

INTRODUCCION

La confiabilidad del medidor de densidad in situ, se refiere al grado en que el equipo produce resultados consistentes y coherentes, para ello, se analizará el comportamiento del densímetro PQI 380, descomponiendo y comprendiendo cada elemento que pueda afectar a esta variable.

Algunos investigadores han reconocido una correlación excelente entre las densidades de testigos y las mediciones con el densímetro PQI 380, sin embargo, hay estudios que solo lo recomiendan para su uso como control de calidad y no como aseguramiento de la calidad. Alex K. Apeagyei señala que son ya numerosos los estados en EE.UU. que utilizan conjuntamente los equipos de densidad in situ y la determinación de densidad en testigos como criterios de aceptación del grado de compactación.

En el 2002, Romero indicó que los equipos basados en impedancia magnética eran sensibles a la temperatura en la que se encuentra el pavimento asfáltico al momento de tomar la lectura del densímetro.

Lo que el autor propone hacer en el presente proyecto es analizar el uso del equipo medidor de densidad in situ, densímetro PQI 380 aplicado a pavimentos flexibles; de tal manera, se pueda obtener resultados confiables y coherentes haciendo una comparación entre los tres métodos utilizados, manipulando el equipo como establece la norma ASTM D7830/7830M-14, sin tener que acudir a pruebas de laboratorio que demandan más tiempo y el deterioro del pavimento.

El presente trabajo tiene la finalidad de dar mayor confiabilidad al uso del densímetro PQI 380, en los diferentes puntos de aplicación del pavimento asfáltico en estudio, los resultados fiables y consistentes de densidad in situ demanda menor tiempo que el obtenido en laboratorio, esto ayudara a optimizar los tiempos en obra, siendo un referente de indicador de calidad de pavimento para futuros estudios de evaluación o desarrollo de carreteras en el departamento de Tarija.

1.1. MARCO TEÓRICO

- Marco conceptual.

El análisis de confiabilidad de densímetro PQI 380, es el análisis de la probabilidad de que el equipo medidor de densidad realice su función de una manera satisfactoria bajo condiciones operativas especificadas durante un periodo predeterminado de tiempo en un entorno natural.

La densidad in situ es un ensayo que se realiza en el mismo lugar donde se encuentra el objeto de análisis para determinar sus características, la densidad es el peso por metro cubico del pavimento asfaltico en el campo.

El grado de compactación se refiere a cuando las partículas son bien adheridas entre si y contienen el menor número de vacíos en la mezcla del pavimento asfáltico.

La temperatura es considerada uno de los agentes ambientales que influyen de manera directa en el comportamiento de los pavimentos, modificando su rigidez, debido a las características termoplásticas del material que constituye las capas asfálticas de los pavimentos flexibles. A medida que aumenta la temperatura, las capas del pavimento asfáltico se vuelven menos rígidas y cuando disminuye se incrementa la rigidez de estas capas. Este efecto se aprecia en mayor grado en las capas de rodadura, generando estados tensionales de origen térmico que se superponen a los generados por la acción del tráfico, lo que trae consigo un efecto en la durabilidad de la estructura.

- Marco referencial.

El equipo, densímetro PQI 380 es un dispositivo para la determinación de densidad in situ en pavimentos asfálticos sin extracción de testigos. Las experiencias con este equipo en mezclas bituminosas en caliente, recogidas en diferentes fuentes bibliográficas, muestran que las densidades medidas in situ con el PQI son muy similares a las obtenidas mediante la extracción de testigos.

En un artículo se expone la primera etapa de un proyecto de investigación que tiene por objeto analizar los resultados de mediciones efectuadas con el densímetro PQI en mezclas bituminosas donde se utiliza emulsión asfáltica como ligante. Se comprueba la variabilidad de la densidad obtenida con el equipo para este tipo de mezclas, y se comparan los resultados con otros métodos de medida de densidad in situ.

El Indicador de Calidad de Pavimento (PQI) es un procedimiento de medición “no nuclear” de la densidad in situ. El equipo utiliza ondas eléctricas para medir la constante dieléctrica del material. La densidad de la mezcla asfáltica es directamente proporcional a la medida de esta constante, y los dispositivos electrónicos del equipo convierten las señales de campo en interpretaciones de la densidad. El procesador de datos calcula esta densidad corregida por la humedad que pueda estar presente en el pavimento.

De la bibliografía estudiada sobre el empleo del equipo PQI en la determinación de densidades in situ en mezclas bituminosas en caliente destacan los siguientes trabajos:

Bryan C. Smith, se determinan medidas de densidad por métodos nucleares y no nucleares, a partir de la información recogida de ocho proyectos de pavimentación ejecutados en el Estado de Virginia. Se llegó a la conclusión, que aplicando una corrección a los datos del PQI basada en un índice de humedad, determinado a partir de los valores obtenidos en este estudio y para las condiciones específicas del mismo, las medidas obtenidas con este equipo correlacionaban mejor con las mediciones de densidad de testigos que las medidas obtenidas con el nuclear.

Alex K. Apeageyi, señala que son ya numerosos los estados en EE UU que utilizan conjuntamente los equipos no nucleares in situ y la determinación de densidad en testigos como criterios de aceptación del grado de compactación.

- Análisis y tendencias.

Cuando se toma mediciones de densidad in situ con el densímetro PQI 380 se quiere contar con resultados fiables y consistentes, con el presente trabajo vamos a establecer si los resultados obtenidos con el equipo densímetro PQI 380 son de confiabilidad según criterios establecidos, si los resultados obtenidos son de gran correlación de la densidad leída in situ con la extraída de laboratorio, se podrá usar el densímetro para las futuras investigaciones de pavimentos asfálticos de otros tramos viales, proporcionando un ahorro significativo de tiempo en el proceso de la construcción de carreteras.

Así también se identificarán las condiciones en las que se encuentran las diferentes vías de una carretera, respecto a la densidad y al grado de compactación.

- Posición del investigador.

Según lo estudiado hasta el momento cabe destacar que obteniendo resultados confiables y de precisión de las lecturas de densidad in situ del densímetro PQI 380, previamente calibrado se podrá optimizar el tiempo de construcción de las nuevas carreteras. Se podrá construir un cuadro referencial de las densidades obtenidas en campo con las densidades obtenidas en laboratorio.

El objeto de estudio se refiere a la confiabilidad, del medidor de densidad in situ densímetro PQI 380 en pavimentos asfálticos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Se llegó a esta línea de trabajo debido a que se cuenta con el equipo y la capacitación suficiente para el manejo del densímetro PQI 380, y por la sentida necesidad de conocer la densidad de los pavimentos asfálticos en el lugar de la obra sin que éste implique demora en el tiempo en el proceso de la determinación de la densidad y el deterioro de la carpeta asfáltica.

Cuando se estudia la confiabilidad del equipo densímetro PQI 380, se debe hacer un análisis de los resultados obtenidos in situ, previamente bien calibrado el equipo, para obtener resultados de temperatura, densidad in situ y grado de compactación según cada punto de aplicación de la carretera en estudio.

Para dar validación a las lecturas de densidad in situ de la carpeta de rodadura asfáltica se procederá a realizar la extracción de testigos de la carretera en estudio.

Se implementa una prueba experimental en cuanto a la forma de determinar los ensayos (lectura tipo trébol), con estas pruebas se pretende dar mayor confiabilidad al equipo de medición densímetro PQI 380 aplicado a pavimentos asfálticos, de tal manera se pueda dar una mayor seguridad en cuanto al uso del equipo en la evaluación y desarrollo de las carreteras pretendiendo alcanzar beneficios tanto técnicos como económicos por la reducción de tiempo en los procesos constructivos.

- **Justificación de Factibilidad: Recursos, insumos y medios utilizados**

El densímetro PQI 380 tiene como componente principal la placa de verificación, que corresponde únicamente al equipo en cuestión, el densímetro PQI 380 se encuentra en laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

El lugar donde se va a realizar la práctica es de acceso libre, puesto que es una carretera nacional, al momento de utilizar el densímetro para poder contar con una lectura coherente se debe tratar de percibir la menor cantidad de vibraciones.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

SITUACION PROBLÉMICA

- Conceptualización puntual del objeto de estudio.

