de densidad con el tamaño del agregado cuando el concreto es un terreno con la misma máquina de molienda empleando la misma cantidad de energía en el proceso de molienda.

b) Absorción de agua

La capacidad de absorción de agua del agregado reciclado en la mezcla de concreto es una de las diferencias más significativas entre los agregados reciclados y materiales de cantera (Hansen y Narud, 1983).

c) Tamaño del agregado

Al aumentar su tamaño los agregados, tienden a incrementar su capacidad de absorción de los agregados. (Hansen y Narud, 1983) concluyeron que la capacidad de absorción de agregados reciclados incrementa con cantidad de mortero adherido.

Hansen y Narud (1983) mencionan que la gran cantidad de mortero adherido en el agregado reciclado disminuye la densidad, la relación entre la resistencia del concreto original, el tamaño de agregado reciclado, la cantidad de mortero adherido, densidad y absorción de los agregados reciclados como se visualiza en la Tabla 17.



Tabla 17 — Propiedades del agregado natural y reciclado

Material	Tamaño (mm)	Gravedad específica (SSD cond.)	Absorción de agua (%)	Los Ángeles	% volumen de mortero
Grava natural original	4 - 8	2500	3.7	25.9	0
	8 - 16	2620	1.8	22.7	0
	16 - 32	2610	0.8	18.8	0
Agregado Reciclado (H) (a/c = 0.40)	4 - 8	2340	8.5	30.1	58
	8 - 16	2450	5	26.7	38
	16 - 32	2490	3.8	22.4	35
Agregado Reciclado (M) (a/c = 0.70)	4 - 8	2350	8.7	32.6	64
	8 - 16	2440	5.4	29.2	39
	16 - 32	2480	4	25.4	28
Agregado Reciclado (L) (a/c = 1.20)	4 - 8	2340	8.7	41.4	61
	8 - 16	2420	5.7	37	39
	16 - 32	2490	3.7	31.5	25
Agregado Reciclado (M) (a/c = 0.70)	< 5	2280	9.8	-	-

FUENTE: Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate (Hansen y Narud,1983)

d) Cantidad de mortero adherido

La capacidad de absorción del agregado grueso reciclado depende de la cantidad y calidad de mortero adherido.

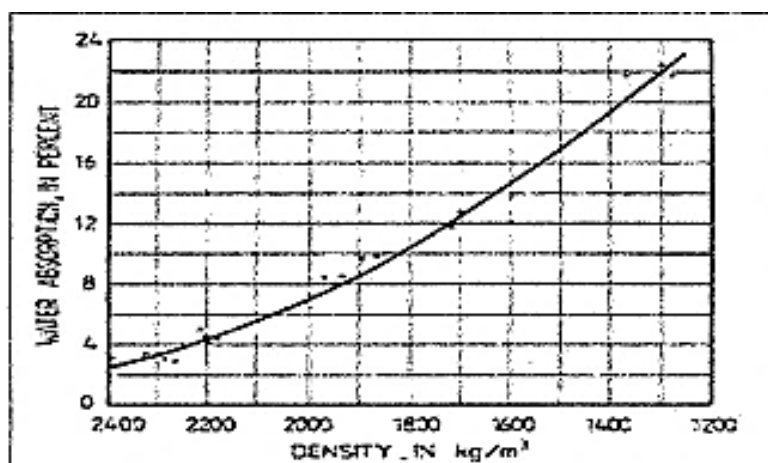


Figura 16 — Absorción de agua em función de la densidad de los agregados reciclados

FUENTE: Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate (Hansen y Narud,1983)



e) Densidad

Los agregados reciclados con mortero adherido tienen menor densidad y mayor capacidad de absorción, por el cual no hay dependencia entre la densidad y la capacidad de absorción. Debido a la alta capacidad de absorción las unidades recicladas, se ha iniciado el uso de unidades empapadas de unidades generadas por concreto para mantener una calidad uniforme en la producción de concreto. Algunos investigadores señalan que la capacidad de absorción promedio establecida es un 5% máximo del 30% de los agregados utilizados (Hansen y Narud, 1983).

f) Abrasión los ángeles

Los agregados reciclados se diferencian con respecto al valor de la Abrasión en función de la resistencia del concreto original, la cantidad de mortero adherido y la calidad total original (Bedoya y Dzul, 2015)

El concreto con una resistencia superior sufre menos desgaste. En los agregados reciclados de "Abrasión Los Ángeles, porcentaje de pérdida" no sólo depende de la cantidad de mortero adherido en su conjunto original, sino también en la forma que el concreto original es aplastado (Bedoya y Dzul, 2015).

g) Sulfato de solidez

La solidez del sulfato asegura la capacidad de los agregados para resistir los ciclos de congelación y descongelación. El porcentaje de pérdida de peso de los agregados reciclados sometidos al sulfato presente en la solución se basa en gran parte en la composición de los agregados de prueba, además del tipo de concreto original y el procedimiento de trituración (Pasquel, 1998).

h) Contaminantes

La existencia de contaminantes influye en la fuerza y la durabilidad de los concretos fabricados con estos componentes. Actualmente, hay sugerencias relacionadas con la restricción de los distintos elementos que pueden aparecer en los agregados reciclados (Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamerica, 2002).



i) Cloruros

Según Rivva (2000) se recomienda que las especificaciones del estándar del agregado reciclado del concreto, se debe imponer límites estrictos sobre el contenido de cloruro. Sin embargo, la concentración de cloruro de umbral, por debajo no hay riesgo de corrosión de las armaduras, sigue siendo un tema controvertido.

3.2.5 Durabilidad de pavimentos de concreto

La durabilidad se refiere a la capacidad de las estructuras de concreto reforzado de mantener sus propiedades físicas y químicas intactas a lo largo de su vida útil cuando son sometidas a la degradación de su material debido a diversos impactos de cargas y demandas, las cuales se contemplan en su diseño de estructura (Muñoz Salinas y Mendoza Escobedo, 2012).

La durabilidad y el diseño de los pavimentos rígidos se basa en la obtención de la mejor resistencia a la flexión de concreto, utilizando el modelo de ruptura como un parámetro en la fórmula que nos permite calcular el espesor del paño, además de considerar otros parámetros como servicialidad, número de ejes equivalentes de diseño, módulo de resiliencia, tipo de método de transmisión de cargas (Párraga y Torres, 2021).

Del mismo modo, el (Consejo Mundial Empresarial para Desarrollo Sostenible, 2009) considera que, “La durabilidad del concreto y del concreto reciclado significa que su larga vida útil puede presentar ventajas en sostenibilidad frente a otros materiales de construcción” (p. 15). Por su parte Ruiz (2024) señala que “el concreto, denominado hormigón en ciertas regiones es un material de construcción muy empleado en la industria debido a su versatilidad y resistencia. se compone por una mezcla de concreto y se emplea en sus propiedades” (p. 22).

De las explicaciones anteriores, se puede resumir que, La durabilidad del pavimento de concreto se refiere a pavimentos que mantienen su integridad estructural y funcionan durante largos períodos de tiempo en diferentes condiciones de uso y resisten factores degradantes como el tráfico, los ciclos de congelación y descongelación, la abrasión, los productos químicos y otros factores ambientales.



Esta durabilidad está asegurada por la selección adecuada de materiales, la dosificación y mezcla correctas, la colocación y curado correctos, el diseño estructural teniendo en cuenta las cargas esperadas y las condiciones ambientales, y un mantenimiento adecuado y oportuno.

3.2.5.1 Factores que afectan la durabilidad del concreto en pavimentos

Irigoin Jimenez (2016) da a conocer algunos factores que afectan la durabilidad del concreto, son aquellos que producen el deterioro de este. Estos factores se clasifican en Congelamiento y Deshielo, Ambiente químicamente agresivo, Abrasión, Corrosión de metales en el concreto y reacciones químicas en los agregados.

Constituye un agente de deterioro que ocurre en los climas en que la temperatura desciende hasta provocar el congelamiento del agua contenida en los poros capilares del concreto. En términos generales el fenómeno se caracteriza por inducir esfuerzos internos en el concreto que pueden provocar su fisuración reiterada y la consiguiente desintegración.

Los ambientes agresivos usuales están constituidos por aire, agua y suelos contaminados que entran en contacto con las estructuras de concreto.

El factor principal reside en qué tan resistente es desde el punto de vista estructural o mecánico, la superficie expuesta al desgaste. 55 Se han desarrollado varias maneras de medir el desgaste o la resistencia a la abrasión tanto a nivel de laboratorio como a escala natural pero los resultados son bastante relativos pues ninguna de ellas puede reproducir las condiciones reales de uso de las estructuras, ni dar una medida absoluta en términos numéricos que pueda servir para comparar condiciones de uso o concretos similares, por lo tanto el mejor indicador es evaluar principalmente factores como la resistencia en compresión, las características de los agregados, el diseño de mezcla, la técnica constructiva y el curado.

El concreto por ser un material con una alcalinidad muy elevada ($\text{PH} > 12.5$), y alta resistividad eléctrica constituye uno de los medios ideales para proteger metales introducidos en su estructura, al producir en ellos una película protectora contra la corrosión. Pero si por circunstancias internas o externas se cambian estas condiciones de protección, se producen el proceso



electroquímico de la corrosión generándose compuestos de óxidos de hierro que llegan a triplicar el volumen original del hierro, destruyendo el concreto al hincharse y generar esfuerzos internos.

La reacción propicia el desarrollo de un gel expansivo en la interface agregado – pasta, que rompe la estructura interna del concreto provocando fisuración y desintegración

3.2.5.2 Métodos de evaluación de la durabilidad del concreto

Con respecto al manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos (MTC, 2014), se plantea un método de evaluación de durabilidad del concreto, a continuación, se dará a conocer:

- Evaluación estructural por deflectometría

La evaluación superficial se complementa a una evaluación estructural a través de la comparación del equipo con otros equipos. Igualmente, en numerosas situaciones se requiere también realizar calicatas, sondeos, recolección de muestras y pruebas de laboratorio para corroborar las hipótesis derivadas de la evaluación superficial (MTC, 2013).

La deflectometría es un estudio de la deformación vertical de la superficie del carril que es una consecuencia de una determinada actividad de carga o demanda. La deflexión es una medida de la respuesta de conjunto “pavimento - subrasante” frente a una determinada sollicitación, indicando la educabilidad del pavimento desde el punto de vista estructural.

En cuanto a Saucedo Rodríguez (2023) también propone los siguientes métodos de evaluación:

- Metodología VIZIR (Vision Inspection of Zones et Itinéraires à Risque)

El método clasifica 2 categorías de tipo funcional y estructural en donde se indica lo siguiente:

Los daños de Tipo A se centran en las fallas estructurales, por la incapacidad estructural de la calzada; como las deformaciones y agrietamientos que están conectados a la fatiga del pavimento.

Los daños de Tipo B son fallas funcionales, no por causas estructurales sino por malos procesos constructivos y también por condiciones locales



particulares que el tránsito coopera para poner en evidencia. Ese tipo B muestra desprendimientos, ojos de pescado y afloramientos principalmente.

a) Determinación del índice de deterioro superficial “IS”

Este punto se obtiene el Índice Superficial, clasificación final por esta metodología del estado de la vía.

Para su determinación primero obtendrá el Índice de Fisuración “IF” y Índice de Deformación “ID”, donde depende de la gravedad y extensión de las fisuraciones y agrietamientos de Tipo estructural en el tramo en estudio y luego depende también de la gravedad y extensión de las deformaciones de origen estructural.

b) Metodología PCI (pavement condition index)

Se constituye como la manera más exacta en la calificación y evaluación de pavimentos flexibles y rígidos. Es un índice que tiene valores desde (0), para un pavimento que se encuentra en malas condiciones o hasta (100) a pavimentos que están en óptimas condiciones. Se establecen márgenes de clase, severidad y cantidad de daño que presente. Los datos obtenidos ofrecen un panorama más claro de las causas de daño ó la relación que tiene con las cargas o sino con el clima.

3.2.5.3 Estrategias de mejora de la durabilidad en pavimentos

Jaramillo Abrego y Rios Ponce (2023) sugieren estrategias de mejora Para garantizar la durabilidad y resistencia del concreto, es imprescindible llevar a cabo un diseño apropiado del concreto. Para lograrlo, se requiere el empleo de un cemento que resista los sulfatos. El cemento de tipo II y V posee una resistencia moderada y alta a los sulfatos, respectivamente, ambos tipos de cementos podrían ser utilizados en concretos destinados a áreas costeras. No obstante, es imprescindible analizar la presencia de estos tipos de cementos en Lima. El cemento tipo II no es de uso comercial, por lo que se elige el cemento tipo V para la construcción de concreto.

Es importante tener en cuenta que incluso el cemento tipo V no es capaz de tolerar una exposición severa a los sulfatos si se tiene una alta relación agua – material cementante, es decir, si se tiene una alta relación agua – cemento.



Murga Tirado et al. (2023) dan a conocer sobre los materiales que optimizan la estructura de pavimentos rígidos

A través del análisis, se observó que todas las investigaciones se centran en la incorporación de materiales en el concreto, sin abordar las otras capas que conforman el pavimento rígido. Estos materiales incorporados pueden desempeñar roles como agregados, aditivos o incluso como componentes cementantes. El objetivo de incorporar estos materiales en la investigación es mejorar las características físicas y químicas del concreto.

La incorporación de ceniza volante y escoria se considera como un aditivo, y ha demostrado brindar los mejores resultados, especialmente en términos de resistencia a la compresión, superando los 40 MPa. También se investigó la incorporación de fibras simples e híbridas, también consideradas como aditivos. Para este tipo de concreto, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, tracción y fatiga, y se observaron resultados notablemente mejores, con un aumento del 13.23% en comparación con el F'c.

La inclusión de residuo de mármol se considera como un agregado fino en la investigación, y se ha demostrado que brinda mejores resultados en comparación con el agregado fino convencional (arena). Con este material, se logró una resistencia a la compresión de 32.37 N/mm². Otro material incorporado en las investigaciones es el reciclado de pavimento asfáltico, el cual se utiliza como agregado en el concreto. Este material proporciona resultados comparables a utilizar un agregado de cantera, por ejemplo, con una relación agua/cemento de 0.5, se obtiene un concreto con una resistencia similar al uso de agregado convencional. Sin embargo, si el reciclado de pavimento asfáltico reemplaza por completo los agregados del concreto, se logra obtener un concreto con características superiores, con una resistencia superior a los 40 MPa.

Las fibras de acero y poliolefina se incorporan como aditivos en el concreto, y mejoran las propiedades físicas del mismo, destacando especialmente en la resistencia a la fatiga. Con la inclusión de estos dos materiales, se logra una resistencia en el concreto que varía entre un 9% y un 35% más de lo esperado.

Elementos prefabricados de madera laminada encolada (GLT) y madera contrachapada o chapa laminada (LVL), unidos a una losa superior de



hormigón vertido in situ. Las pruebas realizadas demuestran la resistencia, ductilidad e integridad del sistema en condiciones higrotérmicas exigentes. Estudios recientes han confirmado la posibilidad de aplicar estos RCA en bases de carreteras como Material Granular Tratado con Cemento (CTGM), lo que redundaría en una mayor efectividad tanto en su comportamiento mecánico como en su durabilidad.

La escoria de horno de arco eléctrico y el vidrio molido son materiales que se añaden al concreto como agregados fino y grueso, respectivamente. En la investigación se demostró que estos materiales son reemplazos perfectos de los materiales de cantera, ya que aportan las mismas características al concreto. Para contrarrestar la permeabilidad del concreto y evitar problemas relacionados con el clima, se utilizaron fluoropolímeros, silicato de resina y materiales cristalinos en una investigación. Los resultados mostraron una absorción de agua de solo el 1.4%. El humo de sílice o microsíllice se incorpora al concreto como material cementante y ha demostrado ser altamente efectivo, proporcionando resistencias a la compresión superiores a 40 MPa. Por último, la arena de sílice se utiliza como agregado fino y se evaluó en términos de resistencia y módulo de elasticidad del concreto. Los resultados mostraron que el concreto con arena de sílice supera los valores de un concreto convencional, y su incorporación es beneficiosa debido a su bajo costo. Se obtuvo una resistencia de 47.35 N/mm².

Al mismo tiempo, el MTC (2013) manifiesta que, todos los materiales deben cumplir los requerimientos de las especificaciones técnicas generales para la Construcción de carreteras del MTC (Vigente).

Murga Tirado et al. (2023) también propone métodos para evaluar la integridad estructural de un pavimento rígido, donde puntualiza que todos los métodos se someten a un control de calidad para determinar si cumplen con las condiciones estructurales requeridas, como resistencia, durabilidad, trabajabilidad, entre otras. En caso contrario, no pueden ser implementados. Una de las pruebas principales para evaluar la estructura es la resistencia a la compresión, la cual generalmente se rige según el estándar IS: 516-1999: "Method of tests for strength of concrete". Se representa mediante un gráfico



con dos variables: resistencia a la compresión en unidades de MPa y tiempo de curado en días.

Otra prueba común utilizada para evaluar la resistencia es la tracción indirecta, la cual se obtiene mediante un ensayo de tracción del concreto. Se toma una muestra de al menos 30 cm de longitud y 15 cm de diámetro, que luego se somete a fuerzas opuestas en una máquina de compresión para determinar la resistencia interna del concreto.

Actualmente, se utiliza la prueba de vibraciones de carga de tráfico e interferencia con cargas de choque para evaluar los pavimentos rígidos. En esta prueba, se emplean especímenes de concreto de 28 días y se someten a vibraciones generadas por cargas de tráfico, junto con cargas de choque, para evaluar la respuesta de las losas de concreto.

3.2.5.4 El impacto de los métodos modernos en la calidad de los pavimentos rígidos

Murga Tirado et al. (2023) mencionan que, en la vida útil de un pavimento, se producen cambios y deterioro debido al uso, diseño o construcción deficientes. Por esta razón, se están investigando constantemente nuevos métodos para mejorar la durabilidad del pavimento.

El análisis sistemático de los artículos seleccionados revela que mediante la incorporación de diferentes materiales en el concreto utilizado en los pavimentos, junto con la utilización de materiales de alta calidad y mano de obra calificada, se puede obtener un pavimento de alta calidad que cumpla con los requisitos establecidos por las normas, y a un costo reducido.

Uno de los materiales más utilizados es la escoria de alto horno, que se puede emplear como agregado fino y cumple con los requisitos de resistencia y abrasión. Además, al ser de origen natural, ayuda a preservar el medio ambiente. También se emplean fibras hidráulicas y de poliolefina, las cuales mejoran la resistencia a la tracción y abrasión al entrar en contacto con el concreto, lo que proporciona un mejor rendimiento.

Se han identificado varias adiciones que tienen un impacto significativo en la calidad del pavimento rígido. Entre ellas, la escoria de horno de arco eléctrico combinada con vidrio molido reciclado ha demostrado crear un



concreto de alta calidad sin necesidad de utilizar arena o grava como agregados tradicionales.

Además, se ha encontrado que los suelos rojos, arcillosos o de algodón negro, cuando se mezclan con cemento Portland, presentan una resistencia superior a la normal. Se evaluó el efecto de agregar caucho a los agregados estabilizados con cemento en pavimentos semirrígidos para reducir la fluctuación de temperatura. Se realizaron pruebas de propiedades térmicas en diferentes porcentajes de volumen de caucho (0%, 5%, 10% y 20%).

3.2.6 Impacto ambiental de la construcción con agregados reciclados

3.2.6.1 Beneficios ambientales del uso de agregados reciclados

El (Consejo Mundial Empresarial para Desarrollo Sostenible, 2009) explica a cerca de los beneficios ambientales en cuanto al uso de agregados reciclados. A continuación, se detallan:

Reducción de desechos en vertederos de basura y degradación asociada de la tierra. Sustitución de recursos vírgenes y reducción de los costos ambientales asociados a la explotación de recursos naturales.

Reducción de los costos de transporte: a menudo, el concreto puede ser reciclado en los sitios de construcción y demolición, o cerca de las áreas urbanas donde será reutilizado.

Reducción del pago de tarifas e impuestos asociados al vertimiento de desechos. Buen desempeño en algunas aplicaciones debido a su buena compactación y propiedades de densidad (por ejemplo, como sub-base vial).

En algunos casos, generación de empleos en la industria del reciclaje de concreto que de otro modo no existirían en otros sectores. Así mismo, aunque el concreto no se descompone en sus partes básicas, puede ser recuperado y triturado para su reutilización como agregado (para su uso en mezclas listas de concreto u otras aplicaciones) o puede ser reciclado mediante el proceso de fabricación del cemento en cantidades controladas, ya sea como materia prima alternativa para producir clínker o como componente adicional al moler clínker, yeso y otros aditivos del cemento.

Por otra parte, Países como Japón y Holanda logran la recuperación casi completa de los residuos del concreto.



a) Reducción de emisiones de carbono y huella de agua

Schneider y Samaniego (2010) la huella hídrica (o del agua), da cuenta de la proporción del uso del agua en relación con el consumo de las personas. El concepto ideado en 2002 por Arjen Hoekstra, considera el consumo total de agua, las características del clima y la eficiencia al utilizar este recurso (Hoekstra y Hung, 2002). Es adoptada como un indicador de consumo cuya información complementa la tradicionalmente generada por los indicadores de uso de los sectores productivos. La huella hídrica de un país es el volumen total de agua utilizado globalmente para producir los bienes y servicios consumidos por sus habitantes. Incluye el agua sustraída de los ríos, lagos y acuíferos (aguas superficiales y subterráneas) para la agricultura, la industria y el uso doméstico, así como el agua de lluvia utilizada para los cultivos. Contempla además el consumo doméstico y la importación de agua virtual del país, menos la exportación de ésta. Es un indicador que permite conocer la demanda del país respecto a los recursos hídricos del planeta (WWF, 2008). A nivel individual, la huella hídrica es igual a la cantidad total de agua virtual de todos los productos consumidos. A modo de ejemplo, una dieta a base de carne supone una huella hídrica mucho mayor que una dieta vegetariana (en promedio de 4.000 litros de agua al día frente a 1.500).

b) Gestión de residuos de construcción y demolición desde la perspectiva de la sostenibilidad

En el enfoque de sostenibilidad se han utilizado tres aspectos que son económicos, sociales y ambientales (Negash et al., 2021). La adopción de prácticas de construcción sostenibles es una solución para poder revertir los impactos negativos de los trabajos de construcción (Carvajal Arango et al., 2019) y equilibrar los beneficios económicos, impactos sociales y el control ambiental (Huang et al., 2018). En la etapa de construcción el aspecto económico, las sostenibilidad busca maximizar el presupuesto del proyecto minimizando costos de mantenimiento y operación (Ogunbiyi et al., 2014); la parte ambiental se encamina a disminuir el consumo de recursos y los desechos de materiales y energía



producidos por las actividades de construcción (Koranda et al., 2012), dando a conocer que el aspecto social se relaciona en la mejora de las diferentes condiciones de bienestar, salud y seguridad de todo el personal en el sitio de las operaciones.

c) Gestión de residuos de construcción y demolición en relación con el período de duración del proyecto.

Es importante gestionar los RCD en las etapas del proyecto, asimismo la minimización de los desechos de construcción se realiza en todas las etapas del ciclo de vida proyecto. Varios factores como el pedido y manejo de materiales en la fase de adquisición, cambios en el plan del proyecto, diseño, planes y tecnologías de gestión de desechos durante la etapa de construcción y demolición afectan la gestión de RCD en los ciclos de vida del proyecto (Esa et al., 2016). Por otra parte, en la etapa de planificación y diseño se encuentran factores que afecta la gestión, por ejemplo, tener en cuenta el tipo y volumen de residuos antes del comienzo del proyecto, la aplicación del modelado de información de construcción (MIB), la contribución de las partes interesadas, el plan diseñado de gestión de desechos y el equipo encargado del seguimiento de la gestión (Kabirifar et al., 2020).

d) Herramientas de gestión de residuos de construcción y demolición

Existen varias herramientas que se utilizan para gestionar los RCD, entre ellas están las herramientas de tecnología de información y la tecnología de prefabricación (Jin et al., 2019). Dentro de las tecnologías de información se encuentra la aplicación modelada de información de construcción (MIB) que sirve para predecir el volumen del material a utilizar en las etapas de planificación y diseño de un proyecto (Wong et al., 2013; Krystofik et al., 2015). Otras tecnologías como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y el Sistema de Información Geográfica (GIS) se han incluido para la prevención de desechos y evaluación del diseño del material del lugar de construcción.



3.2.6.2 Huella de carbono

Chávarri Cueva y Falen Solis (2020) refieren que la huella de carbono es definida como una forma de cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero emitidos (GEI) al medio ambiente, que se asocia a las actividades de consumo y producción de los seres humanos. En otras palabras, la huella de carbono se define como la cantidad total de GEI producidos por nuestras actividades desarrolladas día a día causados directa o indirectamente por una organización, un servicio o un producto (Asociación Española para la Calidad, 2012). Por lo tanto, la huella de carbono es un instrumento que nos permite identificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (metano, óxido nitroso, gases fluorcarbonados, dióxido de carbono, etc.) que cuantifica la liberación de CO₂ en un periodo determinado, de forma directa e indirecta por una persona, evento, servicio u organización y establecer medidas eficaces de reducción. El CO₂ es usado como gas de referencia y el resto se expresa en función de su equivalencia con el CO₂ en términos de “potencial de calentamiento global”. La huella de carbono se mide en toneladas de CO₂ equivalente y se calcula multiplicando los datos de las actividades (cantidad) desarrolladas a cabo por los factores de emisión. Este 52 análisis comprende todas aquellas actividades del ciclo de vida de un producto, es decir, desde la adquisición del producto hasta su final como residuo.

Asimismo, el (Consejo Mundial Empresarial para Desarrollo Sostenible, 2009) hace hincapié a la mayoría de las emisiones de gases con efecto invernadero provenientes de la fabricación del concreto ocurren durante la producción del cemento. Donde explica que es posible lograr ahorros menores si la necesidad de transportar los agregados se reduce por medio del reciclaje.

3.2.6.3 Análisis de ciclo de vida comparativo entre el uso de concreto convencional y alternativas de concreto reciclado

Balmaceda Castillo (2021) aborda sobre el análisis del ciclo de vida como herramienta ambiental para el uso de concreto convencional y alternativas de concreto reciclado.



Así como es importante estudiar los procesos de obtención de los agregados reciclados y con ellos la producción de una nueva mezcla de concreto, también es necesario utilizar una herramienta efectiva para evaluar su impacto ambiental (Farina et al., 2020). De ese modo, se podría corroborar si la aplicación de concreto reciclado en el Perú resulta favorable tanto en la parte técnica como ambiental generando menores emisiones de GEI e impactos ambientales que el concreto convencional. En ese sentido, al cuantificar los impactos ambientales producto del contraste de mezclas de concreto basadas en agregado reciclado y concreto convencional, se podrá llegar a una conclusión mucho más precisa que englobe análisis cualitativo y cuantitativo. Por ende, varios autores han creído conveniente utilizar un ACV como herramienta ideal para llegar a una respuesta final (Gursel et al., 2014; Kim y Tae, 2016) y esta investigación no será ajena a ello. Además de adicionar agua a la mezcla original, se pueden trabajar dos nuevas alternativas para la dosificación del concreto reciclado (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2005). La primera y más reciente sería aceptar el uso de aditivo superplastificante; sin embargo, es más costoso, falta regulación en el tema y se debería realizar un estudio previo de composición química para tomar en cuenta su influencia en las propiedades mecánicas del concreto.

3.2.7 Técnicas de evaluación de desgaste en pavimentos

Para esta investigación se describen tres métodos el PCI, manual de identificación, clasificación y tratamientos de fallas en pavimentos urbanos y el VIZIR.

V1: Métodos convencionales

Quispe Vera y Condor Buitrón (2020) nos hace mención que: “El PCI se usa para realizar un estudio superficial de un pavimento, que califica su condición actual mediante una inspección visual de daños y/o deterioros, lo cual se encuentra en un rango que parte desde 0 para un pavimento en mal estado, hasta el 100 para un pavimento en perfecto estado”. Así mismo, pasamos por desapercibidos algunos daños de consideración por el sistema VIZIR también nos hace mención que “esta clase de imperfecciones, concurrentes notables en su funcionalidad, tiene que estar en buen sentido geotécnico con gran amplitud, en lo cual sobrepasara la relevancia de este método”.



De esta manera se puede definir que los métodos convencionales cumplen una función importante en el pavimento, que evita la contaminación de los materiales encontrados.

El método de la visión e inspección de zonas e itinerarios en riesgo (VIZIR) se originó y desarrolló en Francia durante la década de 1960, y se implementó inicialmente en Asia y África. Hoy en día se emplea en más de 20 países a nivel global (Garcia Orosco, 2022).

El desarrollo de la metodología PCI (pavement condition index) tiene sus raíces en los años 70, bajo la dirección del centro de ingeniería de la fuerza aérea de Estados Unidos, con el objetivo de lograr un sistema de gestión de pavimentos rígidos y flexibles (Garcia Orosco, 2022).

El estado peruano ha puesto especial atención en la construcción de nuevas infraestructuras viales, no obstante, el nuevo enfoque se enfoca en el mantenimiento y conservación de las superficies del pavimento ya existente (Garcia Orosco, 2022).

- **Tipo de V1**

- a) **D1: Método PCI**

Quispe Vera y Condor Buitrón (2020) nos mencionan que: “Es la forma más completa y sencilla de aplicar, lo cual no se necesita hacer uso de instrumentos específicos para su análisis y puntuación ideal del asfalto PCI difiere de cero para un asfalto dañado en buenas circunstancias”.

El índice de condición del pavimento (PCI) se establece como el método más integral para la evaluación y calificación imparcial de pavimentos, ya sean flexibles o rígidos, dentro de los modelos de administración vial existentes, según el propio manual del PCI (Garcia Orosco, 2022).

El PCI es un valor que, evalúa el estado de la superficie del pavimento y ofrece una medición de la situación actual del pavimento, fundamentada en las imperfecciones visibles en su superficie. Asimismo, refleja la solidez estructural y el estado operativo de la superficie, incluyendo la rugosidad en áreas específicas y aspectos de seguridad. No es capaz de evaluar la resistencia estructural ni proporciona una medida directa de la adherencia o rugosidad. Ofrece un criterio objetivo y lógico para establecer la urgencia de la conservación y las prioridades asociadas.



Rangos de calificación del PCI

García Orosco (2022) relacionando la severidad, cantidad o densidad se puede conocer el deterioro de la estructura del pavimento. Mediante la aplicación de “valores deducidos”, que sirven como factores de ponderación, el valor numérico del PCI está en el rango del 0 al 100. En cuanto a la calificación, para el ASTM varía de “fallado” a “bueno”. Sin embargo, el Manual de Cálculo de índice de condición de pavimento, establece el rango de clasificación entre “excelente” y “fallado”, como se muestra en la Tabla 19:

Tabla 18— Rangos de clasificación del PCI

Escala numérica	Standard PCI Rating Scale (ASTM)	Clasificación (Manual PCI)
100 - 85	Bueno	Excelente
85 - 70	Satisfactorio	Muy Bueno
70 - 55	Tolerable	Bueno
55 - 40	Pobre	Regular
40 - 25	Muy Pobre	Malo
25 - 10	Severo	Muy malo
10 - 0	Fallado	Fallado

Fuente: ASTM D6433-07: Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys. (ASTM International, 2008).

Categoría de fallas

Tabla 19— Tipos de Fallas para la metodología del Manual PCI

Pavimento asfáltico		Pavimento de concreto hidráulico	
Nº	Daño	Nº	Daño
1	Piel de Cocodrilo.	21	Blow up / Buckling.
2	Exudación.	22	Grieta de esquina.
3	Agrietamiento en bloque.	23	Losa dividida.
4	Abultamientos y hundimientos.	24	Grieta de durabilidad 'D'.
5	Corrugación.	25	Escala.
6	Depresión.	26	Sello de junta.
7	Grieta de borde.	27	Desnivel Carril / Berma.
8	Grieta de reflexión de junta.	28	Grieta lineal.
9	Desnivel carril / berma.	29	Parqueo (grande).
10	Grietas longitudinal y transversal	30	Parqueo (pequeño)
11	Parqueo.	31	Pulimento de agregados
12	Pulimento de agregados.	32	Popouts
13	Huecos.	33	Bombeo
14	Cruce de vía férrea.	34	Punzonamiento.
15	Ahuellamiento.	35	Cruce de vía férrea



16	Desplazamiento.	36	Desconchamiento
17	Grieta parabólica (slippage)	37	Retracción
18	Hinchamiento.	38	Descascaramiento de esquina
19	Desprendimiento de agregados.	39	Descascaramiento de junta

Fuente: Adaptado de PAVER : Pavement maintenance management system – PCI distress identification manual. (U.S. Army Corps of Engineers, 2001).

La Tabla 19 muestra una tabla que muestra el número de fallos mencionados en el Manual de PCI y su descripción.

Tabla 20— Longitudes de Unidades de Muestreo Asfálticas

Ancho de calzada (m)	Longitud de la unidad de muestreo (m)
5.0	46.0
5.5	41.8
6.0	38.3
6.5	35.4
7.3 (máximo)	31.5

Fuente: Adaptado de PAVER : Pavement maintenance management system – PCI distress identification manual. (U.S. Army Corps of Engineers, 2001).

Cada fallo afecta la calidad del tránsito de forma diferente, se muestran aspectos generales al realizar una revisión de daños y la gravedad de estos.

- L: (Low: Bajo). No se requiere disminuir la velocidad por razones de confort o seguridad al notar irregularidades en la carretera. Se sienten las vibraciones en el automóvil (por ejemplo, por baches). Las protuberancias o hundimientos aislados generan un pequeño salto en el vehículo, pero ocasionan poco malestar.
- M: (Medium: Medio): Las oscilaciones en el auto son notables y es necesario disminuir la velocidad para mejorar el confort y la seguridad; de lo contrario, los bultos o depresiones individuales provocan un rebote considerable, generando malestar.
- H: (High: Alto): Las oscilaciones en el automóvil son tan intensas que es necesario disminuir la velocidad de manera significativa para garantizar la comodidad y la seguridad; o los bultos o depresiones individuales provocan un rebote excesivo del automóvil, generando una gran incomodidad o un alto riesgo de peligro o daño grave al vehículo.

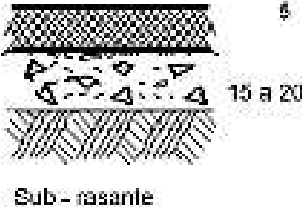
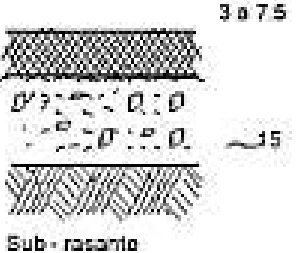
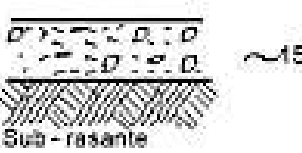


Dado que es una inspección visual, el PCI no tiene como objetivo evaluar la capacidad estructural, ni ofrecer una medición directa de la resistencia de la rodadura o la rugosidad. En cambio, ofrece una base objetiva y lógica para establecer las necesidades de mantenimiento y reparación y establecer las prioridades (García Orosco, 2022).

Tipos de pavimentos

Existen Pavimentos flexibles, rígidos y mixtos.

Tabla 21— Tipos de pavimentos

TIPO DE PAVIMENTO	SECCIÓN TÍPICA (espesor en cm)	OBSERVACIONES Y CARACTERÍSTICAS
1. Pavimentos flexibles	 <p>Sub-rasante</p>	Predominante en pavimentos nuevos y por consiguiente en áreas de urbanización más recientes. Las carpetas asfálticas en general se ejecutan con mezcla en caliente; bases granulares de material seleccionado en espesores de 15 a 20 cm.
2. Pavimentos mixtos (pavimentos rígidos cubiertos con mezclas asfálticas)	 <p>Sub-rasante</p>	Se encuentra en pavimentos rígidos que han recibido un recapado de asfalto como rehabilitación en algún momento de su período de servicio.
3. Pavimentos rígidos	 <p>Sub-rasante</p>	Predominante en el área urbana más antigua, en algunos casos apoyados sobre sub-áreas granulares de material seleccionado o eventualmente una cama de arena de reducido espesor.

Fuente: Manual de identificación, clasificación y tratamientos de fallas en pavimentos urbanos (MICTFPU, 1999).

Severidad y extensión de fallas

La gravedad hace referencia a la severidad del problema. El nivel de gravedad, fundamentado en experiencia anterior, se divide en tres grados: bajo, moderado y alto.



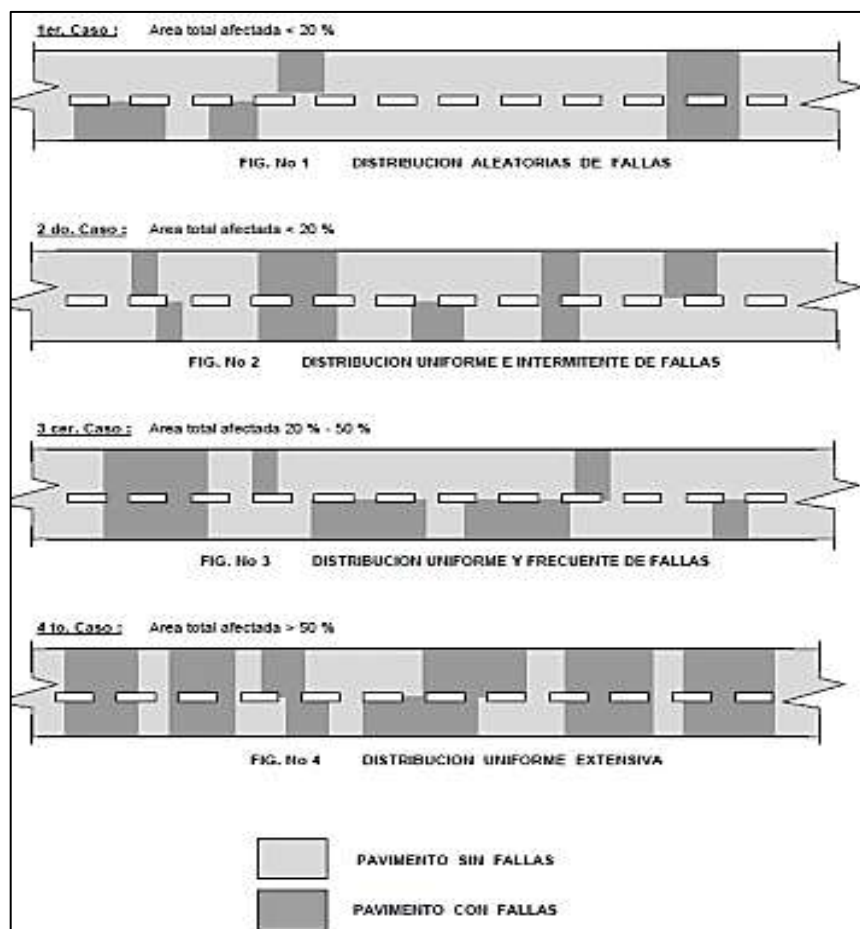


Figura 17 — Casos de tramos en proceso de evaluación de pavimentos
 Fuente: Manual de identificación, clasificación y tratamientos de fallas en pavimentos urbanos (MICTFPU, 1999).

Tabla 22— Categorías de fallas

CATEGORÍA:	PAVIMENTOS	
	Pavimentos flexibles y mixtos	Pavimentos rígidos
1 Desintegraciones y otros	Peladuras Baches descubiertos Pulimentos de superficie Desintegración de borde Exudación de asfalto	Descascaramiento Peladuras Baches descubiertos Pulimento de la superficie Deficiencia de juntas
2 Deformaciones	Ahuellamiento (hundimiento, corrugación, corrimiento, hinchamiento)	Levantamiento Dislocamiento (hundimiento)
3 Agrietamientos	Fisuras (tipo piel de cocodrilo, longitudinales, transversales, en arco) Por reflexión de juntas	Fisuras y rajaduras (en bloques, de esquina, longitudinales, transversales o diagonales, inducidas) Losas subdivididas

Fuente: Manual de identificación, clasificación y tratamientos de fallas en pavimentos urbanos (MICTFPU, 1999).



b) D2: Método VIZIR

Quispe Vera y Condor Buitre (2020), nos hace mención que “esta clase de imperfecciones, concurrentes notables en su funcionalidad, tiene que estar en buen sentido geotécnico con gran amplitud, en lo cual sobrepasara la relevancia de este método”.

Garcia Orosco (2022), Es un sistema de fácil aplicación, en el cual se establece una distinción clara entre fallas estructurales y funcionales. El método clasifica los deterioros de los pavimentos asfálticos en dos grandes categorías, A y B.

- Tipo A: Caracterizan condición estructural, teniendo solución de mantenimiento que deriva de su capacidad portante, calidad de materiales.
- Tipo B: Caracterizan condición funcional, teniendo solución de mantenimiento derivada de su reconocimiento visual. Los daños tipo A son asociados generalmente a insuficiencia de a capacidad estructural del pavimento, mientras que los daños de tipo B están asociados a aspectos del proceso constructivo.

Los daños de la primera categoría se asocian generalmente con obras de rehabilitación de costo alto; mientras que los daños de la segunda categoría, con obras de mantenimiento periódico. (MTC, 2014).

3.2.7.1 Condiciones superficiales

Quispe Vera y Condor Buitre (2020), las condiciones superficiales de pavimento flexible se encuentran “conformadas por subbase y base, así como la capa superior es una carpeta compuesta de aditivos, esencialmente se tiene en cuenta como capa superior”. Según QUISPE VERA y Condor Buitre (2020) “las condiciones superficiales están constituidas de una carpeta de rodadura, la cual se flexiona de acuerdo con las cargas que se presentan, provocando deformaciones mínimas en las capas; base, subbase y la superficie de rodaduras”.

Las condiciones superficiales del pavimento flexible se caracterizan por la estética que tiene, así mismo, algunas fallas que pueden presentar en transcurso del tiempo, también se caracteriza por ser económico en la elaboración inicial.