El objeto de estudio se refiere a la confiabilidad del densímetro PQI 380 en relación a las mediciones de densidad in situ que nos brinda el equipo en pavimentos asfálticos, cuando se habla de la confiabilidad del equipo, se habla de predecir cuándo ocurrirá la falla o no del densímetro. Para ellos se aprovechan los datos obtenidos con el equipo y con ensayos similares.

- Descripción del fenómeno ocurrido.

Al realizar un estudio de los pavimentos asfálticos se puede determinar la densidad in situ con ayuda del densímetro PQI 380, obteniendo resultados en un menor tiempo y sin ocasionar deterioro de la carpeta asfáltica.

Al analizar la confiabilidad del medidor de densidad in situ, se aprovechará los datos obtenidos con el densímetro PQI 380 y los obtenidos en laboratorio, para poder predecir cuándo ocurrirá la posible falla del densímetro.

- Breve explicación de la perspectiva de solución.

Se utiliza la perspectiva de hacer un análisis, es decir que vamos a analizar el comportamiento del densímetro PQI 380 con relación a la determinación de la densidad in situ, el densímetro PQI 380, indicador de calidad de pavimento nos permitirá obtener medidas fiables y consistentes de la densidad en campo sin tener que acudir a pruebas de laboratorio que implique mayor tiempo y el deterioro del pavimento asfáltico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Problema de investigación.

¿De qué manera, el análisis sobre el uso del medidor de densidad in situ, densímetro PQI 380, puede establecer si los resultados obtenidos son de confiabilidad y coherentes manipulando el equipo como establece la norma?

- Breve descripción sobre: Delimitación de tiempo, factibilidad y espacio.

El tiempo que nos tomara el presente proyecto será de doce semanas, se cuenta con el equipo, densímetro PQI 380, en el laboratorio de asfaltos y con el técnico autorizado responsable del manejo del densímetro para obtener lecturas de densidades in situ del pavimento asfáltico.

Para realizar el análisis de confiabilidad del densímetro PQI 380 se tomará como tramo de aplicación la carretera departamental Yesera - Santa Ana.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Analizar el uso del densímetro PQI 380 aplicado a pavimentos flexibles mediante la comparación con los métodos de extracción de briquetas y cono de arena; de tal manera, se pueda establecer si los resultados son análogos, manipulando el equipo como lo establece la norma ASTM D7830/7830M-14, sin tener que acudir a pruebas de laboratorio que demanda mayor tiempo y el deterioro del pavimento.

1.4.2. Objetivos específicos

- Obtener medidas de densidad in situ con el equipo PQI380 en pavimentos flexibles, y compararlas con testigos extraídos sometidos a pruebas de laboratorio.
- Obtener medidas de densidad in situ con el equipo PQI380 en pavimentos flexibles, y compararlas con pruebas de densidad in situ mediante el cono de arena.

- Identificar las condiciones respecto a la densidad y grado de compactación en las que se encuentran la carretera.
- Analizar y construir un cuadro referencial de las densidades obtenidas in situ con el densímetro PQI380 y el cono de arena, con las densidades obtenidas en laboratorio con la extracción de briquetas.

1.5. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis

Si analizamos el uso del densímetro PQI 380 en pavimentos asfálticos, una vez calibrado el equipo, a partir de mediciones de densidad in situ y grado de compactación, a diferentes puntos de aplicación dentro de la carretera en estudio, obtendremos resultados confiables y consistentes que puedan ser verificados en laboratorio, manipulando el equipo como lo indica la norma establecida.

1.5.2. Identificación de variables

Variable independiente

X_1 = Punto de aplicación.

Variables dependientes

Y_1 = Densidad in situ.

Y_2 = Grado de compactación.

Y_3 = Densidad en laboratorio.

1.6. ALCANCE

El alcance de este trabajo de investigación está orientado a la carpeta asfáltica de los pavimentos flexibles.

La carretera en estudio tiene una ubicación entre los kilómetros 20 y 10 del tramo Santa Ana – Yesera con las siguientes coordenadas UTM:

- Kilómetro 20 → $Y = 7636879.46$ N.
 $X = 339321.79$ E.
- Kilómetro 10 → $Y = 7627929.04$ N.
 $X = 338387.06$ E.
- Zona 20 S

El presente trabajo tiene la finalidad de dar mayor confiabilidad al uso del densímetro PQI 380, en los diferentes puntos de aplicación del pavimento asfáltico en estudio, los resultados fiables y consistentes de densidad in situ demanda menor tiempo que el obtenido en laboratorio, esto ayudara a optimizar los tiempos en obra, siendo un referente indicador de la calidad de pavimento para futuros estudios de evaluación o desarrollo de carreteras en el departamento de Tarija.

1.7. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

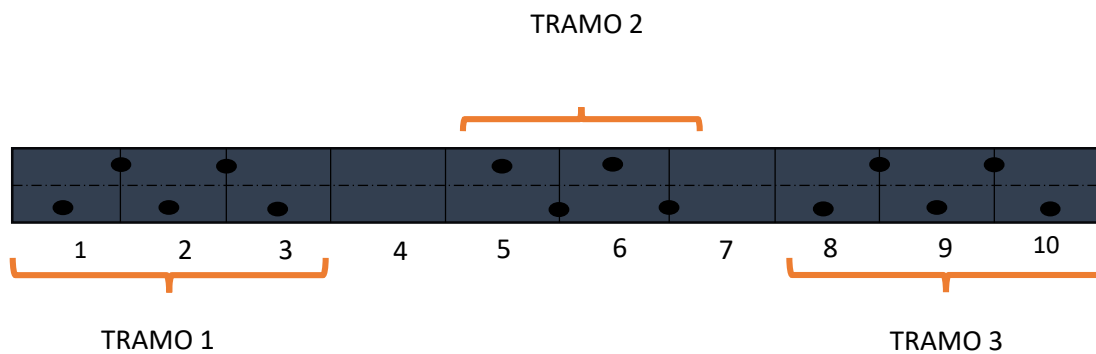
1.7.1. Identificación del tipo del diseño de investigación

En el presente trabajo se realiza una investigación causal con una técnica de muestreo estratificado.

1.7.2. Criterio asumido

El criterio asumido para la toma de muestras es el de tres al bolillo que es el más utilizado en vías, para determinar el número de ensayos se tomara dos tramos de 3 kilómetros a cada extremo y un tramo de 2.5, al inicio del tramo en el kilómetro 20, al medio en el kilómetro 15 y al final en el kilómetro 10 como se muestra en la figura N° 1.1.

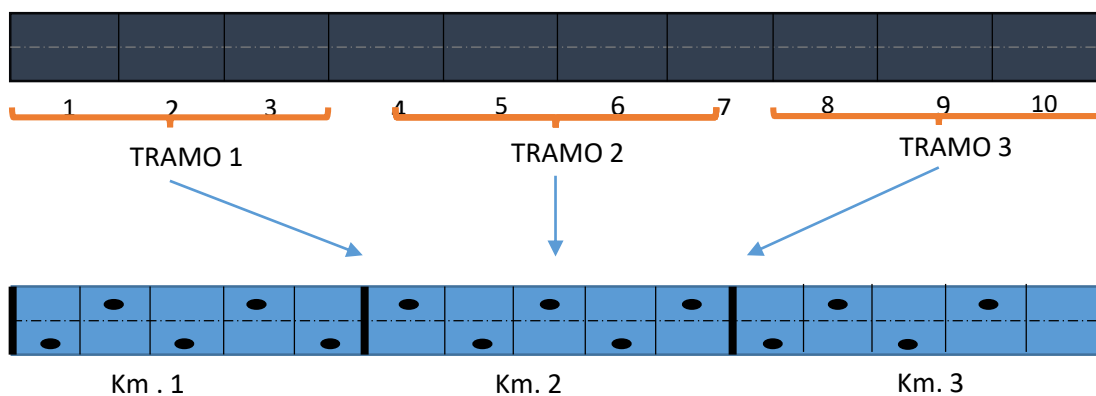
FIGURA N° 1.1. Distribución de tramos a medir



Fuente: Elaboración propia.