3.2.7.2 Tipo de V2

Rugosidad

Quispe Vera y Condor Buitre (2020), nos menciona que “la rugosidad como las desviaciones de la superficie de una vía, con respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la movilidad de los vehículos y la calidad de manejo, y como consecuencia surge mayor gasto de mantenimiento vehicular”.

Baches

Miranda Rebolledo (2010), nos menciona “cavidad, normalmente redondeada, que se forma al desprenderse de la mezcla asfáltica, para considerar como bache al menos una de sus dimensiones debe tener un mínimo de 150mm”. Considerándose un pavimento insuficiente para el nivel de solicitudes y características de la subrasante, así mismo, drenaje inadecuado o insuficiente.

Grietas

Miranda Rebolledo (2010), hace mención “son grietas interconectadas con patrones irregulares, generalmente ubicadas en zonas donde hay repeticiones de carga que se dan por fatiga de la estructura o de la carpeta asfáltica (espesor insuficiente y deformaciones de la subrasante, así mismo, se encuentra grietas con tendencia longitudinal, estas se dan a falta de confinamiento lateral de la estructura debido a la carencia de bordillos”.

Relación de Fallas



Tabla 23— Fallas consideradas por método VIZIR

Clasificación de los daños	Código de daño	Daños	Gravedad	Posibles técnicas de rehabilitación
Daños estructurales (Tipo A)	1	Piel de cocodrilo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Malla grande (>0.5 m) sin material suelto 2. Malla mediana (0.3 y 0.5 m) con o sin material suelto. 3. Malla pequeña (<0.3 m) con o sin material suelto. 	Tratamientos adecuados: Sobrecapa estructural, Reciclado en frío en el sitio, Reciclado en planta en caliente, Remoción y reemplazo de capas, whitetopping, Bacheo y geomallas (como tratamientos previos).
	2	Fisuras longitudinales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fisuras finas en las huellas del tránsito (ancho menor a 1 mm). 2. Fisuras abiertas y/o ramificadas sin pérdida de material (ancho mayor a 1 mm). 3. Fisuras abiertas y/o ramificadas con pérdida de material (ancho mayor a 1 mm). 	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamientos adecuados: Sobrecapa estructural, Geotextiles y geomallas (como tratamientos previos). • Otros tratamientos: Tratamiento superficial, mezcla drenante, Reciclado, remoción y reemplazo de capas, whitetopping, Parcheo, bacheo, mejoramiento de drenaje, SAMI, ruteo y sello (como tratamientos previos).
	3	Deformación por deficiencia estructural	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad sensible al usuario pero menor a 2 cm. 2. Profundidad entre 2 cm y 4 cm. 3. Profundidad mayor a 4 cm. 	Tratamientos adecuados: Remoción y reemplazo de capas, whitetopping. Bacheo, fresado, capa de nivelación (como tratamientos previos).
	4	Ahuellamiento viscoelástico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad sensible al usuario, menor a 1 cm. 2. Profundidad mayor a 1 cm. 	Tratamientos adecuados: Sobrecapa estructural, fresado y Sobrecapa, reciclado superficial en caliente, reciclado en planta en caliente, remoción y reemplazo de capas, whitetopping. Parcheo, bacheo, fresado, relleno de zonas ahuelladas y capa de nivelación (como tratamientos previos).
	5	Reparaciones o bacheo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reparación o bacheo para daños superficiales. 2. Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en buen estado. 3. Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en mal estado. 	Considerados como tratamientos previos de rehabilitación de pavimentos.

Daños superficiales (Tipo B)	6	Desprendimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Puntual sin aparición de la base granular. 2. Continuo sin aparición de la base granular o puntual con aparición de la base granular. 3. Continuo, con aparición de la base granular. 	Tratamientos adecuados: Sobrecapa estructural, reciclado en planta en caliente. Bacheo (como tratamiento previo).
	7	Huecos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diámetro menor a 20 cm. 2. Diámetro entre 20 y 50 cm. 3. Diámetro mayor a 50 cm. 	Tratamientos adecuados: Sobrecapa estructural, reciclado en planta. Bacheo y geomallas (como tratamiento previo).
	8	Fisuras transversales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fisuras finas en las huellas del tránsito (ancho menor a 1 mm) 2. Fisuras abiertas y/o ramificadas sin pérdida de material (ancho mayor a 1 mm) 3. Fisuras abiertas y/o ramificadas con pérdida de material (ancho mayor a 1 mm) 	Tratamientos adecuados: Sobrecapa estructural, Fresado y Sobrecapa, Reciclado. Geotextiles, geomallas, SAMI, Sello de grietas, Ruteo y sello (como tratamientos previos)
	9	Exudación	<ol style="list-style-type: none"> 1. Puntual. 2. Continua. 3. Continua, con superficie viscosa. 	Tratamientos adecuados: Mezcla drenante, reciclado en planta en caliente. Bacheo y fresado (como tratamientos previos).

Fuente: Adaptado del manual de carreteras – suelos y pavimentos, MTC (2014), y de las guías técnicas de INVIAS.

Es necesario calcular el índice de fisuración (If), el cual está relacionado con la intensidad y el alcance de las fisuras y grietas superficiales. Se tienen en cuenta las fallas de tipo.

Tabla 24— Índice de fisuración (If)

Examen	Índice de fisuración (If)	Extensión vs gravedad	0 al 10%	10% al 50%	Mayor a 50
		Visual	1	1	2
	2	2	3	4	
	3	3	4	5	

Fuente: Adaptado de las guías técnicas de INVIAS.

Tabla 25— Índice de deformación (Id)

Examen	Índice de deformación (Id)	Extensión vs gravedad	0 al 10%	10% al 50%	Mayor a 50
		Visual	1	1	2
	2	2	3	4	
	3	3	4	5	

Fuente: Adaptado de las guías técnicas de INVIAS.

Para el cálculo del “índice de deformación” (Id), está basado en los mismos factores.

Tabla 26— Índice de deterioro superficial (Is)

Índice de deterioros (Is)	If vs Id	0	1 a 2	3	4 a 5
	0	1	2	3	4
1 a 2	3	3	4	5	
3	4	5	5	6	
4 a 5	5	6	7	7	

Fuente: Adaptado de las guías técnicas de INVIAS.

A partir de la relación entre los dos parámetros, se obtiene el primer índice de evaluación presentado en la Tabla 26, el cual debe ajustarse de acuerdo con la longitud y la calidad del trabajo de reparación. Al final, se determina el “índice de deterioro superficial” (Is), que oscila entre 1 y 7.



Tabla 27— Corrección por reparación

Extensión vs gravedad	0 al 10%	10% al 50%	Mayor a 50
1	0	0	0
2	0	0	0+1
3	0	0+1	0+1

Fuente: Adaptado de las guías técnicas de INVIAS.

Tabla 28— Rangos de calificación del método VIZIR

RANGOS DE CALIFICACIÓN DEL VIZIR	RANGO CALIFICACIÓN
1 y 2	Bueno
3 y 4	Regular
5, 6 y 7	Deficiente

Fuente: Adaptado de las guías técnicas de INVIAS.

3.2.8 Estrategias para mejorar la integridad estructural en pavimentos conservación vial

Se presentan las diversas actividades diseñadas para mantener a largo plazo la total transpirabilidad de los caminos. El propósito es prevenir al máximo la pérdida progresiva del capital invertido en las carreteras, a través de la administración de programas de conservación orientados a salvaguardar la estructura fundamental y la superficie de rodadura (García Orosco, 2022).

- **Mantenimiento rutinario**

Reparación para subsanar defectos (fallas) en la calzada y el pavimento, es llevado a cabo después que el deterioro ha ocurrido y usualmente aplicando tratamientos de acuerdo con los niveles de deterioro y bajo límites aceptables, con frecuencia de una o más veces al año, su objetivo es evitar la destrucción gradual de una vía mediante acciones y reparaciones preventivas de protección física de la estructura y la superficie de rodadura (García Orosco, 2022).

- **Mantenimiento diferido**

La reparación de fallos en la calzada y el pavimento se realiza después de que se ha producido el deterioro, generalmente aplicando tratamientos acordes a los niveles de deterioro y bajo límites aceptables, usualmente una o más veces al año. Su meta es prevenir la degradación progresiva de una vía a través de acciones y

reparaciones preventivas de protección física de la estructura y la superficie de la rodadura (García Orosco, 2022).

- **Mantenimiento periódico**

Se refiere a la reparación y renovación parcial extensiva que se realiza cada cierto tiempo en las carreteras, con el objetivo de prevenir deterioros que perjudiquen la estructura fundamental y la superficie de las carreteras (García Orosco, 2022).

- **Rehabilitación**

Reparación selectiva mayor, con fortalecimiento del pavimento o del camino. Es necesario llevar a cabo labores de mantenimiento como el tratamiento de fisuras, parchados, etc. en la estructura actual y posibles mejoras en el drenaje, cuando se requiera (García Orosco, 2022).

- **Reconstrucción**

Es la renovación completa de la estructura, con una previa demolición parcial o completa de la estructura existente, las causas determinantes probables son una deficiente construcción o la ausencia de mantenimiento adecuado, su finalidad es Restaurar los deterioros provocados por desatención o descuido prolongado de las vías, a fin de asegurar el normal funcionamiento de la vía, economizando el costo posible (García Orosco, 2022).

- **Construcción (Obra nueva)**

Se trata de construir una vía o caminos pavimentados (flexibles y rígidos), de grava, o de tierra con nuevo trazo; ampliación de nuevos carriles; creación de vías adicionales, vías de servicio, y vías de enlace a desnivel, con el objetivo de optimizar la comunicación y el transporte de vehículos, pasajeros y carga entre áreas de demanda creciente de acuerdo con las prioridades socioeconómicas (García Orosco, 2022).

Tabla 29— Guía para estimar la condición de pavimento

PCR	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO
0 - 20	Pavimento en condiciones deficientes a muy deficientes, agrietamientos, desportillamiento, dislocaciones severas y extensas. Circulación extremadamente incómoda, superficie muy rugosa y abrupta.
20 - 30	Pavimento en condiciones deficientes, con desportillamiento moderado, agrietamiento y dislocaciones severas y extensas. Circulación incómoda, superficie muy rugosa y abrupta.



30 - 40	Pavimento en condiciones deficientes a regulares con desportillamiento moderado y frecuente y agrietamiento moderado extenso. Circulación es regular a deficiente y la superficie moderadamente rugosa e irregular.
40 - 50	Pavimento en condiciones deficientes a regulares, con agrietamiento moderado frecuente y desportillamiento moderado intermitente. Circulación regular a deficiente. Superficie moderadamente rugosa e irregular.
50 - 65	Pavimento en condiciones regulares, con agrietamiento leve, moderado y frecuente y desportillamiento moderado a leve. Circulación es regular. Superficie es levemente rugosa e irregular.
65 - 75	Pavimento en relativas buenas condiciones, con agrietamientos y deformaciones leves y algunas áreas de desportillamiento. Circulación relativamente buena, con secciones rugosas e irregulares intermitentes.
75 - 90	Pavimento en buenas condiciones, con agrietamiento frecuente pero leve. Circulación buena a muy buena. Algunas secciones levemente rugosas e irregulares.
90 - 100	Pavimento en condiciones excelentes, con pocas grietas. Circulación excelente. Muy pocas áreas con deformaciones leves.

Fuente: Manual de identificación, clasificación y tratamientos de fallas en pavimentos urbanos (MICTFPU, 1999).

Tabla 30— Tratamiento para vías urbanas

CONDICIÓN DEL PAVIMENTO	PCR	TRATAMIENTOS
Pavimento en condiciones excelentes. Circulación muy confortable. Posibles depresiones menores. No hay defectos de superficie o agrietamientos de ningún tipo.	80 - 100	No se realiza ninguna acción.
Pavimento en buenas condiciones. Circulación cómoda. Algunas depresiones debidas a pequeñas deformaciones. Defectos y/o agrietamientos de superficie intermitentes (de bajo a moderado).	60 - 80	Se lleva a cabo Mantenimiento normal. La vía es candidata potencial para estrategias de mantenimiento preventivo.
Pavimento en condiciones regulares. Circulación aceptable. Depresiones intermitentes a frecuentes debidas a deformaciones de la superficie. Defectos y agrietamientos de la superficie moderados, intermitentes a frecuentes. Se pueden presentar niveles bajos de piel de cocodrilo localizado.	40 - 60	Mantenimiento correctivo para mantener el nivel de serviciabilidad. La vía es candidata para mantenimiento correctivo mayor. La vía es candidata para rehabilitación en 5 años.
Pavimentos en condiciones deficientes. La circulación es apenas aceptable. Depresiones frecuentes debidas a deformaciones moderadas a severas de la superficie. Defectos y agrietamientos de superficie frecuentes. Piel de cocodrilo localizado a nivel alto.	20 - 40	Mantenimiento correctivo para retardar el deterioro rápido del nivel de serviciabilidad. Candidata para rehabilitación en 3–5 años.
Pavimento en condiciones muy deficientes. Circulación muy incómoda. Depresiones frecuentes y extensas debidas a deformaciones moderadas a severas de superficie, frecuentes a	0 - 20	Mantenimiento correctivo para mantener serviciabilidad. Rehabilitación dentro de un período de



extensos. Piel de cocodrilo alta o moderada frecuente a extensa.		tres años. Candidata para Reconstrucción.
--	--	---

Fuente: Manual de identificación, clasificación y tratamientos de fallas en pavimentos urbanos (MICTFPU, 1999).

3.3 Marco conceptual

a) Pavimento

La estructura general del pavimento, subrasante, subbase, base y capas de pavimento colocadas sobre el nivel del suelo para soportar cargas de vehículos (Coronado Iturbide, 2002).

b) CRB (California bearing ratio)

Valor relativo de soporte de un suelo o material, que se mide por la penetración de una fuerza dentro de una masa de suelo (MTC, 2013).

c) Carretera

Camino para el tránsito de vehículos motorizados, de por lo menos dos ejes, con características geométricas definidas de acuerdo con las normas técnicas vigentes en el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2013).

d) Concreto

Mezcla de cemento Portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos (E060 Concreto Armado, 2009).

e) Aditivo.

Material distinto del agua, de los agregados o del cemento hidráulico, utilizado como componente del concreto, y que se añade a éste antes o durante su mezclado a fin de modificar sus propiedades (E060 Concreto Armado, 2009).

f) Agregado

Material granular, de origen natural o artificial, como arena, grava, piedra triturada y escoria de hierro de alto horno, empleado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulico (E060 Concreto Armado, 2009).



g) Grava

Agregado grueso, proveniente de la desintegración natural de los materiales pétreos. Se encuentra comúnmente en canteras y lechos de ríos, depositado en forma natural (E060 Concreto Armado, 2009).

h) Módulo de elasticidad

Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material (E060 Concreto Armado, 2009).

i) Resistencia de diseño

Resistencia nominal multiplicada por el factor de reducción de resistencia que corresponda (MTC, 2013).

j) Resistencia a compresión

Ensayo de resistencia a la compresión que se realiza colocando una muestra cilíndrica en una prensa al que se le aplica una fuerza hasta la rotura de la muestra o testigo (MTC, 2013).

k) Agregado denominado hormigón

Material formado por grava y arena utilizado en su estado natural de recolección (E060 Concreto Armado, 2009).

l) Agregado grueso

Agregado retenido en el tamiz 4,75 mm (Nº 4), proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas (E060 Concreto Armado, 2009).

m) Agregado fino

Agregado proveniente de la desintegración natural o artificial, que pasa el tamiz 9,5 mm (3/8") (E060 Concreto Armado, 2009).

n) Piedra triturada o chancada

Agregado grueso, obtenido por trituración artificial de rocas o gravas (E060 Concreto Armado, 2009).



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación.

4.1.1 Tipo de investigación

Según Arias Chávez y Cangalaya Sevillano (2023), la investigación aplicada parte de conocimientos ya existentes y busca optimizar o proponer soluciones prácticas. Este tipo de investigación no pretende descubrir principios totalmente nuevos, como la investigación básica, sino utilizar lo ya conocido para resolver situaciones concretas o mejorar procesos.

Por su parte, Bunge (2002) señala que la finalidad de la investigación aplicada es resolver problemas reales y mejorar condiciones existentes. Se orienta a la innovación y se caracteriza por generar aplicaciones útiles basadas en el conocimiento científico.

4.1.2 Nivel de investigación

El estudio se ubicó en un nivel descriptivo, ya que, como señalan Arias Chávez y Cangalaya Sevillano (2023), este tipo de investigaciones se orienta a detallar y caracterizar las variables involucradas. Para ello, suelen apoyarse en técnicas de estadística descriptiva con el propósito de cuantificar y ordenar los resultados obtenidos.

Por su parte, Salkind (1999) indica que la investigación descriptiva se centra en ofrecer una visión detallada del estado actual de un fenómeno. Su finalidad es elaborar un diagnóstico o una descripción sistemática sin intervenir o modificar las condiciones estudiadas

La investigación buscó resolver un problema práctico y específico, relacionado con la mejora del diseño de pavimentos utilizando concreto reciclado. Es decir, no solo pretendió generar conocimiento teórico, sino aplicar ese conocimiento para evaluar y optimizar el uso de materiales reciclados en pavimentos rígidos.



4.2 Diseño de la investigación

De acuerdo con Hernández Sampieri (2014), el diseño de investigación constituye un elemento esencial para asegurar que los objetivos del estudio puedan alcanzarse de forma ordenada, coherente y metodológicamente sólida. Bajo esta premisa, el presente trabajo orientó su diseño hacia el análisis del comportamiento mecánico y del deterioro superficial en pavimentos rígidos que incorporan agregado grueso proveniente de concreto reciclado. El estudio se desarrolló específicamente en suelos limo-gravosos de la ciudad de Abancay, los cuales presentaron particularidades geotécnicas que demandaron una evaluación detallada para determinar si estos materiales reciclados podían emplearse adecuadamente en este tipo de infraestructura vial.

La metodología aplicada corresponde a un enfoque cuantitativo de carácter experimental, lo que permitió comparar de manera directa el desempeño de pavimentos construidos con concreto reciclado frente a aquellos elaborados con agregados convencionales. A través de ensayos de laboratorio, se obtuvieron datos precisos referentes a las propiedades físicas y mecánicas del concreto reciclado, así como información sobre su resistencia, durabilidad y comportamiento bajo condiciones reales de carga y servicio. Entre los datos se destaca:

- Evaluar las características físicas y mecánicas del agregado grueso de concreto reciclado y contrastarlas con las de los agregados convencionales en la construcción de pavimentos rígidos.
- Determinar cómo la incorporación de agregado grueso de concreto reciclado afecta la resistencia y durabilidad del pavimento rígido en las vías de transporte de la ciudad de Abancay.
- Analizar las interacciones y efectos del suelo limo-gravoso de Abancay en el comportamiento mecánico del pavimento rígido con agregado grueso de concreto reciclado.

Tabla 31 — Diseño para evaluar el comportamiento mecánico del pavimento

Grupos experimentales	Porcentaje de adición	Edad de ensayo (días)	Diseño de concreto	Ensayo estándar para $f'c$	Diseño óptimo
GE1	0%	3, 7, 14, 21 y 28	X1	O1	DO
GE2	15%	3, 7, 14, 21 y 28	X1	O2	DO
GE3	30%	3, 7, 14, 21 y 28	X1	O3	DO
GE4	45%	3, 7, 14, 21 y 28	X1	O4	DO
GE5	75%	3, 7, 14, 21 y 28	X1	O5	DO
GE6	90%	3, 7, 14, 21 y 28	X1	O6	DO



4.3 Descripción ética de la investigación

Durante la verificación de las muestras recolectadas para el desarrollo de esta investigación, se procesó la información con rigor técnico y precisión, recurriendo a diversas fuentes bibliográficas, así como a artículos científicos y recursos digitales confiables. Este proceso permitió asegurar la calidad de los datos y la validez del análisis. Según La Rosa (2021), en toda investigación es imprescindible preservar la dimensión ética y humana, garantizando que los intereses del investigador no entren en conflicto con los derechos de quienes participan en el estudio. Además, advierte que el investigador debe identificar los límites de su propia actuación para evitar vulneraciones y asegurar un comportamiento ético adecuado.

En la misma línea, López (2021) sostiene que el respeto por la dignidad humana, la privacidad, la autonomía y la confidencialidad constituye un pilar esencial de la labor investigativa. Asimismo, subraya la importancia de proteger a los animales y otros seres vivos involucrados en los ecosistemas, e indica que toda evaluación ética debe contemplar criterios metodológicos, legales, administrativos y éticos que estén alineados con estándares nacionales e internacionales vigentes.

Por su parte, CONCYTEC establece que tanto las instituciones como los investigadores deben velar por la protección del ambiente, asegurando que sus actividades científicas no generen impactos negativos sobre los ecosistemas y cumplan plenamente con la normativa peruana relacionada con la investigación responsable.

Asimismo, el Código de Ética para la Investigación de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA) establece lineamientos éticos fundamentales que los investigadores deben observar. Entre ellos destacan:

- Realizar investigaciones pertinentes y originales, alineadas con las líneas institucionales reconocidas.
- Usar de manera eficiente los recursos destinados a la investigación.
- Cumplir con las normas institucionales y gubernamentales que regulan la actividad científica.
- Actuar con rigor científico, garantizando la validez y confiabilidad de los métodos y datos utilizados.
- Comunicar los resultados de forma completa, transparente y oportuna, así como compartirlos con las comunidades participantes cuando corresponda.
- Resguardar la confidencialidad de la información obtenida y evitar su uso con fines ajenos o ilícitos.



4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

La población de estudio estuvo conformada por mezclas de concreto que usan agregado grueso reciclado y agregados naturales, aplicadas en pavimentos rígidos construidos sobre suelos limo-gravosos de Abancay. Estas mezclas se consideraron de acuerdo con las condiciones geotécnicas locales y por interés en evaluar opciones sostenibles además aplicables en infraestructura vial.

4.4.2 Muestra

En la presente investigación se analizaron los agregados tradicionales y agregados gruesos provenientes de concreto reciclado para determinar sus propiedades físicas, mecánicas y su influencia en la resistencia, durabilidad y desempeño del concreto usado en pavimentos. En función de estas características se seleccionaron las muestras a emplear en los ensayos.

De este modo la investigación estuvo por 60 muestras con 6 repeticiones para cada edad de ensayo, conformados en 6 grupos experimentales.

- Grupo experimental 1 (G_1)
10 muestras con incorporación de AGR al 0 %
- Grupo experimental 2 (G_2)
10 muestras con incorporación de AGR al 15 %
- Grupo experimental 3 (G_3)
10 muestras con incorporación de AGR al 30 %
- Grupo experimental 4 (G_4)
10 muestras con incorporación de AGR al 45 %
- Grupo experimental 5 (G_5)
10 muestras con incorporación de AGR al 75 %
- Grupo experimental 6 (G_6)
10 muestras con incorporación de AGR al 90 %

































Tabla 32— Cantidad de muestras del grupo experimental 1 (G1)

Edad de ensayo	Muestra	R1	R2	R3	Muestra	R4	R5	R6
3 días	Muestra 1				Muestra 2			
7 días	Muestra 3				Muestra 4			
14 días	Muestra 5				Muestra 6			
21 días	Muestra 7				Muestra 8			
28 días	Muestra 9				Muestra 10			






















Nota: R1, 2, 3, 4, 5, 6: Número de repeticiones

Tabla 33— Cantidad de muestras del grupo experimental 2 (G2)

Edad de ensayo	Muestra	R1	R2	R3	Muestra	R4	R5	R6
3 días	Muestra 11				Muestra 12			
7 días	Muestra 13				Muestra 14			
14 días	Muestra 15				Muestra 16			
21 días	Muestra 17				Muestra 18			
28 días	Muestra 19				Muestra 20			





























Nota: R1, 2, 3, 4, 5, 6: Número de repeticiones

Tabla 34— Cantidad de muestras del grupo experimental 3 (G3)

Edad de ensayo	Muestra	R1	R2	R3	Muestra	R4	R5	R6
3 días	Muestra 21				Muestra 22			
7 días	Muestra 23				Muestra 24			
14 días	Muestra 25				Muestra 26			
21 días	Muestra 27				Muestra 28			
28 días	Muestra 29				Muestra 30			































Nota: R1, 2, 3, 4, 5, 6: Número de repeticiones

Tabla 35— Cantidad de muestras del grupo experimental 4 (G4)

Edad de ensayo	Muestra	R1	R2	R3	Muestra	R4	R5	R6
3 días	Muestra 31				Muestra 32			
7 días	Muestra 33				Muestra 34			
14 días	Muestra 35				Muestra 36			
21 días	Muestra 37				Muestra 38			
28 días	Muestra 39				Muestra 40			

Nota: R1, 2, 3, 4, 5, 6: Número de repeticiones

Tabla 36— Cantidad de muestras del grupo experimental 5 (G5)

Edad de ensayo	Muestra	R1	R2	R3	Muestra	R4	R5	R6
3 días	Muestra 41				Muestra 42			
7 días	Muestra 43				Muestra 44			
14 días	Muestra 45				Muestra 46			
21 días	Muestra 47				Muestra 48			
28 días	Muestra 49				Muestra 50			

Nota: R1, 2, 3, 4, 5, 6: Número de repeticiones

Tabla 37— Cantidad de muestras del grupo experimental 6 (G6)

Edad de ensayo	Muestra	R1	R2	R3	Muestra	R4	R5	R6
3 días	Muestra 51				Muestra 52			
7 días	Muestra 53				Muestra 54			
14 días	Muestra 55				Muestra 56			
21 días	Muestra 57				Muestra 58			
28 días	Muestra 59				Muestra 60			

Nota: R1, 2, 3, 4, 5, 6: Número de repeticiones



4.5 Procedimiento

Se siguieron los procedimientos señalados en la Figura 18 para la investigación.

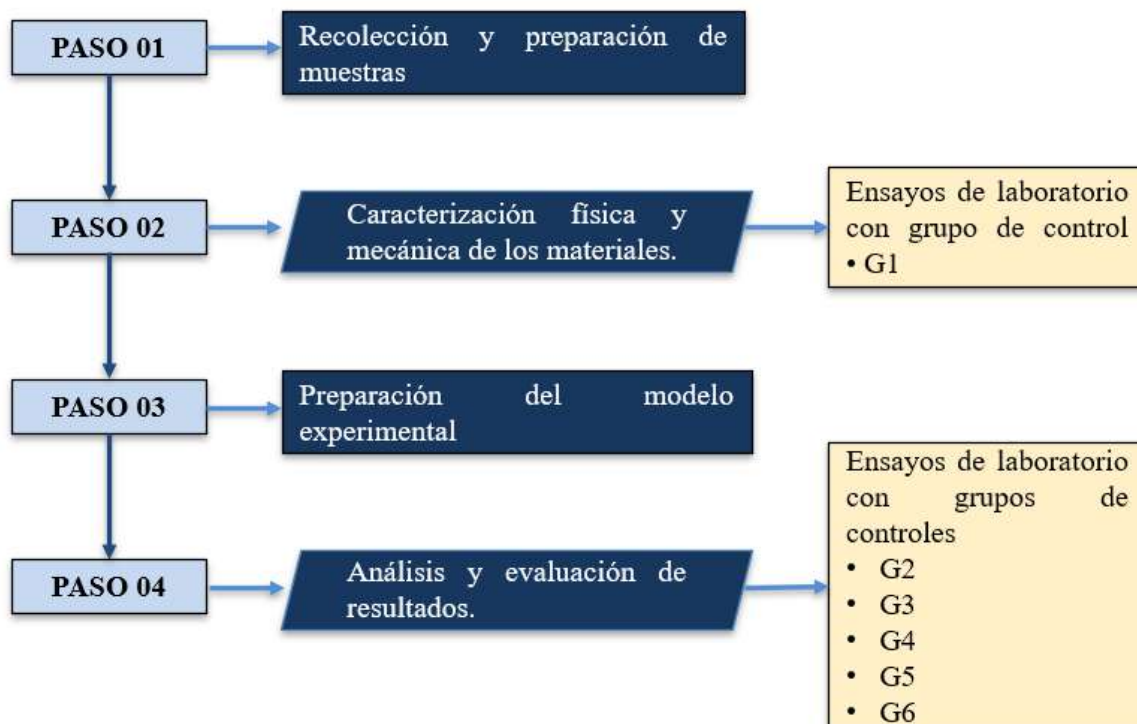


Figura 18— Esquema del procedimiento de la investigación

A continuación, se detalla el esquema del procedimiento de la investigación en las siguientes tablas de acuerdo con los cuatro pasos descritos en la anterior figura.

Tabla 38 — PASO 01: Recolección y preparación de muestras

Etapa	Descripción
Selección de sitios	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de sitios representativos en Abancay con suelos limo-gravosos. - Se deben seleccionar sitios que reflejen las características típicas de los suelos donde se utilizarán pavimentos rígidos con concreto reciclado.
Extracción de muestras	<ul style="list-style-type: none"> - Obtención de muestras de suelo y concreto reciclado de diferentes profundidades y ubicaciones dentro de los sitios seleccionados. - Se debe recolectar un número adecuado de muestras para garantizar que los resultados sean representativos.
Preparación de muestras	<ul style="list-style-type: none"> - Procesamiento y acondicionamiento de las muestras. Esto incluye la desagregación, tamizado, y preparación del concreto reciclado para los ensayos de laboratorio. - Asegurar la homogeneidad de las muestras para garantizar resultados consistentes.



Tabla 39 — PASO 2: Caracterización física y mecánica de los materiales

Etapa	Descripción
Propiedades físicas	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de propiedades físicas básicas como granulometría, contenido de humedad, densidad y límites de Atterberg. - Estas propiedades se medirán tanto para los suelos como para el agregado reciclado y los agregados tradicionales.
Propiedades mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> - Medición de parámetros como resistencia a compresión. - Estos ensayos permitirán comparar el comportamiento de los pavimentos con agregados reciclados y tradicionales.
Ensayos de laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos específicos como resistencia a compresión. - Se busca obtener datos precisos bajo condiciones controladas.

Tabla 40 — PASO 03: Preparación del modelo experimental

Etapa	Descripción
Selección de materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Selección del concreto reciclado y agregados tradicionales representativos para la investigación. - Caracterización preliminar de los materiales para asegurar que los modelos a escala sean fieles a las condiciones reales en la ciudad de Abancay.
Preparación de modelos	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción de modelos a escala de pavimentos rígidos en laboratorio. - Estos modelos deben reproducir fielmente las propiedades mecánicas y geotécnicas del suelo limo-gravoso y el concreto reciclado.
Configuración de pruebas	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe configurar el equipo de pruebas para simular condiciones reales de uso de pavimentos.

Tabla 41 — PASO 4: Realización de pruebas y evaluación

Etapa	Descripción
Pruebas de resistencia y desgaste	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicación de pruebas de resistencia a compresión y desgaste a los modelos a escala de pavimento rígido.
Monitoreo de comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Registro continuo de datos durante las pruebas. - Se empleará la observación para verificar los cambios o daños que se generen en el proceso de prueba.
Análisis de resultados	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis detallado de los datos obtenidos durante los ensayos, identificando patrones de comportamiento del pavimento rígido con y sin agregado reciclado.
Comparación con normativa y teoría	<ul style="list-style-type: none"> - Comparación de los resultados experimentales con las normas técnicas aplicables y con la literatura teórica existente sobre el uso de concreto reciclado en pavimentos rígidos.
Interpretación de resultados	<ul style="list-style-type: none"> - Interpretación de los resultados obtenidos para determinar cómo las características específicas del suelo limo-gravoso y el uso de concreto reciclado influyen en la resistencia y durabilidad del pavimento rígido.



4.6 Técnicas e instrumentos

La técnica utilizada en esta investigación fue la observación, mediante la cual se recopiló información proveniente de los ensayos realizados a los agregados naturales, agregados reciclados, suelos y concreto en laboratorio. El procesamiento de dichos datos se efectuó empleando herramientas estadísticas, particularmente el software Excel, aplicando las ecuaciones correspondientes.

De acuerdo con Benassini (2009), la observación consiste en que el investigador se dedica a examinar acciones o hechos de interés sin intervenir directamente en ellos, limitándose a registrar lo que ocurre en la realidad estudiada.

Por su parte, Arias (1999) define las técnicas de investigación como las distintas formas utilizadas para obtener información, las cuales permiten seleccionar los procedimientos más adecuados para la recolección de datos según los objetivos del estudio.

Los instrumentos empleados en la presente investigación fueron las fichas de recolección de datos, elaboradas en función de los ensayos de laboratorio realizados y siguiendo estrictamente las Normas Técnicas Peruanas (NTP), así como manuales estandarizados aplicables.

Dichas fichas permitieron registrar los parámetros obtenidos en los ensayos de análisis granulométrico (NTP 400.037 / AASHTO T-89), peso unitario (NTP 400.017), peso específico y absorción (NTP 400.020 para agregados finos y NTP 400.021 para agregados gruesos), además de los ensayos de humedad en agregados (NTP 400.012).

Para los suelos, se consideraron los procedimientos establecidos para humedad (NTP 339.127 / ASTM D2216), análisis granulométrico, expansión (swell) y CBR (NTP 339.145 / ASTM D1883), así como el Proctor Modificado (NTP 339.141 / ASTM D1557). En el caso del concreto, se recopiló información del ensayo de resistencia a la compresión de cilindros siguiendo NTP 339.034, ASTM C39M y AASHTO T22. Asimismo, se incluyó el registro correspondiente al ensayo no normalizado de profundidad de huella de desgaste, también instrumentado mediante las fichas desarrolladas para tal fin.

4.7 Análisis estadístico

Para la evaluación estadística del estudio, se utilizó el análisis de varianza de un factor (ANOVA), dado que se formaron 6 grupos experimentales, cada uno con tres repeticiones, utilizando muestras de datos de naturaleza cuantitativa. Esto nos facilitará establecer si los resultados difieren considerablemente entre sí.



4.7.1 Análisis de varianza de un factor

Es un método para comprobar que la hipótesis de que tres o más promedios de población sean idénticos. Utiliza datos clasificados con un factor, lo que resulta en una propiedad utilizada para segmentar los datos muestrales en diferentes categorías (Triola, 2018).

Requisitos:

- Las distribuciones de las muestras son aproximadamente normales.
- Las desviaciones estándar de las muestras son iguales.
- Las muestras están basadas en datos cuantitativos.
- Las muestras no se relacionan entre sí.
- Las diversas muestras son de poblaciones categorizadas de una sola manera.

Procedimiento:

- Paso 1: Se plantea la hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_n$$

H_a : las medias son distintas

- Paso 2: Se determina el nivel de significancia
- Paso 3: Se determina la prueba de normalidad
- Paso 4: Se determina la prueba de igualdad de varianza
- Paso 5: Análisis de varianza de un factor
- Paso 6: Criterios de decisiones

Si $p\text{-valor} < 0.05$ aceptamos H_a

Si $p\text{-valor} \geq 0.05$ aceptamos H_0

4.7.2 Prueba de una hipótesis estadística

Se refiere a una regla que nos asiste en la toma de decisiones al analizar los valores experimentales; conlleva la aceptación o negación de la hipótesis. Poner el foco en dos hipótesis estadísticas, la hipótesis nula (H_0), que representa la hipótesis a probar, y la hipótesis alterna (H_a), que representa la hipótesis que se opone a la hipótesis nula y se admite cuando se descarta la hipótesis nula, ofrece una manera sencilla de establecer lo que se desea de un procedimiento de prueba de hipótesis estadísticas (Moya Calderón, 2009).



Hipótesis nula (H_0)

La hipótesis nula "anula" el impacto de un proceso y simboliza la falta de influencia de la variable en cuestión. Así pues, la definición de la hipótesis nula generalmente se contrapone a la definición de la hipótesis cierta (Moya Calderón, 2009, p.702)

Hipótesis alterna (H_a)

La hipótesis alternativa se plantea con menos exactitud en la mayoría de las situaciones; a menudo se describe como una variación de valores que predominaría si la variable que se analiza tuvo algún impacto. La hipótesis subyacente es la hipótesis que se opone a la hipótesis nula (Moya Calderón, 2009, p.702)



CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis de resultados

Es la cuantificación de las pruebas realizadas a cabo en laboratorio para posteriormente procesar los resultados del estudio de agregados, diseño de mezcla y los ensayos del concreto en estado fresco y endurecido para conocer los respectivos resultados.

5.1.1 Características de los agregados

Realizada el ensayo de granulometría se obtuvo los siguientes resultados:

a) Granulometría

Agregado fino:

Tabla 42 — Análisis granulométrico del agregado fino de cantera

Tamiz	Abertura (mm)	Pesos Retenidos (gr)	% Pesos Retenidos	% Retenidos Acumulados	% que pasa	Rango	
1 1/2"	37.500						
1"	25.000						
3/4"	19.000						
1/2"	12.500						
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
Nº 4	4.750	65.00	3.80	3.80	96.20	95	100
Nº 8	2.360	222.00	12.98	16.78	83.20	80	100
Nº16	1.180	445.00	26.02	42.81	57.20	50	85
Nº 30	0.600	502.00	29.36	72.16	27.80	25	60
Nº 50	0.300	250.00	14.62	86.78	13.20	5	30
Nº 100	0.150	197.00	11.52	98.30	1.70	0	10
< Nº 200	0.075	29.00	1.70	100.00	0.00		
TOTAL		1,710.00	100.00				
M.F.:		3.206	Tamaño máximo:		3/8"		

En la Tabla 42 se visualiza que, el agregado fino cuenta con un tamaño máximo de 3/8" y un módulo de finura de 3.206.



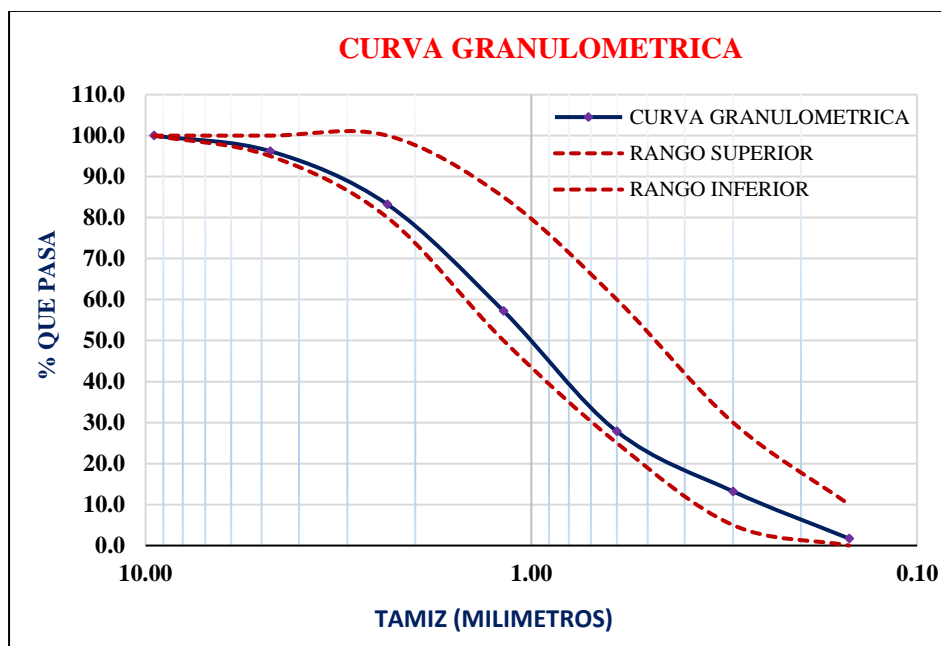


Figura 19 — Curva granulométrica del agregado fino de cantera

La Figura 19 muestra que la curva granulométrica se ubica dentro del límite superior e inferior establecido por la NTP 400.012, tal como se muestra en la Figura 19.

Agregado grueso:

Tabla 43 — Análisis granulométrico del agregado grueso de cantera

TAMIZ	Abertura (mm)	Pesos Retenidos (gr)	% Pesos Retenidos	% Retenidos Acumulados	% Q PASA	RANGO	
1 1/2"	37.500	0	0.00	0.00	100.0	100	100
1"	25.000	51	1.85	1.85	98.2	90	100
3/4"	19.000	1279	46.34	48.19	51.8	40	85
1/2"	12.500	1274	46.16	94.35	5.7	10	40
3/8"	9.500	130	4.71	99.06	0.9	0	15
N° 4	4.750	26	0.94	100.00	0.0	0	5
N° 8	2.360	0	0.00	100.00	0.0	0	0
N°16	1.180	0	0.00	100.00	0.0	0	0
N° 30	0.600	0	0.00	100.00	0.0	0	0
N° 50	0.300	0	0.00	100.00	0.0	0	0
N° 100	0.150	0	0.00	100.00	0.0	0	0
< N° 200	0.075	0	0.00	100.00	0.0	0	0
TOTAL		2760.00	100.00				
M.F.:		7.491		Tamaño máximo:		1 1/2"	



Se puede observar en la Tabla 43 que tiene un tamaño máximo de 1 1/2" y un módulo de finura de 7.491.