Cada kilómetro se dividió en diez tramos de cien metros, se tomó la muestra cada cuatrocientos metros, para usar el criterio de tres al bolillo que es el más común en estudios de carreteras, se obtuvo catorce puntos de aplicación en tres kilómetros como se muestra en la figura N° 1.2.

FIGURA N° 1.2. Números de ensayos por tramo



Fuente: Elaboración propia.

1.7.3. Número de ensayos

Resumen del número de ensayos

Densidad in situ 42

Grado de compactación 42

Densidad en laboratorio 14

Nivel de confianza de 95 %

TABLA N° 1.1. Nivel de confianza

Nivel de confianza %	Valor del nivel de confianza Z
50	0.574
80	1.280
85	1.444
90	1.640
95	1.960
99	2.680

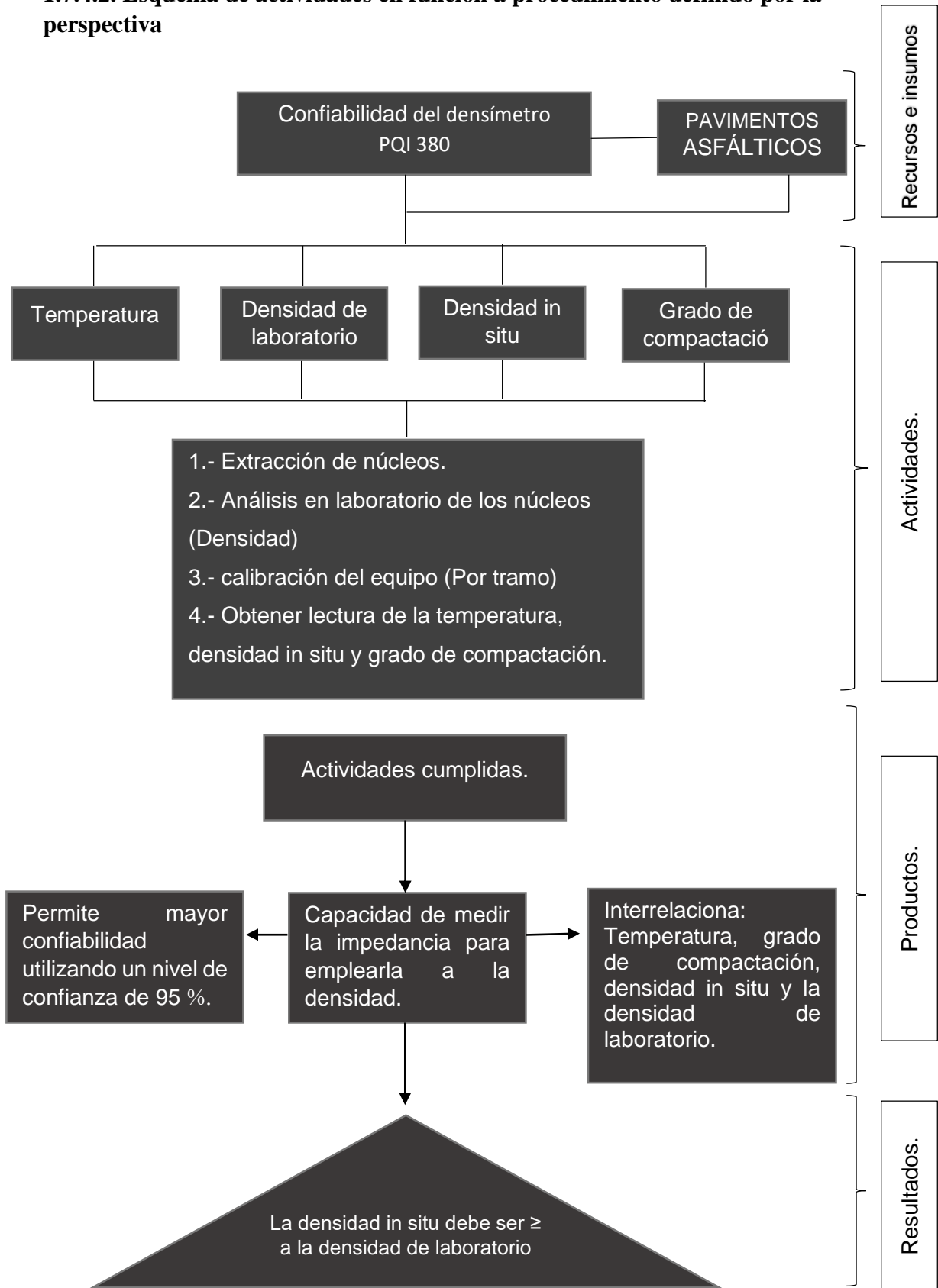
Fuente: Sesión N° 04 – capítulo IV, confiabilidad y validez de instrumentos de investigación. Dr. Roberto Marroquín.

1.7.4. Métodos y procedimientos lógicos

1.7.4.1. Listado de actividades a realizar

- 1.- Extracción de núcleos.
- 2.- Análisis en laboratorio de los núcleos (Densidad)
- 3.- Calibración del equipo (Por tramo)
- 4.- Obtener lectura de la temperatura, densidad in situ y grado de compactación.
- 5.- Construir un cuadro comparativo entre las densidades
- 6.- Construir gráficos de correlación densidad in situ vs densidad de laboratorio y densidades vs grado de compactación.
- 7.- Construir gráficos de frecuencia y valores medios de las densidades.
- 8.- Realizar un análisis estadístico.
- 9.- Se establecerá la confiabilidad del densímetro.

1.7.4.2. Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva



2.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.

2.1.1. Características y comportamiento de la mezcla

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire (o simplemente vacíos).
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

2.1.1.1 Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es

usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.1.1.2. Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

“Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios para que pueda fluir el asfalto”. Según Geman Paiva Ipanaque (capítulo IV-Diseño de mezclas asfálticas).

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

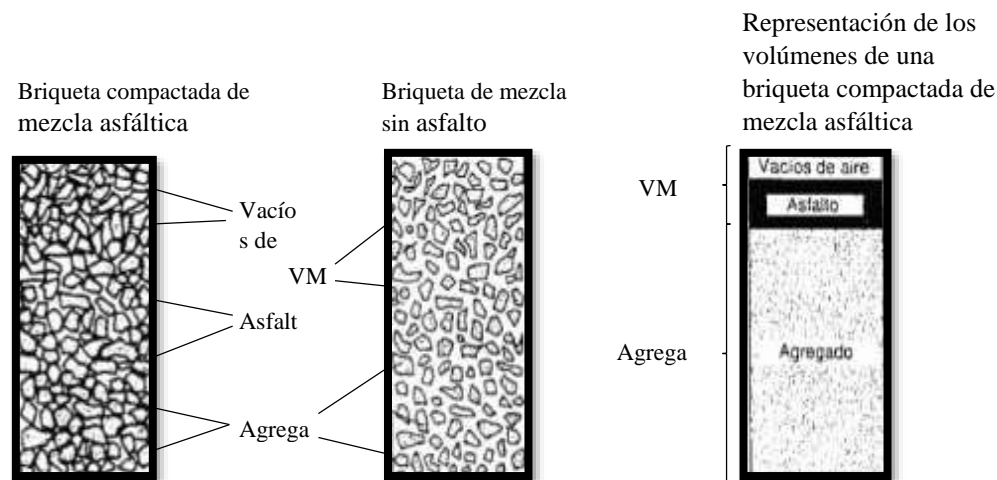
“La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos”. Según Geman Paiva Ipanaque (capítulo IV-Diseño de mezclas asfálticas).

2.1.1.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla. La fig. 2.1. Ilustra el concepto de VMA y la tabla 2.1. Presenta los valores requeridos.

FIGURA N° 2.1. Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada (Nota: para simplificar el volumen de asfalto absorbido no es mostrado).