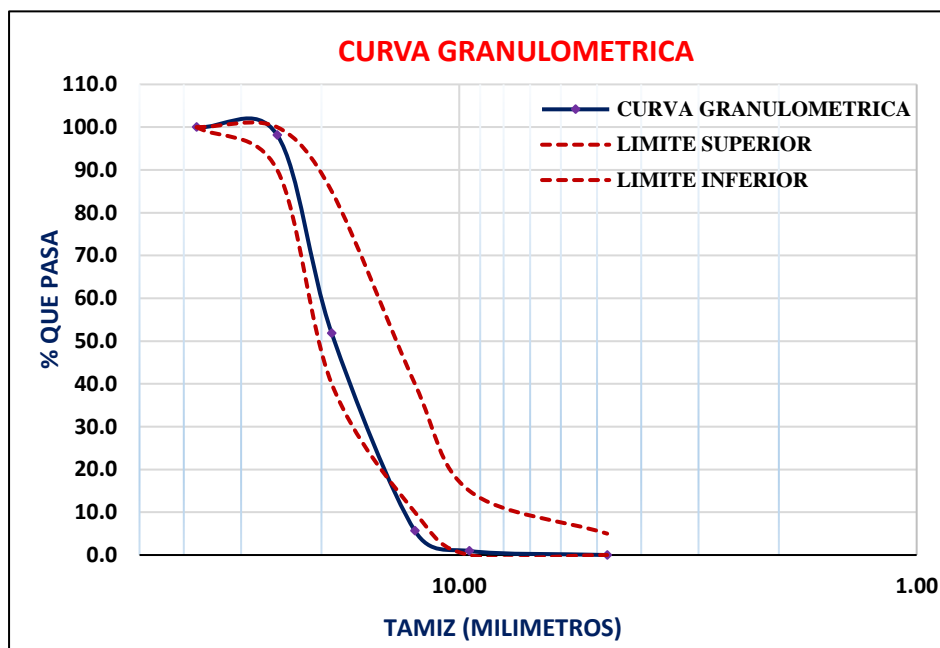


Figura 20 — Curva granulométrica del agregado grueso de cantera

Se observa en la Figura 20 que la curva granulométrica está ubicada dentro del límite superior e inferior establecido por la NTP 400.037.

Tabla 44 — Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado

TAMIZ	Abertura (mm)	Pesos Retenidos (gr)	% Pesos Retenidos	% Retenidos Acumulados	% Q PASA	RANGO	
1 1/2"	37.500		0.00	0.00	100.0	100	100
1"	25.000		0.00	0.00	100.0	90	100
3/4"	19.000	309.00	11.19	11.19	88.8	40	85
1/2"	12.500	1,360.00	49.26	60.45	39.6	10	40
3/8"	9.500	361.00	13.07	73.52	26.5	0	15
1/4"	4.750	387.00	14.02	87.54	12.5	0	5
N° 4	4.750	92.00	3.33	90.87	9.1	0	0
N° 8	2.360	143.00	5.18	96.05	3.9	0	0
N° 10	1.651	24.00	0.87	96.92	3.1	0	0
N° 16	1.180	34.00	1.23	98.15	1.8	0	0
N° 20	0.833	12.00	0.43	98.59	1.4	0	0
N° 30	0.600	14.00	0.51	99.09	0.9	0	0
N° 40	0.425	9.00	0.33	99.42	0.6	0	0
N° 50	0.300	7.00	0.25	99.67	0.3	0	0
N° 60	0.250	2.00	0.07	99.75	0.3	0	0



N° 80	0.180	4.00	0.14	99.89	0.1	0	0
N° 100	0.150	1.00	0.04	99.93	0.1	0	0
N° 200	0.075	2.00	0.07	100.00	0.0	0	0
TOTAL		2761.00	100.00				
M.F.:	6.685		Tamaño máximo:		1"		

Se puede observar en la Tabla 44 que, posee un tamaño máximo de 1" y un módulo de finura de 6.685.

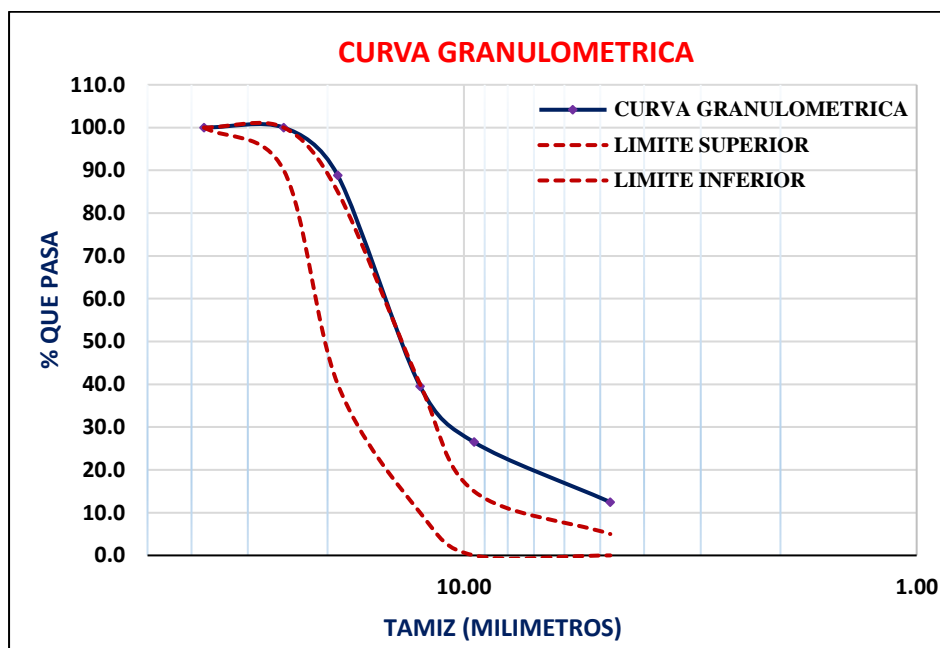


Figura 21 — Curva granulométrica del agregado grueso reciclado

NOTA: La Figura 21 muestra que la curva granulométrica se ubica por encima del límite superior establecido por la NTP 400.037.

b) Contenido de humedad

Agregado fino:

Tabla 45— Contenido de humedad del agregado fino de cantera

CONTENIDO DE HUMEDAD		TARAS			PROMEDIO
1	Tara N°	T1	T2	T3	4.44%
2	Peso de la tara + Peso de la muestra húmeda (gr)	70.10	68.60	65.00	
3	Peso de la tara + Peso de la muestra seca (gr)	68.05	66.55	63.10	
4	Peso del agua contenida (gr) (2)-(3)	2.05	2.05	1.90	
5	Peso de la tara (gr)	20.60	20.86	20.86	
6	Peso de la muestra seco (gr) (3)-(5)	47.45	45.69	42.24	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	4.32%	4.49%	4.50%	

NOTA: La Tabla 45 muestra los resultados logrados para el agregado fino de cantera, obteniendo un contenido de humedad del 4.44%.

Agregado grueso:


Tabla 46— Contenido de humedad del agregado grueso de cantera

CONTENIDO DE HUMEDAD		TARAS			PROMEDIO
1	Tara N°	T1	T2	T3	2.60%
2	Peso de la tara + Peso de la muestra húmeda (gr)	66.70	64.40	65.50	
3	Peso de la tara + Peso de la muestra seca (gr)	65.80	63.70	64.70	
4	Peso del agua contenida (gr) (2)-(3)	0.90	0.70	0.80	
5	Peso de la tara (gr)	35.00	33.40	33.60	
6	Peso de la muestra seco (gr) (3)-(5)	30.80	30.30	31.10	
7	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	2.92%	2.31%	2.57%	

NOTA: La Tabla 46 presenta los logros alcanzados para el agregado grueso de cantera, con un porcentaje de humedad del 2.60%.


c) Peso unitario y porcentajes de vacíos de los agregados

Tabla 47— Peso unitario suelto del agregado fino

DATOS ENSAYO	PESO UNITARIO SUELTO			DESCRIP. MUESTRA
	T1	T2	T3	
Peso molde (gr.)	7973	7973	7973	
Peso material + molde (gr.)	13126	13109	13111	
Peso neto del material (gr.)	5153	5136	5138	
Volumen del molde (cm ³)	3128	3128	3128	
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	1.647	1.642	1.643	
PROM. PESO UNITARIO (kg/m ³)	1.644			

NOTA: La Tabla 47 muestra los resultados logrados para el agregado fino de cantera, obteniendo un promedio de peso unitario suelto de 1.644 kg/m³.


Tabla 48— Peso unitario compactado del agregado fino

DATOS ENSAYO	PESO UNITARIO COMPACTADO			DESCRIP. MUESTRA
	T1	T2	T3	
Peso molde (gr.)	7973	7973	7973	
Peso material + molde (gr.)	13858	13902	13954	
Peso neto del material (gr.)	5885	5929	5981	
Volumen del molde (cm ³)	3128	3128	3128	
Peso unit. compactado (gr/cm ³)	1.881	1.895	1.912	
PROM. PESO UNITARIO (kg/m ³)	1.896			

NOTA: La Tabla 48 muestra los resultados logrados para el agregado fino de cantera, obteniendo un promedio de peso unitario compactado de 1.896 kg/m³.




Tabla 49— Peso unitario suelto del agregado grueso

DATOS ENSAYO	PESO UNITARIO SUELTO			DESCRIP. MUESTRA
	T1	T2	T3	
Peso molde (gr.)	7973	7973	7973	
Peso material + molde (gr.)	12092	12026	12018	
Peso neto del material (gr.)	4119	4053	4045	
Volumen del molde (cm ³)	3128	3128	3128	
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	1.317	1.296	1.293	
PROM. PESO UNITARIO (kg/m ³)	1.302			


NOTA: La Tabla 49 muestra los resultados logrados para el agregado grueso de cantera, donde se registró un promedio de peso unitario suelto de 1.302 kg/m³.

Tabla 50— Peso unitario compactado del agregado grueso

DATOS ENSAYO	PESO UNITARIO COMPACTADO			DESCRIP. MUESTRA
	T1	T2	T3	
Peso molde (gr.)	7973	7973	7973	
Peso material + molde (gr.)	12798	12813	12770	
Peso neto del material (gr.)	4825	4840	4797	
Volumen del molde (cm ³)	3128	3128	3128	
Peso unit. compactado (gr/cm ³)	1.543	1.547	1.534	
PROM. PESO UNITARIO (kg/m ³)	1.541			


NOTA: La Tabla 50 muestra los resultados de laboratorio logrados para el agregado grueso de cantera, obteniendo un promedio de peso unitario compactado de 1.541 kg/m³.

Tabla 51— Peso unitario suelto del agregado grueso reciclado

DATOS ENSAYO	PESO UNITARIO SUELTO			DESCRIP. MUESTRA
	T1	T2	T3	
Peso molde (gr.)	7973	7973	7973	
Peso material + molde (gr.)	12138	12174	12064	
Peso neto del material (gr.)	4165	4201	4091	
Volumen del molde (cm ³)	3128	3128	3128	
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	1.332	1.343	1.308	
PROM. PESO UNITARIO (kg/m ³)	1.327			

NOTA: La Tabla 51 muestra los resultados logrados para el agregado grueso reciclado, obteniendo un promedio de peso unitario suelto de 1.327 kg/m³.


Tabla 52— Peso unitario compactado del agregado grueso reciclado

DATOS	PESO UNITARIO COMPACTADO			DESCRIP. MUESTRA
	ENSAYO	T1	T2	
Peso molde (gr.)	7973	7973	7973	AG02 
Peso material + molde (gr.)	12903	12870	12777	
Peso neto del material (gr.)	4930	4897	4804	
Volumen del molde (cm ³)	3128	3128	3128	
Peso unit. compactado (gr/cm ³)	1.576	1.566	1.536	
PROM. PESO UNITARIO (kg/m ³)	1.559			

NOTA: La Tabla 52 muestra los resultados logrados para el agregado grueso reciclado, obteniendo un promedio de peso unitario compactado de 1.559 kg/m³.


d) Peso específico y absorción de los agregados

Tabla 53— Peso específico y absorción del agregado fino

N°	DATOS	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN			DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
	ENSAYO	T1	T2	T3	
1	Volumen del picnómetro (ml)	500.00	500.00	500.00	AF 
2	Peso del picnómetro (gr)	153.40	153.40	153.40	
3	Peso de la muestra seca (gr)	484.50	483.20	482.60	
4	Peso del picnómetro + agua + muestra (gr)	959.20	961.40	955.20	
5	Peso de la muestra saturada con superficie seca (gr)	504.20	501.60	503.50	
6	Peso del picnómetro + agua (gr)	650.60	650.60	652.60	
7	Peso de la muestra sumergida (gr)	308.60	310.80	302.60	
8	Peso del agua desplazada (gr)	175.90	172.40	180.00	
9	Peso del agua absorbida (gr)	19.70	18.40	20.90	
10	Peso específico (gr/cm ³)	2.74	2.79	2.76	
11	Capacidad de absorción	4.28%	4.39%	4.14%	
	Peso específico (gr/cm³)	2.76			
	Absorción (%)	4.27			


NOTA: La Tabla 53 presenta las conclusiones alcanzadas para el agregado fino, logrando un peso específico de 2.76 gr/cm³ y una absorción del 4.27%.

Tabla 54— Peso específico y absorción del agregado grueso

N°	DATOS	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN			DESCRIP. DE LA MUESTRA
	ENSAYO	T1	T2	T3	
1	Peso de la canastilla sumergida (gr)	865.00	870.00	868.00	AG 01 
2	Peso de la Muestra Seca (gr)	3010.00	3023.00	3012.00	
3	Peso de la canastilla + muestra sumergida (gr)	2145.00	2153.00	2144.00	
4	Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	3031.00	3044.00	3032.00	
5	Peso del Agua Absorbida (gr)	21.00	21.00	20.00	
6	Peso Específico (gr/cm ³)	2.65	2.64	2.67	
7	Capacidad de Absorción (%)	0.69	0.69	0.66	
	Peso Específico (gr/cm³)	2.65			
	Absorción (%)	0.68			

NOTA: La Tabla 54 muestra los resultados logrados para el agregado grueso, obteniendo un valor de peso específico de 2.65 gr/cm³ y una absorción del 0.68%.

Tabla 55— Peso específico y absorción del agregado grueso reciclado

N°	DATOS	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN			DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
	ENSAYO	T1	T2	T3	
1	Peso de la canastilla sumergida (gr)	866.00	872.00	869.00	AG 02 
2	Peso de la Muestra Seca (gr)	3010.00	3023.00	3012.00	
3	Peso de la canastilla + muestra sumergida (gr)	2144.00	2151.00	2143.00	
4	Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	3032.00	3046.00	3035.00	
5	Peso del Agua Absorbida (gr)	22.00	23.00	23.00	
6	Peso Específico (gr/cm ³)	2.66	2.67	2.67	
7	Capacidad de Absorción (%)	0.73	0.76	0.76	
	Peso Específico (gr/cm³)	2.67			
	Absorción (%)	0.75			

NOTA: En la Tabla 55 se puede apreciar los resultados obtenidos para el agregado grueso reciclado, el cual se obtuvo un valor de peso específico de 2.67 gr/cm³ y una absorción de 0.75%.

e) Abrasión de los ángeles

El ensayo de abrasión de los ángeles se realizó con el método B según la Tabla 56, para ver una de sus propiedades del agregado grueso como es la dureza de un agregado y el desgaste en acorde a la NTP 400.019.

Tabla 56— Tipo de método de ensayo para abrasión al desgaste por el método B

Método		A	B	C	D
Malla (Que pasa)	Retenido (Que pasa)	Cantidad de material a usar (gr.)			
1 1/2	1	1250			
1	3/4	1250			
3/4	1/2	1250	2500		
1/2	3/8	1250	2500		
3/8	1/4			2500	
1/4	N°4			2500	
N°4	N°8				5000
Peso total		5000	5000	5000	5000
N° de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación (minutos)		15	15	15	15

Agregado grueso:

Tabla 57— Desgaste del agregado grueso de cantera

Prueba	1
Granulometría usada en el Ensayo	A
Tamaño Máximo Nominal (mm)	3/4"
Estado de la Muestra	Seca
B: Masa antes del ensayo (g)	5000.00
C1 masa (100 rev)	4015.60
C2 masa (500 rev)	3511.90
D1 % pérdida 100 rev	20.00
D2 % pérdida 500 rev	30.00
% pérdida	30

NOTA: En la Tabla 57 se observa los resultados obtenidos de la prueba de abrasión de los ángeles, se obtuvo la pérdida del 30%.

Agregado grueso reciclado:

Tabla 58— Desgaste de agregado grueso reciclado

Prueba	1
Granulometría usada en el Ensayo	A
Tamaño Máximo Nominal (mm)	3/4"
Estado de la Muestra	Seca
B: Masa antes del ensayo (g)	5000.00
C1 masa (100 rev)	4001.20
C2 masa (500 rev)	3310.40

D1 % pérdida 100 rev	20.00
D2 % pérdida 500 rev	34.00
% pérdida	34

NOTA: En la Tabla 57 se observa los resultados obtenidos de la prueba de abrasión de los ángeles, se obtuvo la pérdida del 30%.

5.1.2 Diseño de mezcla

Para la obtención del diseño de mezcla se siguió los pasos establecidos en el ACI 211.1-22 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2022), de los cuales se obtuvo la siguiente dosificación:

Tabla 59— Diseño de mezcla

Materiales	Cantidad peso 1 m ³	Proporción en peso por 1 bolsa	Proporción en peso por briquetas para el G1
Cemento	455.56 kg/m ³	42.5 kg/bolsa	0.75 kg/m ³
Agua	211.28 lt/m ³	19.71 lt/bolsa	0.35 lt/m ³
Agregado Fino	592.46 kg/m ³	55.27 kg/bolsa	0.98 kg/m ³
Agregado Grueso	1081.45 kg/m ³	100.89 kg/bolsa	1.78 kg/m ³

NOTA: La Tabla 59 presenta las proporciones de los materiales adquiridos a través del método de diseño de mezcla ACI Comité 211, además se presenta la proporción empleada para el grupo experimental 1 (G1).

Tabla 60— Proporción de materiales para los grupos experimentales

Materiales	G2	G3	G4	G5	G6
Cemento	0.75 kg/m ³	0.75 kg/m ³	0.75 kg/m ³	0.75 kg/m ³	0.75 kg/m ³
Agua	0.35 lt/m ³	0.35 lt/m ³	0.35 lt/m ³	0.35 lt/m ³	0.35 lt/m ³
Agregado Fino	0.83 kg/m ³	0.68 kg/m ³	0.54 kg/m ³	0.24 kg/m ³	0.10 kg/m ³
Agregado Grueso	1.51 kg/m ³	1.25 kg/m ³	0.98 kg/m ³	0.45 kg/m ³	0.18 kg/m ³
Agregado Grueso Reciclado	0.41 kg/m ³	0.83 kg/m ³	1.24 kg/m ³	2.07 kg/m ³	2.48 kg/m ³

NOTA: La Tabla 60 presenta las proporciones de los materiales para los grupos experimentales 2 (G2), 3 (G3), 4 (G4), 5 (G5) y 6 (G6).

5.1.3 Controles de calidad del concreto en estado fresco

a) Temperatura

Durante la preparación del concreto se realizó las pruebas acordes a la normativa ASTM C 1064 y NTP 339.184 obteniendo las siguientes temperaturas promedio del concreto en estado fresco $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 61 — Control de temperaturas del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Descripción	Temperatura promedio del concreto fresco (°C)
Grupos experimental 1 (G ₁)	26.1
Grupos experimental 2 (G ₂)	25.9
Grupos experimental 3 (G ₃)	25.7
Grupos experimental 4 (G ₄)	25.5
Grupos experimental 5 (G ₅)	25.3
Grupos experimental 6 (G ₆)	24.8

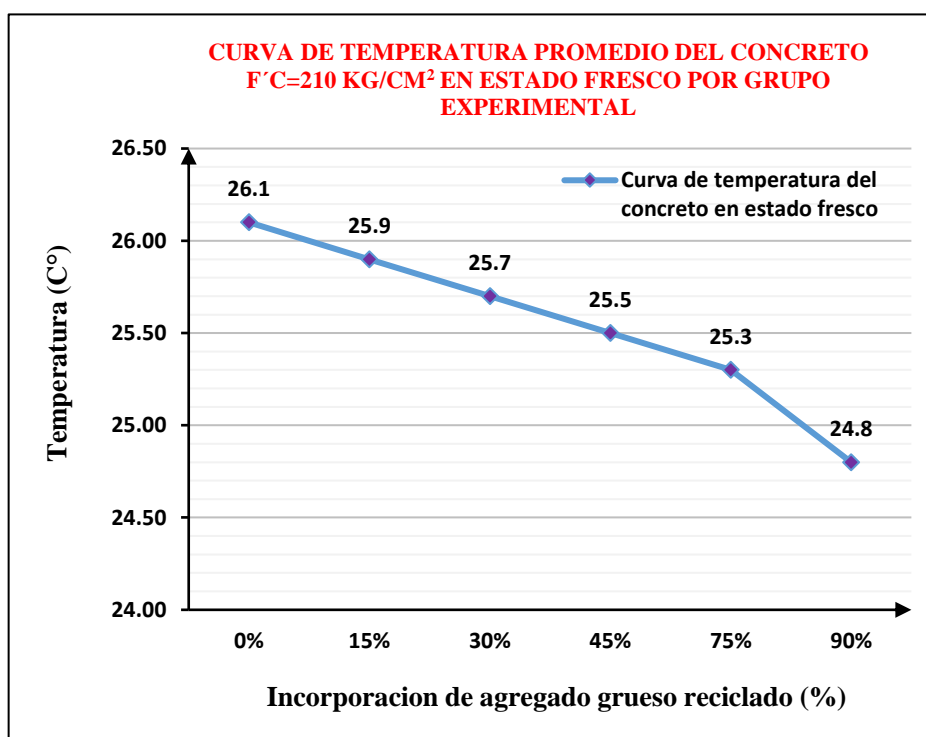


Figura 22 — Temperaturas promedio del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

La Figura 22 muestra los resultados alcanzados durante el proceso de preparación del concreto, logrando una temperatura de 26.1 °C con la inclusión del 0% de agregado grueso reciclado, 25.9 °C con la inclusión del 15% de agregado grueso reciclado, 25.7 °C con la inclusión del 30% de agregado grueso reciclado, 25.5 °C con la inclusión del 45% de agregado grueso reciclado, y 25.3 °C con la inclusión del 75% de agregado grueso reciclado.

b) Asentamiento

Durante la elaboración del concreto se realizó las pruebas de asentamiento (Slump) acorde a la norma NTP 339.045 con tres ensayos para cada lote de concreto de cada dosificación planteada, obteniendo los siguientes resultados:



Tabla 62 — Asentamiento del concreto $f'c=210$ kg/cm²

Descripción	Asentamiento	Asentamiento	Asentamiento	Promedio
	N°01	N°02	N°03	
Grupos experimental 1 (G ₁)	10.22	10.09	10.02	10.11
Grupos experimental 2 (G ₂)	9.95	9.92	10.01	9.96
Grupos experimental 3 (G ₃)	9.91	9.87	9.8	9.86
Grupos experimental 4 (G ₄)	9.83	9.91	9.81	9.85
Grupos experimental 5 (G ₅)	9.87	9.85	9.77	9.83
Grupos experimental 6 (G ₆)	9.79	9.81	9.86	9.82

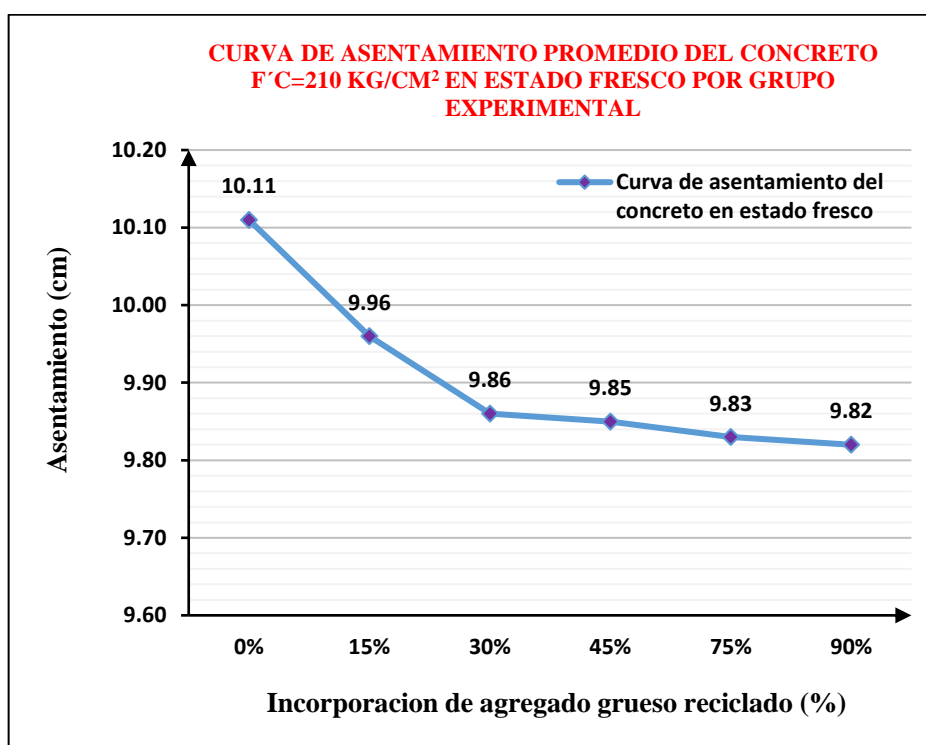


Figura 23 — Asentamiento promedio del concreto $f'c=210$ kg/cm²

La Figura 23 muestra las conclusiones alcanzadas durante la elaboración del concreto, logrando un asentamiento medio de 10.11 cm con la inclusión del 0% de agregado grueso reciclado, 9.86 cm con la inclusión del 30% de agregado grueso reciclado, 9.85 cm con la inclusión del 45% de agregado grueso reciclado, 9.83 cm con la inclusión del 75% de agregado grueso reciclado y un asentamiento medio de 9.82 cm con la inclusión del 90% de agregado grueso reciclado.



5.1.4 Controles de calidad del concreto en estado endurecido

Tabla 63 — Resistencia del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el grupo experimental 1 (G1)

Edad de ensayo	Muestra	Repetición	Resistencia	Resistencia promedio
3 días	M1	R1	130.02	131.88
		R2	134.85	
		R3	126.91	
	M2	R1	131.40	
		R2	135.60	
		R3	132.47	
7 días	M3	R1	194.93	196.71
		R2	193.82	
		R3	199.22	
	M4	R1	197.56	
		R2	201.00	
		R3	193.72	
14 días	M5	R1	238.22	239.49
		R2	239.59	
		R3	245.96	
	M6	R1	238.80	
		R2	246.03	
		R3	228.34	
21 días	M7	R1	256.70	260.86
		R2	265.10	
		R3	268.77	
	M8	R1	260.45	
		R2	248.72	
		R3	265.42	
28 días	M9	R1	310.99	271.63
		R2	264.72	
		R3	265.18	
	M10	R1	259.68	
		R2	264.23	
		R3	264.99	

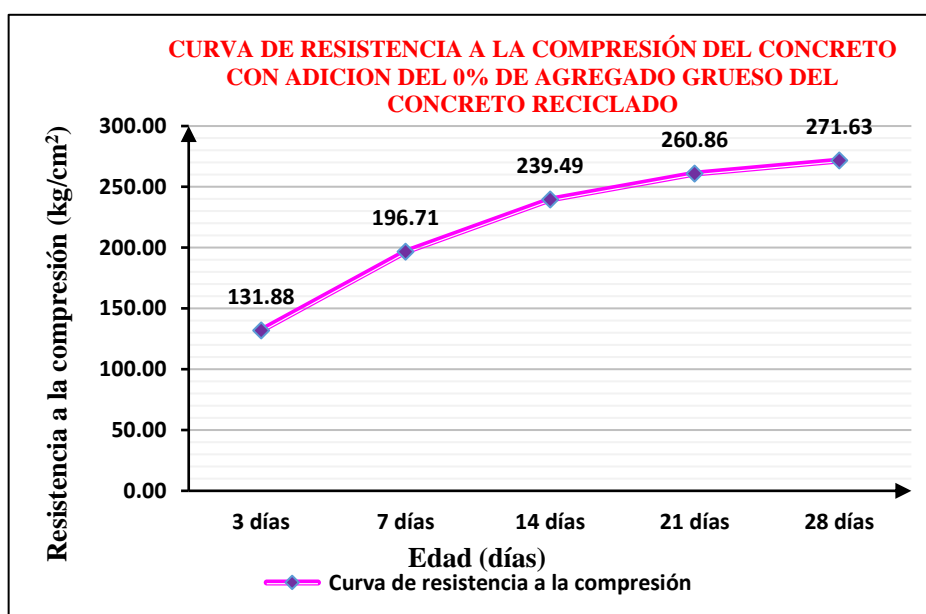


Figura 24 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 0% de agregado grueso del concreto reciclado



La Figura 24 ilustra la curva de resistencia a la compresión del concreto con la incorporación del 0% de agregado grueso reciclado, que forma parte del grupo experimental 1 (G1), donde se puede apreciar que, a los 14 días, el concreto consigue sobrepasar la resistencia de diseño alcanzando un valor de 239.49 kg/cm². Además, se alcanzó una resistencia máxima de 271.63 kg/cm² a los 28 días.

Tabla 64 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm² para el grupo experimental 2 (G2)

Edad de ensayo	Muestra	Repetición	Resistencia	Resistencia promedio
3 días	M11	R1	83.91	82.34
		R2	86.02	
		R3	78.38	
	M12	R1	83.78	
		R2	76.93	
		R3	85.03	
7 días	M13	R1	135.70	142.81
		R2	136.77	
		R3	136.12	
	M14	R1	148.98	
		R2	136.05	
		R3	163.26	
14 días	M15	R1	187.27	170.43
		R2	162.91	
		R3	167.75	
	M16	R1	161.25	
		R2	155.89	
		R3	187.50	
21 días	M17	R1	204.01	193.22
		R2	201.64	
		R3	176.03	
	M18	R1	187.89	
		R2	197.44	
		R3	192.28	
28 días	M19	R1	203.11	209.35
		R2	221.54	
		R3	209.01	
	M20	R1	206.81	
		R2	208.84	
		R3	206.80	



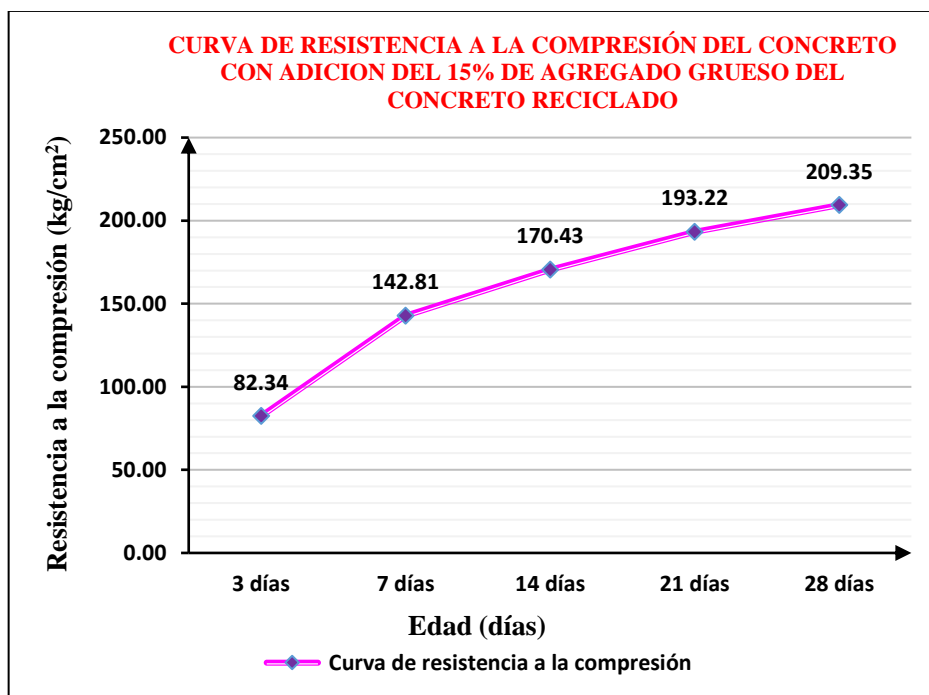


Figura 25 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 15% de agregado grueso del concreto reciclado

En la Figura 25 se muestra la curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 15% de agregado grueso reciclado y 85% de agregado grueso de cantera, perteneciente al grupo experimental 2 (G2), de las cuales se visualiza que el concreto no llega a superar el valor de la resistencia de diseño a los 28 días obteniendo un valor de 209.35 kg/cm².

Tabla 65 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm² para el grupo experimental 3 (G3)

Edad de ensayo	Muestra	Repetición	Resistencia	Resistencia promedio
3 días	M21	R1	109.23	108.59
		R2	106.06	
		R3	106.47	
	M22	R1	104.35	
		R2	109.95	
		R3	115.49	
7 días	M23	R1	152.04	158.91
		R2	155.69	
		R3	152.87	
	M24	R1	147.85	
		R2	160.02	
		R3	184.98	
14 días	M25	R1	153.55	187.74
		R2	186.93	
		R3	184.35	
	M26	R1	187.93	
		R2	200.94	
		R3	212.76	



21 días	M27	R1	201.61	197.34
		R2	200.79	
		R3	198.81	
	M28	R1	181.75	
		R2	179.68	
		R3	221.41	
28 días	M29	R1	238.12	233.19
		R2	234.89	
		R3	245.73	
	M30	R1	212.54	
		R2	230.14	
		R3	237.70	

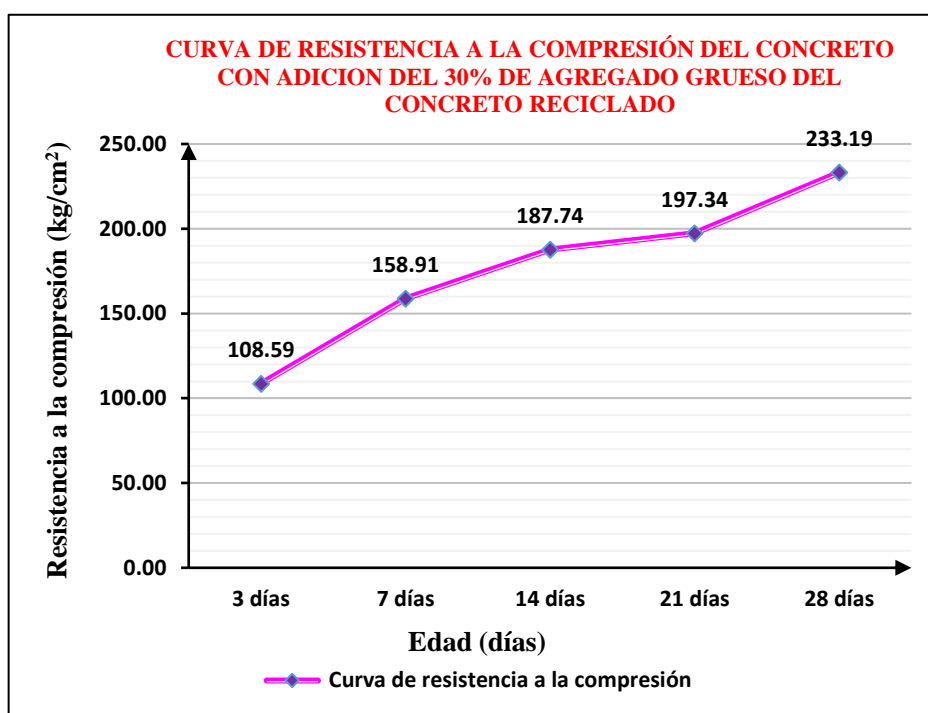


Figura 26 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 30% de agregado grueso del concreto reciclado

En la Figura 26 se muestra la curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 30 % de agregado grueso reciclado y 70 % de agregado grueso de cantera, perteneciente al grupo experimental 3 (G3), de las cuales se visualiza que el concreto llega a superar el valor de la resistencia de diseño a los 28 días obteniendo un valor de 233.19 kg/cm².

Tabla 66 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm² para el grupo experimental 4 (G4)

Edad de ensayo	Muestra	Repetición	Resistencia	Resistencia promedio
3 días	M31	R1	121.09	119.49
		R2	118.01	
		R3	130.17	
	M32	R1	116.16	
		R2	116.27	
		R3	115.21	

7 días	M33	R1	159.54	165.48
		R2	178.66	
		R3	176.25	
	M34	R1	164.17	
		R2	158.91	
		R3	155.34	
14 días	M35	R1	199.84	192.12
		R2	203.95	
		R3	189.32	
	M36	R1	172.27	
		R2	207.36	
		R3	179.96	
21 días	M37	R1	243.30	228.19
		R2	236.66	
		R3	217.46	
	M38	R1	222.41	
		R2	220.05	
		R3	229.26	
28 días	M39	R1	239.22	253.43
		R2	256.77	
		R3	261.70	
	M40	R1	261.70	
		R2	253.55	
		R3	247.64	

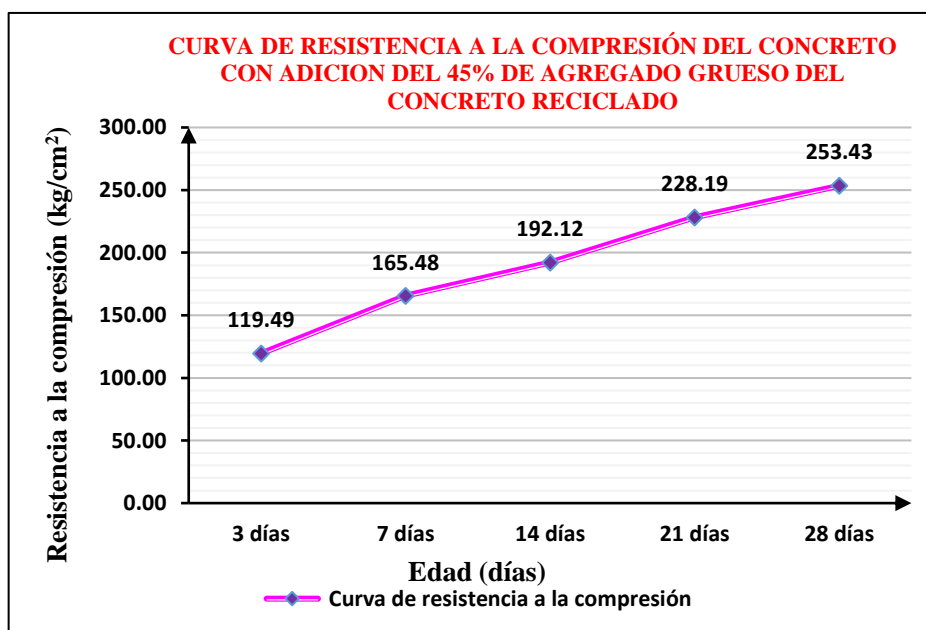


Figura 27 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 45% de agregado grueso del concreto reciclado

En la Figura 27 se muestra la curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 45 % de agregado grueso reciclado y 65 % de agregado grueso de cantera, perteneciente al grupo experimental 4 (G4), de las cuales se visualiza que el concreto llega a superar el valor de la resistencia de diseño a los 21 días obteniendo un valor de 228.19 kg/cm² y una resistencia de 253.43 kg/cm² a los 28 días.



Tabla 67 — Resistencia del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el grupo experimental 5 (G5)

Edad de ensayo	Muestra	Repetición	Resistencia	Resistencia promedio
3 días	M41	R1	104.96	112.02
		R2	115.08	
		R3	119.86	
	M42	R1	106.84	
		R2	106.54	
		R3	118.84	
7 días	M43	R1	172.74	174.87
		R2	177.22	
		R3	166.37	
	M44	R1	176.70	
		R2	177.46	
		R3	178.76	
14 días	M45	R1	204.94	200.50
		R2	204.75	
		R3	190.82	
	M46	R1	202.43	
		R2	204.59	
		R3	195.46	
21 días	M47	R1	228.18	230.39
		R2	243.96	
		R3	228.72	
	M48	R1	227.34	
		R2	226.34	
		R3	227.79	
28 días	M49	R1	235.46	246.44
		R2	249.93	
		R3	248.44	
	M50	R1	248.63	
		R2	246.91	
		R3	249.26	

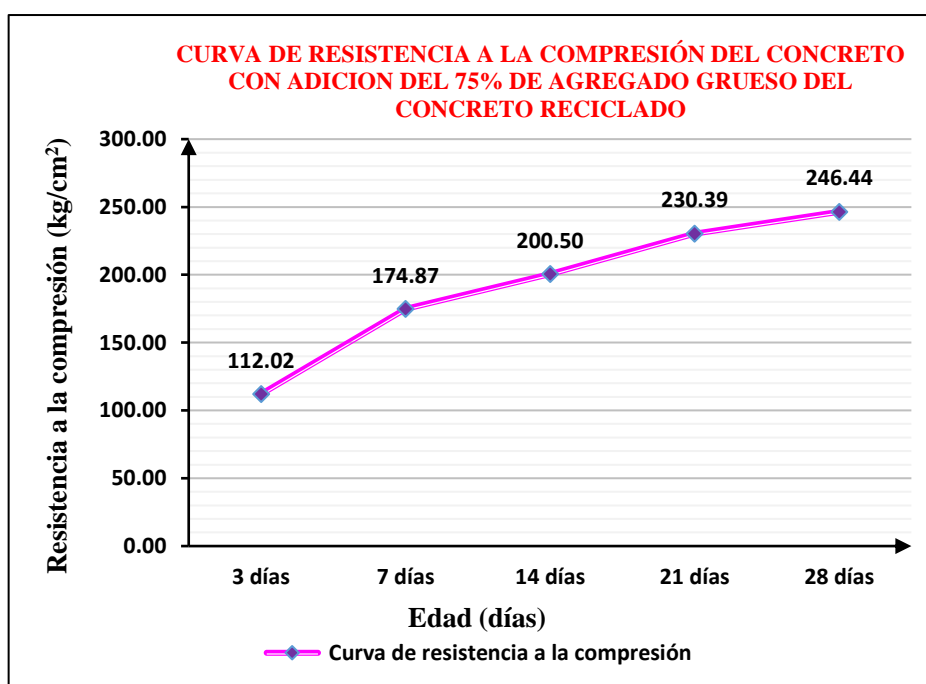


Figura 28 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 75% de agregado grueso del concreto reciclado



En la Figura 28 se muestra la curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 75 % de agregado grueso reciclado y 25 % de agregado grueso de cantera, perteneciente al grupo experimental 5 (G5), de las cuales se visualiza que el concreto llega a superar el valor de la resistencia de diseño a los 21 días obteniendo un valor de 230.39 kg/cm² y una resistencia de 246.44 kg/cm² a los 28 días.

Tabla 68 — Resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm² para el grupo experimental 6 (G6)

Edad de ensayo	Muestra	Repetición	Resistencia	Resistencia promedio
3 días	M51	R1	109.78	98.74
		R2	98.68	
		R3	91.12	
	M52	R1	92.16	
		R2	93.95	
		R3	106.72	
7 días	M53	R1	153.62	155.16
		R2	158.92	
		R3	150.48	
	M54	R1	152.71	
		R2	153.26	
		R3	161.95	
14 días	M55	R1	207.29	186.02
		R2	177.35	
		R3	191.18	
	M56	R1	181.68	
		R2	180.93	
		R3	177.70	
21 días	M57	R1	219.49	206.43
		R2	211.40	
		R3	198.88	
	M58	R1	188.52	
		R2	205.33	
		R3	214.95	
28 días	M59	R1	232.33	218.29
		R2	209.71	
		R3	221.35	
	M60	R1	217.46	
		R2	203.31	
		R3	225.60	



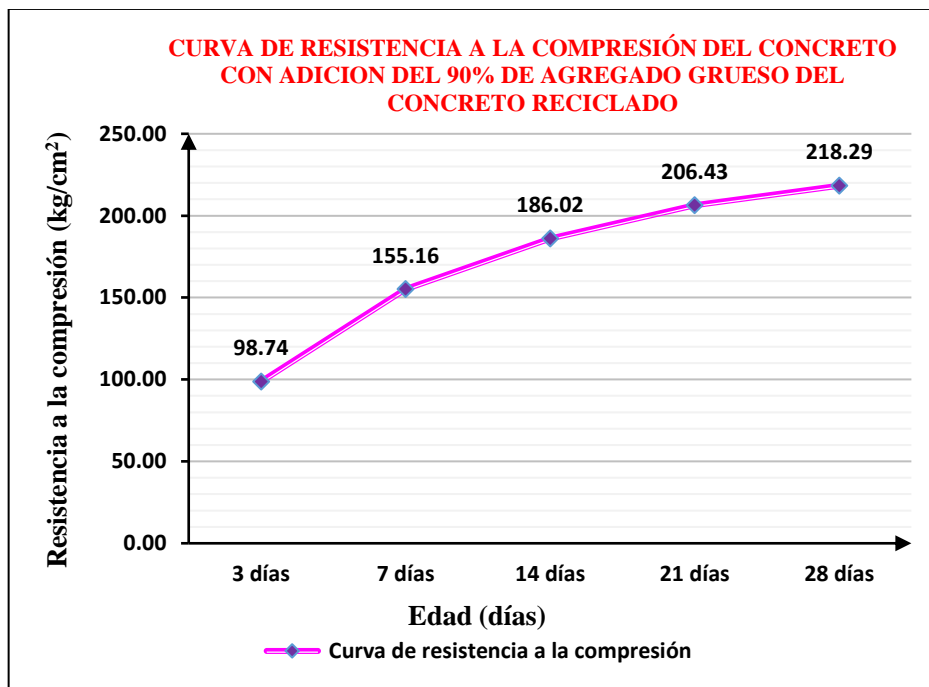


Figura 29 — Curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 90% de agregado grueso del concreto reciclado

En la Figura 29 se muestra la curva de resistencia a la compresión del concreto con adición del 90 % de agregado grueso reciclado y 10 % de agregado grueso de cantera, perteneciente al grupo experimental 6 (G6), de las cuales se visualiza que el concreto llega a superar el valor de la resistencia de diseño a los 28 días obteniendo un valor de 218.29 kg/cm².

a) Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 3 días

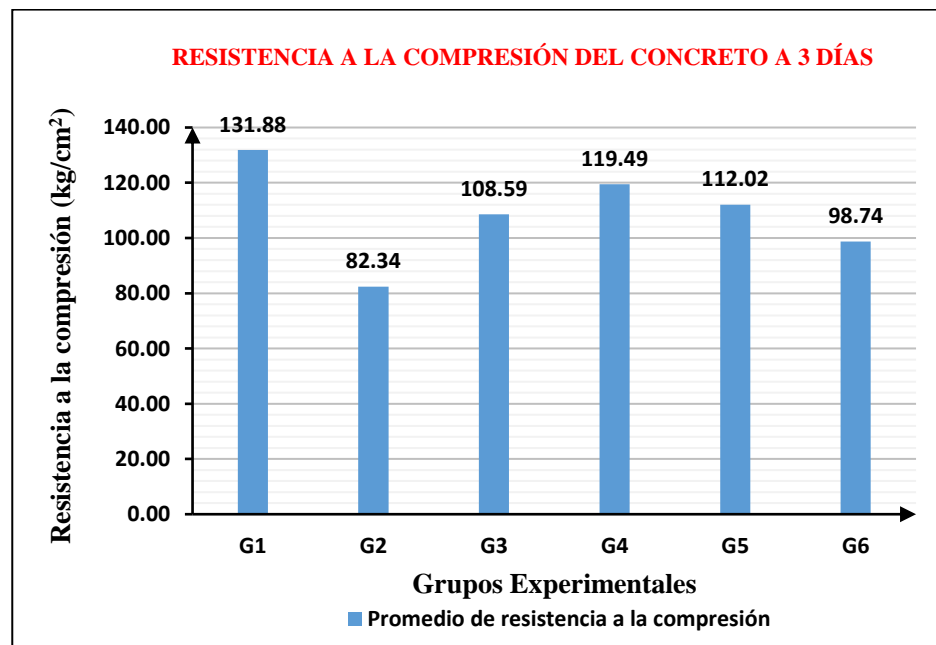


Figura 30 — Resistencia a la compresión del concreto a 3 días

En la Figura 30 se presenta el resumen comparativo de las resistencias a la compresión para la edad de 3 días, donde se puede apreciar que la resistencia del grupo experimental 1 es mayor al resto.

b) Resistencia a compresión del concreto a la edad de 7 días

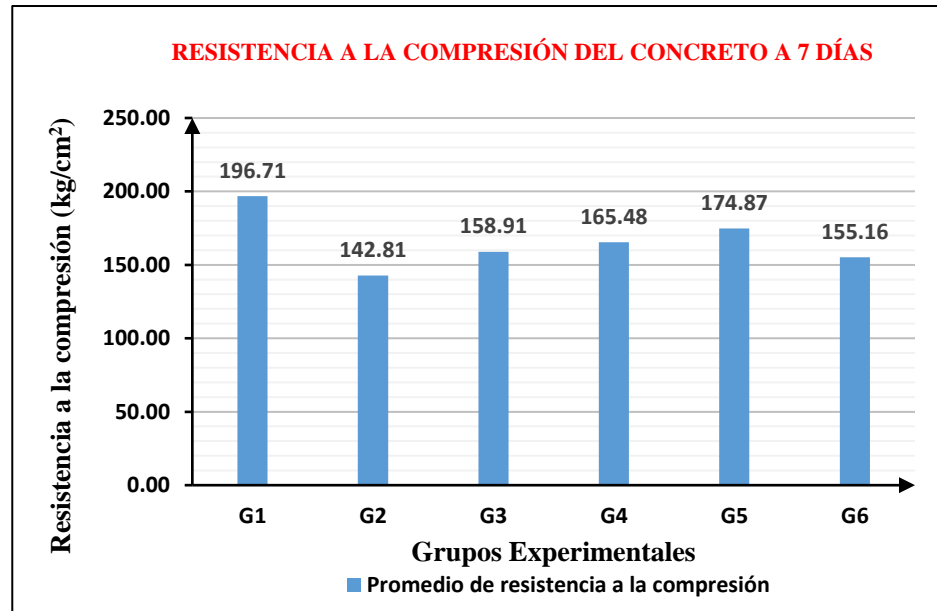


Figura 31 — Resistencia a la compresión del concreto a 7 días
En la Figura 31 se presenta el resumen comparativo de las resistencias a la compresión para la edad de 7 días, donde se puede apreciar que la resistencia del grupo experimental 1 es mayor al resto.

c) Resistencia a compresión del concreto a la edad de 14 días

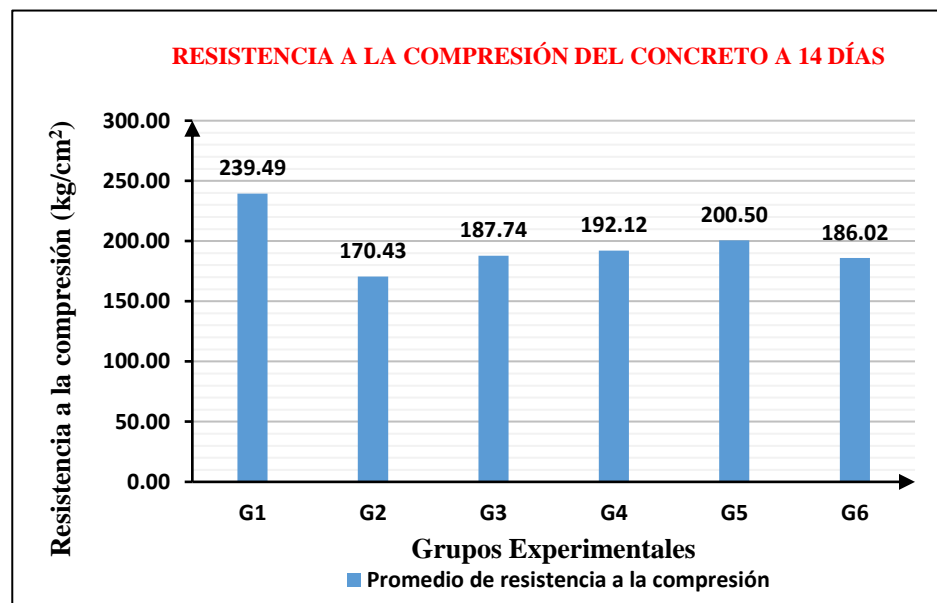


Figura 32 — Resistencia a la compresión del concreto a 14 días



En la Figura 32 se presenta el resumen comparativo de las resistencias a la compresión para la edad de 14 días, donde se puede apreciar que la resistencia del grupo experimental 1 es mayor al resto.

d) Resistencia a compresión del concreto a la edad de 21 días

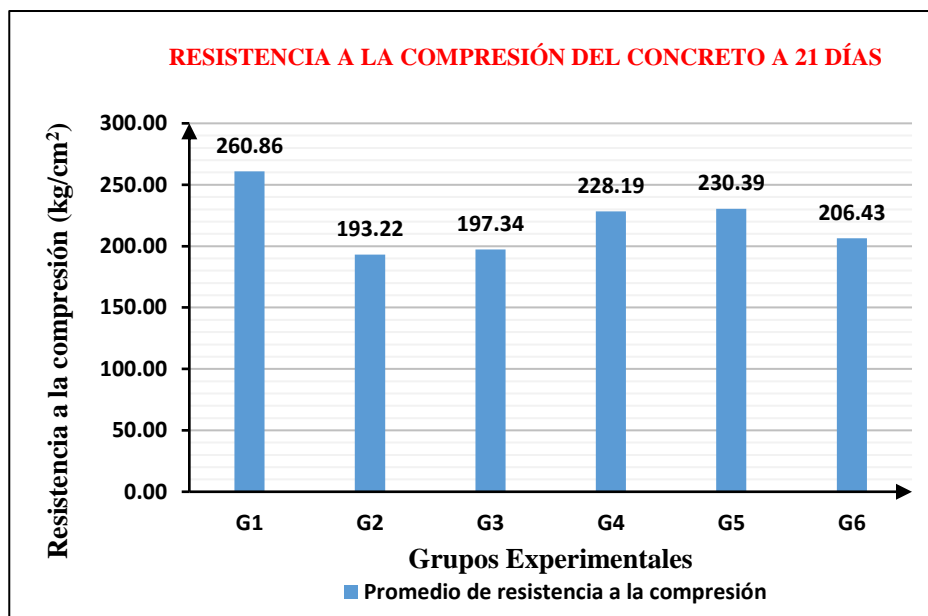


Figura 33 — Resistencia a la compresión del concreto a 21 días

En la Figura 33 se presenta el resumen comparativo de las resistencias a la compresión para la edad de 21 días, donde se puede apreciar que la resistencia del grupo experimental 1 es mayor al resto.

e) Resistencia a compresión del concreto a la edad de 28 días

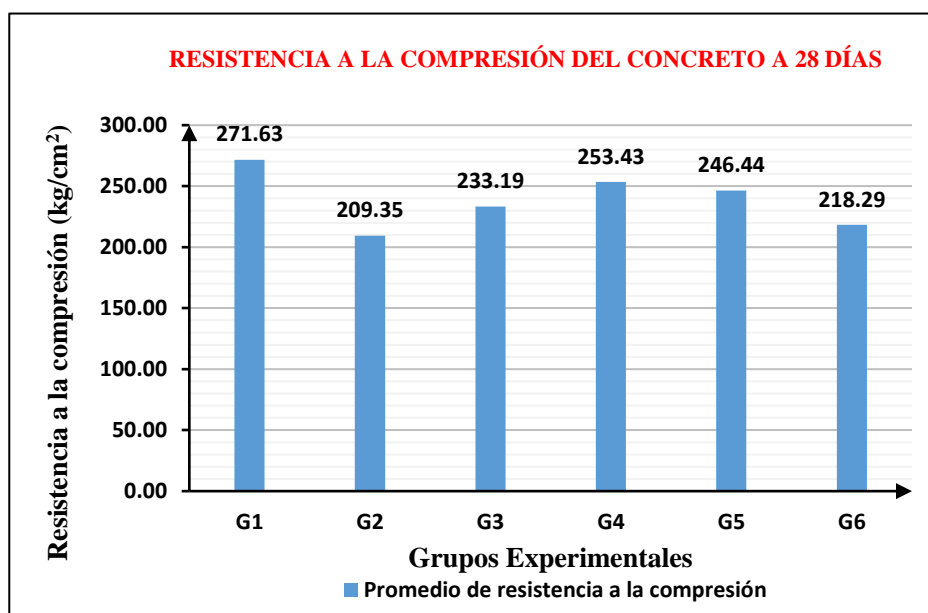


Figura 34 — Resistencia a la compresión del concreto a 28 días



En la figura 34 se presenta el resumen comparativo de las resistencias a la compresión para la edad de 28 días, donde se puede apreciar que la resistencia del grupo experimental 1 es mayor al resto.

5.1.5 Estudio de suelos

5.1.5.1 Análisis granulométrico

Tabla 69— Análisis granulométrico del suelo

TAMIZ	ABERTURA (mm)	Pesos Retenidos	%Pesos Retenidos	%Retenidos Acumulados	% Q° PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
4"	101.60	0.00	0.00	0.00	100.00	CALICATA C-01-M1	
3"	76.20	0.00	0.00	0.00	100.00	PESO TOTAL:	2790.00
1 1/2"	38.10	77.00	2.76	2.76	97.24	TAMAÑO MÁX:	3"
3/4"	19.05	211.00	7.56	10.32	89.68	LÍMITE LÍQUIDO:	25.25%
3/8"	9.53	292.00	10.47	20.79	79.21	LÍMITE PLÁSTICO:	10.10%
Nº 4	4.76	191.00	6.85	27.63	72.37	ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	15.15%
Nº 8	2.38	333.00	11.94	39.57	60.43	HUMEDAD:	12.50%
Nº 16	1.19	356.00	12.76	52.33	47.67	SUCS	SC-CL
Nº 30	0.59	300.00	10.75	63.08	36.92	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcillas inorgánicas, gravosas, arenosas y arcillas limosas	
Nº 50	0.30	330.00	11.83	74.91	25.09		
Nº 100	0.15	524.00	18.78	93.69	6.31		
Nº 200	0.08	146.00	5.23	98.93	1.08		
< Nº 200		30.00	1.08	100.00	0.00	Cu=	11.82
TOTAL		2790.00	100.00			Cc=	0.40

NOTA: En la Tabla 69 se muestra el resultado del análisis granulométrico del suelo por tamizado siguiendo las instrucciones de la NTP 339.128. Se encontró que el 72.37 % del material pasa el tamiz Nº 4 y el 1.08 % pasa el tamiz Nº 200, de la muestra cuarteada, que se seleccionó 2,790.00 gramos.

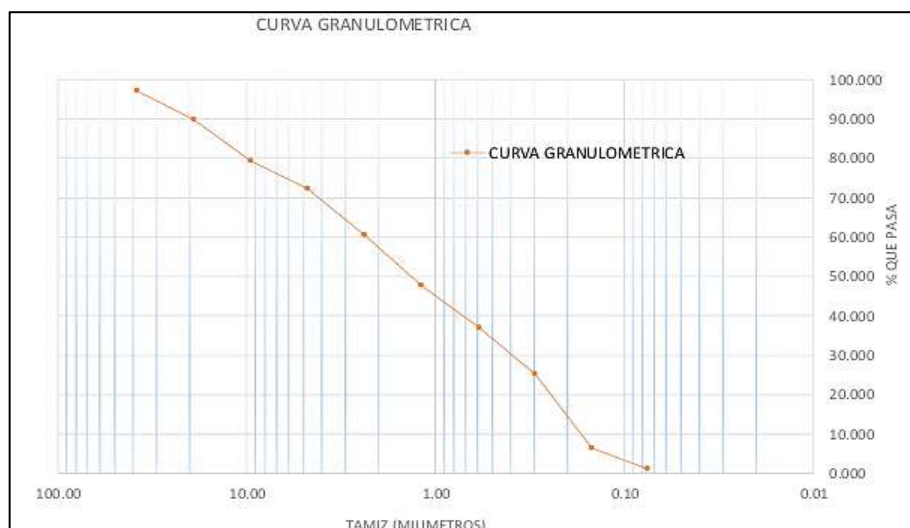


Figura 35 — Curva granulométrica del suelo



5.1.5.2 Contenido de humedad

Tabla 70— Contenido de humedad del suelo

CONTENIDO DE HUMEDAD					
Ítem	Descripción	T1	T2	T3	PROMEDIO
1	Peso de la tara + Peso del suelo húmedo (gr)	63.91	67.17	69.44	12.50%
2	Peso de la tara + Peso del suelo seco (gr)	60.20	63.01	65.11	
3	Peso del agua contenida (gr) (2) - (3)	3.71	4.16	4.33	
4	Peso de la tara (gr)	30.68	30.01	30.02	
5	Peso del suelo seco (gr) (3) - (5)	29.52	33.00	35.09	
6	Contenido de humedad (%) (4) / (6)	12.57%	12.61%	12.34%	

NOTA: En la Tabla 70 se muestra el resultado del contenido de humedad del suelo de acuerdo con la NTP 339.127. Se encontró que un promedio de 12.50 %, teniendo una variación mínima entre ensayos y una medición confiable del contenido de agua presente en la muestra.

5.1.5.3 Límites de consistencia

Tabla 71— Límites de consistencia

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	1	2
Ensayo N°	T1	T2	T3	TP1	TP2
# de Tara	T1	T2	T3	TP1	TP2
Peso de Tara	35.20	34.30	34.70	21.70	21.40
Peso de Tara + M. Húmeda	59.10	55.10	61.90	22.90	22.40
Peso de Tara + M. Seca	54.30	50.90	56.40	22.80	22.30
Peso del Agua	4.80	4.20	5.50	0.10	0.10
Peso de M. Seca	19.10	16.60	21.70	1.10	0.90
Contenido de Humedad	25.10	25.30	25.30	9.09	11.11
# de Golpes	35.00	21.00	15.00	-	-
RESULTADO	25.25			10.10	

NOTA: Los ensayos de límites de consistencia realizados según la 339.129 permitieron obtener un Límite Líquido de 25.25 % y un Límite Plástico de 10.10 %, valores coherentes entre repeticiones y representativos de un suelo con plasticidad baja a moderada.

5.1.5.4 Proctor modificado

Tabla 72— Resultados del ensayo de proctor modificado

N° de Capas:	5	Volumen Molde:	945	
N° de golpes por capas:	25	Método	A	
ENSAYO PROCTOR (Tabla de Cálculo)				
Muestra	I	II	III	IV
Caps.	2	4	6	8
Wcap.	35.10	31.20	34.40	31.20



Wcap+sh.	58.30	56.70	57.50	57.90
Wcap+ss.	56.00	53.90	54.50	54.00
Wss.	20.90	22.70	20.10	22.80
Ww.	2.30	2.80	3.00	3.90
%CH.	11.01	12.34	14.93	17.11
%CH. (redondeado)	11.00	12.33	14.93	17.11
Wmolde	4152.00	4152.00	4152.00	4152.00
Wsh+molde	5912.00	5970.00	6054.00	6045.00
Wsh.	1760.00	1818.00	1902.00	1893.00
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	1.86	1.92	2.01	2.00
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.68	1.71	1.75	1.71
Densidad Seca Máxima (gr/cm³):	1.75			
Contenido Óptimo de Agua (%):	15.00			

NOTA: El ensayo Proctor fue realizado conforme a la Norma Técnica Peruana NTP 339.141, obteniéndose valores consistentes en las cuatro determinaciones, lo que permitió determinar una densidad seca máxima de 1.75 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad de 15.00 %, parámetros fundamentales para definir la compactación óptima del suelo.

5.1.5.5 Resultados de CBR

Tabla 73— Resultado de CBR

Muestra	Molde	N° de Golpes	Densidad Seca (gr/cm ³)	CBR (%)	CBR con la M.D.S. al 95%	CBR con la M.D.S. al 100%
M1	A	12	1.51	11.65	20.40	20.71
	B	25	1.59	14.79		
	C	56	1.68	22.40		

NOTA: La Tabla 73 presenta los resultados obtenidos del ensayo de CBR para una penetración de carga de 0.1", donde al 95% de su densidad máxima seca (M.D.S.= 1.68 gr/cm³) se obtiene un CBR del 20.40 %, mientras que al 100% de su densidad máxima seca (M.D.S.= 1.75 gr/cm³) se alcanza un CBR del 20.71 %.

5.1.6 Cálculo del espesor estructural del pavimento rígido

El cálculo realizado se basa en el Método (AASHTO, 1993), toma todos los parámetros de acuerdo con las características de la zona, siendo los datos determinantes el ESAL, CBR de diseño calculado, además que el espesor del pavimento está en función directa del espesor de la base granular.

a) Carga equivalente por eje (ESAL-W18)

De acuerdo con estudio realizado se obtuvo un ESAL = 484,374.00



Tabla 74 — Cálculo del número de ejes equivalentes (ESAL) para pavimento rígido

PAVIMENTO RÍGIDO			
Tiempo de vida útil del pavimento (años)	n		20
Tasa anual de crecimiento – Vehículos pesados	r (p)		6.65%
Tasa anual de crecimiento – Vehículos livianos (r)	r		0.59%
Factor Fca – Vehículos pesados	$Fca = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$	Fca (p)	39.46
Factor Fca – Vehículos livianos		Fca	21.16
Nº de calzadas, sentidos y carriles por sentido			1
Factor direccional * Factor carril	Fd*Fc		1.00
Tránsito equivalente diario	$\Sigma f \cdot IMDA$		33.63
Número de ejes equivalentes	$\#EE = 365 * (\Sigma f \cdot IMDa) * F_d * F_c * F_{ca}$	ESAL	484,374

Fuente: Adaptado de: Guide for design of pavement structures. (AASHTO, 1993).

b) Factor de crecimiento del tráfico (r)

El factor de crecimiento del tráfico es un parámetro que considera en el diseño de pavimentos, los años de periodo de diseño más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vía.

Tabla 75 — Rangos referenciales de la tasa anual de crecimiento del tránsito (r)

CASO	TASA DE CRECIMIENTO
Crecimiento normal	1% al 3%
Vías completamente saturadas	0% al 1%
Con tráfico inducido	4% al 5%
Alto crecimiento	Mayor al 5%

Fuente: Adaptado con base en: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos – Sección suelos y pavimentos, cap. VI, apartado 6.3. (MTC, 2014)

Por lo tanto, para el diseño se tomará el valor de $r = 3\%$.

c) Periodo de diseño (Pd)

El presente trabajo considera un período de diseño de 20 años.

d) Factor de sentido (Fs)

Del total del tráfico que se estima para el diseño del pavimento deberá determinarse el correspondiente a cada sentido de circulación, usamos 0.50.

Tabla 76 — Factor de sentido (Fs) según condición de circulación

CIRCULACIÓN	FACTOR
Un sentido	1.00
Doble sentido	0.50

Fuente: Adaptado con base en: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. (MTC, 2014).



e) Factor carril (Fc)

Es el coeficiente que permite estimar que tanto el tráfico circula por el carril de diseño y para esta investigación se usa un factor de 1.00.

Tabla 77 — Factor carril

Nº CARRIL en c/sentido	Factor carril (Fc)
1	1.00
2	0.80 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75

Fuente: Adaptado con base en: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos, cap. VI. (MTC, 2014)

f) Confiabilidad (R%)

La confiabilidad (R%) expresa la probabilidad de que un pavimento mantenga su desempeño durante su vida de diseño, compensando la variabilidad del tránsito y del comportamiento estructural mediante los factores ZR y So según el enfoque (AASHTO, 1993).

Tabla 78 — Rangos de confiabilidad

TIPO DE PAVIMENTO	CONFIABILIDAD
Autopistas	90%
Carreteras	75%
Rurales	65%
Zonas industriales	60%
Urbanas principales	55%
Urbanas secundarias	50%

Fuente: Adaptado con base en: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. (MTC, 2014).

g) Desviación estándar (Zr)

Es función de los niveles seleccionados de confiabilidad R=80% usamos Zr = -0.841 según la Tabla 79.

Tabla 79 — Desviación estándar según rango de confiabilidad

Confiabilidad R (%)	Desviación Estan. (Zr)
50	0
70	-0.524
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.34
99	-2.327
99.99	-3.75

Fuente: Adaptado con base en: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. (MTC, 2014).



h) Error estándar combinado (So)

AASHTO (1993) propuso los siguientes valores para seleccionar la variabilidad o error estándar combinado So, cuyo valor recomendado es 0.35.

Tabla 80 — Error estándar combinado

CATEGORÍA	VALOR
Para pavimentos rígidos	0.30 - 0.40
En construcción nueva	0.35
En sobre capas	0.4

Fuente: Adaptado de: Guide for design of pavement structures. (AASHTO, 1993).

i) Serviciabilidad (Δ PSI):

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico que circulan en la vía. La medida primaria de la serviciabilidad es el índice de serviciabilidad presente. El procedimiento de diseño (AASHTO, 1993) predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (Δ PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Como el índice de serviciabilidad final de un pavimento es el valor más bajo de deterioro a que puede llegar el mismo, se sugiere que para carreteras de primer orden este valor sea de 2.50 y para vías menos importantes sea de 2.00; para el valor del índice de serviciabilidad inicial la AASTHO llegó a un valor de 4.50 para pavimentos de concreto.

Tabla 81 — Índice de servicio

Índice de servicio	Calificación
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

Fuente: Adaptado de: Guide for design of pavement structures. (AASHTO, 1993).

$$\Delta PSI = P_o - P_t = 4.50 - 2.00 = 2.50$$

$$\Delta PSI = 2.50$$

j) Módulo de ruptura (MR)

Es una propiedad del concreto que influye notablemente en el diseño de pavimentos rígidos de concreto. Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión, es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como resistencia a la flexión por



tensión ($S'c$) o módulo de ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días, teniendo la $F'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ por fórmula $S'c=32(F'c)^{1/2}$ según (AASHTO, 1993) obtenemos $S'c = 463.7 \text{ Psi}$.

k) Drenaje (Cd)

Para el caso los materiales a ser usados tienen una calidad regular de drenaje y está expuesto en un 30% durante un año normal de precipitaciones.

Tabla 82 — Coeficiente de drenaje

Calidad de Drenaje	% de Tiempo del año en que el pavimento está expuesto a niveles de saturación			
	Menor a 1%	1% a 5%	5% a 25%	Mayor a 25%
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Regular	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Pobre	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy pobre	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Adaptado de: Guide for design of pavement structures. (AASHTO, 1993).

l) Coeficiente de transferencia de carga (J)

AASHTO (1993) Es la capacidad que tiene la losa de transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes, lo que repercute en minimizar las deformaciones y los esfuerzos en las estructuras del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de carga mejor será el comportamiento de las losas.

Este concepto depende de los siguientes factores: cantidad de tráfico, utilización de pasajuntas y soporte lateral de las losas.

La AASTHO recomienda para pavimentos rígidos un valor de $J = 2.8$

m) Módulo de elasticidad del concreto (E_c).

Las relaciones de mayor uso para su determinación son:

$$F'c = \text{Resistencia a la compresión del concreto (Kg/cm}^2\text{)} = 210 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_c = 5500 \times (f'c)^{1/2} \text{ (En MPa)}$$

$$E_c = 17000 \times (f'c)^{1/2} \text{ (En Kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 246,353.40 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_c = 3,503,968.23 \text{ Psi}$$



n) Módulo de reacción de la sub rasante (K)

De acuerdo con AASHTO (1993) se han propuesto diversas correlaciones para estimar el parámetro K a partir de los valores de CBR de diseño de la subrasante.

Una de las expresiones más aceptadas por AASHTO plantea lo siguiente:

$$\text{Para } CBR \leq 10: K = 2.55 + 52.5 \cdot \log (CBR) \text{ (MPa/m)}$$

$$\text{Para } CBR > 10: K = 46.0 + 9.08 \cdot (\log (CBR))^{4.34} \text{ (MPa/m)}$$

El valor de CBR de subrasante obtenido del estudio de laboratorio (Mecánica de Suelos – CBR de diseño) corresponde a: $CBR = 20.40$

Calculando el parámetro K para este valor:

$$K = 75.28 \text{ MPa/m}$$

$$\text{Convertido: } K = 7.68 \text{ kg/cm}^2/\text{cm} \text{ (tomando que } 1 \text{ MPa} = 10.2 \text{ kg/cm}^2\text{)}$$

o) Módulo efectivo de la reacción del terreno (Kc)

AASHTO (1993) menciona que para una base granular, el módulo de reacción combinado Kc se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Kc = K + 0.02 \cdot (1.2 \cdot e + e^2 / 12)$$

donde:

K = Módulo de reacción de la subrasante (kg/cm²/cm)

Kc = Módulo de reacción combinado de la base (kg/cm²/cm)

e = Espesor de la base en cm (En pavimentos rígidos, la “base” puede ser sustituida por la subbase.)

Si se asume un espesor de base e = 20 cm, entonces al aplicar la ecuación:

Kc = 8.82481 kg/cm²/cm, convirtiendo la unidad, se obtiene:

$$Kc = 318.15 \text{ psi/in o lb/pulg}^3$$

p) Espesor del pavimento (D)

Según la formula General AASHTO (1993):

$$\log_{10}(W18) = Z_r \cdot S_o \cdot \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.624 \cdot 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \cdot P_t) \cdot \log_{10} \left(215.63 \cdot \frac{S'_c \cdot C_d \cdot (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \cdot J \cdot \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{1.25}} \right)} \right)$$

Se deduce el espesor calculado de la losa de concreto D = 15.99 cm por lo que se asume como espesor de la losa de concreto un valor de D= 20.00 cm.



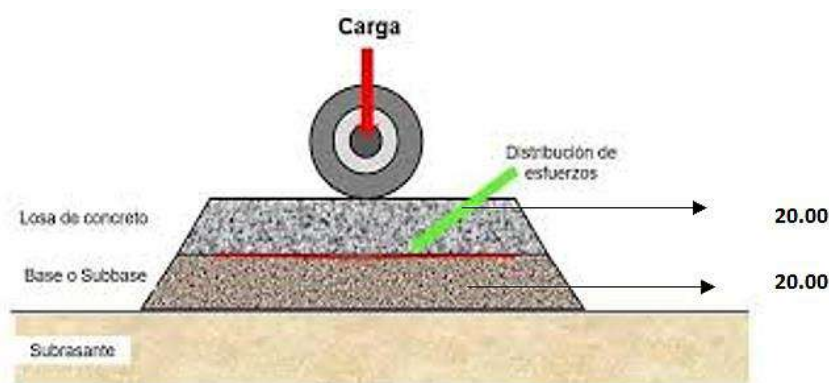


Figura 36 — Espesor de base y losa de concreto calculado según AASHTO (1993)

5.2 Contrastación de hipótesis

El análisis estadístico del estudio se llevó a cabo mediante el software IBM SPSS Statistics. Se midió la resistencia a la compresión del concreto al incorporar el agregado grueso del concreto reciclado en porcentajes para cada grupo experimental, desde el 0% (patrón), hasta el 15%, 30%, 45%, 75% y 90%.

Para contrastar la hipótesis, se empleó el análisis de varianza de un factor que incluye más de tres promedios de población, y se complementará con las pruebas post hoc de Tukey.

a) Para la edad del concreto de 3 días

- Paso 1: Planteamiento estadístico

H₀: No existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 3 días incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% ($\mu_{\text{CBR}_{0\%}} = \mu_{\text{CBR}_{15\%}} = \mu_{\text{CBR}_{30\%}} = \mu_{\text{CBR}_{45\%}} = \mu_{\text{CBR}_{75\%}} = \mu_{\text{CBR}_{90\%}}$).

H_a: Existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 3 días, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90%.

Decisión: Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀ y si p-valor < 0.05 se acepta H_a

- Paso 2: Nivel de significancia

Se estableció el 5% (0.05).

- Paso 3: Prueba de normalidad

Para la investigación, se examinaron 36 muestras, y la evaluación de normalidad se realizará a través del método de Shapiro-Wilk.

Hipótesis

H₀: Los datos tienen distribución normal

H_a: Los datos no tienen distribución normal



Decisión

Si $p\text{-valor} \geq 0.05$ se acepta H_0

Si $p\text{-valor} < 0.05$ se acepta H_a

Tabla 83 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 3 días

% Agregado grueso reciclado		Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 3 días (muestra patrón + % agregado grueso del concreto reciclado)	0%	0.96	6	0.85
	15%	0.85	6	0.15
	30%	0.92	6	0.49
	45%	0.79	6	0.05
	75%	0.85	6	0.14
	90%	0.88	6	0.26

NOTA: La Tabla 83 muestra los resultados del estudio de normalidad, en la que se pueden observar que los valores de significancia superan el valor de 0.05. Aplicando el criterio de decisión, aceptamos la hipótesis nula.

- Paso 4: Prueba de homogeneidad o igualdad de varianzas

Se utilizó la prueba de Levene para determinar la igualdad de las varianzas.

Hipótesis

H_0 : Existen igualdad de varianzas

H_a : No existen igualdad de varianzas

Decisión: Si $p\text{-valor} \geq 0.05$ se acepta H_0 y si $p\text{-valor} < 0.05$ se acepta H_a

Tabla 84 — Prueba de Levene para la edad del concreto de 3 días

Método		Estadístico	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 3 días (muestra patrón + % agregado grueso del concreto reciclado)	Se basa en la media	2.46	5	30	0.06
	Se basa en la mediana	1.62	5	30	0.18
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1.62	5	19.79	0.20
	Se basa en la media recortada	2.35	5	30	0.07

NOTA: La Tabla 84 muestra los resultados de la prueba de Levene, en el que los valores de significancia superan a 0.05, lo que nos permite aceptar H_0 .

- Paso 5: Análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Tabla 85 — ANOVA para la edad del concreto de 3 días

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	8755.58	5	1751.12	58.93	0.00
Dentro de grupos	891.47	30	29.72		
Total	9647.05	35			

NOTA: La Tabla 85 se visualiza que, el valor de significancia es menor a 0.05 por lo consiguiente aceptamos la hipótesis alterna (H_a) y concluimos que, existe diferencia entre las resistencias a la compresión del concreto a la edad de 3 días de los grupos experimentales. Al existir igual de varianzas se realizó la prueba post hoc de Tukey.



- Paso 6: Prueba post hoc de Tukey

Tabla 86 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 3 días

HSD Tukey						
(I) adición	(J) grupos exp.	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0%	15%	49,53333*	3,147	0,000	39,9606	59,1060
	30%	23,28333*	3,14726	0,000	13,7106	32,8560
	45%	12,34833*	3,14726	0,006	2,7756	21,9210
	75%	19,85500*	3,14726	0,000	10,2823	29,4277
	90%	33,14000*	3,14726	0,000	23,5673	42,7127
15%	0%	-49,53333*	3,14726	0,000	-59,1060	-39,9606
	30%	-26,25000*	3,14726	0,000	-35,8227	-16,6773
	45%	-37,18500*	3,14726	0,000	-46,7577	-27,6123
	75%	-29,67833*	3,14726	0,000	-39,2510	-20,1056
	90%	-16,39333*	3,14726	0,000	-25,9660	-6,8206
30%	0%	-23,28333*	3,14726	0,000	-32,8560	-13,7106
	15%	26,25000*	3,14726	0,000	16,6773	35,8227
	45%	-10,93500*	3,14726	0,018	-20,5077	-1,3623
	75%	-3,42833	3,14726	0,882	-13,0010	6,1444
	90%	9,85667*	3,14726	0,041	0,2840	19,4294
45%	0%	-12,34833*	3,14726	0,006	-21,9210	-2,7756
	15%	37,18500*	3,14726	0,000	27,6123	46,7577
	30%	10,93500*	3,14726	0,018	1,3623	20,5077
	75%	7,50667	3,14726	0,194	-2,0660	17,0794
	90%	20,79167*	3,14726	0,000	11,2190	30,3644
75%	0%	-19,85500*	3,14726	0,000	-29,4277	-10,2823
	15%	29,67833*	3,14726	0,000	20,1056	39,2510
	30%	3,42833	3,14726	0,882	-6,1444	13,0010
	45%	-7,50667	3,14726	0,194	-17,0794	2,0660
	90%	13,28500*	3,14726	0,003	3,7123	22,8577
90%	0%	-33,14000*	3,14726	0,000	-42,7127	-23,5673
	15%	16,39333*	3,14726	0,000	6,8206	25,9660
	30%	-9,85667*	3,14726	0,041	-19,4294	-0,2840
	45%	-20,79167*	3,14726	0,000	-30,3644	-11,2190
	75%	-13,28500*	3,14726	0,003	-22,8577	-3,7123

Tabla 87 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 3 días

Grupos	N	SUBCONJUNTO PARA ALFA = 0.05				
		1	2	3	4	5
15%	6	82.34				
90%	6		98.74			
30%	6			108.59		
75%	6			112.02	112.02	
45%	6				119.53	
0%	6					131.88
Sig.		1.00	1.00	0.88	0.19	1.00



NOTA: En la Tabla 87 se muestra los subconjuntos homogéneos de los resultados de la resistencia a compresión del concreto a la edad de 3 días, en los que el subconjunto compuesto por el grupo experimental 1 (G1) supera al resto.

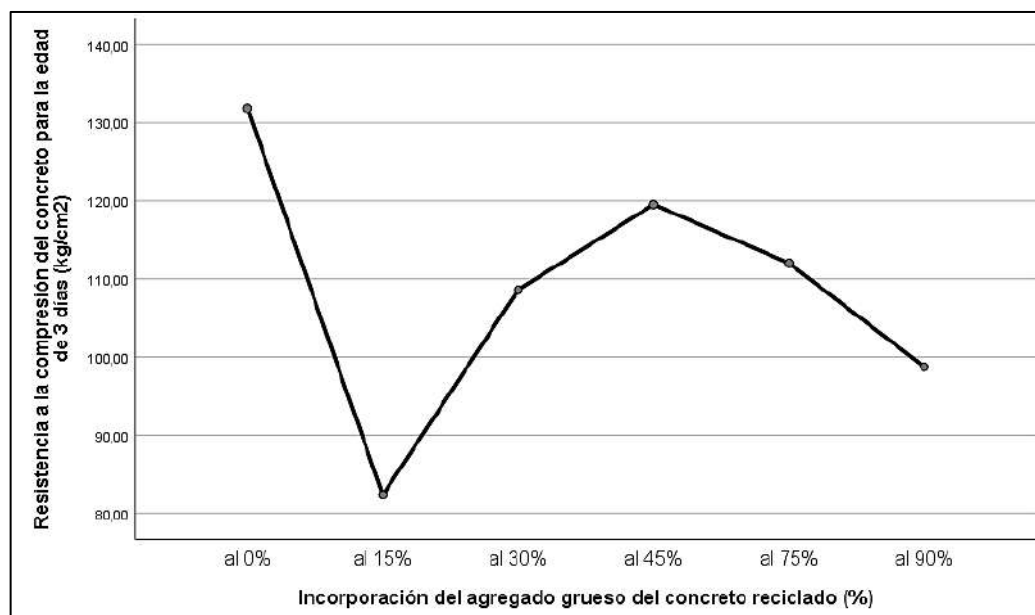


Figura 37 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 3 días

NOTA: La Figura 37 evidencia que dentro del grupo experimental 1 (G1), la incorporación del 0% posee el valor más alto de resistencia a la compresión del concreto a la edad de 3 días con respecto a los demás grupos experimentales.

- Paso 6: Contrastación

De la prueba de ANOVA se aceptó la hipótesis alterna y se deduce que, hay una variación en las resistencias a la compresión del concreto a los 3 días de edad, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% respectivamente.

La Tabla 87 muestra que, respecto a la resistencia a la compresión del concreto a los 3 días, la media del grupo experimental 1 (G₁) supera la media de los otros grupos experimentales. Por ende, podemos interpretar que la inclusión del agregado grueso en el concreto reciclado influye en la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 3 días.

b) Para la edad del concreto de 7 días

- Paso 1: Planteamiento estadístico

H₀: No existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 7 días incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%,



45%, 75% y 90% ($\mu_{\text{CBR}_0\%} = \mu_{\text{CBR}_{15\%}} = \mu_{\text{CBR}_{30\%}} = \mu_{\text{CBR}_{45\%}} = \mu_{\text{CBR}_{75\%}} = \mu_{\text{CBR}_{90\%}}$).

H_a: Existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 7 días, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90%.

Decisión: Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀ y si p-valor < 0.05 se acepta H_a

- **Paso 2: Nivel de significancia**

Se estableció el 5% (0.05).

- **Paso 3: Prueba de normalidad**

Para la investigación, se examinaron 36 muestras, y la evaluación de normalidad se realizará a través del método de Shapiro-Wilk.