Fuente: Tomado del Capítulo IV - Diseño de mezclas asfálticas ([Biblioteca UDEP - Universidad de Piura](#)).

TABLA N° 2.1. Vacíos en el agregado mineral (Requisitos de VMA)

MAXIMO TAMAÑO DE PERTICULA NOMINAL		PORCENTAJE MINIMO VMA		
		PORCENTAJE DISEÑO VACIOS DE AIRE		
mm.	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 6	16.0	17.0	18.0
9.50	3/8	14.0	15.0	16.0
12.50	1/2	13.0	14.0	15.0
19.00	3/4	12.0	13.0	14.0
25.00	1.0	11.0	12.0	13.0
37.50	1.5	10.0	11.0	12.0

Fuente: Tomado del capítulo IV - Diseño de mezclas asfálticas ([Biblioteca UDEP - Universidad de Piura](#)).

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

2.1.1.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo

del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (Nº 200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajuste arbitrario, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto

que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

2.1.2. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.1.2.1. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida

de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en pavimentos.

TABLA N° 2.2. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado con pocas superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: Tomado de Pavimentos Unidad II del Ingeniero Henry Landaeta – Universidad Santa María.

2.1.2.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración

del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

TABLA N° 2.3. Causas y efectos de una poca durabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (Hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

Fuente: Tomado de Pavimentos Unidad II del Ingeniero Henry Landaeta – Universidad Santa María.

2.1.2.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

TABLA N° 2.4. Causas y efectos de la permeabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación Y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Tomado de Pavimentos Unidad II del Ingeniero Henry Landaeta – Universidad Santa María.

2.1.2.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado y la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado y demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

TABLA N° 2.5. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar y poco durable.

Fuente: Tomado de Pavimentos Unidad II del Ingeniero Henry Landaeta – Universidad Santa María.

2.1.2.5. Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es

una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada en bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

2.1.2.6. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

TABLA N° 2.6. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Fuente: Tomado de Pavimentos Unidad II del Ingeniero Henry Landaeta – Universidad Santa María.

2.1.2.7. Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie este mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento.

La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (38 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados debe resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito.

Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

TABLA N° 2.7. Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidropelaje
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Tomado de Pavimentos Unidad II del Ingeniero Henry Landaeta – Universidad Santa María.

2.2. DENSIDAD DE CAMPO

La densidad es una propiedad física de la materia que se define como la proporción de la masa de un objeto a su volumen.

Esta relación entre masa y volumen de una sustancia o mezcla es lo que define la propiedad física de la densidad:

$$\text{Densidad} = \text{Masa} / \text{Volumen}$$

La densidad es una propiedad intensiva de la materia definida como la relación de la masa y un objeto dividida por su volumen. La masa es la cantidad de materia que contenida en un objeto y comúnmente se la mide en unidades de gramo (g). El volumen es la cantidad de espacio ocupado por la cantidad de la materia y es comúnmente expresado en centímetros cúbicos (cm³) o en mililitros (ml). Por consiguiente las unidades comunes usadas para expresar la densidad son los gramos por mililitros (g/ml) y gramos por centímetro cúbicos (g/cm³).

La densidad es un concepto fácil de confundir. Por ejemplo, muchas cosas que comúnmente creemos que son “livianas” o “pesadas” no tiene masas diferentes, pero si tiene densidades diferentes. En la tabla 2.8 se muestran ejemplos de las densidades de sustancias comunes.

TABLA N° 2.8. Tablas de densidades. Por Mart Arre H.

Sustancia	Densidad (kg./m ³)	Densidad (g./cm ³)
Agua	1000	1
Aceite	920	0.92
Gasolina	680	0.68
Plomo	11300	11.3
Acero	7800	7.8
Mercurio	13600	13.6
Madera	900	0.9
Aire	1.3	0.0013
Butano	2.6	0.0026
Dióxido de carbono	1.8	0.0018

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/50303062/tablas> de densidades y temperaturas de fusión y ebullición

La temperatura es considerada uno de los agentes ambientales que influyen de manera directa en el comportamiento de los pavimentos, modificando su rigidez, debido a las características termoplásticas del material que constituye las capas asfálticas de los pavimentos flexibles. A medida que aumenta la temperatura, las capas del pavimento asfáltico se vuelven menos rígidas y cuando disminuye se incrementa la rigidez de estas capas. Este efecto se aprecia en mayor grado en las capas de rodadura, generando estados tensionales de origen térmico que se superponen a los generados por la acción del tráfico, lo que trae consigo un efecto en la durabilidad de la estructura.

2.3. DENSIDAD DE CAMPO UTILIZANDO DENSÍMETRO PQI 380

El Indicador de Calidad de Pavimento (PQI) es un procedimiento de medición “no nuclear” de la densidad in situ. El equipo utiliza ondas eléctricas para medir la

constante dieléctrica del material. La densidad de la mezcla asfáltica es directamente proporcional a la medida de esta constante, y los dispositivos electrónicos del equipo convierten las señales de campo en interpretaciones de la densidad. El procesador de datos calcula esta densidad corregida por la humedad que pueda estar presente en el pavimento.

Este dispositivo utiliza un voltaje continuo de baja frecuencia, determinando la densidad, o nivel de compactación, por la respuesta del campo eléctrico del detector del dispositivo, a los cambios en la impedancia eléctrica de la matriz del material. Esta impedancia es una función de la constante dieléctrica del material y del aire atrapado en los huecos de la capa compactada. Debido a que la constante dieléctrica del aire es muy inferior a la del pavimento, cuando la compactación se incrementa, la constante dieléctrica combinada aumenta al disminuir el porcentaje de aire en la mezcla. Un estudio realizado por Romero concluye que para el control de calidad en mezclas bituminosas en caliente es un método perfectamente aceptable y que, por su rapidez, constituye un procedimiento idóneo para las mediciones de densidad in situ.

El equipo, densímetro PQI 380 es un dispositivo para la determinación de densidad in situ en pavimentos asfálticos sin extracción de testigos. Las experiencias con este equipo en mezclas bituminosas en caliente, recogidas en diferentes fuentes bibliográficas, muestran que las densidades medidas in situ con el PQI son muy similares a las obtenidas mediante la extracción de testigos. En un artículo se expone la primera etapa de un proyecto de investigación que tiene por objeto analizar los resultados de mediciones efectuadas con el densímetro PQI en mezclas bituminosas donde se utiliza emulsión asfáltica como ligante. Se comprueba la variabilidad de la densidad obtenida con el equipo para este tipo de mezclas, y se comparan los resultados con otros métodos de medida de densidad in situ.

El densímetro no nuclear se basa en el principio de impedancia eléctrica. La impedancia eléctrica del material a ensayar es proporcional a la constante dieléctrica e inversamente proporcional al volumen de huecos y al porcentaje de compactación, es

decir, el campo eléctrico va a variar en función de la densidad. El campo eléctrico es transmitido a través del material, desde la placa sensora del equipo. Luego la impedancia es medida y utilizada en el cálculo de la densidad de ese conjunto específico como la simulación comsol ilustra la figura N° 2.2.

De la bibliografía estudiada sobre el empleo del equipo PQI en la determinación de densidades in situ en mezclas bituminosas en caliente destacan los siguientes trabajos: Bryan C. Smith, se determinan medidas de densidad por métodos nucleares y no nucleares, a partir de la información recogida de ocho proyectos de pavimentación ejecutados en el Estado de Virginia. Se llegó a la conclusión, que aplicando una corrección a los datos del PQI basada en un índice de humedad, determinado a partir de los valores obtenidos en este estudio y para las condiciones específicas del mismo, las medidas obtenidas con este equipo correlacionaban mejor con las mediciones de densidad de testigos que las medidas obtenidas con el nuclear.