Hipótesis

H₀: Los datos tienen distribución normal

H_a: Los datos no tienen distribución normal

Decisión: Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀ y si p-valor < 0.05 se acepta H_a

Tabla 88 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 7 días

% de agregado grueso del concreto reciclado		Shapiro - Wilk.		
		Estadístico	gl.	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 7 días (muestra patrón + % de agregado grueso del concreto reciclado)	0%	0,964	6	0,847
	15%	0,849	6	0,154
	30%	0,917	6	0,485
	45%	0,792	6	0,050
	75%	0,845	6	0,144
	90%	0,879	6	0,264

NOTA: La Tabla 88 muestra los resultados del estudio de normalidad, en la que se pueden observar que los valores de significancia superan el valor de 0.05. Aplicando el criterio de decisión, aceptamos la hipótesis nula.

- **Paso 4: Prueba de homogeneidad o igualdad de varianzas**

Se utilizó la prueba de Levene para determinar la igualdad de las varianzas.

Hipótesis

H₀: Existen igualdad de varianzas

H_a: No existen igualdad de varianzas

Decisión

Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀

Si p-valor < 0.05 se acepta H_a



Tabla 89 — Prueba de Levene para la edad del concreto de 7 días

Método		Estadístico	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 7 días (muestra patrón + % agregado grueso del concreto reciclado)	Se basa en la media	2.14	5	30	0.09
	Se basa en la mediana	0.85	5	30	0.52
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.85	5	16.52	0.53
	Se basa en la media recortada	1.85	5	30	0.13

NOTA: La Tabla 89 muestra los resultados de la prueba de Levene, donde los valores de significancia superan el 0.05, lo que nos permite aceptar H_0 .

- Paso 5: Análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Tabla 90 — ANOVA para la edad del concreto de 7 días

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	10159.18	5	2031.84	29.14	0.00
Dentro de grupos	2092.03	30	69.73		
Total	12251.21	35			

NOTA: En la Tabla 90 se visualiza que, el valor de significancia es menor a 0.05, por lo consiguiente aceptamos la hipótesis alterna (H_a) y concluimos que, existe diferencia entre las resistencias a la compresión del concreto a la edad de 7 días de los grupos experimentales. Al existir igual de varianzas se realizó la prueba post hoc de Tukey.

- Paso 6: Prueba post hoc de Tukey

Tabla 91 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 7 días

HSD Tukey						
(I) adición	(J) grupos exp.	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0%	15%	53,07167*	4,82128	0,000	38,4073	67,7361
	30%	38,04500*	4,82128	0,000	23,3806	52,7094
	45%	31,23000*	4,82128	0,000	16,5656	45,8944
	75%	21,83333*	4,82128	0,001	7,1689	36,4977
	90%	41,55167*	4,82128	0,000	26,8873	56,2161
15%	0%	-53,07167*	4,82128	0,000	-67,7361	-38,4073
	30%	-15,02667*	4,82128	0,042	-29,6911	-0,3623
	45%	-21,84167*	4,82128	0,001	-36,5061	-7,1773
	75%	-31,23833*	4,82128	0,000	-45,9027	-16,5739
	90%	-11,52000	4,82128	0,192	-26,1844	3,1444
30%	0%	-38,04500*	4,82128	0,000	-52,7094	-23,3806
	15%	15,02667*	4,82128	0,042	0,3623	29,6911
	45%	-6,81500	4,82128	0,719	-21,4794	7,8494
	75%	-16,21167*	4,82128	0,024	-30,8761	-1,5473
	90%	3,50667	4,82128	0,977	-11,1577	18,1711
45%	0%	-31,23000*	4,82128	0,000	-45,8944	-16,5656
	15%	21,84167*	4,82128	0,001	7,1773	36,5061



	30%	6,81500	4,82128	0,719	-7,8494	21,4794
	75%	-9,39667	4,82128	0,394	-24,0611	5,2677
	90%	10,32167	4,82128	0,295	-4,3427	24,9861
75%	0%	-21,83333*	4,82128	0,001	-36,4977	-7,1689
	15%	31,23833*	4,82128	0,000	16,5739	45,9027
	30%	16,21167*	4,82128	0,024	1,5473	30,8761
	45%	9,39667	4,82128	0,394	-5,2677	24,0611
	90%	19,71833*	4,82128	0,004	5,0539	34,3827
90%	0%	-41,55167*	4,82128	0,000	-56,2161	-26,8873
	15%	11,52000	4,82128	0,192	-3,1444	26,1844
	30%	-3,50667	4,82128	0,977	-18,1711	11,1577
	45%	-10,32167	4,82128	0,295	-24,9861	4,3427
	75%	-19,71833*	4,82128	0,004	-34,3827	-5,0539

Tabla 92 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 7 días

Grupos	N	SUBCONJUNTO PARA ALFA = 0.05			
		1	2	3	4
15%	6	143.64			
90%	6	155.16	155.16		
30%	6		158.66		
75%	6		165.48	165.48	
45%	6			174.88	
0%	6				196.71
Sig.		0.19	0.30	0.39	1.00

NOTA: En la Tabla 92 se muestra los subconjuntos homogéneos de los resultados de la resistencia a compresión del concreto a la edad de 7 días, en los que el subconjunto compuesto por el grupo experimental 1 (G1) supera al resto.

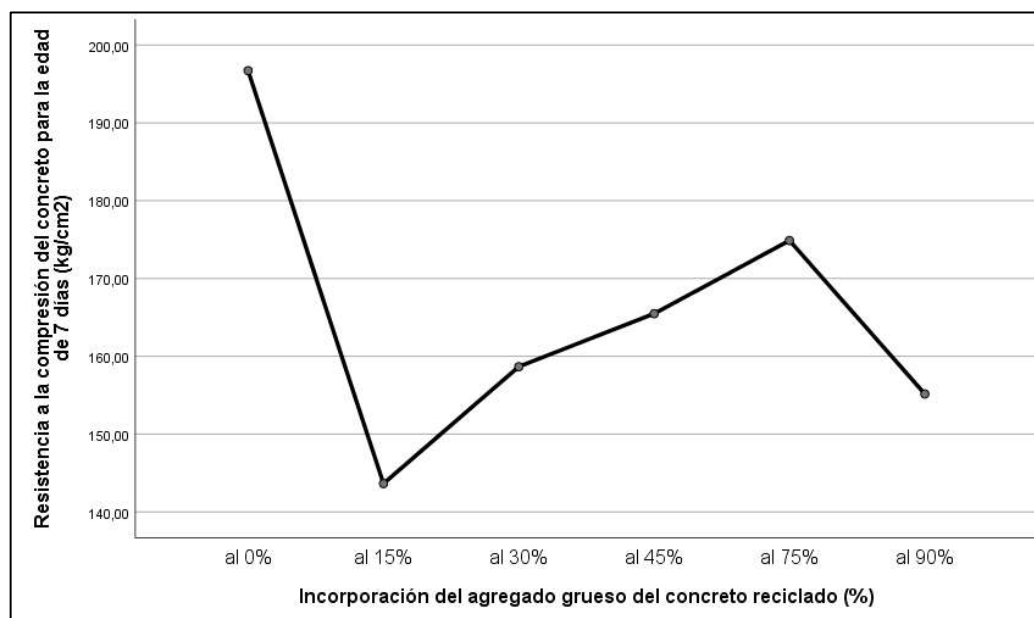


Figura 38 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 7 días

NOTA: La Figura 38 evidencia que dentro del grupo experimental 1 (G1), la incorporación del 0% posee el valor más alto de resistencia a la compresión del concreto a la edad de 7 días, en comparación con los demás grupos experimentales.

- **Paso 6: Contratación**

De la prueba de ANOVA se aceptó la hipótesis alterna y se concluye que, hay una variación en las resistencias a la compresión del concreto a los 7 días de edad, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% respectivamente.

La Tabla 92 muestra que, respecto a la resistencia a la compresión del concreto a los 7 días, la media del grupo experimental 1 (G_1) supera la media de los otros grupos experimentales. Por ende, podemos interpretar que la inclusión del agregado grueso en el concreto reciclado influye en la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 7 días.

c) Para la edad del concreto de 14 días

- **Paso 1: Planteamiento estadístico**

H₀: No existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 14 días incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% ($\mu_{\text{CBR}_{0\%}} = \mu_{\text{CBR}_{15\%}} = \mu_{\text{CBR}_{30\%}} = \mu_{\text{CBR}_{45\%}} = \mu_{\text{CBR}_{75\%}} = \mu_{\text{CBR}_{90\%}}$).

H_a: Existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 14 días, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90%.

Decisión:

Si $p\text{-valor} \geq 0.05$ se acepta H_0

Si $p\text{-valor} < 0.05$ se acepta H_a

- **Paso 2: Nivel de significancia**

Se estableció el 5% (0.05)

- **Paso 3: Prueba de normalidad**

Para la investigación, se examinaron 36 muestras, y la evaluación de normalidad se realizará a través del método de Shapiro-Wilk.

Hipótesis

H₀: Los datos tienen distribución normal

H_a: Los datos no tienen distribución normal

Decisión

Si $p\text{-valor} \geq 0.05$ se acepta H_0

Si $p\text{-valor} < 0.05$ se acepta H_a



Tabla 93 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 14 días

% de agregado grueso del concreto reciclado		Shapiro - Wilk.		
		Estadístico	gl.	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 14 días (muestra patrón + % de agregado grueso del concreto reciclado)	0%	0,879	6	0,262
	15%	0,842	6	0,136
	30%	0,925	6	0,544
	45%	0,931	6	0,586
	75%	0,795	6	0,054
	90%	0,799	6	0,057

NOTA: La Tabla 93 muestra los resultados del estudio de normalidad, en la que se pueden observar que los valores de significancia superan el valor de 0.05. Aplicando el criterio de decisión aceptamos la hipótesis nula.

- Paso 4: Prueba de homogeneidad o igualdad de varianzas

Se utilizó la prueba de Levene para determinar la igualdad de las varianzas.

Hipótesis

H₀: Existen igualdad de varianzas

H_a: No existen igualdad de varianzas

Decisión

Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀

Si p-valor < 0.05 se acepta H_a

Tabla 94 — Igualdad de varianzas para la edad del concreto de 14 días

Método		Estadístico	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 14 días (muestra patrón + % agregado grueso del concreto reciclado)	Se basa en la media	1.39	5	30	0.26
	Se basa en la mediana	1.04	5	30	0.41
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1.04	5	18.50	0.42
	Se basa en la media recortada	1.40	5	30	0.25

NOTA: La Tabla 94 muestra los resultados de la prueba de Levene, en el que los valores de significancia superan el 0.05, lo que nos permite aceptar H₀.

- Paso 5: Análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Tabla 95 — ANOVA para la edad del concreto de 14 días

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	16489.98	5	3298.00	19.97	0.00
Dentro de grupos	4953.96	30	165.13		
Total	21443.84	35			

NOTA: La Tabla 95 se visualiza que, el valor de significancia es menor a 0.05 por lo consiguiente aceptamos la hipótesis alterna (H_a) y concluimos que, existe diferencia entre las resistencias a la compresión del concreto a la edad de 14 días de los grupos experimentales. Al existir igualdad de varianzas se realizó la prueba post hoc de Tukey.



- Paso 6: Prueba post hoc de Tukey

Tabla 96 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 14 días

HSD Tukey						
(I) adición	(J) grupos exp.	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0%	15%	69,06167*	7,41909	0,000	46,4958	91,6275
	30%	51,74667*	7,41909	0,000	29,1808	74,3125
	45%	47,37333*	7,41909	0,000	24,8075	69,9392
	75%	38,99167*	7,41909	0,000	16,4258	61,5575
	90%	53,46833*	7,41909	0,000	30,9025	76,0342
15%	0%	-69,06167*	7,41909	0,000	-91,6275	-46,4958
	30%	-17,31500	7,41909	0,212	-39,8809	5,2509
	45%	-21,68833	7,41909	0,065	-44,2542	0,8775
	75%	-30,07000*	7,41909	0,004	-52,6359	-7,5041
	90%	-15,59333	7,41909	0,313	-38,1592	6,9725
30%	0%	-51,74667*	7,41909	0,000	-74,3125	-29,1808
	15%	17,31500	7,41909	0,212	-5,2509	39,8809
	45%	-4,37333	7,41909	0,991	-26,9392	18,1925
	75%	-12,75500	7,41909	0,530	-35,3209	9,8109
	90%	1,72167	7,41909	1,000	-20,8442	24,2875
45%	0%	-47,37333*	7,41909	0,000	-69,9392	-24,8075
	15%	21,68833	7,41909	0,065	-0,8775	44,2542
	30%	4,37333	7,41909	0,991	-18,1925	26,9392
	75%	-8,38167	7,41909	0,865	-30,9475	14,1842
	90%	6,09500	7,41909	0,961	-16,4709	28,6609
75%	0%	-38,99167*	7,41909	0,000	-61,5575	-16,4258
	15%	30,07000*	7,41909	0,004	7,5041	52,6359
	30%	12,75500	7,41909	0,530	-9,8109	35,3209
	45%	8,38167	7,41909	0,865	-14,1842	30,9475
	90%	14,47667	7,41909	0,393	-8,0892	37,0425
90%	0%	-53,46833*	7,41909	0,000	-76,0342	-30,9025
	15%	15,59333	7,41909	0,313	-6,9725	38,1592
	30%	-1,72167	7,41909	1,000	-24,2875	20,8442
	45%	-6,09500	7,41909	0,961	-28,6609	16,4709
	75%	-14,47667	7,41909	0,393	-37,0425	8,0892

Tabla 97 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 14 días

Grupos	N	SUBCONJUNTO PARA ALFA = 0.05		
		1	2	3
15%	6	170.43		
90%	6	186.02	186.02	
30%	6	187.74	187.74	
75%	6	192.12	192.12	
45%	6		200.50	
0%	6			239.49
Sig.		0.06	0.39	1.00



NOTA: En la Tabla 97 se muestra los subconjuntos homogéneos de los resultados de la resistencia a compresión del concreto a la edad de 14 días, donde el subconjunto compuesto por el grupo experimental 1 (G1) supera al resto.

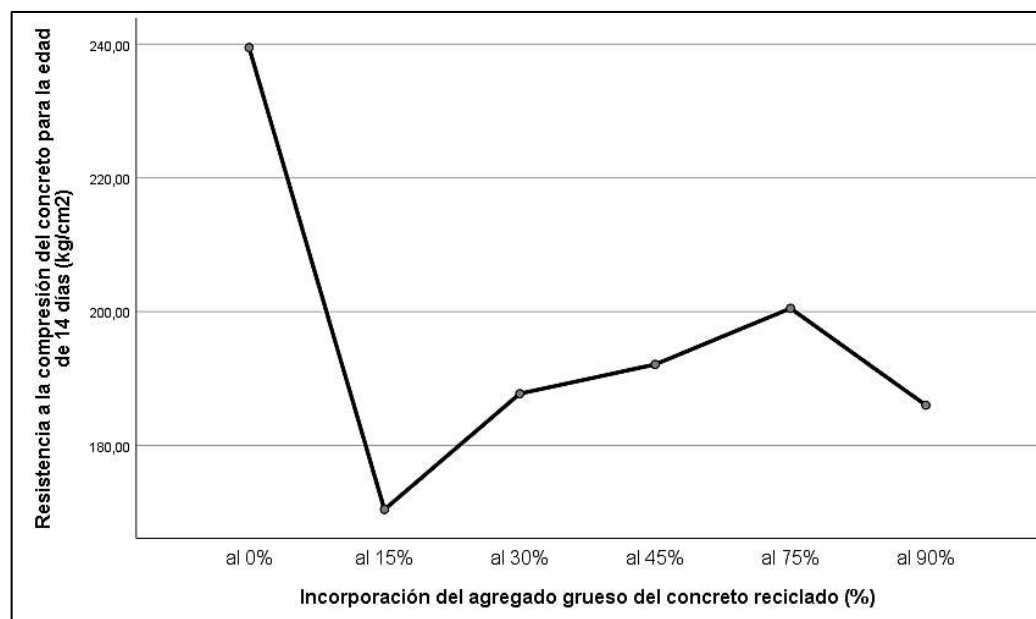


Figura 39 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 14 días

NOTA: La Figura 39 evidencia que dentro del grupo experimental 1 (G1), la incorporación del 0% posee el valor más alto de resistencia a la compresión del concreto a la edad de 14 días, en comparación con los demás grupos experimentales.

- Paso 6: Contrastación

De la prueba de ANOVA se aceptó la hipótesis alterna y se deduce que, hay una variación en las resistencias a la compresión del concreto a la edad de 14 días, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% respectivamente.

La Tabla 97 muestra que, respecto a la resistencia a la compresión del concreto a los 14 días, la media del grupo experimental 1 (G₁) supera la media de los otros grupos experimentales. Por ende, podemos interpretar que la inclusión del agregado grueso del concreto reciclado influye en la disminución de resistencia a la compresión del concreto a la edad de 14 días.

d) Para la edad del concreto de 21 días

- Paso 1: Planteamiento estadístico

H₀: No existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 21 días incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%,



45%, 75% y 90% ($\mu_{\text{CBR}_0\%} = \mu_{\text{CBR}_{15\%}} = \mu_{\text{CBR}_{30\%}} = \mu_{\text{CBR}_{45\%}} = \mu_{\text{CBR}_{75\%}} = \mu_{\text{CBR}_{90\%}}$).

H_a: Existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 21 días, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90%.

Decisión

Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀

Si p-valor < 0.05 se acepta H_a

- Paso 2: Nivel de significancia

Se estableció el 5% (0.05)

- Paso 3: Prueba de normalidad

Para la investigación, se examinaron 36 muestras, y la evaluación de normalidad se realizará a través del método de Shapiro-Wilk.

Hipótesis

H₀: Los datos tienen distribución normal

H_a: Los datos no tienen distribución normal

Decisión: Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀ y si p-valor < 0.05 se acepta H_a

Tabla 98 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 21 días

% de agregado grueso del concreto reciclado		Shapiro - Wilk.		
		Estadístico	gl.	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 21 días (muestra patrón + % de agregado grueso del concreto reciclado)	0%	0.932	6	0.595
	15%	0.939	6	0.650
	30%	0.796	6	0.055
	45%	0.928	6	0.564
	75%	0.795	6	0.053
	90%	0.963	6	0.843

NOTA: La Figura 98 muestra los resultados del estudio de normalidad, en la que se pueden observar que los valores de significancia superan el valor de 0.05. Aplicando el criterio, aceptamos la hipótesis nula.

- Paso 4: Prueba de homogeneidad o igualdad de varianzas

Se utilizó la prueba de Levene para determinar la igualdad de las varianzas.

Hipótesis

H₀: Existen igualdad de varianzas

H_a: No existen igualdad de varianzas

Decisión: Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀ y si p-valor < 0.05 se acepta H_a



Tabla 99 — Igualdad de varianzas para la edad del concreto de 21 días

Método		Estadístico	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 21 días (muestra patrón + % agregado grueso del concreto reciclado)	Se basa en la media	0.72	5	30	0.61
	Se basa en la mediana	0.70	5	30	0.63
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.70	5	28.00	0.63
	Se basa en la media recortada	0.76	5	30	0.59

NOTA: La Figura 99 muestra los resultados de la prueba de Levene, donde los valores de significancia superan el 0.05, lo que nos permite aceptar H_0 .

- Paso 5: Análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Tabla 100 — ANOVA para la edad del concreto de 21 días

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	18436.02	5	3687.20	43.37	0.00
Dentro de grupos	2550.67	30	85.02		
Total	20986.69	35			

NOTA: En la Tabla 100 se visualiza que, el valor de significancia es menor a 0.05 por lo consiguiente aceptamos la hipótesis alterna (H_a) y concluimos que, existe diferencia entre las resistencias a la compresión del concreto a la edad de 21 días de los grupos experimentales. Al existir igual de varianzas se realizó la prueba post hoc de Tukey.

- Paso 6: Prueba post hoc de Tukey

Tabla 101 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 21 días

HSD Tukey						
(I) adición	(J) grupos exp.	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0%	15%	67,64500*	5,32361	0,000	51,4528	83,8372
	30%	58,36500*	5,32361	0,000	42,1728	74,5572
	45%	32,67000*	5,32361	0,000	16,4778	48,8622
	75%	29,49833*	5,32361	0,000	13,3061	45,6906
	90%	54,43167*	5,32361	0,000	38,2394	70,6239
15%	0%	-67,64500*	5,32361	0,000	-83,8372	-51,4528
	30%	-9,28000	5,32361	0,516	-25,4722	6,9122
	45%	-34,97500*	5,32361	0,000	-51,1672	-18,7828
	75%	-38,14667*	5,32361	0,000	-54,3389	-21,9544
	90%	-13,21333	5,32361	0,162	-29,4056	2,9789
30%	0%	-58,36500*	5,32361	0,000	-74,5572	-42,1728
	15%	9,28000	5,32361	0,516	-6,9122	25,4722
	45%	-25,69500*	5,32361	0,001	-41,8872	-9,5028
	75%	-28,86667*	5,32361	0,000	-45,0589	-12,6744
	90%	-3,93333	5,32361	0,975	-20,1256	12,2589
45%	0%	-32,67000*	5,32361	0,000	-48,8622	-16,4778
	15%	34,97500*	5,32361	0,000	18,7828	51,1672

	30%	25,69500*	5,32361	0,001	9,5028	41,8872
	75%	-3,17167	5,32361	0,991	-19,3639	13,0206
	90%	21,76167*	5,32361	0,004	5,5694	37,9539
75%	0%	-29,49833*	5,32361	0,000	-45,6906	-13,3061
	15%	38,14667*	5,32361	0,000	21,9544	54,3389
	30%	28,86667*	5,32361	0,000	12,6744	45,0589
	45%	3,17167	5,32361	0,991	-13,0206	19,3639
	90%	24,93333*	5,32361	0,001	8,7411	41,1256
90%	0%	-54,43167*	5,32361	0,000	-70,6239	-38,2394
	15%	13,21333	5,32361	0,162	-2,9789	29,4056
	30%	3,93333	5,32361	0,975	-12,2589	20,1256
	45%	-21,76167*	5,32361	0,004	-37,9539	-5,5694
	75%	-24,93333*	5,32361	0,001	-41,1256	-8,7411

Tabla 102 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 21 días

Grupos	N	SUBCONJUNTO PARA ALFA = 0.05		
		1	2	3
15%	6	193.22		
90%	6	202.50		
30%	6	206.43		
75%	6		228.19	
45%	6		231.36	
0%	6			260.86
Sig.		0.16	0.99	1.00

NOTA: En la Tabla 102 se muestra los subconjuntos homogéneos de los resultados de la resistencia a compresión del concreto a la edad de 21 días, en los que el subconjunto compuesto por el grupo experimental 1 (G1) supera al resto.

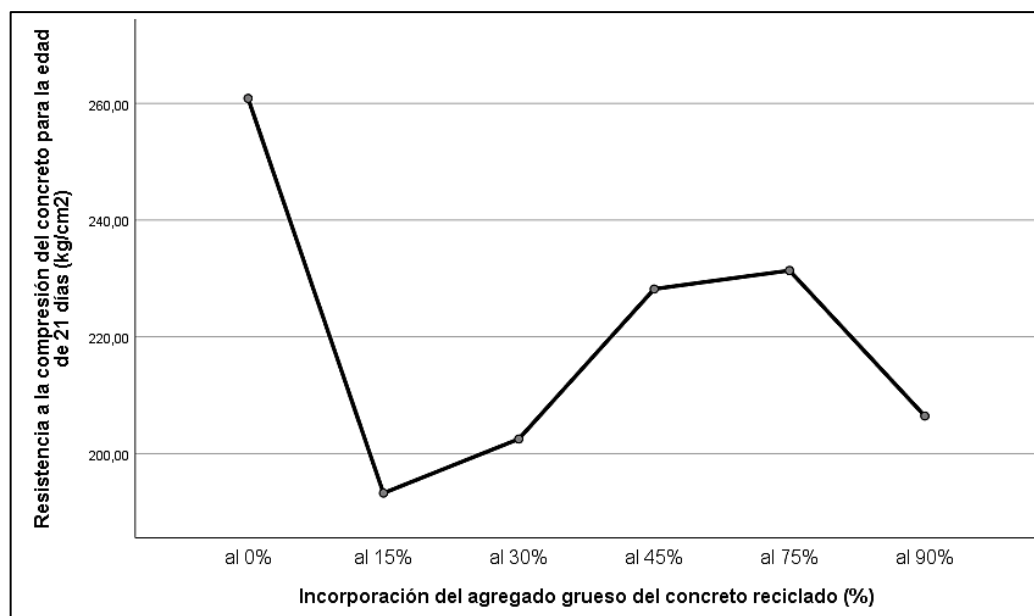


Figura 40 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 21 días

NOTA: La Figura 40 evidencia que dentro del grupo experimental 1 (G1), la incorporación del 0% posee el valor más alto resistencia a la compresión del concreto a la edad de 21 días, en comparación con los demás grupos experimentales.

- **Paso 6: Contrastación**

De la prueba de ANOVA se aceptó la hipótesis alterna y se concluye que, hay una variación en las resistencias a la compresión del concreto a los de 21 días de edad, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% respectivamente.

La Tabla 102 muestra que, respecto a la resistencia a la compresión del concreto a los 21 días, la media del grupo experimental 1 (G_1) supera a la media de los otros grupos experimentales. Por ende, podemos interpretar que la inclusión del agregado grueso del concreto reciclado influye en la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 21 días.

e) **Para la edad del concreto de 28 días**

- **Paso 1: Planteamiento estadístico**

H₀: No existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 28 días incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% ($\mu_{\text{CBR}_{0\%}} = \mu_{\text{CBR}_{15\%}} = \mu_{\text{CBR}_{30\%}} = \mu_{\text{CBR}_{45\%}} = \mu_{\text{CBR}_{75\%}} = \mu_{\text{CBR}_{90\%}}$).

H_a: Existe diferencia entre las resistencias a compresión del concreto a la edad de 28 días, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90%.

Decisión

Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀

Si p-valor < 0.05 se acepta H_a

- **Paso 2: Nivel de significancia**

Se estableció el 5% (0.05).

- **Paso 3: Prueba de normalidad**

Para la investigación, se examinaron 36 muestras, y la evaluación de normalidad se realizará a través del método de Shapiro-Wilk.

Hipótesis

H₀: Los datos tienen distribución normal

H_a: Los datos no tienen distribución normal

Decisión

Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀

Si p-valor < 0.05 se acepta H_a



Tabla 103 — Prueba de normalidad para la edad del concreto de 28 días

% de agregado grueso del concreto reciclado		Shapiro - Wilk.		
		Estadístico	gl.	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días (muestra patrón + % de agregado grueso del concreto reciclado)	0%	0.80	6	0.05
	15%	0.80	6	0.06
	30%	0.89	6	0.30
	45%	0.91	6	0.46
	75%	0.79	6	0.05
	90%	1.00	6	1.00

NOTA: La Tabla 103 muestra los resultados del estudio de normalidad, en la que se pueden observar que los valores de significancia superan el valor de 0.05. Aplicando el criterio de decisión aceptamos la hipótesis nula.

- Paso 4: Prueba de homogeneidad o igualdad de varianzas

Se utilizó la prueba de Levene para determinar la igualdad de las varianzas.

Hipótesis

H₀: Existen igualdad de varianzas

H_a: No existen igualdad de varianzas

Decisión

Si p-valor ≥ 0.05 se acepta H₀

Si p-valor < 0.05 se acepta H_a

Tabla 104 — Igualdad de varianzas para la edad del concreto de 28 días

Método		Estadístico	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días (muestra patrón + % agregado grueso del concreto reciclado)	Se basa en la media	0.60	5	30	0.70
	Se basa en la mediana	0.45	5	30	0.81
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.45	5	21.75	0.81
	Se basa en la media recortada	0.58	5	30	0.72

NOTA: La Tabla 104 muestra los resultados de la prueba de Levene, en el que los valores de significancia superan el 0.05, lo que nos permite aceptar H₀.

- Paso 5: Análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Tabla 105 — ANOVA para la edad del concreto de 28 días

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	14917.10	5	2983.42	41.94	0.00
Dentro de grupos	2133.86	30	71.13		
Total	17050.95	35			

NOTA: La Tabla 105 se visualiza que, el valor de significancia es inferior a 0.05 por lo consiguiente aceptamos la hipótesis alterna (H_a) y concluimos que, existe diferencia entre las resistencias a la compresión del concreto a la edad de 28 días de los grupos experimentales. Al existir igual de varianzas se realizó la prueba post hoc de Tukey.



- Paso 6: Prueba post hoc de Tukey

Tabla 106 — Prueba post hoc de Tukey para la edad del concreto de 28 días

HSD Tukey						
(I) adición	(J) grupos exp.	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0%	15%	59,50833*	4,86924	0,000	44,6981	74,3186
	30%	36,00333*	4,86924	0,000	21,1931	50,8136
	45%	14,94167*	4,86924	0,047	0,1314	29,7519
	75%	22,79333*	4,86924	0,001	7,9831	37,6036
	90%	50,06333*	4,86924	0,000	35,2531	64,8736
15%	0%	-59,50833*	4,86924	0,000	-74,3186	-44,6981
	30%	-23,50500*	4,86924	0,000	-38,3153	-8,6947
	45%	-44,56667*	4,86924	0,000	-59,3769	-29,7564
	75%	-36,71500*	4,86924	0,000	-51,5253	-21,9047
	90%	-9,44500	4,86924	0,399	-24,2553	5,3653
30%	0%	-36,00333*	4,86924	0,000	-50,8136	-21,1931
	15%	23,50500*	4,86924	0,000	8,6947	38,3153
	45%	-21,06167*	4,86924	0,002	-35,8719	-6,2514
	75%	-13,21000	4,86924	0,102	-28,0203	1,6003
	90%	14,06000	4,86924	0,070	-0,7503	28,8703
45%	0%	-14,94167*	4,86924	0,047	-29,7519	-0,1314
	15%	44,56667*	4,86924	0,000	29,7564	59,3769
	30%	21,06167*	4,86924	0,002	6,2514	35,8719
	75%	7,85167	4,86924	0,597	-6,9586	22,6619
	90%	35,12167*	4,86924	0,000	20,3114	49,9319
75%	0%	-22,79333*	4,86924	0,001	-37,6036	-7,9831
	15%	36,71500*	4,86924	0,000	21,9047	51,5253
	30%	13,21000	4,86924	0,102	-1,6003	28,0203
	45%	-7,85167	4,86924	0,597	-22,6619	6,9586
	90%	27,27000*	4,86924	0,000	12,4597	42,0803
90%	0%	-50,06333*	4,86924	0,000	-64,8736	-35,2531
	15%	9,44500	4,86924	0,399	-5,3653	24,2553
	30%	-14,06000	4,86924	0,070	-28,8703	0,7503
	45%	-35,12167*	4,86924	0,000	-49,9319	-20,3114
	75%	-27,27000*	4,86924	0,000	-42,0803	-12,4597

Tabla 107 — Subconjuntos homogéneos para la edad del concreto de 28 días

Grupos	N	SUBCONJUNTO PARA ALFA = 0.05				
		1	2	3	4	5
15%	6	209.68				
90%	6	219.13	219.13			
30%	6		233.19	233.19		
75%	6			246.40	246.40	
45%	6				254.25	
0%	6					269.19
Sig.		0.40	0.07	0.10	0.60	1.00

NOTA: Se muestran los subconjuntos homogéneos de los resultados de la resistencia a compresión del concreto a la edad de 28 días, en los que el subconjunto compuesto por el grupo experimental 1 (G1) supera al resto.



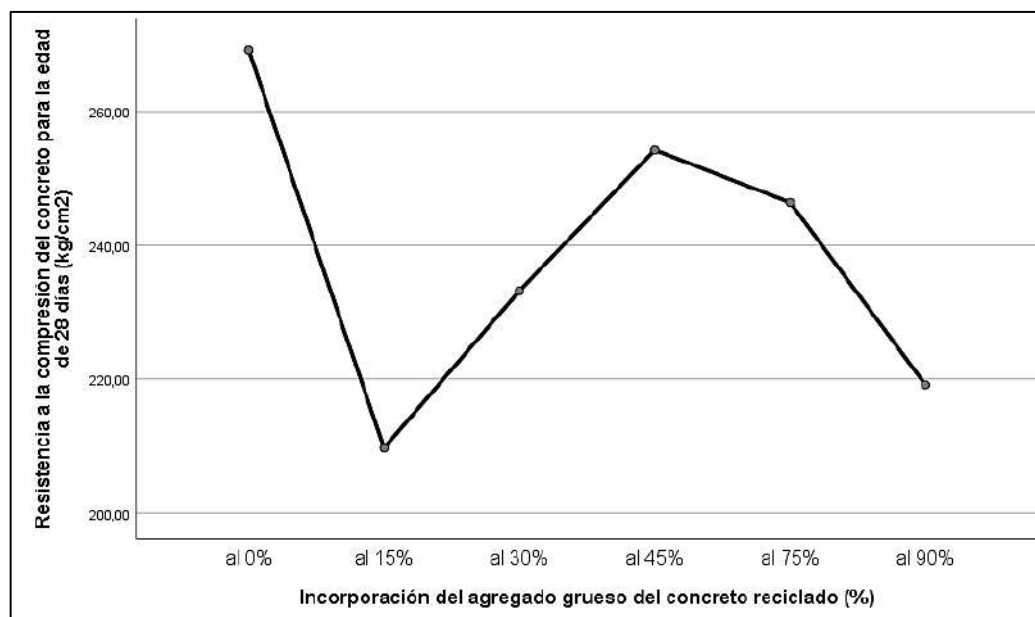


Figura 41 — Grafico de medias de la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días

NOTA: La Figura 41 evidencia que dentro del grupo experimental 1 (G1), la incorporación del 0% posee el valor más alto de resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días, en comparación con los demás grupos experimentales.

- Paso 6: Contrastación

De la prueba de ANOVA se aceptó la hipótesis alterna y se deduce que, hay una variación en las resistencias a la compresión del concreto a los 28 días de edad, incorporando agregado grueso del concreto reciclado al 0%, 15%, 30%, 45%, 75% y 90% respectivamente.

La Tabla 107 muestra que, respecto a la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, la media del grupo experimental 1 (G₁) supera la media de los otros grupos experimentales. Por ende, podemos interpretar que la inclusión del agregado grueso del concreto reciclado influye en la disminución de resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días.

5.3 Discusión

El análisis del comportamiento mecánico y del desgaste del pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso reciclado (AGR) proveniente de concreto demolido permitió identificar tendencias respecto a la variación de la resistencia y desempeño estructural del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ en suelos limo-gravosos de Abancay.

En primer lugar, la caracterización física y mecánica del AGR evidenció diferencias relevantes frente al agregado natural, como los de Jaramillo Abrego y Ríos Ponce (2023)

y Ruiz Flores (2024), donde se reporta menor peso específico y mayor absorción en agregados reciclados por la presencia de mortero adherido. Esta condición también resultó evidente en los AGR utilizados en el presente estudio, justificando los ajustes en proporciones de mezcla y la variabilidad observada en los valores de resistencia.

Respecto al segundo objetivo, relacionado con la durabilidad y resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm², el análisis estadístico revela que las resistencias presentan un orden creciente desde las mezclas con mayor porcentaje de reciclado hacia la mezcla control (0 % AGR). Este comportamiento coincide con investigaciones como las de Valenzuela Rivas (2023), quien señala que la resistencia disminuye conforme aumenta el porcentaje de agregado reciclado, aunque permanece dentro de los rangos normativos requeridos.

En el presente estudio, la mezcla con 15 % de agregado grueso reciclado alcanzó la resistencia más baja (209.68 kg/cm²), mientras que porcentajes elevados como 90 % AGR mostraron valores intermedios (219.12 kg/cm²). Esto confirma que el material reciclado incide de manera directa en la capacidad mecánica del concreto, especialmente en términos de compactación, absorción y adherencia pasta-agregado, logrando un comportamiento no lineal similar a lo reportado por Ruiz Flores (2024), quien identificó porcentajes óptimos alrededor del 30% de adición de agregado grueso reciclado.

Finalmente, respecto al impacto del agregado reciclado en la integridad estructural y resistencia al desgaste, los subconjuntos obtenidos en el análisis estadístico evidencian que cada porcentaje de agregado grueso reciclado forma parte de grupos significativamente distintos. Esto demuestra que la incorporación del agregado reciclado sí genera diferencias estadísticas en el desempeño del pavimento rígido.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La incorporación de agregado grueso de concreto reciclado mostró un impacto significativo en el comportamiento mecánico y el desgaste del pavimento rígido, confirmando la hipótesis de que este material influye en la resistencia estructural y la durabilidad; no obstante, entre los porcentajes evaluados, el 45% presentó el mejor desempeño, alcanzando los requisitos del diseño y cumpliendo el objetivo del estudio al determinar el comportamiento mecánico y desgaste del pavimento rígido en suelos limo-gravosos de Abancay, Apurímac 2024.
- La caracterización del agregado grueso reciclado mostró mayor peso unitario, mayor peso específico y mayor absorción respecto al agregado natural, lo que afectó la trabajabilidad y la respuesta mecánica del concreto. Estos resultados confirman la hipótesis, evidenciando que las propiedades del AGR difieren de las de los agregados convencionales y que su uso modifica el desempeño del concreto en pavimentos rígidos, cumpliéndose así el objetivo del estudio.
- Los resultados de laboratorio evidenciaron que la resistencia a la compresión a 28 días disminuyó conforme se incrementó la proporción de agregado reciclado en la mezcla. Se obtuvieron los siguientes promedios: G1: 271.63 kg/cm², G2: 209.35 kg/cm², G3: 233.19 kg/cm², G4: 253.43 kg/cm², G5: 246.44 kg/cm² y G6: 218.29 kg/cm². Estas variaciones confirman que el AGR influye en la durabilidad y resistencia del concreto, aunque las mezclas evaluadas mantienen resistencias dentro de rangos aceptables para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.
- La incorporación de agregado grueso reciclado generó una disminución en la integridad estructural y en la resistencia al desgaste del pavimento rígido en comparación con mezclas elaboradas con agregados naturales. Esto se explica por las propiedades físicas del AGR, caracterizado por mayor porosidad y adherencia de mortero, lo cual provoca mayor absorción y menor desempeño frente a cargas repetitivas.



6.2 Recomendaciones

- Se sugiere emplear porcentajes de agregado grueso reciclado cercanos al 45%, dado que este rango mostró el mejor desempeño mecánico y de desgaste en comparación con otras dosificaciones. Antes de aplicar este porcentaje en obra, es conveniente realizar ensayos preliminares que consideren las condiciones específicas del suelo y del clima para asegurar que el comportamiento sea consistente.
- Asimismo, es recomendable caracterizar detalladamente cada lote de agregado reciclado incluyendo peso unitario, peso específico, absorción, granulometría y mortero adherido ya que estas propiedades varían significativamente y afectan la trabajabilidad y la respuesta mecánica del concreto. Esta caracterización permitirá ajustar la mezcla de manera adecuada y evitar variaciones en el desempeño del pavimento.
- Considerando la disminución observada en la resistencia a la compresión conforme se incrementó el contenido de agregado reciclado, se aconseja ajustar la relación agua/cemento y la dosificación del cemento para compensar la mayor absorción del AGR. También resulta útil complementar los ensayos de resistencia con análisis de variabilidad para reducir el impacto de la heterogeneidad propia de este tipo de agregados.
- Finalmente, debido a la reducción en la integridad estructural y resistencia al desgaste observada en mezclas con AGR, se recomienda incorporar ensayos adicionales de durabilidad, como abrasión acelerada y ciclos de humedad–secado, que permitan validar su desempeño frente a condiciones reales de tráfico y ambientales. Estos ensayos ayudarán a establecer límites seguros de incorporación y a garantizar el comportamiento adecuado del pavimento en contextos similares al de Abancay.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). 1993. Guide for design of pavement structures, 1993. Washington, D.C.: AASHTO.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). 2022. ACI 211.1-22: Selecting proportions for normal-density and high-density concrete—Guide. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

ARIAS ODÓN, Fidias G. 1999. El proyecto de investigación: guía para su elaboración. 3.^a ed. Caracas: Editorial Episteme. ISBN 980-07-3868-1.

ARROYO HILTON, N. F. Diseño y conservación de pavimentos rígidos. Tesis de licenciatura. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2010. Disponible en: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3436343> [Consulta: 7 febrero 2024].

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CALIDAD (AEC). 2012. Guía de la Huella de Carbono. Madrid : s.n.

BALMACEDA CASTILLO, Hans Alonso. 2021. Análisis de ciclo de vida comparativo entre el uso de concreto convencional y alternativas de concreto reciclado [Tesis de licenciatura]. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19561> [Consulta: 7 febrero 2024].

BEDOYA, Carlos; DZUL, Luis. 2015. Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project [en línea]. Revista Ingeniería de Construcción, 30(2), pp. 99–108. DOI: 10.4067/S0718-50732015000200002. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732015000200002&lng=en [Consulta: 7 febrero 2024].

BENASSINI, Marcela. 2009. Introducción a la investigación de mercados: enfoque para América Latina. 2.^a ed. México: Pearson Educación. ISBN 978-970-26-1512-5.

BOOZ ALLEN HAMILTON; BARRIGA DALL'ORTO; WILBUR SMITH. 1999. Manual de identificación, clasificación y tratamientos de fallas en pavimentos urbanos. Lima: Asistencia técnica en estudios de transporte urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao. Disponible en: <https://idoc.pub/documents/tratamientos-de-fallas-en-pavimentos-8x4e8w1pom43> [Consulta: 7 febrero 2024].

BUNGE, Mario. 2002. La investigación científica: su estrategia y su filosofía. México: Siglo XXI Editores.

CARVAJAL ARANGO, David; BAHAMÓN JARAMILLO, Sara; ARISTIZÁBAL MONSALVE, Paula; VÁSQUEZ HERNÁNDEZ, Alejandro; BOTERO BOTERO, Luis Fernando. 2019. Relationships between lean and sustainable construction: positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. Journal of Cleaner Production, 234, pp. 1322–1337. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.216.

CASTRO VÁSQUEZ, María Gabriela; CASTRO VÁSQUEZ, Luis Alberto; CASTRO VÁSQUEZ, Prissila Germania. 2020. Aplicación práctica del método AASHTO-93 para el



diseño de pavimento rígido [en línea]. Polo del Conocimiento, 5(9), pp. 640–663. DOI: 10.23857/pc.v5i9.1717. Disponible en: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/1717> [Consulta: 11 enero 2024].

CCOILLO, Illary. 2017. Comportamiento de la subrasante de suelos con adición de escoria en pavimentos flexibles de la Universidad Agraria La Molina-2016 [Tesis]. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/13342> [Consulta: 7 febrero 2024].

CHÁVARRI CUEVA, Luis; FALEN SOLÍS, Arturo. 2020. Propuesta de concreto ecosostenible con la adición de caucho reciclado para la construcción de pavimentos urbanos en la ciudad de Lima [Tesis]. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/651661> [Consulta: 7 febrero 2024].

CHÁVEZ LÓPEZ, J. 2021. Evaluación superficial de las causas de deterioro del pavimento rígido de las calles de la lotización 22 de octubre, Cajamarca [Tesis]. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.

COLANGELO, Francesco; GÓMEZ-NAVARRO, Tomás; FARINA, Ilenia; PETRILLO, Antonella. 2020. Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe. The International Journal of Life Cycle Assessment, 25(9), pp. 1790–1804. DOI: 10.1007/s11367-020-01798-6.

CONCYTEC – CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA. 2019. Código nacional de la integridad científica [en línea]. Lima: CONCYTEC. Disponible en: <https://portal.concytec.gob.pe/images/publicaciones/Codigo-integridad-cientifica.pdf> [Consulta: 7 febrero 2024].

CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA. 2002. Catálogo de deterioro de pavimentos rígidos [en línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/30560977/M5_2_CAT%3%81LOGO_DE_DETERIOROS_DE_PAVIMENTOS_R%3%8DGDIDOS_CONSEJO_DE_DIRECTORES_DE_CARRETERAS_DE_IBERIA_E_IBEROAM%3%89RICA [Consulta: 7 febrero 2024].

CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA DESARROLLO SOSTENIBLE. 2009. Iniciativa por la sostenibilidad del cemento.

CORONADO ITURBIDE, J. 2002. Manual centroamericano para diseño de pavimentos. Guatemala: s. n.

DE LA CRUZ, Lizeth Mercedes; SALCEDO, Kaite Karen Rojas. 2019. Estabilización de suelos cohesivos por medio de aditivos [Tesis]. Huancayo: Universidad Peruana Los Andes. Disponible en: <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/112> [Consulta: 7 febrero 2024].

ESA, Mohd Reza; HALOG, Anthony; RIGAMONTI, Lucia. 2016. Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol. 19. DOI: 10.1007/s10163-016-0516-x.



FLORIAN TIRADO, Cristhian Wuesley y JARA GAMARRA, Cristhian Gaudencio. 2021. Influencia del porcentaje en la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar activada alcalinamente sobre la estabilización de la mezcla suelo-sedimento para uso en vías, Trujillo 2021. Trujillo: s.n.

GARCIA OROSCO, Alonso Eduardo. 2022. Análisis comparativo de métodos de evaluación superficial de pavimentos aplicados en vías de acceso al Hospital Rebagliati en Lima, Perú [Tesis de licenciatura]. Lima: Universidad Ricardo Palma. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5383> [Consulta: 7 febrero 2024].

GLOSARIO DE TÉRMINOS DE USO FRECUENTE EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL. 2013. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial [en línea]. Disponible en: <http://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2013/Julio/14/RD-18-2013-MTC-14.pdf>

GÜRSEL, A. Petek; MASANET, Eric; HORVATH, Arpad; STADEL, Alex. 2014. Life-cycle inventory analysis of concrete production: a critical review. *Cement and Concrete Composites*, Vol 51. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005.

HANSEN, Torben C.; NARUD, Henrik. 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, 5(1), pp. 79–83.

HARMSSEN, T. E. 2002. Diseño de estructuras de concreto armado. s.l.: s.n.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. 2014. Metodología de la investigación. 6.^a ed. México: McGraw-Hill.

HENAO, Á. M. H.; LÓPEZ, E. A. A. 2012. Agregado reciclado para morteros [en línea]. *Revista Universidad EAFIT*, 39(132), pp. 76–89. Disponible en: <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/897> [Consulta: 11 enero 2026].

HOEKSTRA, Arjen Y.; HUNG, P. Q. 2002. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Delft: UNESCO-IHE (Institute for Water Education).

HUANG, Beijia; WANG, Xiangyu; KUA, Harnwei; GENG, Yong; BLEISCHWITZ, Raimund; REN, Jingzheng. 2018. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 129. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.029.

INTERNATIONAL, ASTM. 2008. ASTM D6433-07: Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys. West Conshohocken, PA: ASTM International.

INVIAS – INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. (diversas ediciones). Manuales y guías técnicas de evaluación, deterioro y rehabilitación de pavimentos. Bogotá: INVIAS.

IRIGOIN JIMÉNEZ, Jim. 2016. Análisis de los factores que afectan la durabilidad del concreto en el pavimento rígido del Jr. Libertad en las cuadras 9, 10 y 11 de la ciudad de Chulucanas y planteamiento de recomendaciones para ampliar su vida útil [Tesis]. Disponible en:



https://repositorio.uap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12990/4345/Tesis_Factores_Durabilidad_Pavimento.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Consulta: 7 febrero 2024].

JARAMILLO ABREGO, Daniela Flor; RIOS PONCE, Dante Edyson. 2023. Propuesta de concreto con agregado grueso y fino de concreto reciclado para pavimentos especiales con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ para zonas costeras en Lima Metropolitana [Tesis]. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Disponible en: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/671074/Jaramillo_AD.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Consulta: 7 febrero 2024].

JIN, Ruoyu; YUAN, Hongping; CHEN, Qian. 2019. Science mapping approach to assisting the review of construction and demolition waste management research published between 2009 and 2018. *Resources, Conservation and Recycling*, 140. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.029.

KABIRIFAR, Kamyar; MOJTAHEDI, Mohammad; WANG, Changxin; TAM, Vivian W.Y. 2020. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: a review. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121265. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121265.

KIM, Taehyoung; TAE, Sungho; CHAE, Chang U. 2016. Analysis of environmental impact for concrete using LCA by varying the recycling components, the compressive strength and the admixture material mixing. *Sustainability*, 8(4), 389. DOI: 10.3390/su8040389.

KORANDA, Collin; CHONG, Wai Kiong; KIM, Changwan; CHOU, Jui-Sheng; KIM, Changmin. 2012. An investigation of the applicability of sustainability and lean concepts to small construction projects. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(5), pp. 699–707. DOI: 10.1007/s12205-012-1460-5.

KRYSTOFIK, Mark; WAGNER, Jeffrey; GAUSTAD, Gabrielle. 2015. Leveraging intellectual property rights to encourage green product design and remanufacturing for sustainable waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 97.

LA ROSA, Marco Mauricio. 2021. La ética en la investigación científica universitaria y su inclusión en la práctica docente. s.l. : Ciencia Latina.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (MTC). 2013. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial. Lima: MTC.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (MTC). 2014. Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Lima: MTC.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (MTC). 2016. Manual de ensayos de materiales. Lima: MTC.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO; SENCICO. 2009. Norma técnica E.060: concreto armado. Reglamento Nacional de Edificaciones [en línea]. Lima: SENCICO. Disponible en: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/109/2009/08/Norma-E.060-2009.pdf> [Consulta: 7 febrero 2024].



MIRANDA REBOLLEDO, Ricardo Javier. 2010. Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

MOYA CALDERÓN, Rufino. 2009. Probabilidad e inferencia estadística. 2.^a ed. Lima: San Marcos.

MUÑOZ SALINAS, Francisco; MENDOZA ESCOBEDO, Carlos Javier. 2012. La durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto [en línea]. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 4(1), pp. 63–86. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000200004 [Consulta: 7 febrero 2024].

MURGA TIRADO, Christian Edinson; FLORES BENITES, Alex; VASQUEZ SALAZAR, Anais Gabriela y VILCAHUAMÁN TADEO, Ronald. 2023. Mejora del rendimiento de pavimentos rígidos mediante el uso de métodos modernos en la optimización de capas. *Revista de Investigación e Innovación Científica y Tecnológica GnosisWisdom*, vol. 3(3), ISSN 2789-4282.

NEGASH, Yeneneh Tamirat; HASSAN, Abdiqani Muse; TSENG, Ming-Lang; WU, Kuo-Jui; ALI, Mohd Helmi. 2021. Sustainable construction and demolition waste management in Somaliland: regulatory barriers lead to technical and environmental barriers. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126717. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126717.

NIETO VEGA, Juan Sebastián. 2019. Evaluación del uso de aditivos químicos no tradicionales como estabilizadores de suelos limosos para caminos productivos de bajo volumen de tránsito. Chile: s.n.

NTP 400.053. 1999. Manejo de residuos de la actividad de la construcción: reciclaje de concreto de demolición. Lima: s. n.

OGUNBIYI, Oyedolapo; OLADAPO, Adebayo; GOULDING, Jack. 2014. An empirical study of the impact of lean construction techniques on sustainable construction in the UK. *Construction Innovation*, Vol. 14(1), pp. 88–107. DOI: 10.1108/CI-08-2012-0045.

PÁRRAGA, Cristhian; TORRES, Jose. 2021. Propuesta de diseño de concreto con cementos puzolánicos para la construcción de pavimentos CRCP en las carreteras de la región sur de Lima [Tesis]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/656075> [Consulta: 7 febrero 2024].

PASQUEL, Carbajal Enrique. 1998. Tópicos de tecnología del concreto en el Perú. Lima: s.n. Vol. II.

PUCHA AGUINSACA, P. A.; ZÁRATE TORRES, B. A. 2020. Evaluación superficial de pavimentos rígidos en carreteras mediante ortoimágenes obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado. *Avances Investigación en Ingeniería*, 17(2). DOI: 10.18041/1794-4953/avances.2.6599.

QUISPE VERA, Judan Rulo y CONDOR BUITRÓN, Ayme. 2020. Condición de superficie de pavimentos rígidos analizados mediante métodos convencionales-calles Andrés Avelino Cáceres y Casa Blanca, Santo Tomas, Cusco-2020. Cusco.



RIVVA LÓPEZ, Enrique. 2000. Naturaleza y materiales del concreto. Vol. I. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.

ROLDÁN DE PAZ, Jairon. 2018. Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y sub bases. Guatemala : s.n.

ROMAN CASTAÑEDA, C. Evaluación de las características físico-mecánicas del concreto elaborado con agregado reciclado de pavimentos, para su uso en construcciones – Abancay, 2022. Abancay: Universidad Tecnológica de los Andes, 2023.

RUIZ FLORES, D.A. 2024. Propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c=280$ kg/cm² con sustitución parcial de agregado grueso por concreto reciclado, Piura 2023. s.l.: Universidad César Vallejo.

Salkind, Neil J. 1999. Métodos de investigación. México : Prentice-Hall.

SANTOS, W. 2019. Importancia del slump en la resistencia de concreto lanzado por la E.E Robocon SAC en la Mina Chungar Compañía Minera Glencore Group SAC [Tesis en línea]. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6513> [Consulta: 7 febrero 2024].

SIKA PERÚ S.A.C. 2014. Hoja técnica: Sika® Dust Seal PE [en línea]. Lima: Sika Perú S.A.C. Disponible en: <https://per.sika.com/dms/getdocument.get/5639241a-46fa-372f-927b-6917b3899940/HT-Sika%20Dust%20Seal.pdf> [Consulta: 7 febrero 2024].

SÁNCHEZ DE JUAN, Marta; ALAEJOS GUTIÉRREZ, Pilar. 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 23(2), pp. 872–877. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.

SAUCEDO RODRÍGUEZ, Jhon Alexander. 2023. Evaluación del pavimento rígido aplicando los métodos del VIZIR, PCI y el Instituto Mexicano de SEDESOL. Universidad Señor de Sipán, Repositorio Institucional. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/11136> [Consulta: 7 febrero 2024].

SCHNEIDER, Heloísa y SAMANIEGO, Joseluis. 2010. La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. s.l. : Naciones Unidas, Santiago de Chile.

TRIOLA, Mario F. 2018. Estadística. 12.^a ed. México : Pearson Educación.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2001. PAVER: Pavement maintenance management system – PCI distress identification manual. ERDC/GSL TR-01-XX. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.

UNAMBA – Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. 2018. Código de ética para la investigación. Resolución N° 010-2018-VRINV-UNAMBA. Tamburco, Abancay : s.n.

VALENZUELA RIVAS, A.Z. 2023. Influencia de concreto reciclado de demoliciones de pavimentos rígidos como agregado grueso para la elaboración de buzones de alcantarillado, Abancay 2022. Abancay: Universidad Tecnológica de los Andes.



VALLE, Wilfredo Alfonso AREAS. 2018. Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos. Madrid : s.n.

VERGARA VICUÑA, Antony Luis. 2015. Evaluación del estado funcional y estructural del pavimento flexible mediante la metodología PCI tramo Quichuay. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

WASTE MANAGEMENT. 2013. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. Waste Management, 33(6), pp. 1539–1551. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.001.

WONG, Johannes K.W. y LI, Heng y WANG, Shouqing. 2013. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. Waste Management.

WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza). 2008. Informe Planeta Vivo 2008. Gland: WWF.

YANAGIBASHI, Kunio; INOUE, Kazumasa; SEKO, Shigeki y TSUJI, Daijiro. 2009. A study on cyclic use of aggregate for structural concrete. Japón: Research & development institute, Takenaka Corporation. Disponible en: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB3971.pdf>



ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia de la investigación	153
Anexo B. Evidencias fotográficas	155
Anexo C. Resultados de laboratorio	171
Anexo D. Certificados de calibración	194
Anexo E. Estudio de tráfico	204
Anexo F. Declaratoria de originalidad del autor	206
Anexo G. Plano de ubicación	208



Anexo A. Matriz de consistencia

Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac – 2024

Tabla 108 — Matriz de consistencia de la investigación

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema general: ¿Cuál es el comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?</p>	<p>Objetivo general: Determinar el comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.</p>	<p>Hipótesis general: Se espera que la incorporación de agregado grueso de concreto reciclado influya significativamente en el comportamiento mecánico y el desgaste del pavimento rígido, la utilización de este tipo de agregado afectará la resistencia estructural, la durabilidad y la vida útil del pavimento en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.</p>	<p>Dependiente: Agregado grueso reciclado. <i>Dimensiones:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Propiedades físicas mecánicas. <p>Suelo limo-gravoso <i>Dimensiones:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Caracterización geotécnica del suelo. Capacidad portante del suelo 	<p>Tipo de investigación: Aplicada con un enfoque cuantitativo</p> <p>Nivel: Descriptivo.</p> <p>Diseño: Experimental</p> <p>Población: Todas las áreas viales en la ciudad de Abancay que presentan pavimentos rígidos.</p>
<p>Problemas específicos: PE1: ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso de concreto reciclado y cómo se comparan con las de los agregados tradicionales en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?</p>	<p>Objetivos específicos: OE1: Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de agregado grueso del concreto reciclado y compararlas con las de los agregados tradicionales en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.</p>	<p>Hipótesis específicas: HE1: Las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso de concreto reciclado difieren de las de los agregados tradicionales utilizados en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024, lo cual influye en su desempeño estructural.</p>	<p>Independiente: Pavimento rígido. <i>Dimensiones:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Propiedades mecánicas. Desgaste de pavimento rígido. 	<p>Muestra: 60 muestras para evaluar con diferentes porcentajes de incorporación de agregado grueso del concreto reciclado.</p>

<p>PE2: ¿Cómo influirá la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado en la durabilidad y resistencia en concreto $f'c=210$ kg/cm² para las vías de transporte en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?</p> <p>PE3: ¿Cómo influirá la incorporación del agregado grueso de concreto reciclado en la integridad estructural y la resistencia al desgaste del pavimento rígido con concreto $f'c=210$ kg/cm² en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024?</p>	<p>OE2: Determinar cómo la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado afecta en la durabilidad y resistencia en concreto $f'c=210$ kg/cm² para las vías de transporte en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.</p> <p>OE3: Evaluar el impacto de la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado en la integridad estructural y la resistencia al desgaste del pavimento rígido con concreto $f'c=210$ kg/cm² en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.</p>	<p>HE2: La incorporación de agregado grueso del concreto reciclado disminuye ligeramente la durabilidad y resistencia del concreto $f'c=210$ kg/cm² del pavimento rígido para las vías de transporte en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.</p> <p>HE3: La incorporación de agregado grueso del concreto reciclado reduce la integridad estructural y la resistencia al desgaste del pavimento rígido con concreto $f'c=210$ kg/cm² en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024.</p>		
---	--	--	--	--

Anexo B. Evidencias fotográficas



Figura 42 — Reciclaje del concreto en el distrito de Abancay



Figura 43 — Preparación del agregado del concreto reciclado



Figura 44 — Cantera Murillo de Abancay



Figura 45 — Recolección de agregado grueso en la cantera Murillo



Figura 46 — Recolección de agregado fino en la Murillo



Figura 47 — Cuarteo de muestras del agregado grueso



Figura 48 — Cuarteo de muestras del agregado fino



Figura 49 — Tamizado de agregados



Figura 50 — Verificación de los pesos por tamices



Figura 51 — Verificación de la distribución de tamaños del agregado



Figura 52 — Distribución de tamaños del agregado grueso



Figura 53 — Tamizado del agregado grueso del concreto reciclado



Figura 54 — Tamizado de los agregados y verificación de los pesos por tamices



Figura 55 — Verificación del peso del material retenido en cada tamiz



Figura 56 — Prueba de abrasión del agregado grueso



Figura 57 — Preparación manual del concreto $f'c=210$ kg/cm² para el G₁



Figura 58 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm² para el G₁



Figura 59 — Verificación del asentamiento mediante el cono de Abrams



Figura 60 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el G₂



Figura 61 — Preparación manual del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el G₃



Figura 62 — Toma de temperatura del concreto en estado fresco



Figura 63 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm² para el G₃



Figura 64 — Preparación manual del concreto $f'c=210$ kg/cm² para el G₄



Figura 65 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210$ kg/cm² para el G₄



Figura 66 — Preparación manual del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el G₅



Figura 67 — Elaboración de testigos de concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el G₅



Figura 68 — Preparación manual del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el G₆



Figura 69 — Mezcla manual del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ para el G₆



Figura 70 — Desencofrado de los testigos de concreto



Figura 71 — Escritura de la nomenclatura para los testigos de concreto



Figura 72 — Curado de los testigos concreto del grupo experimental 1 (G₁)



Figura 73 — Curado de los testigos de concreto



Figura 74 — Curado de testigos de concreto (G₃)



Figura 75 — Verificación del diámetro de los testigos de concreto G₁



Figura 76 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₁



Figura 77 — Tipo de falla del testigo de concreto con prensa hidráulica G₁

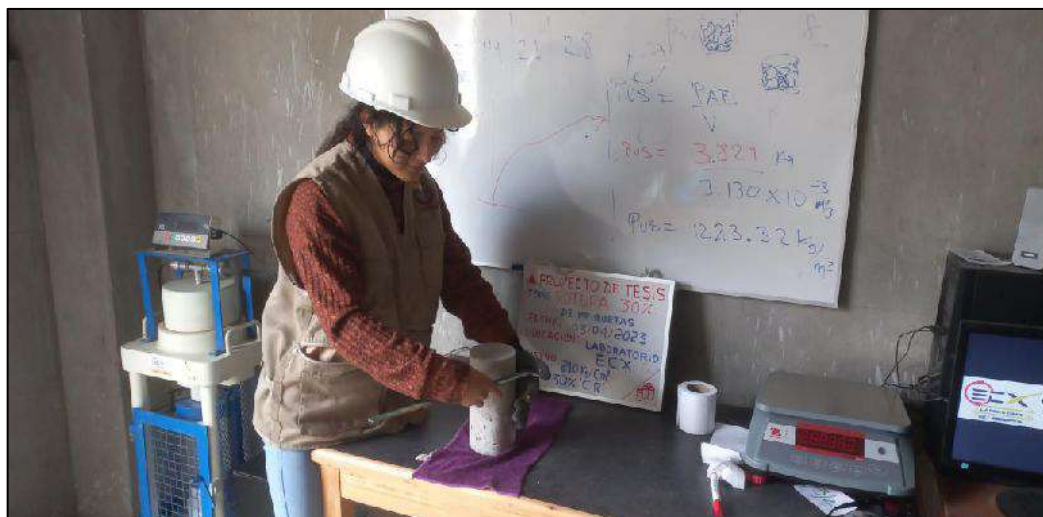


Figura 78 — Verificación del diámetro de los testigos de concreto G₃



Figura 79 — Tipo de falla del testigo de concreto con prensa hidráulica G₃



Figura 80 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₃



Figura 81 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₂



Figura 82 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₃



Figura 83 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₂



Figura 84 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₆



Figura 85 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₆



Figura 86 — Rotura de testigos de concreto con prensa hidráulica G₅



Figura 87 — Preparación del pavimento para la evaluación del desgaste




Figura 88 — Control del desgaste del pavimento con agregado de cantera




Figura 89 — Control del desgaste del pavimento con agregado reciclado

Anexo C. Resultados de laboratorio



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING · CONSTRUCTION
MAUCACALLE · SAHUNAY MZ B IT'S. ABANCAY, PERU



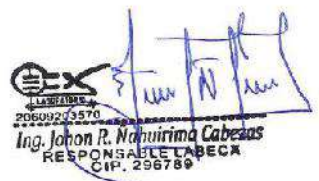
CONTROL DE ASENTAMIENTO

PROYECTO Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024

UBICACIÓN ABANCAY

DISTRITO ABANCAY **PROVINCIA** ABANCAY


N°	DATOS	ASENTAMIENTO			
		A1	A2	A3	PROMEDIO
1	Grupo experimental 1 - incorporación del 0% de agregado grueso reciclado	10.22	10.09	10.02	10.11
2	Grupo experimental 2 - incorporación del 15% de agregado grueso reciclado	9.95	9.92	10.01	9.96
3	Grupo experimental 3 - incorporación del 30% de agregado grueso reciclado	9.91	9.87	9.80	9.88
4	Grupo experimental 4 - incorporación del 45% de agregado grueso reciclado	9.83	9.91	9.81	9.85
5	Grupo experimental 5 - incorporación del 75% de agregado grueso reciclado	9.87	9.85	9.77	9.83
6	Grupo experimental 6 - incorporación del 90% de agregado grueso reciclado	9.79	9.81	9.86	9.82




Ing. John R. Nahirima Cabezas
RESPONSABLE LABECA
CIP. 296789

Figura 90 — Control de asentamiento de los grupos experimentales





LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING · CONSTRUCTION
997374826 / 985190469
ITALICACALLE · SANURAY MZ. B Nº2, ABANCAY, PERU




CONTROL DE TEMPERATURA

PROYECTO Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024

UBICACIÓN ABANCAY

DISTRITO ABANCAY **PROVINCIA** ABANCAY

Nº	DATOS	TEMPERATURA
1	Grupo experimental 1 - incorporación del 0% de agregado grueso reciclado	26.10
2	Grupo experimental 2 - incorporación del 15% de agregado grueso reciclado	25.90
3	Grupo experimental 3 - incorporación del 30% de agregado grueso reciclado	25.70
4	Grupo experimental 4 - incorporación del 45% de agregado grueso reciclado	25.50
5	Grupo experimental 5 - incorporación del 75% de agregado grueso reciclado	25.30
6	Grupo experimental 6 - incorporación del 90% de agregado grueso reciclado	24.80



Ing. John A. Nahuirima Córdova
RESPONSABLE LABORATORIO
CIP. 299786

Figura 91 — Control de temperatura de los grupos experimentales



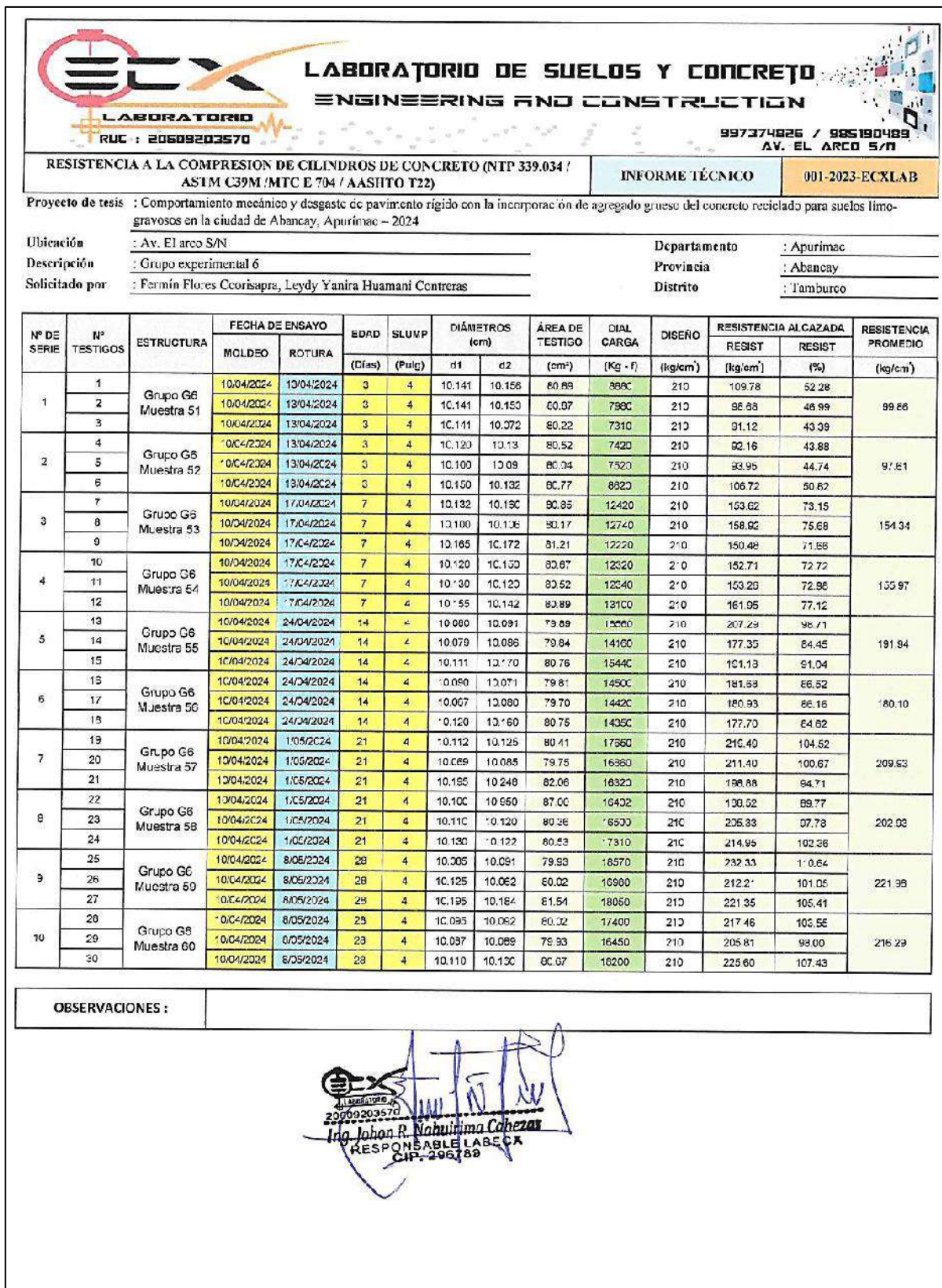


Figura 92 — Resistencia a compresión del grupo experimental 6 (G6)



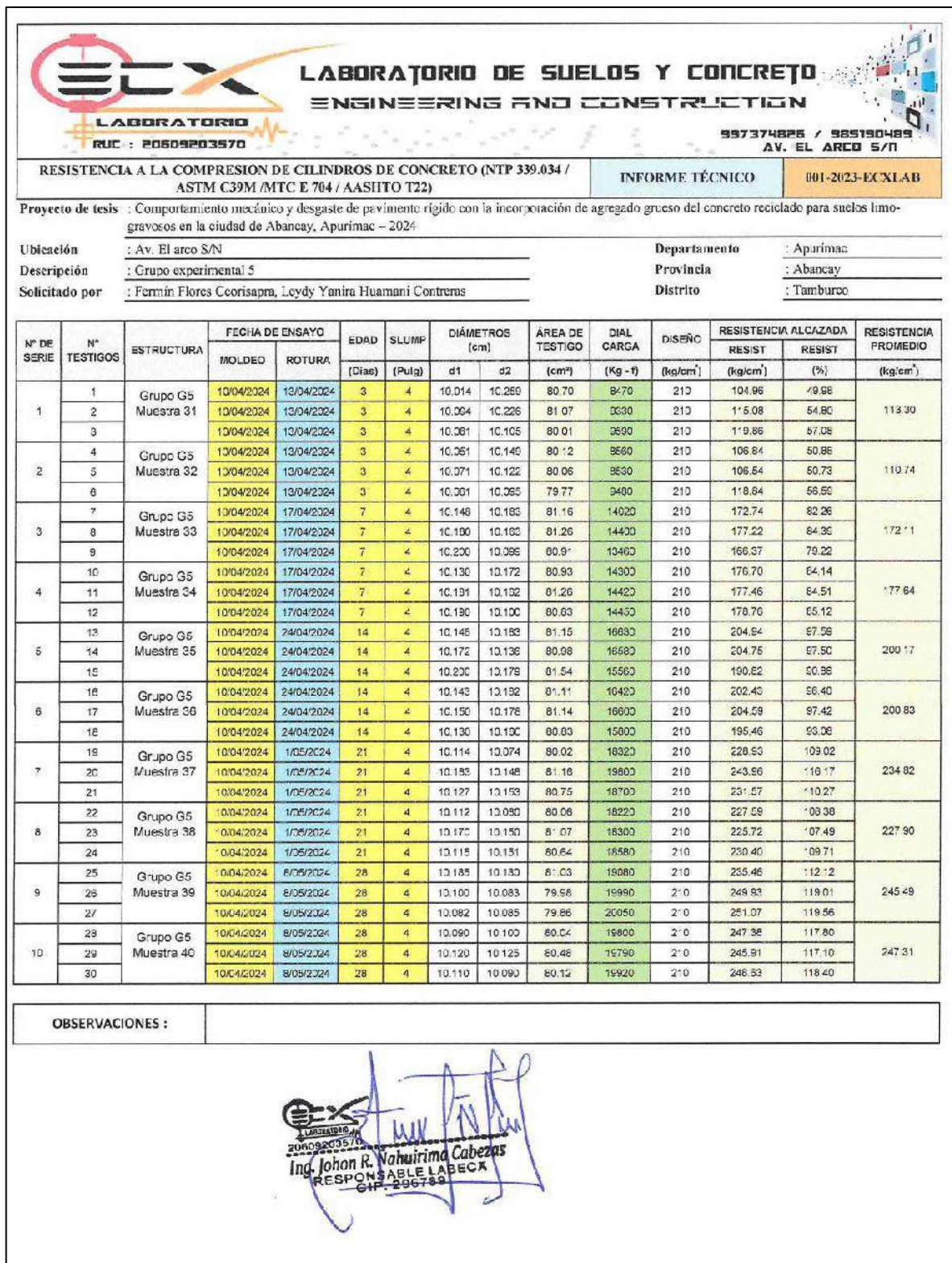


Figura 93 — Resistencia a compresión del grupo experimental 5 (G5)



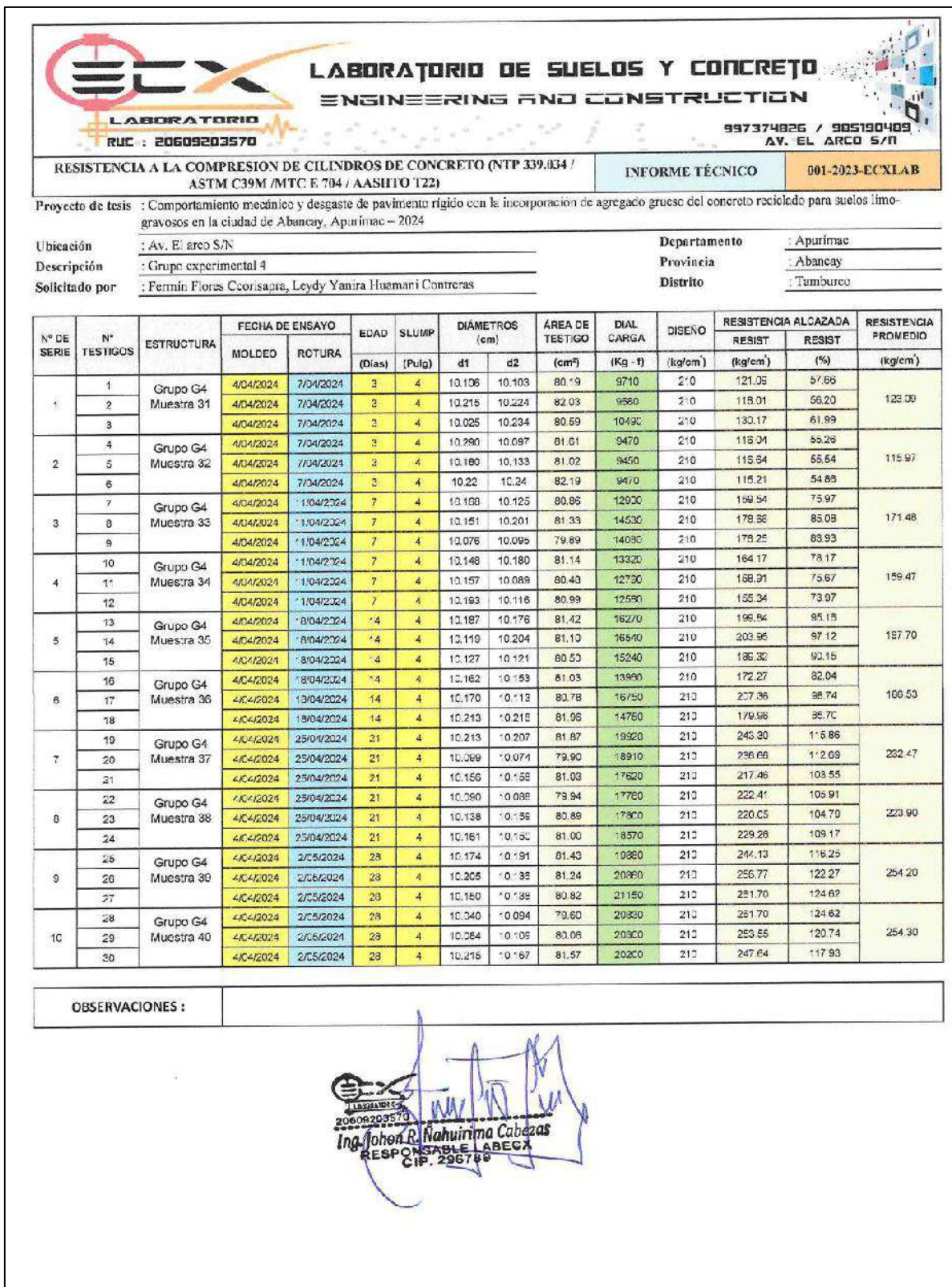



Figura 94 — Resistencia a compresión del grupo experimental 4 (G4)





LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING AND CONSTRUCTION

RUC : 20609203570

997374026 / 985190489
AV. EL ARCO S/N

RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO (NTP 339.034 / ASTM C39M / MTC E 704 / AASHTO T22)	INFORME TÉCNICO	001-2023-ECXLAB
--	------------------------	------------------------

Proyecto de tesis : Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac – 2024


Ubicación : Av. El arco S/N Departamento : Apurímac

Descripción : Grupo experimental 3 Provincia : Abancay

Solicitado por : Fermin Flores Ccorisapra, Leydy Yanira Huamani Contreras Distrito : Tamburco

N° DE SERIE	N° TESTIGOS	ESTRUCTURA	FECHA DE ENSAYO		EDAD (Días)	SLUMP (Pulg)	DIÁMETROS (cm)		ÁREA DE TESTIGO (cm²)	DIAL CARGA (Kg - f)	DISEÑO (kg/cm²)	RESISTENCIA ALCAZADA		RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm²)
			MOLDEO	ROTURA			d1	d2				RESIST (kg/cm²)	RESIST (%)	
1	1	Grupo G3	31/03/2024	3/04/2024	3	4	10.123	10.064	80.02	8740	210	109.23	52.01	107.25
	2	Muestra 21	31/03/2024	3/04/2024	3	4	10.191	10.190	81.56	8652	210	105.05	50.50	
	3		31/03/2024	3/04/2024	3	4	10.132	10.233	81.43	8670	210	103.47	50.70	
2	4	Grupo G3	31/03/2024	3/04/2024	3	4	10.062	10.069	79.73	8320	210	104.35	49.69	109.93
	5	Muestra 22	31/03/2024	3/04/2024	3	4	10.211	10.116	81.13	8920	210	109.95	52.36	
	6		31/03/2024	3/04/2024	3	4	10.195	10.132	81.13	9370	210	115.49	55.00	
3	7	Grupo G3	31/03/2024	7/04/2024	7	4	10.253	10.100	81.10	12350	210	162.04	72.40	153.70
	8	Muestra 23	31/03/2024	7/04/2024	7	4	10.157	10.185	81.25	12550	210	155.83	74.14	
	9		31/03/2024	7/04/2024	7	4	10.133	10.162	81.11	12440	210	153.37	73.03	
4	10	Grupo G3	31/03/2024	7/04/2024	7	4	10.136	10.168	80.98	11970	210	147.85	70.40	153.62
	11	Muestra 24	31/03/2024	7/04/2024	7	4	10.150	10.191	81.24	13000	210	160.02	76.20	
	12		31/03/2024	7/04/2024	7	4	10.155	10.163	81.09	14840	210	183.01	87.15	
5	13	Grupo G3	31/03/2024	14/04/2024	14	4	10.223	10.175	81.54	12520	210	153.55	73.12	174.34
	14	Muestra 25	31/03/2024	14/04/2024	14	4	10.174	10.163	81.37	15210	210	186.93	89.01	
	15		31/03/2024	14/04/2024	14	4	10.234	10.133	81.37	15000	210	184.35	87.78	
6	16	Grupo G3	31/03/2024	14/04/2024	14	4	10.116	10.113	80.35	15100	210	187.93	89.40	200.54
	17	Muestra 25	31/03/2024	14/04/2024	14	4	10.072	10.090	79.03	16040	210	200.94	95.69	
	18		31/03/2024	14/04/2024	14	4	10.112	10.120	80.37	17100	210	212.76	101.31	
7	19	Grupo G3	31/03/2024	21/04/2024	21	4	10.110	10.101	80.21	16190	210	201.86	96.12	199.97
	20	Muestra 27	31/03/2024	21/04/2024	21	4	10.152	10.175	81.13	16200	210	199.68	95.09	
	21		31/03/2024	21/04/2024	21	4	10.128	10.177	80.36	16030	210	198.07	94.32	
8	22	Grupo G3	31/03/2024	21/04/2024	21	4	10.115	10.058	80.22	15590	210	194.21	92.48	205.12
	23	Muestra 28	31/03/2024	21/04/2024	21	4	10.143	10.200	81.25	16400	210	201.83	96.11	
	24		31/03/2024	21/04/2024	21	4	10.155	10.176	81.15	17800	210	219.32	104.44	
9	25	Grupo G3	31/03/2024	28/04/2024	28	4	10.080	10.068	79.71	18930	210	238.12	113.39	239.58
	26	Muestra 29	31/03/2024	28/04/2024	28	4	10.070	10.093	79.83	18750	210	234.89	111.85	
	27		31/03/2024	28/04/2024	28	4	10.083	10.077	79.83	19810	210	245.73	117.02	
10	28	Grupo G3	31/03/2024	28/04/2024	28	4	10.169	10.150	81.07	17230	210	212.54	101.21	225.79
	29	Muestra 30	31/03/2024	29/04/2024	28	4	10.189	10.144	81.17	18680	210	230.14	109.59	
	30		31/03/2024	29/04/2024	28	4	10.089	10.077	79.65	18980	210	237.70	113.19	

OBSERVACIONES :



Ing. John R. Nahirima Cabezas
RESPONSABLE LABORATORIO
CIP. 29678P

Figura 95 — Resistencia a compresión del grupo experimental 3 (G3)