2.3.1. Densidad por medio del densímetro PQI 380

El Pavement Quality Indicator (PQI) Modelo 380 de TransTech usa tecnología de última generación para obtener lecturas precisas de la densidad de pavimentos asfálticos. Sus principales características son:

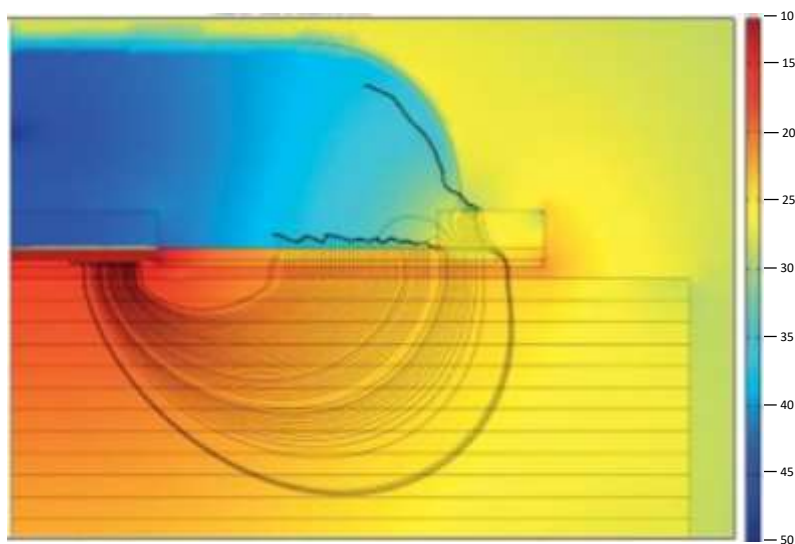
- No requiere de una licencia especial ni incorpora fuentes radiactivas.
- Ligero y de fácil uso
- 12 horas de operación en obra.
- Mide la densidad en unidades comunes (Libras/Pie cúbico y Kilogramos/Metro cúbico).
- Mide la humedad relativa y la compensa si es necesario.
- Guarda en memoria un número ilimitado de registros.

- Descarga de datos al ordenador mediante dispositivo USB de memoria flash (formato de archivos de texto delimitado por punto y coma).

El nuevo equipo denominado Densímetro no nuclear fue introducido en el campo internacional, el cual funciona por medio de impedancia eléctrica.

El equipo PQI 380 emplea espectroscopia de impedancia para medir la respuesta eléctrica del asfalto en el que se va a calcular la densidad. Como puede observarse en la simulación consol que se muestra a continuación, el equipo mide la impedancia y la emplea en el cálculo de la densidad de ese aglomerado en particular.

FIGURA N° 2.2. Simulación consol del densímetro



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 –
Trans Tech Systems, Inc.

2.3.2. Partes y accesorios

El equipo medidor de densidad in situ cuenta con los siguientes componentes:

- Una maleta de almacenamiento y transporte.
- Un manual de instrucciones.
- Un equipo PQI380.

- Un mango del equipo PQI380.
- Un cargador de batería: 120/220V CA a 12 VCD.
- Cargador de coche.
- 3 paquetes de baterías.

FIGURA N° 2.3. Partes del densímetro PQI 380.



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG

0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

2.3.3. Procedimiento

Antes de utilizar el Equipo PQI380 por primera vez, se tiene que configurar el equipo para realizar medidas y grabar datos correctamente. A continuación se deberá de seguir estos pasos antes de utilizar el equipo:

1. Instalar y cargar las baterías.

2. Arrancar el software.
3. Poner la fecha y hora local.
4. Configurar el GPS.
5. Seleccionar las unidades de medida.
6. Seleccionar el registro de datos.
7. Definir el material que se está ensayando (Detalles de la mezcla).
8. Detallar del proyecto (Para la función de registro de datos).
9. Seleccionar el Modo de Medida.

2.3.4. Modos de lectura

El PQI380 tiene cuatro modos de lectura: Sencillo, Promedio, Continuo y de Segregación.

FIGURA N° 2.4. Modos de lectura



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Con el modo continuo y de segregación no se guardan los datos. Con los modos sencillos y promedio solo se guardan los datos si está activada la función de registro de datos.

2.3.4.1. Modo de lectura sencillo

Para empezar a tomar lecturas se debe pulsar Measure. Si la función de registro de datos no está activada, el equipo mostrara los resultados de la primera lectura y esperará a la siguiente.

FIGURA N° 2.5. Modo de lectura sencilla



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

FIGURA N° 2.6. Confirmación del modo de lectura sencilla



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Si la función de registro de datos esta activa, aparecerá los botones Accept (aceptar) y Reject (rechazar) para esa lectura. Cuando la acepte aparecerá la pantalla Enter Location (introducir situación) para poder guardar información específica de dicha ubicación. Pulse Accept inmediatamente para saltarse esta pantalla o cuando haya terminado de editar.

2.3.4.2. Modo de lectura promedio

Se toma cinco lecturas para el promedio en forma de hoja de trébol. Aparecerá resaltado en pantalla el número de la lectura sí como la posición en la que debería estar colocado el equipo.

FIGURA N° 2.7. Modos de lectura promedio



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Cuando el equipo esté colocado en la superficie plana pulse One (uno). Cuando se haya tomado la lectura Uno, en el resumen de densidades aparecerá la lectura individual de densidad y aparecerá resaltado el botón verde con el número Dos. Mueva el equipo a esta posición y pulse 2. Y así se repite lo mismo para las cinco lecturas.

FIGURA N° 2.8. Visualización de la lectura promedio



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Después de efectuar la quinta lectura, el equipo mostrara las cinco lecturas individuales bajo el epígrafe Density Summary (Resumen de densidades) situado a la izquierda, y

el promedio de compactación, densidad y temperatura de las cinco lecturas aparecerá en el centro de la pantalla. El equipo no guarda las lecturas individuales, solo guarda las lecturas promedio. Si se necesita lecturas individuales, esta será la última vez que aparezca en pantalla. Si la función de registro de datos esta activada el equipo permite aceptar (Accept) o rechazar (Decline) la lectura promedio actual. Si se rechaza no se guardara en el archivo de datos y el equipo esperara para realizar otro conjunto de lecturas. Si la función de registro de datos esta desactivada el equipo únicamente mostrará los promedios y esperará para realizar el siguiente conjunto de lecturas (Next Reading).

FIGURA N° 2.9. Confirmación del modo de lectura promedio



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Si el registro de datos está activado y desea guardar la lectura promedio que aparece en la pantalla, pulse Accept. Como sucedía en el modo de lectura sencillo, aparecerá la pantalla Enter Location (introducir situación) con la que se puede guardar información específica de esa ubicación. Pulse Accept inmediatamente para saltarse esta pantalla o cuando haya terminado de editar.

2.3.4.3. Modo de lectura continuo

Con este modo no se guardan datos. Para empezar a tomar lecturas se presiona Measure.

FIGURA N° 2.10. Modos de lectura continuo



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Después de apretar el botón Measure (Medida) el modo continuo mostrará de forma continuada y actualizada la compactación, densidad y temperatura hasta que pulse el botón STOP, como se muestra en la figura 2.10.

2.3.4.4. Modo de lectura de segregación

Con este modo no se guardan datos. Asegúrese de anotar las lecturas individuales, si desea utilizarlas. Este modo copia al del PQI300 en el que se toma dos lecturas (A y B) para cada ubicación.

La segregación es la separación de las partículas gruesas y finas de árido en la mezcla asfáltica. Una mezcla segregada normalmente tendrá fluctuaciones de densidad en el material acabado.

El modo de segregación del PQI380 se puede usar convenientemente para medir las variaciones de densidad que resultan de la segregación de la mezcla. La operación en Modo Segregación está diseñada según procedimiento de ensayos utilizados por algunas compañías. El PQI380 se usa para tomar una serie de lecturas en ubicaciones predeterminadas sobre la capa de aglomerado. Las variaciones de los datos se calculan cuando se hayan tomado todas las lecturas.