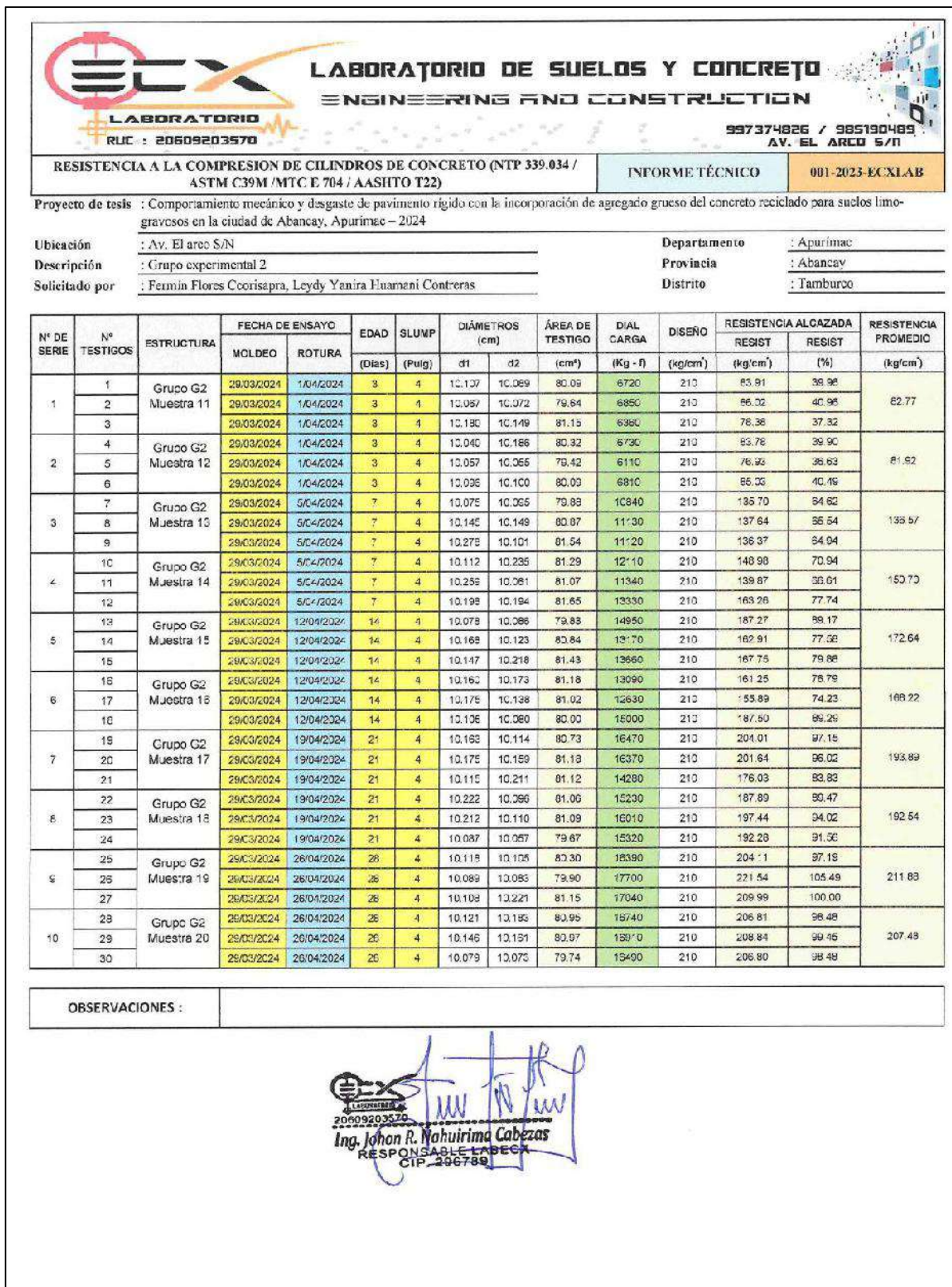


Figura 96 — Resistencia a compresión del grupo experimental 2 (G2)



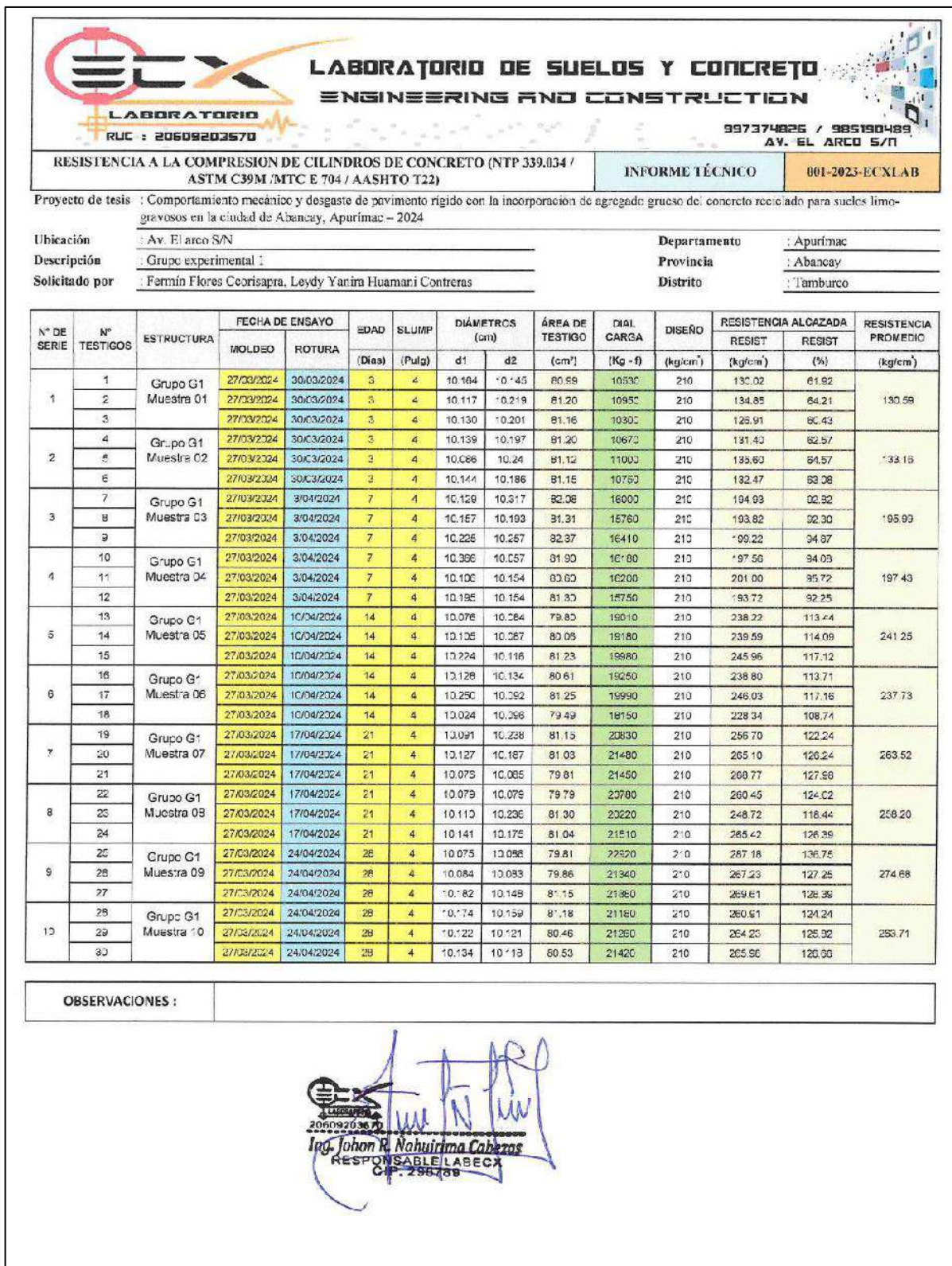


Figura 97 — Resistencia a compresión del grupo experimental 1 (G1)




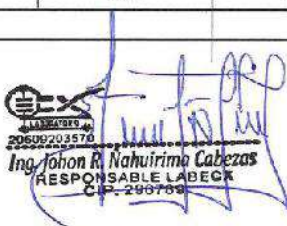

	INFORME DE ENSAYO			CÓDIGO:	AA-2024
	ABRACION LOS ANGELES (L.A.) AL DESGASTE DE LOS GREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37,5 MM (1 1/2")			VERSIÓN:	1
	MTC E 207 / ASTM C-131			PÁGINA: 1 DE: 1	
NOMBRE CLIENTE:	FERMIN FLORES CCORISAPRA, LEYDY YANIRA HUAMANI CONTRERAS				
TESIS	COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DESGASTE DE PAVIMENTO RÍGIDO CON LA INCORPORACIÓN DE AGREGADO GRUESO DEL CONCRETO RECICLADO PARA SUELOS LIMO-GRAVOSOS EN LA CIUDAD DE ABANCAY, APURÍMAC - 2024				
MUESTRA:	AGREGADO GRUESO DE 3/4" PIEDRA CHANCADA				
PRUEBA		1			
Granulometría usada en el Ensayo		A			
Tamaño Máximo Nominal (mm)		3/4"			
Estado de la Muestra		SECA			
B: Masa de la muestra antes del ensayo (g)		5000			
C ₁ : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm (No. 12), (g) 100 REVOLUCIONES		4015.60			
C ₂ : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm (No. 12), (g) 500 REVOLUCIONES		3511.90			
D ₁ , % de Pérdida a 100 REVOLUCIONES		20.00			
D ₂ , % de Pérdida a 500 REVOLUCIONES		30.00			
% de Pérdida		30			
GRANULOMETRÍAS DE LA MUESTRA DE ENSAYO, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES					
TAMAÑOS DE TAMIZ		MASA DE LAS DIFERENTES FRACCIONES g.			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRÍAS			
		A	B	C	D
37.5mm (1 1/2")	25mm (1")				
25mm (1")	19mm (3/4")	1250±25			
19mm (3/4")	12.5mm (1/2")	1250±25			
12.5mm (1/2")	9.5mm (3/8")	1250±10	2500±10		
9.5mm (3/8")	6.3mm (1/4")	1250±10	2500±10	2500±10	
6.3mm (1/4")	4.75mm (# 4)			2500±10	
4.75mm (# 4)	2.36mm (# 8)				5000±10
TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
No DE ESFERAS		12	11	8	6
No DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
REVISÓ			APROBÓ		
 <p>  20609203570 Ing. Johari R. Nahirima Cabezas RESPONSABLE LABECC C.I.F. 296789 </p>					

Figura 98 — Desgaste del agregado grueso de cantera



INFORME DE ENSAYO		CÓDIGO:	AA-2024		
ABRASION LOS ANGELES (L.A.) AL DESGASTE DE LOS GREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37,5 MM (1 1/2")		VERSIÓN:	1		
MTC E 207 / ASTM C-131		PAGINA:	1 DE 1		
NOMBRE CLIENTE:	FERMIN FLORES CCORISAPRA, LEYDY YANIRA HUAMANI CONTRERAS				
TESIS	COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DESGASTE DE PAVIMENTO RÍGIDO CON LA INCORPORACIÓN DE AGREGADO GRUESO DEL CONCRETO RECICLADO PARA SUELOS LIMO-GRAVOSOS EN LA CIUDAD DE ABANCAY, APURÍMAC - 2024				
MUESTRA :	AGREGADO GRUESO RECICLADO DE 3/4"				
PRUEBA	1				
Granulometría usada en el Ensayo	A				
Tamaño Máximo Nominal (mm)	3/4"				
Estado de la Muestra	SECA				
B: Masa de la muestra antes del ensayo (g)	5000.00				
C ₁ : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm (No. 12), (g) 100 REVOLUCIONES	4001.20				
C ₂ : Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm (No. 12), (g) 500 REVOLUCIONES	3310.40				
D ₁ , % de Pérdida a 100 REVOLUCIONES	20.00				
D ₂ , % de Pérdida a 500 REVOLUCIONES	34.00				
% de Pérdida	34				
GRANULOMETRÍAS DE LA MUESTRA DE ENSAYO, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES					
TAMAÑOS DE TAMIZ		MASA DE LAS DIFERENTES FRACCIONES g.			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRIAS			
		A	B	C	D
37.5mm (1 1/2")	25mm (1")				
25mm (1")	19mm (3/4")	1250±25			
19mm (3/4")	12.5mm (1/2")	1250±25			
12.5mm (1/2")	9.5mm (3/8")	1250±10	2500±10		
9.5mm (3/8")	6.3mm (1/4")	1250±10	2500±10	2500±10	
6.3mm (1/4")	4.75mm (# 4)			2500±10	
4.75mm (# 4)	2.36mm (# 8)				5000±10
TOTAL		6000±10	5000±10	5000±10	5000±10
No DE ESFERAS		12	11	8	5
No DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
REVISÓ		APROBÓ			





Ing. John R. Nahirima Cabezas
 RESPONSABLE LABECC
 C.I.F. 299769

Figura 99 — Desgaste del agregado grueso del concreto reciclado

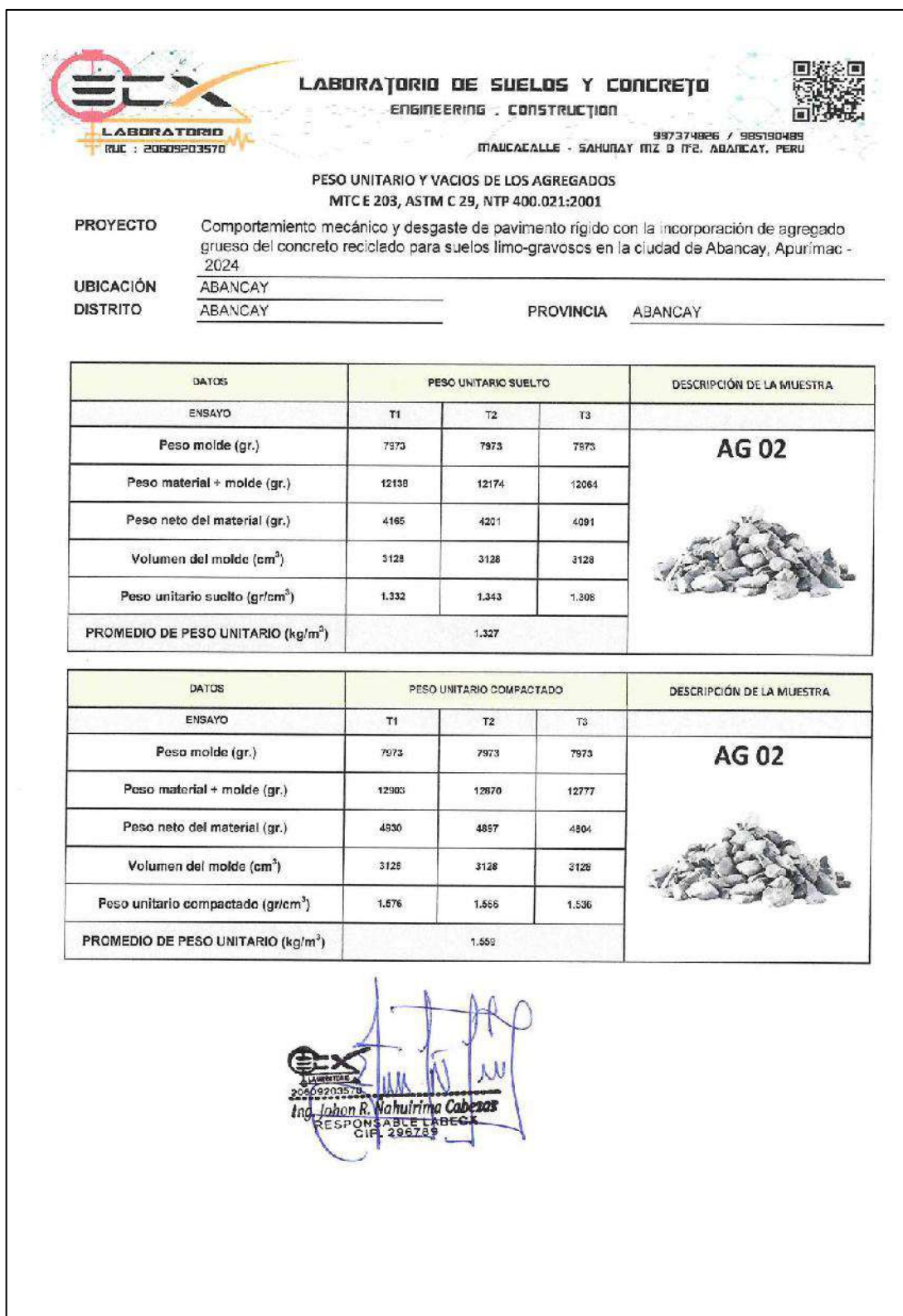


Figura 100 — Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso de cantera

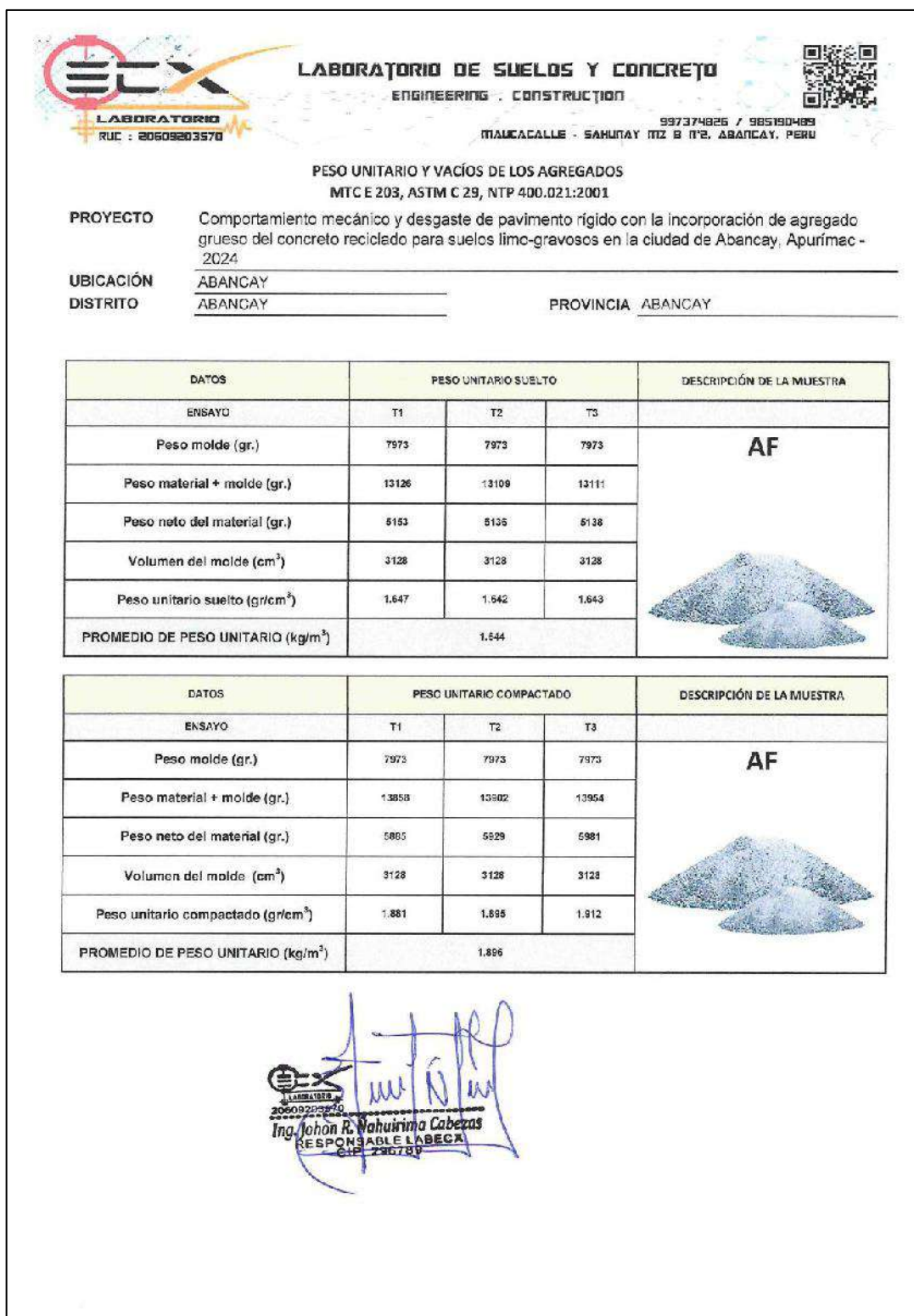


Figura 102 — Peso unitario suelto y compactado del agregado fino de cantera

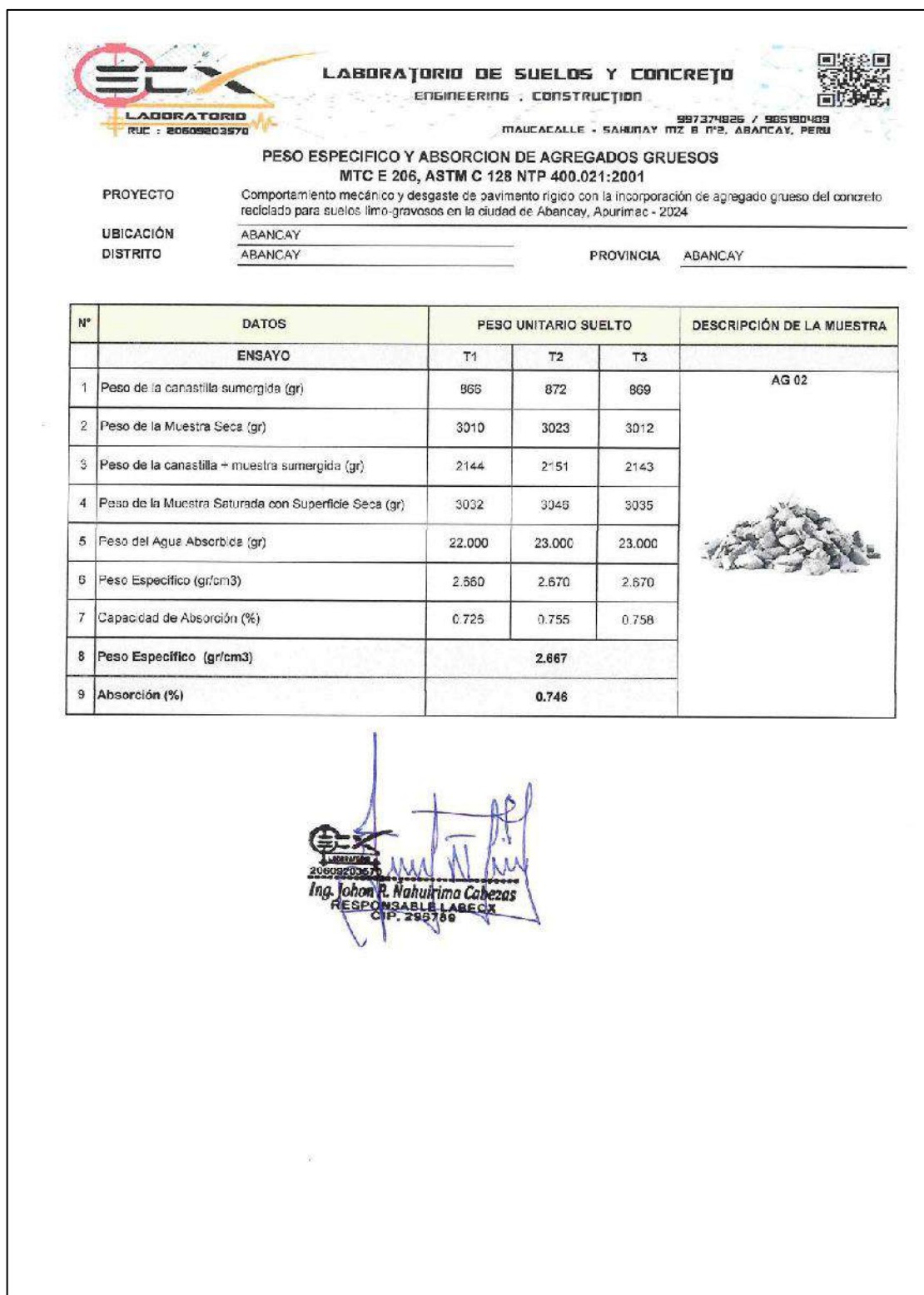


Figura 103 — Peso específico y Absorción del agregado grueso reciclado

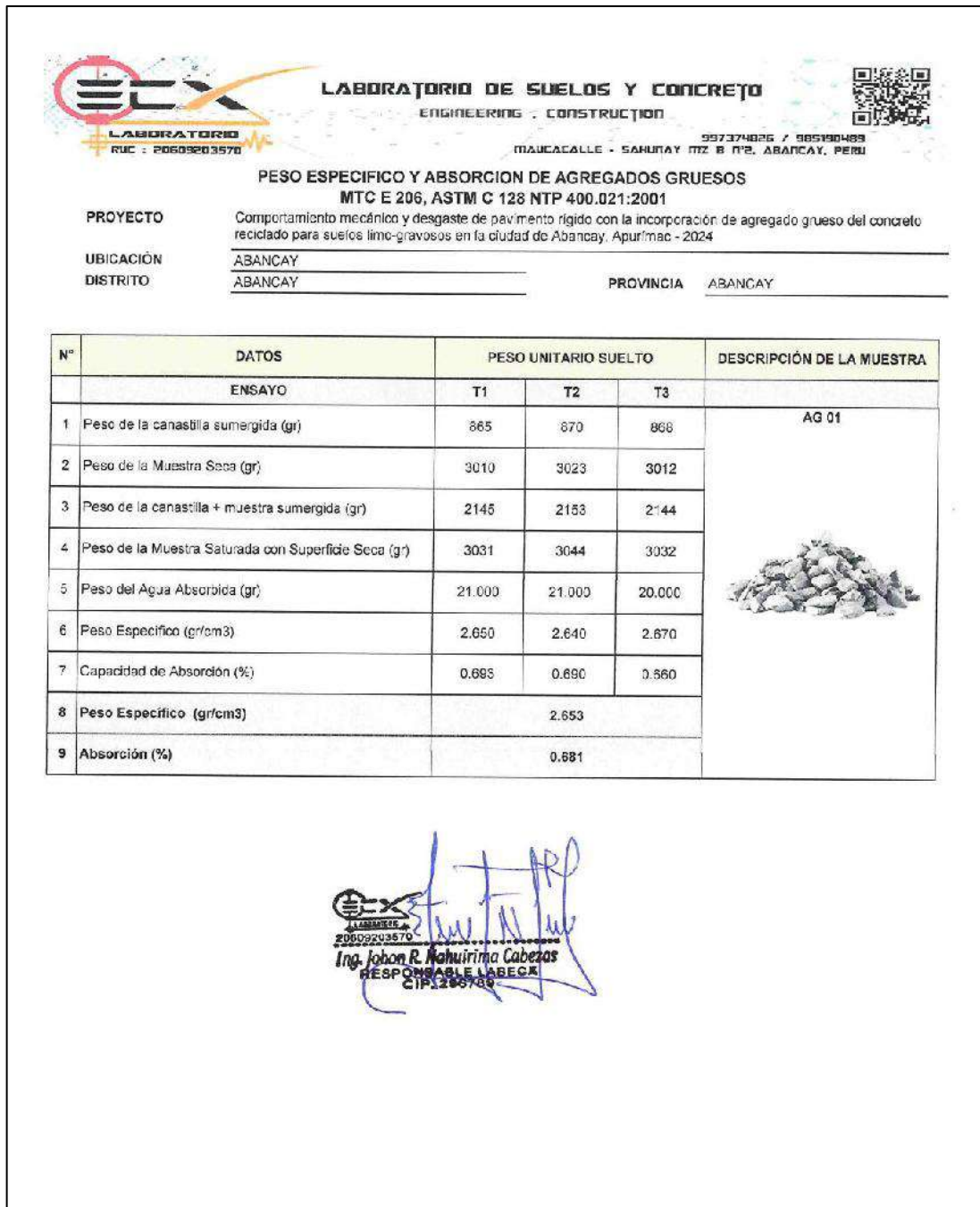


Figura 104 — Peso específico y Absorción del agregado grueso de cantera



Figura 105 — Peso específico y Absorción del agregado fino

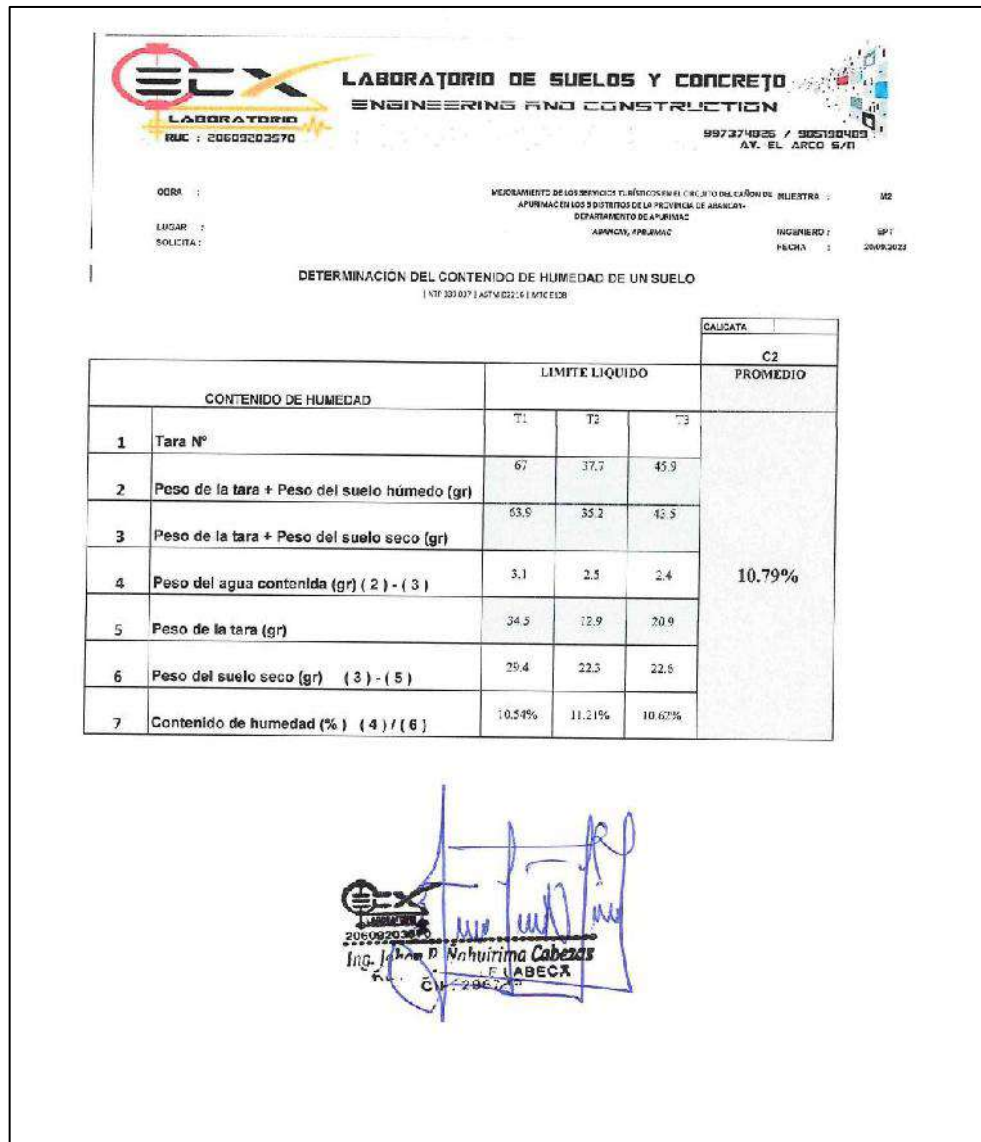


Figura 106 — Contenido de humedad del suelo prueba 1

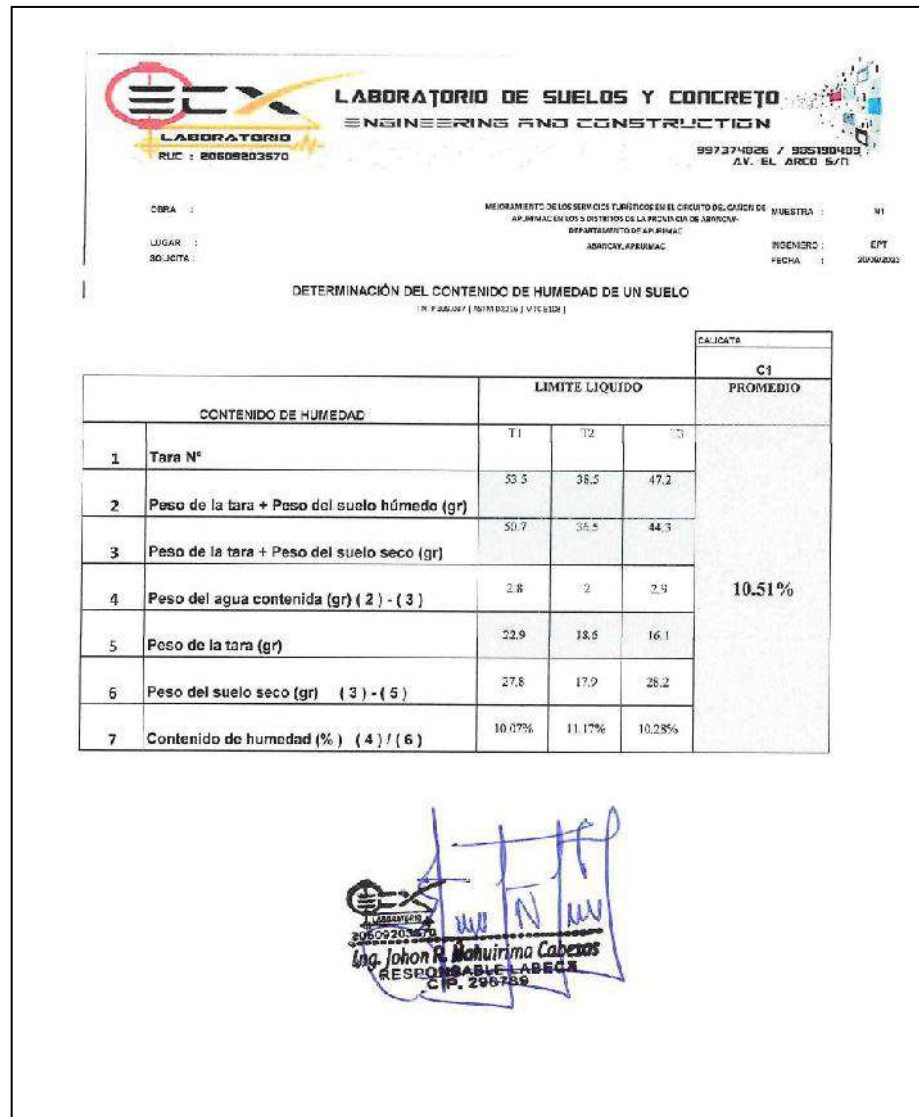


Figura 107 — Contenido de humedad del suelo prueba 2

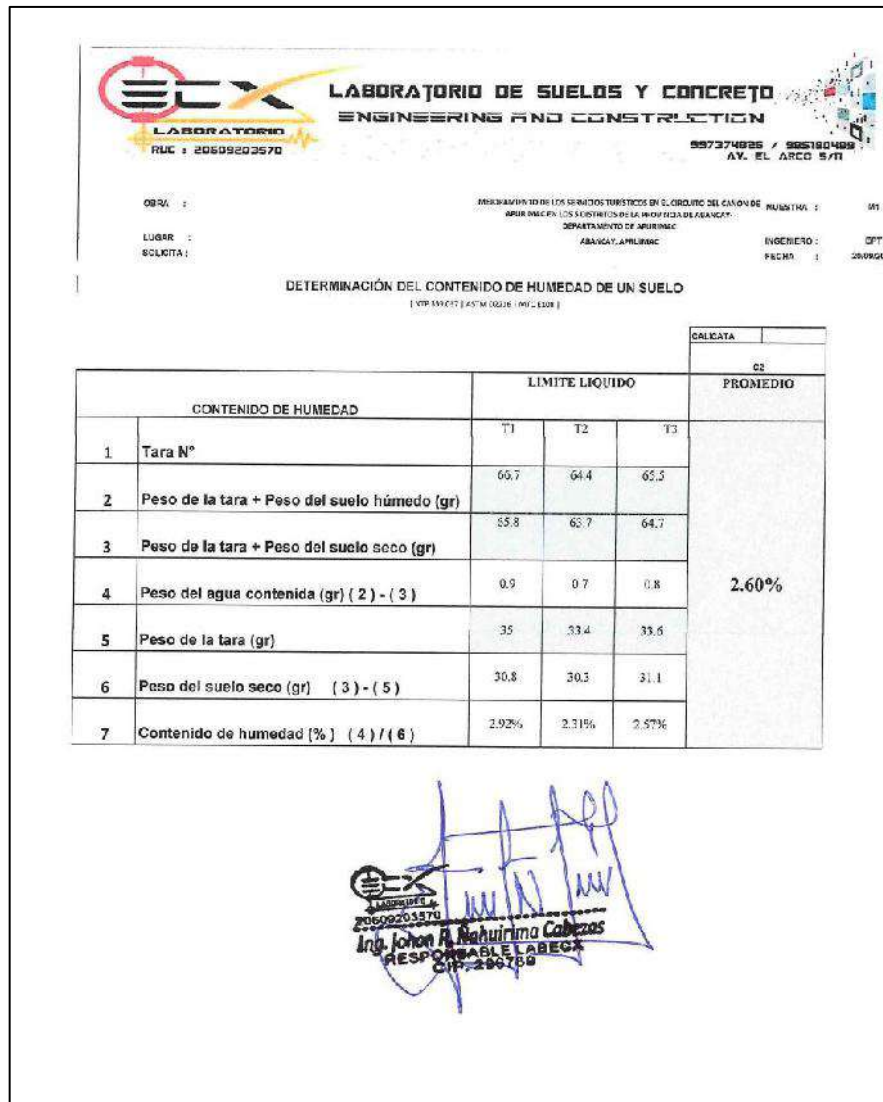


Figura 108 — Contenido de humedad del suelo prueba 3

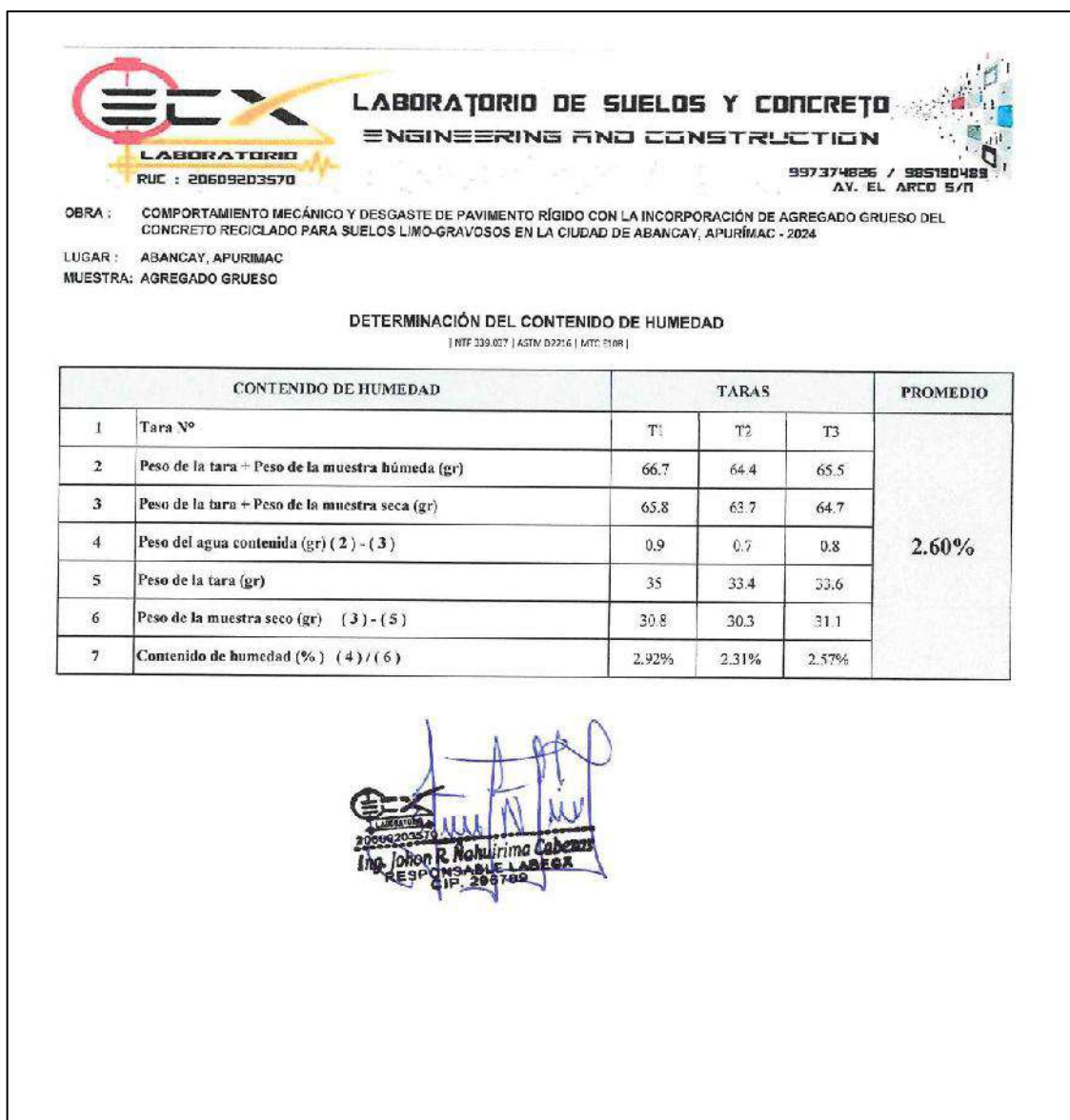


Figura 109 — Contenido de humedad del suelo prueba 4

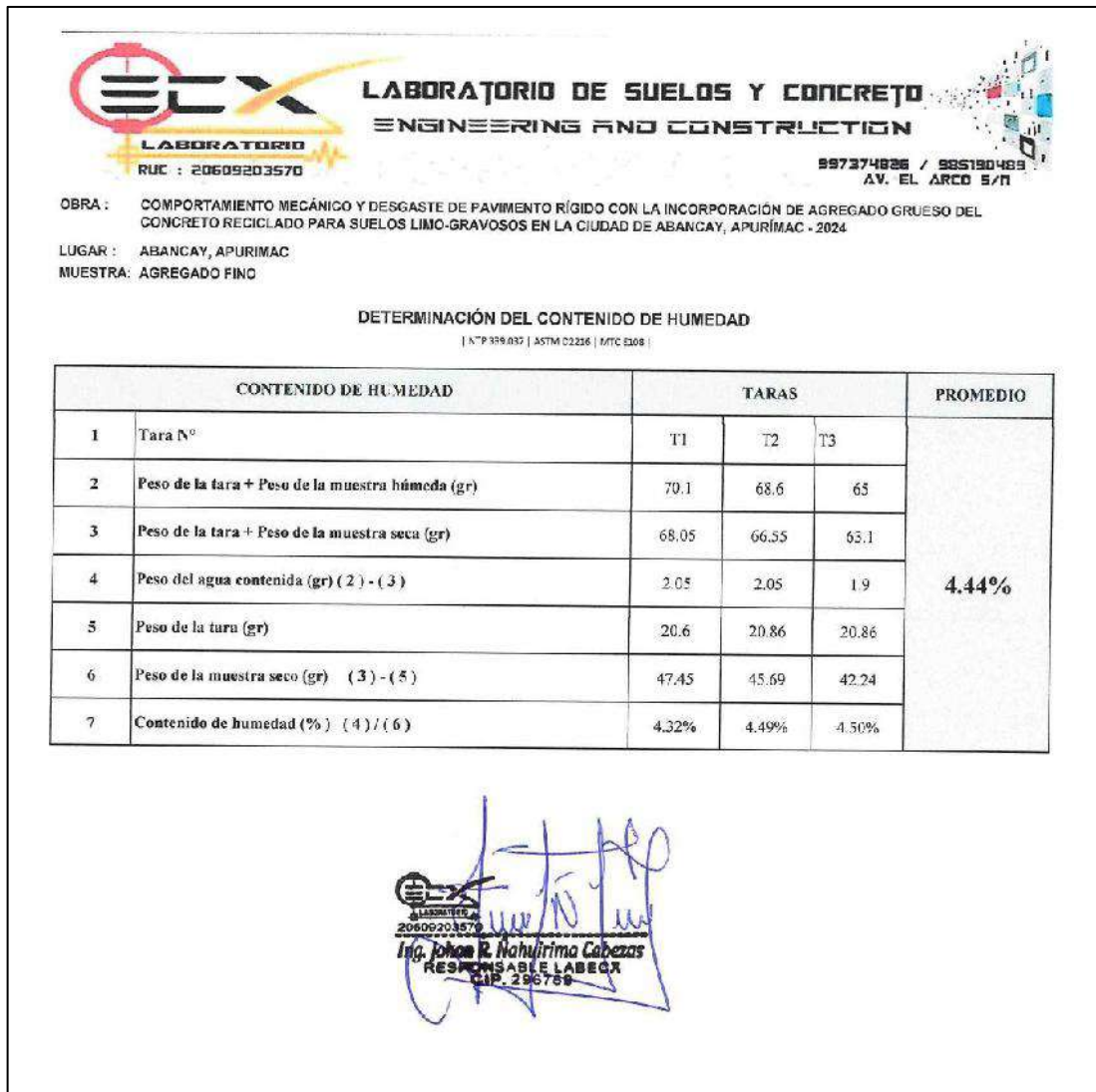


Figura 110 — Contenido de humedad del suelo prueba 5



ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO ASTM C 33, MTC E 204, NTP 400.012