FIGURA N° 2.11. Modos de lectura de segregación



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Coloque el PQI380 en la primera ubicación predeterminada en la capa de aglomerado y pulse Measure para obtener la lectura 1A para la ubicación 1. Si es necesario, anote los resultados de la lectura en este momento. Cada vez que se tome una lectura aparecerá las opciones “Accept” (aceptar) o “Reject” (rechazar) como se muestra en la figura de arriba. En cada ubicación se toman dos lecturas (‘A’ y ‘B’) y se calcula el valor medio. En el caso de equipos nucleares es necesario determinar la medida de dos lecturas por ubicación debido a su pobre repetibilidad. El PQI380 tiene una repetibilidad excelente por lo que no serían necesarias dos lecturas, pero se toman dos

por razones de compatibilidad con los procedimientos de ensayos con equipos nucleares existentes. Si está conforme con la primera lectura pulse Accept (Aceptar).

FIGURA N° 2.12. Toma de dato en el punto 1 B



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

El PQI380 le pedirá tomar la siguiente lectura en la misma ubicación, 1B. Pulse Measure. Aparecerán en pantalla los resultados de la lectura 1B para la ubicación 1 y el equipo esperará a que los acepte o rechace.

FIGURA N° 2.13. Toma de dato en el punto 2 A.



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Si está satisfecho con la siguiente lectura anote los resultados (si es necesario), pulse Accept. El PQI380 mostrará ahora en pantalla el botón “Calculate” (Calcular) y le pedirá que se mueva a la ubicación 2 para efectuar la primera lectura (2A). Cuando haya aceptado el último par de lecturas pulse Calculate. El equipo mostrara en pantalla el porcentaje de compactación, densidad y temperatura para las lecturas más bajas, más alta y para la media.

2.3.5. Calibración del equipo

Para obtener lecturas precisas y coherentes en necesario calibrar el PQI380 en cada nueva mezcla. Esto se debe a la variedad de mezclas asfálticas en caliente (HMA) que se utilizan en obra hoy en día. Las variaciones en el tipo y tamaño del árido así como las variaciones en los ligantes producen una gran variedad de propiedades eléctricas.

Una vez calibrado a un estándar (testigo) el PQI380 mantendrá una precisión óptima.

2.3.5.1. Método de calibración de testigo

Para obtener resultados óptimos, el método de calibración de testigo es el más preciso para calibrar el PQI380. El nivel de control de calidad desde la planta hasta la capa de aglomerado será el que determine el número de ubicaciones de ensayo que deberá identificar el operador (de una a cinco). Este método normalizado para establecer una banda de control como se especifica en la norma AASHTO TP 68-04 deberá constar de un total de cinco ubicaciones testigos. Cuanta más ubicaciones de ensayo, más precisos serán los resultados.

Método de calibración del núcleo

Para obtener resultados óptimos, el método de calibración del núcleo es el método más preciso al calibrar el PQI 380.

El nivel de control de calidad de la planta a la alfombra determinará el número de lugares de prueba que un operador debe identificar (uno a cinco). El método estándar para establecer una tira de control según se especifica en AASHTO TP 68-04 sería un total de cinco lugares principales. Recuerde que la calibración sólo será tan buena como los núcleos que se calibran a. Por lo tanto, cuantos más lugares de prueba tenga, más precisos serán los resultados.

Coloque el PQI 380 en la primera ubicación en la alfombra de asfalto. Utilizando la placa del sensor como guía, trace un círculo alrededor del PQI con un marcador de lápiz. Usando el Modo Promedio en el PQI, Presione 1 para la primera lectura.

(NO TOCAR NI MANIPULARSE SOBRE EL PQI MIENTRAS ESTA LECTURA)

El PQI 380 NO guarda en memoria las lecturas individuales, solo guarda la lectura promedio si está activada la función de registro de datos.

FIGURA N° 2.14. Toma de lectura promedio de para la calibración



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Mueva el PQI aproximadamente 2 pulgadas hacia arriba y hacia la derecha en el exterior del círculo. La pantalla modo de lectura promedio también le guiará a la ubicación y número de lectura adecuados. Pulse 2 para realizar la segunda lectura. Continúe con el patrón de hoja de trébol hasta que haya completado cinco lecturas individuales. Después de la quinta lectura, el PQI 380 mostrará las cinco lecturas

individuales para su verificación en la parte del resumen de densidad de la pantalla. Si se necesitan lecturas individuales, anótelas, ésta será la última vez que la pantalla las muestre.

El promedio de estas cinco lecturas individuales se mostrará en el centro de la pantalla esperando que se presione el botón Aceptar o Rechazar. Anote la lectura promedio de PQI 380 en la "Hoja de trabajo de calibración comparativa básica" que se encuentra al final de este manual. Presione Aceptar para almacenar la lectura promedio en el archivo de datos. Si la opción de Aceptar o rechazar no se muestra, el registro de datos está desactivado y la lectura promedio no se almacenará.

La compactación directa en porcentaje de la estera de ensayo se consigue tirando de las muestras físicas (núcleos) de las posiciones previamente ensayadas. Una vez que se reciben los informes del laboratorio de densidad de núcleo, ingrese el valor para cada núcleo en la "Hoja de trabajo de comparación básica".

Calcular la diferencia entre las lecturas medias de PQI y los valores de densidad de núcleo. A continuación se promediarán las cinco diferencias calculadas (densidad básica - Densidad media PQI) para obtener una diferencia. Esta diferencia será el Desplazamiento para esa mezcla específica que se almacenará en el medidor para esa mezcla. Por lo tanto, usted estará ajustando el valor de las lecturas PQI por esa cantidad para que el medidor lea lo mismo que el núcleo (s).

FIGURA N° 2.15. Menú principal y calculadora



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Si no tiene una calculadora a mano, presione Menú principal en la barra de tareas. En el menú principal, presione Calculadora. Una vez calculada la diferencia numérica, determine si el PQI 380 está leyendo demasiado alto o demasiado bajo. Por ejemplo, si el PQI lee 155lb / ft³ y le gustaría que lea 150lb / ft³, el PQI lee demasiado alto y el valor ajustado de la desviación del PQI380 será de 5.

FIGURA N° 2.16. Configuración de la desviación del PQI380



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Luego desde el menú de control pulse Mix. 29 Asegúrese de que la mezcla verde resaltada es la mezcla a la que desea añadir el desplazamiento. Pulse editar mezcla y, a continuación, pulse desplazar mediante el uso de la densidad previamente medida y comparando el valor con la densidad deseada, determine si la lectura PQI 380 es demasiado baja o demasiado alta.

FIGURA N° 2.17. Tipo de lectura demasiado baja o demasiado alta



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Presione PQI está leyendo demasiado alto o bajo dependiendo de su situación. Para el ejemplo, vamos a utilizar "PQI está leyendo demasiado alto". Aparecerá un teclado numérico, así como el Nombre de mezcla y la Offset de corriente para esa mezcla. Escriba el valor ajustado para el desplazamiento que determinamos anteriormente sería 5. Tipo 5, luego presione Intro. 30 PQI380 Offset Setup

El valor ajustado y el nuevo desplazamiento serán iguales si el desplazamiento de corriente fuera originalmente cero. Si el Offset actual hubiera sido 1 y el valor ajustado 5, entonces el nuevo desplazamiento sería -4 para una lectura PQI que había leído demasiado alto. Presione Aceptar. La pantalla vuelve a la pantalla Edit Mix donde puede verificar la información de esa mezcla. Una vez verificado, presione Salir y luego presione Control Menú en la barra de tareas para regresar al Control Menú. El desplazamiento de cada mezcla se puede ajustar en cualquier momento. Las lecturas tomadas antes de un ajuste específico no reflejarán ese ajuste. Los archivos de datos registrarán cada desplazamiento utilizado para calcular la densidad para cada lectura.

2.3.5.2. Método de calibración mediante la placa de verificación

Para la calibración mediante la placa de verificación el equipo debe encontrarse en el tramo del cual se va a proceder a medir las densidades en sitio, el equipo debe

permanecer en la caja de almacenamiento en completa estabilidad, mientras se procede a prender y calibrar el densímetro PQI 380 mediante su estandarización.

FIGURA N° 2.18. Calibración mediante la placa de verificación



Fuente: Propia

2.3.6. Descarga de datos

FIGURA N° 2.19. Descarga de datos



Fuente: Manual de instrucciones version del software P380ENG 0.1.7 – Trans Tech Systems, Inc.

Desde el menú de control, pulse Administración de datos. Desplácese hasta el proyecto que desea descargar utilizando las flechas ubicadas en la esquina superior izquierda de la pantalla. Inserte la unidad flash USB en el puerto USB situado en la parte posterior del medidor. Pulse Descargar y descargar de nuevo. Descargando se completa cuando el indicador muestra "Listo" en la esquina superior derecha. Cuando y si lo desea para eliminar un proyecto, asegúrese de resaltar el proyecto correcto y pulse Borrar. Las opciones de impresión aún no disponible.

Para descargar los datos en la computadora, abra una hoja de cálculo de Excel e importe los datos haciendo clic en Importar datos externos en el menú Datos haga clic en Importar datos. Cambie la carpeta Buscar en la ubicación en la que almacenó sus datos, así como Archivos de tipos a todos los archivos. Resalte y abra su archivo de datos (por ejemplo, Proyecto1 o Tramo1). Comprobar delimitado, haga clic Siguiente, ficha Comprobar, marcar punto y coma, haga clic en Finalizar. Resalte la celda inicial y haga clic en Aceptar.

Los encabezados de columna y los datos para cada lectura individual incluyen los siguientes: de Detalles del Proyecto: Proyecto Nombre, Ubicación 1, Ubicación 2, Contacto; de Detalles de la Mezcla: Nombre de la mezcla, Tamaño de la piedra, Profundidad, MTD, Offset, Gauge Op; Información de la estación: Nombre de la estación, Offset de la estación, Descripción, Operador; Densidad, Compactación, Superficie, Temperatura, localización del GPS, hora del GPS, fecha del GPS, fecha / hora de PQI380.

Ahorro de energía / Apagado automático

El modelo 380 de PQI tiene un modo de ahorro de energía incorporado. Si no se pulsan botones después de aproximadamente 20 minutos la unidad entrará en un modo de ahorro de energía. Al pulsar cualquier tecla se activará el PQI para continuar utilizar. Si el PQI se deja "On" durante una hora sin presionar ningún botón, se apagará, para conservar tiempo de funcionamiento de la batería.

2.4. DENSIDAD DE CAMPO UTILIZANDO EL CONO DE ARENA

Este ensayo nos sirve para determinar la densidad en campo con una forma indirecta de obtener el volumen del agujero en el campo utilizando arena estandarizada, se usa generalmente arena estandarizada que corresponde a la que pase la malla No 20 ASTM (0.85 mm) y queda retenida en la malla No. 30 ASTM (0.60 mm). Arena estandarizada compuesta por unas partículas cuarzosas no cementadas con una granulometría redondeada

En muchos trabajos de pavimentos es necesario realizar ensayos para controlar la densidad seca de cada capa que se va compactando y en este caso se utiliza el método del cono de arena para obtener la densidad in situ y compararla con la máxima densidad seca obtenida en el laboratorio.

2.4.1. Objetivo del cono de arena

Determinar la densidad seca y la humedad de un suelo compactado y verificar el grado de compactación en el campo.

Luego debemos comparar los valores de las densidades seca y humedad para obtener un control de compactación el cual es conocido como grado de compactación definido como:

La relación en porcentaje entre la densidad seca obtenida por los datos obtenidos en el campo y la densidad máxima correspondiente a la prueba realizada en el laboratorio.

FIGURA N° 2.20. Ensayo de densidad in situ



Fuente: Propia.

El grado de compactación de un suelo lo podemos determinar de la siguiente forma:

$$G_c = (\Gamma_d / \Gamma_d \text{ max}) \times 100$$

Donde:

G_c = Grado de compactación %

Γ_d = Densidad seca en el campo kg/m^3

$\Gamma_d \text{ max}$ = Densidad seca máxima obtenida en el laboratorio kg/m^3

2.4.2. Materiales y equipo

- Arena estandarizada, se usa generalmente arena que corresponde al pase de la malla No 20 ASTM (0.85 mm) y queda retenida en la malla No. 30 ASTM (0.60 mm).
- Cono de arena con válvula cilíndrica, con aproximadamente 4 litros de capacidad.
- Cucharón
- Placa base de 4" ó 6" de diámetro, debe ser igual al diámetro de la boca del embudo
- Balanza electrónica con 0.01 g de precisión, superior a 10 kgs.
- Almádana o combo de 1 ½ libras de peso
- Cinta métrica
- Brocha
- Cono de arena y cilindro contenedor
- Espátula
- Guantes
- Horno

2.4.3. Procedimiento que debe de realizarse antes del ensayo

- Con la arena calibrada pase No.20 y retenida No.30 se verterá en el contenedor.
- Luego pesar el contenedor con la arena calibrada.

FIGURA N° 2.21. Ensayo densidad in situ, peso del aparato más cono con la arena que quedo después de vaciar al hoyo.



Fuente: Propia.

- Después de obtenido el peso total debemos obtener el peso retenido en el cono de arena, para esto hay que verter la arena que tiene el contenedor sobre la placa base de 4" o 6" de diámetro.

FIGURA N° 2.22. Cono de arena



Fuente: Propia.

- Después de vaciar la arena en el cono como se muestra en la figura N° 2.22, se debe proceder a pesar de nuevo el contenedor para saber la arena que se quedó en el cono.

2.4.4. Procedimiento del ensayo In Situ

- Colocar la placa base de 4" o 6" de diámetro en la superficie que se desea medir la densidad in situ, en este caso sobre el pavimento asfáltico.
- Como se tiene ya un hueco por la extracción de núcleos para su respectivo análisis en laboratorio se aprovechara para adaptar este ensayo a la carpeta asfáltica con su respectiva profundidad de la extracción del núcleo.
- Colocar el material extraído en una bolsa.
- Pesarse el material extraído en una balanza.

- Una vez que se ha sacado la muestra del ensayo, debe colocarse la arena calibrada que llevamos en el contenedor o frasco sobre el agujero realizado en la extracción del núcleo.
- Verter la arena y pesar nuevamente al contenedor para conocer el peso de la arena del orificio, para luego determinar el volumen retirado del material.
- Retirar la arena calibrada para los ensayos futuros.
- Pesar el material extraído retenido en la malla de $\frac{3}{4}$ y determinar el contenido de humedad y el peso seco.

1. Calibración de la placa y el cono a arena en la placa y el cono (Lb).

$$APC = P \text{ inicial Lab} - P \text{ final Lab}$$

2. Calibración de la Arena

a) Peso arena (Lb)

$$W_A = (\text{Peso Molde} + \text{Arena}) - \text{Peso Molde}$$

b) Densidad de la arena. (Lb/pie³)

$$D_A = W_A/V_A$$

3. Prueba de Campo

a) Peso de la arena en el agujero (Lb.)

$$W_{AA} = P \text{ inicial campo} - P \text{ final campo} - APC$$

b) Volumen del agujero (pie³)

$$V_A = W_{AA}/D_A$$

c) Peso suelo extraído (Lb)

$$W_{SE} = (\text{peso lata} + \text{suelo}) - \text{Peso lata}$$

d) Densidad húmeda. (Lb/pie³)

$$DH = WSE/VA$$

e) Porcentaje de humedad (%)

PRUEBA 1

$$P.lata = X_1$$

$$P.humedo = X_1 + \text{muestra húmeda} - X_1$$

$$P.seco = X_1 + \text{muestra seca} - X_1$$

$$\%H = (Ph - Ps) * 100 / Ps$$

PRUEBA 2

$$P.lata = X_2$$

$$P.humedo = X_2 + \text{muestra húmeda} - X_2$$

$$P.seco = X_2 + \text{muestra seca} - X_2$$

$$\%H = (Ph - Ps) * 100 / Ps$$

2.5. DENSIDAD EN LABORATORIO

2.5.1. Ubicación del punto de extracción de briqueta

Primero debemos ubicar nuestros puntos de extracción de núcleos dentro de cada tramo establecido.