PROYECTO Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac - 2024

DEPARTAMENTO APURÍMAC

PROVINCIA ABANCAY **DISTRITO** ABANCAY

TAMIZ	ABERTURA (mm)	Pesos Retenidos (gr)	% Posos Retenidos	% Retenidos Acumulados	% Q' PASA	RANGO		DESCRIPCION DE LA MUESTRA
1 1/2"	37.500	0	0.00	0.00	100.0	100	100	AG-01
1"	25.000	51	1.85	1.85	98.2	90	100	
3/4"	19.000	1279	46.34	48.19	51.8	40	85	
1/2"	12.500	1274	46.16	94.35	5.7	10	40	
3/8"	9.500	130	4.71	99.06	0.9	0	15	PESO TOTAL
N° 4	4.750	26	0.94	100.00	0.0	0	5	
N° 8	2.360	0	0.00	100.00	0.0	0	0	2760.00
N° 16	1.180	0	0.00	100.00	0.0	0	0	
N° 30	0.600	0	0.00	100.00	0.0	0	0	
N° 50	0.300	0	0.00	100.00	0.0	0	0	
N° 100	0.150	0	0.00	100.00	0.0	0	0	
< N° 200	0.075	0	0.00	100.00	0.0	0	0	
TOTAL		2760.00	5.65					
MF :		7.490942029		TAMAÑO MAXIMO :	1 1/2"			

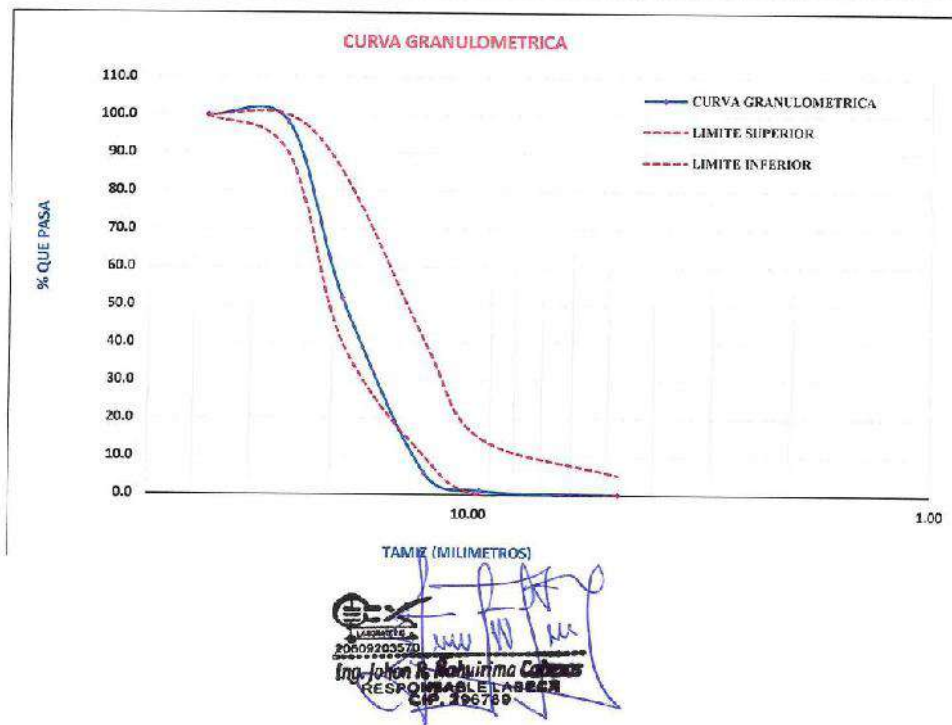


Figura 111 — Análisis granulométrico del agregado grueso de cantera



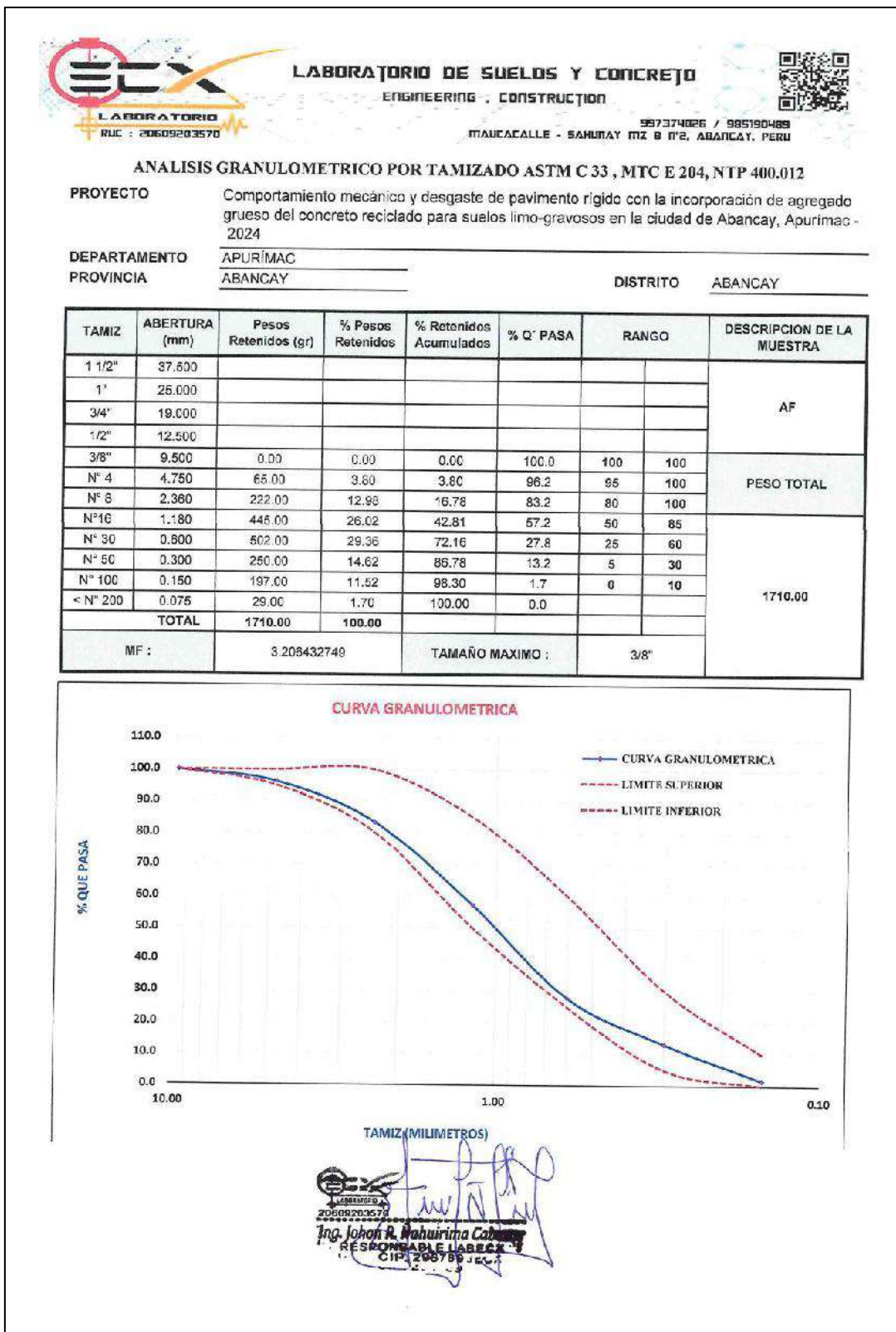


Figura 112 — Análisis granulométrico del agregado fino de cantera




Anexo D. Certificados de calibración

 <p>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LD-043-2024</p>		<p>Página 1 de 2</p>
<p>Arsou Group Laboratorio de Metrología</p>		
Fecha de emisión	2024/11/29	<p>Este certificado de calibración documenta trazabilidad a traabilidad nacionales o internacionales establecidos por la medidas de acuerdo con la sistema internacional de Unidades SI.</p>
Solicitante	ECX - INGENIEROS E.R.L.	
Dirección	JR. LOS LIRIOS NBO, SN URB. PATIBAMBA BAJA APURIMAC – ABANCAY – ABANGAY	
<p>Instrumento de medición ESCLEROMETRO</p>		<p>Los resultados son validos al momento de la calibración se tienen en reglación plicaciones, si los los archeosso, Kermoo-pate la luste con lo estabelixarmitte de estados regulamntes que nno sebro las caracteristicos de las estadós de esta regulctacion vigen-te.</p> <p>ARSOU GROUP S.A.C. no se responsable por agente de exilrmo agente axieme a allonacion presentaca avisar a proveo porvio por escrito a és ARSOU GROUP.</p> <p>Este certificado podrá ser eficiente en esento b de a la información adicionacia y a biguete previo por to al presente ARSOU GROUP</p>
Identificación	NO INDICA	
Marca	NO INDICA	
Modelo	NO INDICA	
Serie	1271	
Tipo	N	
Lectura	ANALOGO	
Procedencia	CHINA	
Lugar de calibración	LABORATORIO DE CONCRETO LABORATORIO DE ARSOU GROUP S. A.	
Fecha de calibración	2024/11/29	
<p>Método/Procedimiento de calibración</p> <p>El Verificación del equipo de egulipo relacionado por rouete de extud-tual el esperanubidad supitene se de manera qué eveno el enbóro esta perpendicular a sítroificanse excurióstora (tunapl y desputo, Impacia sebro resultado, 11 a 72 (Sela verificación se distingua, modil que el valor que indica es menor).</p>		
		

Figura 113 — Certificado de calibración del equipo de esclerometría pág. 1





Arsou Group
Laboratorio de Metrología

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LD-043-2024

Página 2 de 2

Patrones e Instrumentos auxiliares

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	YUNQUE	MAT-JUN-0513-2021


Condiciones ambientales durante la calibración

Temperatura Ambiental	Inicial: 17 °C	Final: 17 °C
Humedad Relativa	Inicial: 68 %hr	Final: 71 %hr

Resultados

LECTURA	HRC
1	71
2	74
3	73
4	70
5	73
6	71
7	72
8	72
9	70
10	68

Promedio:	71.4
	OK
Factor reajuste	1.13



Observaciones

1. Antes de la calibración no se realizó ningún tipo de ajuste.
2. (*) Código indicado en una etiqueta adherida al instrumento.
3. Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO"

Fin de documento





Figura 114 — Certificado de calibración del equipo de esclerometría pág. 2



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-728-2024


Página 1 de 3

Arsou Group
Laboratorio de Metrología

<p>Fecha de emisión: 2024/11/29</p> <p>Solicitante: ECZ. – INGENIEROS E.R.L</p> <p>Dirección: JR. LOS LIROS NRO. 50 URB. PATIMBAMBA BAJA APURIMAC – ABANCAY – ABANCAY</p> <p>Instrumento de medición: BALANZA</p> <p>Identificación: NO INDICA</p> <p>Intervalo de dedicación: 30000 g</p> <p>División de escala: 1 g</p> <p>Resolución:</p> <p>División de verificación e: 1 g</p> <p>Tipo de tipo: Digital</p> <p>Marca / Fabricante: OHAUS</p> <p>Modelo: R21P90</p> <p>N° serie: 33310106828</p> <p>Ubicación: ESTADOS UNIDOS</p> <p>Lugar de calibración: LABORATORIO DE ARSOU GROUP S.A.C.</p> <p>Fecha de calibración: 2024/11/29</p>	<p>Este certificado de calibración documenta la trazabilidad de la medición a las unidades de medida internacionales, establecidos para relación la medida acuerdo con la sistema internacional de Unidades SI, internacionalment</p> <p>Los resultados son válidos, al momento de la calibración se tienen en relación publicaciones son a los que obedezca. Recompense la ajuste con lo establecimiento de estados regu. anemans que comma. os características de estados de reg- a regione</p> <p>ARSOU GROUP S.A.C no se responsable por el agente e situa agente adjunto e a quiste e digercación presente previo por escifuro de ARSOU GROUP</p> <p>Este certificado podrá ser efigente en axerto e o información adicionala presente previo por e la órsente ARSOU GROUP</p>
--	---

Método/Procedimiento de calibración

"Procedimiento para la Calibración de Balanzas de Funcionamiento por Edición Closs y la Norma CO115 del SNM NDECOPI Serie Edición Enero 2009 y la Norma Metrológica "Instrumentos de Pésaje de Funcionamiento No Automatico (NMP.003-2009)"



ARSOU GROUP S.A.C





Figura 115 — Certificado de calibración de la balanza pág. 1





CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-728-2024

Página 2 de 3

Arsou Group
Laboratorio de Metrología

Patrones e Instrumentos auxiliares

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
PESATEC PERÚ S.A.C.	Juego de Pesas de 1mg a 1kg	1226-MPES-C-2022
PESATEC PERÚ S.A.C.	Juego de Pesas de 1g a 1kg	1227-MPES-C-2022
PESATEC PERÚ S.A.C.	Pesa Patrón de 5kg	1228-MPES-C-2022
PESATEC PERÚ S.A.C.	Pesa Patrón de 10 kg	1229-MPES-C-2022
PESATEC PERÚ S.A.C.	Pesa Patrón de 20kg	1230-MPES-C-2022

Condiciones ambientales durante la calibración


Temperatura Ambiental	Inicial: 17 °C	Final: 17 °C
Humedad Relativa	Inicial: 71 %hr	Final: 71 %hr

Resultados:

ENSAYO DE REPETIBILIDAD


Medición N°	Carga L1= 15000 g			Carga L1= 30000 g		
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)
1	14997	0.07	-0.12	3000	0.05	-0.1
2	14998	0.07	-0.15	29999	0.04	-0.12
3	14997	0.04	-0.12	30000	0.05	-0.13
4	14998	0.02	-0.11	30000	0.04	-0.1
5	14998	0.06	-0.11	30000	0.03	-0.11
6	14997	0.07	-0.11	29999	0.05	-0.11
7	14998	0.06	-0.11	30000	0.04	-0.11
8	14999	0.06	-0.12	29999	0.05	-0.1
9	14999	0.09	-0.12	29999	0.04	-0.11
10	15001	0.08	-0.1	30000	0.05	-0.11

Carga (g)	Diferencia Máxima Encontrada (g)	Error Máximo Permitido (g)
15001	0	1
30000	0	5



Arsou Group S.A.C.
Ingeniero Luis Arevalo Carnicero
METROLOGÍA

Figura 116 — Certificado de calibración de la balanza pág. 2



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LMA-728-2024

Página 3 de 3

Arso Group
Laboratorio de Metrología

ENSAYO DE EXCENTRICIDAD

Posición de la Carga	Determinación de E ₀				Determinación de E ₀				
	Carga Min ^[2] (g)	I (kg)	ΔL (g)	E ₀ (g)	Carga L (g)	I (kg)	ΔL (g)	E (g)	E _c (g)
1	1	1	0.04	-0.06	500	500	0.07	-0.02	0.07
2		1	0.05	-0.01		500	0.07	-0.02	0
3		1	0.03	0		500	0.05	-0.01	-0.03
4		1	0.02	0.01		500	0.07	0.04	0.05
5		1	0.07	-0.02		499	0.07	0.19	0.21

^[2] Valor entre 0 y 10 e

ENSAYO DE PESAJE

Carga L (g)	Crecientes				Decrecientes				EMP ^[2] (±g)
	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E _c (g)	I (g)	ΔL (g)	E (g)	E _c (g)	
1	1	1	-0.02						1
5	10	10	0.01	0.01	10	0.04	0.01	0.03	1
10	50	50	-0.01	0.01	50	0.04	-0.03	-0.05	1
50	100	100	0.00	0	100	0.02	-0.07	-0.05	1
100	200	200	0.00	0	200	0.06	-0.04	0.01	1
500	500	500	0.01	0.01	500	0.06	-0.01	0.00	1
1000	1000	1000	-0.02	0.02	1000	0.05	0.00	0.02	1
5000	5000	4999	-0.05	0.03	4999	0.06	-0.18	-0.02	1
10000	10000	9999	0.01	0.01	4999	0.15	0.21	0.11	5
15000	15000	14998	0.09	0.03	14999	0.05	-0.12	-0.01	5
30000	30000	30000	0.15	0.18	30000	0.05	-0.18	-0.15	5

Incertidumbre de la medición: 1 g

Leyenda
 I: Indicación de la balanza ΔL: Carga Incrementada E: Error encontrado
 E₀: Error en cero E_c: Error corregido EMP: Error máximo permitido

INCERTIDUMBRE EXPANDIDA Y LECTURA CORREGIDA

Incertidumbre expandida de medición: $U_{95} = 2 \cdot \sqrt{0.43325 \text{ g}^2 + 0.000000010841 \text{ R}^2}$


Lectura Corregida: $R_{\text{Corregida}} = R + 0.938558532 \text{ R}$

R: Indicación de lectura de balanza: (g)

Observaciones

1. Antes de la calibración no se realizó ningún tipo de ajuste.
2. Los EMP para esta balanza, corresponden para balanzas en uso de funcionamiento no automático de clase de exactitud II según la Norma Metroológica Peruana NMP 003:2009
3. La incertidumbre de la medición ha sido calculada para un nivel de confianza de aproximadamente del 95 % con un factor de cobertura k=2.
4. (*) Código indicado en una etiqueta adherida al instrumento.
5. Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO"

ARSOU GROUP S.A.C.
 Av. V. Los Platos de San Diego Mz.C Lote 01, San Martín de Porres, Lima, Perú.
 Telef: +51 705-3680 / Cel: +51 928 336 793 / Cel: +51 925 351 437

ARSOU GROUP S.A.C.

 Ingo Luis Arevalo Castro
 Metrología




Figura 117 — Certificado de calibración de la balanza pág. 3





CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LBS-467-2024

Página 1 de 2

Arsou.Group
 Laboratorio de Metrología


Fecha de emisión	2024/11/29	<p>Este certificado de calibración documenta trazabilidad a trazabilidad nacionales o internacionales. establecidos unidades medida le acuerdo con la Sistema internacional de Unidades SI. internacional.</p> <p>Los resultados vero validados al momento de la calibración se tienen en relación pluçad-siones que un los os ablecibucto el. complic como undrieza los establecimiento de estados regulamentesos que com. sobre los caractertdicas de estadós de asta regulacion v vigente</p> <p>Este certificado no-poró ser el egente en exrito o o ajuste a ajuste a dibienacion presentada avisorata provio del exciítar a ARSOU GR</p> <p>Esté certificado podrá ser el eligente en esento o a Informaciór adicionado presente previo por se tuerto de ARSOU GROUP</p>
Solicitante	ECX – INGENIEROS E L.R.L.	
Dirección	JR. LOS LIRROS NRO. SN URB. PATIBAMBA BAJA APIURIMAC - ABANCAV - ABANCAV	
Instrumento de medición	CONO Y PISÓN DE ABSORCIÓN	
Identificación	NO INDICA	
Marca	ARSOU	
Modelo	NO INDICA	
Serie	1502	
Estructura	ACERO	
Procedencia	PERÚ	
Ubicación	LABORATORIO DE SUELOS.	
Lugar de calibración	LABORATORIO DE ARSOU GROUP S.A.C.	
Fecha de calibración	2024/11/29	
Método/Procedimiento de calibración		
<p>La calibraación ob provento por comparación directa tounando referencia el procedimiento FC 012-Std, "Procedimiento de Alatióón de Piè de ,L. del CKM INDECOPI y la Norma del MTC 205. — considera.</p>		



ARSOU GROUP S.A.C.



Figura 118 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 1



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° LBS-467-2024

Página 2 de 2

Arsou Group
Laboratorio de Metrología

Patrones e Instrumentos auxiliares

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
DSI AUTOMATION EIRL	Pie de Rey digital de 300 mm a 0.01 mm	L-0048-2022
Patrones de referencia de INACAL	Balanza Ohaus de 30 kg x 1 g	144-LM-2021

Condiciones ambientales durante la calibración

Temperatura Ambiental	Inicial: 17 °C	Final: 17 °C
Humedad Relativa	Inicial: 71 %hr	Final: 70 %hr



Resultados

TABLA N° 01			
MOLDE CÓNICO			
	Dato Prom. (mm)	Tolerancia	Resultado
Espesor	1.52	> 0.8	OK
∅ Interior Base Menor	39.87	40 +/- 3	OK
∅ Interior Base Mayor	90.02	90 +/- 3	OK
Altura	75.12	75 +/- 3	OK

TABLA N° 01			
PISÓN			
	Dato Prom. (mm)	Tolerancia	Resultado
Peso (g.)	341	340 +/- 15	OK
Superfi. Circ. Plana (mm)	25.1	25 +/- 3	OK

Observaciones

1. Antes de la calibración no se realizó ningún tipo de ajuste.
2. (*) Código indicado en una etiqueta adherida al instrumento.
3. Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO"

ARSOU GROUP S.A.C.

[Signature]

Ing. María Félix Guerrero Caceres

Figura 119 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 2

		CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LFP 20-2024	Página 1 de 3
Arsou.Group Laboratorio de Metrología			
Fecha de emisión	2024/11/29	Este certificado de calibración documenta trazabilidad a trazabilidad a a standarós, estaahidos d establecidas establecidas en. Acuerdo con la sistem Internacional de Unidades SI. Los resultados obeteien el tolerancia de os o mimmos se tienen establecidos-por-lions con una corrieran por cumpui on cordidelizar el establecimiento de estapios regulamentos que comince sobre las caracteristicos de las estados de esta regulación vigente. Este certificado confirmará el ejigente en exento o ajuste de información presente. adenando al presente. fuerte de excitar á ARSOU GROUP S.A.C Este certificadó confirma á información de rertificación presente, adenando da la fuerza de ARSOU GROUP S.A.C.	
Solicitante	ECX – INGENIEROS E I.R.L.		
Dirección	JR LOS URCOS NRO. 5N URB, PATIBAMBA BAJA APURIMAC – ABANCAY – ABANCAY		
Instrumento de medición	PRESA HIDRÁULICA PARA CONCRETO		
Identificación	NO INDICA		
Marca	ARSOU		
Modelo	PH402		
Serie	PR01		
Capacidad	120.000 kg		
Indicador	HIGH WEIGHT		
Resolución	1 kg		
Seal	NO INDICA		
Bomba	ELECTRICA		
Procedencia	PERÚ		
Lugar de calibración	LABORATORIO de concreto LABORATORIO DE ARSOU GROUP S.A.C		
Fecha de calibración	2024/11/29		
Método/Procedimiento de calibración El procedimiento conforme a conforme común ISO 7500-1 "Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines". - Una aplicades series a Digital System tests the same prensa series, to considera.			

Figura 120 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 1



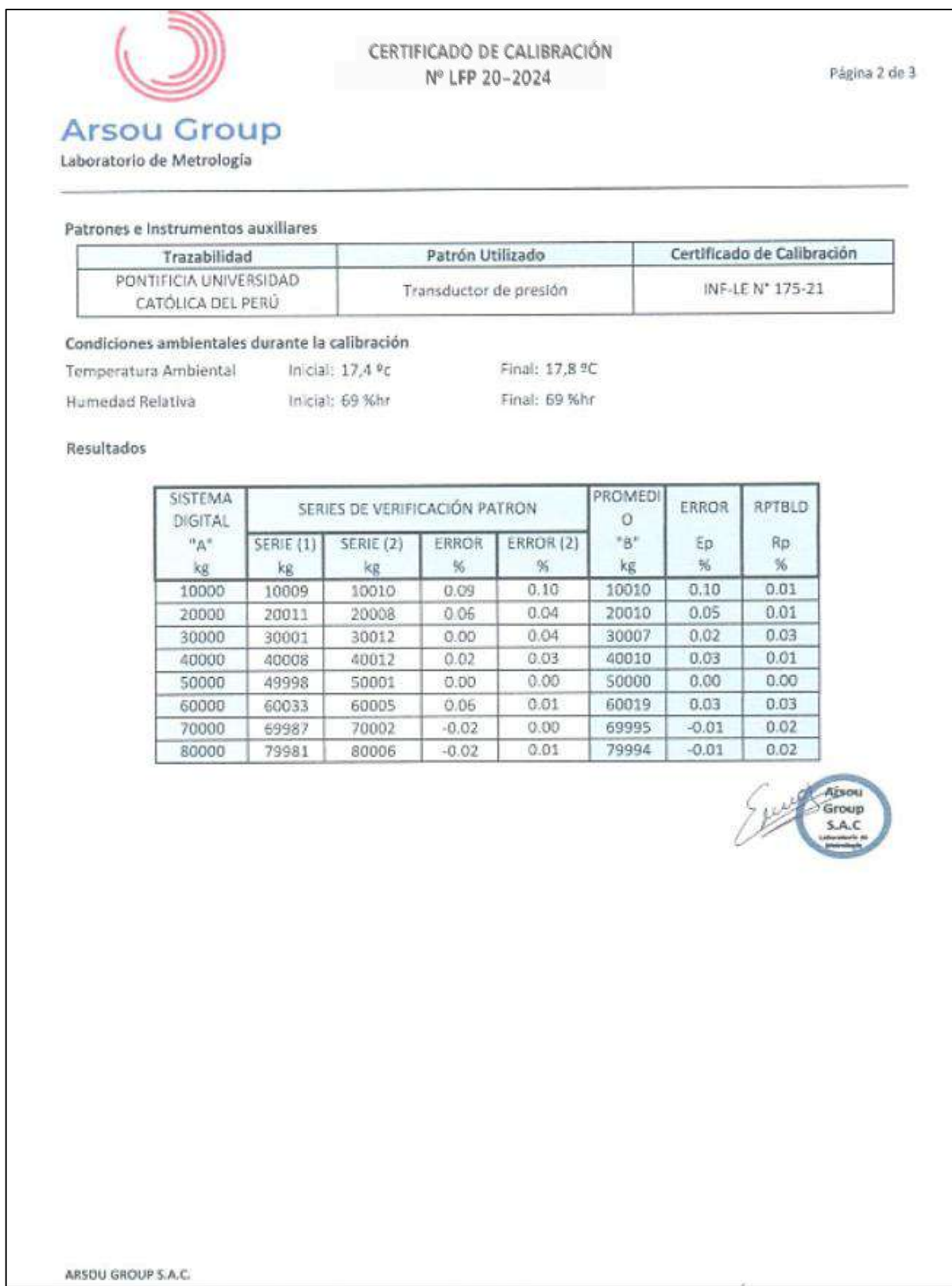


Figura 121 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 2

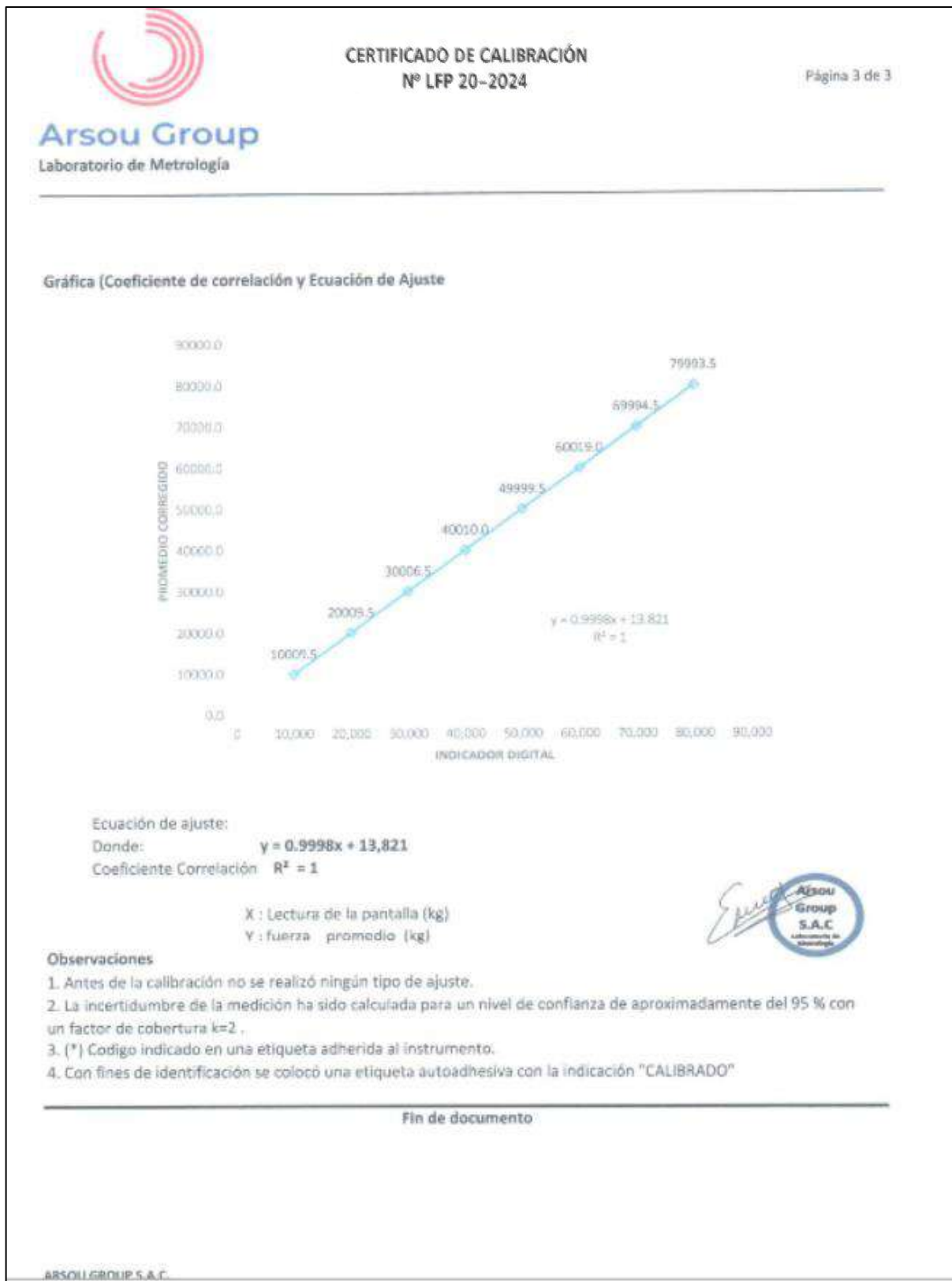


Figura 122 — Certificado de calibración de cono y pisón de absorción pág. 3

Anexo E. Estudio de trafico

Carretera		Sector Maucacalle - Sabuanay				Año de estudio		2024		Modificar datos:													
Tramo		Calle Maucacalle - Sabuanay				Tiempo de estudio a la ejecución de proyecto		1 Año		Cálculos automáticos:													
Cod Estación		E-1				TIPO DE PAVIMENTO		Pavimento rígido		Resultados:													
Estación		Maucacalle - Tamburco				Ubicación		Centro Poblado, Maucacalle		Resultados:													
Factor de corrección estacional		Veh. Livianos		fe:		1.0429																	
		Veh. Pesados		fe:		1.0749																	
Día		Automóvil	S. Wagon	Camionetas			Omnibus			Camion			Semitrailers			Trailers							
				Pick Up	Panel	Rural	Micro	2E	3E	4E	2E	3E	4E	2S1	2S2	2S3	3S1	3S2	≥3S3	2T2	2T3	3T2	≥3T3
Domingo 23/03/2024	URB. SAN JOSE-INGRESO	40	39	11	7	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	40	39	11	7	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	80	78	22	14	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lunes 17/03/2024	URB. SAN JOSE-INGRESO	58	57	21	10	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	58	57	21	10	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	116	114	42	20	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Martes 18/03/2024	URB. SAN JOSE-INGRESO	58	60	13	4	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	58	60	13	4	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	116	120	26	8	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Miercoles 19/03/2024	URB. SAN JOSE-INGRESO	63	63	11	4	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	63	63	11	4	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	126	126	22	8	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jueves 20/03/2024	URB. SAN JOSE-INGRESO	63	65	9	5	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	63	65	9	5	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	126	130	18	10	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Viernes 21/03/2024	URB. SAN JOSE-INGRESO	55	53	8	6	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	55	53	8	6	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	110	106	16	12	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sábado 22/03/2024	URB. SAN JOSE-INGRESO	46	52	31	9	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	46	52	31	9	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	92	104	62	18	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMDs	URB. SAN JOSE-INGRESO	55	56	15	6	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	55	56	15	6	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	109	111	30	13	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMDa	URB. SAN JOSE-INGRESO	57	58	15	7	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	URB. SAN JOSE-SALIDA	57	58	15	7	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	114	116	31	13	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMDa	2024	Total Vehículos (IMDa)		114	116	31	13	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		288																					
Tasa anual de crecimiento Vehículos livianos		r:		0.59 %																			
Tasa anual de crecimiento Vehículos pesados		r:		6.65 %																			
Tiempo que pasa del estudio de proyecto hasta la ejecución (años)		n:		1																			
Población futura de vehículos																							
IMDa	2025	Total	114	116	31	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		288																					

$$Tn = T0(1 + r)^{n-1}$$

T_n = Tránsito proyectado al año "n" en veh/día
 T₀ = Tránsito actual (año base) en veh/día
 n = año futuro de proyección
 r = tasa anual de crecimiento de tránsito

Figura 123 — Estudio de tráfico vial

VOLUMEN DE TRÁFICO PROMEDIO DIARIO

Tramo CALLE MAUCACALLE SAHUANAY
Cod Estación E-1
Estación Maucacalle - Tamburco

Ubicacion Centro Poblado. Maucacalle
Sentido Ambos sentidos
Dia del 17 al 23 de Marzo del 2024

DIA	AUTO	STATION WAGON				MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAYER				TRAYLERS				TOTAL	PORC. %		
		PICK UP	PANEL	RURAL (Cambi)	2E		>=3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	>=3T3					
LUNES	116	114	42	20	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	306	15.85	
MARTES	116	120	26	8	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	282	14.61	
MIERCOLES	126	126	22	8	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	296	15.34	
JUEVES	126	130	18	10	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	296	15.34	
VIERNES	110	106	16	12	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258	13.37	
SABADO	92	104	62	18	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	292	15.13	
DOMINGO	80	78	22	14	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	10.36	
TOTAL SEMANAL	766	778	208	90	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1930	100.00	
IMDs	110	112	30	13	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	278	
%	39.57	40.29	10.79	4.68	0.00	0.00	0.00	0.00	4.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00		

VEHICULOS LIGEROS

VEHICULOS PESADOS

TRAFICO VEHICULAR
IMDs Sin Corrección
(Veh/dia)

Tipo de Vehiculos	IMD	Distrib. %
Autos	110	39.6%
Station Wagon	112	40.3%
Camioneta Pick Up	30	10.8%
Camioneta Panel	13	4.7%
Camioneta Rural	0	0.0%
Micro	0	0.0%
Omnibus 2E y 3E	0	0.0%
Camión 2E	13	4.7%
Camión 3E	0	0.0%
Camión 4E	0	0.0%
Semi trayler	0	0.0%
Trayler	0	0.0%
TOTAL IMD	278	100.0%

CALCULO DEL IMD Resumen de Metodologia	
$IMD = \frac{VS}{7}$	
VS = Volumen Promedio Semanal	
FC Veh. Ligeros =	1.042934
FC Veh. Pesados =	1.074874
IMD =	290 Vehiculos por día
	105,827 Veh. x año

TRAFICO VEHICULAR
IMD ANUAL Y CLASIFICACION VEHICULAR
(Veh/dia)

Tipo de Vehiculos	IMDa	Distrib. %
Autos	115	39.6%
Station Wagon	117	40.3%
Camioneta Pick Up	31	10.8%
Camioneta Panel	14	4.7%
Camioneta Rural	0	0.0%
Micro	0	0.0%
Omnibus 2E y 3E	0	0.0%
Camión 2E	14	4.7%
Camión 3E	0	0.0%
Camión 4E	0	0.0%
Semi trayler	0	0.0%
Trayler	0	0.0%
TOTAL IMD	290	100.0%

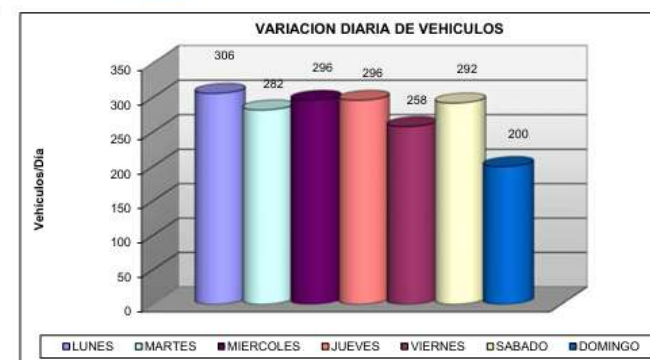
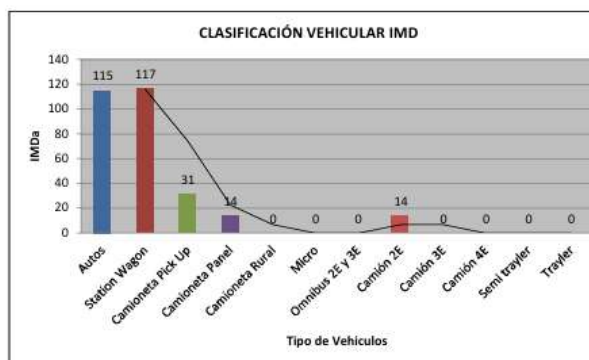
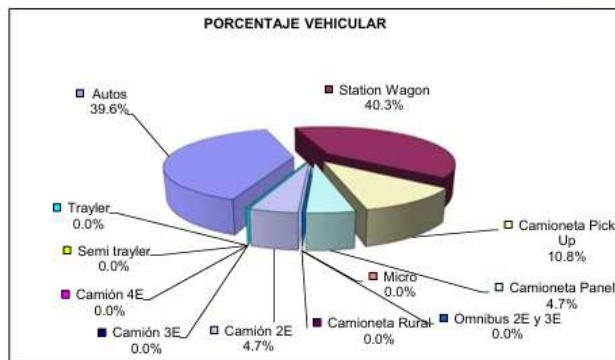


Figura 124 — Resumen del volumen de tráfico diario

ANEXO F. Declaratoria de originalidad del autor

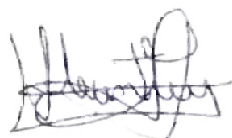
DECLARACIÓN JURADA

Yo, Leydy Yanira Huamani Contreras, identificado con DNI N° 72793400 bachiller de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, con código de estudiante N° 151301, con domicilio en Prolongación Uruguay N° 111, distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac.

Declaro bajo juramento:

- La originalidad fiel de la presente investigación de tesis titulada “Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac – 2024”, la cual no cuenta con robo o plagio de otros autores peruanos e internacionales.
- La fidelidad de la recolección y procesamiento de datos en los resultados de la investigación.
- Uso de software con licencia y libres para los cálculos de la investigación.
- La realización de ensayos de laboratorio confiables de acuerdo con las normas establecidas, sin alterar o manipular maliciosamente la obtención de resultados.

Abancay, 30 de diciembre de 2024



Leydy Yanira Huamani Contreras

DNI N° 72793400



DECLARACIÓN JURADA

Yo, Fermin Flores Ccorisapra, identificado con DNI N° 43837151 bachiller de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, con código de estudiante N° 162290, con domicilio en Av. Juan Pablo II s/n, distrito de Tamburco, provincia de Abancay, departamento de Apurímac.

Declaro bajo juramento:

- La originalidad fiel de la presente investigación de tesis titulada “Comportamiento mecánico y desgaste de pavimento rígido con la incorporación de agregado grueso del concreto reciclado para suelos limo-gravosos en la ciudad de Abancay, Apurímac – 2024”, la cual no cuenta con robo o plagio de otros autores peruanos e internacionales.
- La fidelidad de la recolección y procesamiento de datos en los resultados de la investigación.
- Uso de software con licencia y libres para los cálculos de la investigación.
- La realización de ensayos de laboratorio confiables de acuerdo con las normas establecidas, sin alterar o manipular maliciosamente la obtención de resultados.

Abancay, 30 de diciembre de 2024



Fermin Flores Ccorisapra

DNI N° 43837151