FIGURA N° 2.23. Tramo Yesera-Santa Ana



Fuente: Propia.

El número de núcleos extraídos será de acuerdo a la longitud de cada tramo en estudio, una vez extraído las briquetas se procede llevar a laboratorio para su respectivo análisis. Se procede a pesar las briquetas secas, luego se toma su peso de las briquetas sumergidas en agua por el equipo de determinación de peso específico que se encuentra en el laboratorio de hormigones y por último se pesa las briquetas después de sumergirlas secándolas superficialmente.

2.5.2. Procedimiento de laboratorio

El trabajo que se realiza en el laboratorio después de extraídas las muestras es el siguiente.

1. Pesar la muestra en seco y natural como se la extrajo.
2. Sumergir las briquetas en agua atreves del equipo de determinación de peso específico que se encuentra en el laboratorio de hormigones de la carrera de ingeniería civil.
3. Pesar las briquetas sumergidas en agua.

FIGURA N° 2.24. Sumersión de las briquetas



Fuente: Propia.

4. Retirar del aparato de determinación de peso específico y se procede a secar superficialmente las briquetas.

FIGURA N° 2.25. Peso de las briquetas sumergidas



Fuente: Propia.

5. Pesar nuevamente las briquetas humedecidas y superficialmente secadas.

2.6. CONFIABILIDAD

Se refiere a la consistencia de los resultados. En el análisis de la confiabilidad se busca que los resultados de la medición con un instrumento preciso concuerden con los resultados de la misma medición con otro instrumento. Si esto ocurre se puede afirmar que existe un alto grado de confiabilidad.

“Es la probabilidad de que un componente o sistema pueda cumplir su función en las condiciones operativas especificadas durante un intervalo de tiempo dado” Ésta es la definición general de confiabilidad. Aplica a los componentes o sistemas orientados a una misión y se designa por la letra R (Reliability). Esta definición no tiene sentido para los componentes o sistemas reparables puesto que éstos toleran las fallas; para estos sistemas se utiliza la disponibilidad (es la probabilidad de que un componente o sistema pueda cumplir su función en las condiciones operativas especificadas en un instante de tiempo dado).

2.6.1. Método de formas alternativas o paralelas

En este procedimiento no se administra el mismo instrumento de medición, con dos o más versiones equivalentes. Las versiones son similares en contenido, instrucciones, duración y otras características. Las versiones (casi siempre dos) se administran a un mismo grupo de personas simultáneamente o dentro de un periodo relativamente corto. El instrumento es confiable si la correlación entre los resultados de ambas administraciones es positiva de manera significativa. Los patrones de respuesta deben variar poco entre las aplicaciones. Una variación de este método es el de las formas alternas prueba-posprueba (Creswell, 2005), cuya diferencia reside en que el tiempo que transcurre entre la administración de las versiones es mucho más largo, que es el caso de algunos experimentos.

El Método de formas alternativas o paralelas es el método que se utilizara el presente estudio, este método se calcula a través de un coeficiente de correlación entre los resultados de dos pruebas supuestamente equivalentes. Lo cual se puede visualizar en la figura (2.26)

FIGURA N° 2.26. Coeficiente de correlación



Fuente: Sesión N° 04 – capítulo IV, confiabilidad y validez de instrumentos de investigación. Dr. Roberto Marroquín.

2.6.2. Método de mitades partidas (split-halves)

Los procedimientos anteriores (medida de estabilidad y método de formas alternas) requieren cuando menos dos administraciones de la medición en el mismo grupo de individuos. En cambio, el método de mitades partidas necesita solo una aplicación de la medición. Específicamente el conjunto total de ítems o reactivos se divide en dos mitades equivalentes y se comparan las puntuaciones o los resultados de ambas. Si el instrumento es confiable, las puntuaciones de las dos mitades deben estar muy correlacionadas. Un individuo con baja puntuación en una mitad tendera a mostrar también una baja puntuación en la otra mitad.

2.6.3. Medidas de consistencia interna

Estos son coeficientes que estiman la confiabilidad: a) el alfa de Cronbach (desarrollado por J.L. Cronbach) y b) los confidentes KR-20 y KR-21 de Kuder y Richardson (1937). El método de cálculo en ambos casos requiere una sola administración del instrumento de medición. Su ventaja reside en que no es necesario dividir en dos mitades a los ítems del instrumento, simplemente se aplica la medición y se calcula el coeficiente.

2.6.4. Cómo mejorar la confiabilidad

Existen dos formas básicas mediante las cuales puede mejorarse la confiabilidad de un componente o sistema:

TABLA N° 2.9. Calidad - Redundancia

Calidad	Redundancia
<p>Se refiere a la calidad de los materiales utilizados y a su fabricación, pruebas, calibración, transporte y puesta en servicio.</p>	<p>Se colocan elementos de respaldo. Si un componente falla o sale, su función es asumida por componente de respaldo.</p> <p>Existen dos tipos de redundancia:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Activa: El componente redundante siempre está conectado en paralelo con el componente al cual da respaldo. • Stand_by: El componente redundante se conecta en el momento en que el componente al cual da respaldo falla o sale. Otros métodos son: el mantenimiento preventivo, la diversidad de componentes, el stock de repuestos. La mejora de la confiabilidad conlleva a inversiones adicionales y cambios en el diseño que pueden afectar las prestaciones del componente o sistema.

Fuente: tomado de Confiabilidad en ingeniería, primera edición 2011, Carlos J. Zapata de la universidad tecnológica de Pereira Colombia.

Conforme se aumenta el nivel de confiabilidad, se aumenta el nivel de inversión requerido y viceversa. El costo de la confiabilidad debe compararse con los beneficios globales tanto para el usuario como para la sociedad. El nivel aceptable de confiabilidad depende de lo que los usuarios y la sociedad en su conjunto estén dispuestos a pagar por esta. Este nivel aceptable de confiabilidad puede ser diferente del óptimo matemático. Para justificar las inversiones en mejora de la confiabilidad se deben definir los costos asociados a las fallas o interrupciones del servicio (salidas) para los usuarios, las empresas distribuidoras y la sociedad.

2.6.5. Tipos de análisis o estudios en confiabilidad

- Cualitativo o cuantitativo

TABLA N° 2.10. Análisis cualitativo y cuantitativo

Cualitativo	Cuantitativo
<p>Es una valoración subjetiva.</p> <p>No se establecen índices numéricos.</p> <p>Ejemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • No fallará • Es muy confiable • Este equipo es mejor que aquél <p>No sirve para comparar alternativas o hacer análisis económico.</p> <p>Se conoce como “juicio de ingeniería”</p>	<p>Es una valoración objetiva.</p> <p>Se establecen índices numéricos, que pueden ser determinísticos o probabilísticos.</p> <p>Ejemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Probabilidad de falla del 50% • Confiabilidad del 0.995 • Margen del 20% <p>Sin embargo, la probabilidad puede ser establecida mediante un juicio de ingeniería por lo cual también sería subjetivo.</p>

Fuente: tomado de Confiabilidad en ingeniería, primera edición 2011, Carlos J.

Zapata de la universidad tecnológica de Pereira Colombia.

2.7. CORRELACIÓN

En probabilidad y estadística, la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación entre ellas si al disminuir los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad.

2.7.1. Correlación estadística

En probabilidad y estadística, la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas.

2.7.1.1. Frecuencia estadística

En estadística, la frecuencia (o frecuencia absoluta) de un evento i , es el número de veces en que dicho evento se repite durante un experimento o muestra estadística. Comúnmente, la distribución de la frecuencia suele visualizarse con el uso de histogramas.

En estadística se pueden distinguir hasta cuatro tipos de frecuencias:

- **Frecuencia absoluta**

Valor de la variable estadística X , es el número de veces que aparece ese valor en el estudio. Se suele denotar por F_i a la frecuencia absoluta del valor $X = x_i$ de la variable X . Dada una muestra de N elementos, la suma de todas las frecuencias absolutas debe dar el total de la muestra estudiada N .

- **Frecuencia relativa (f_i)**

Es el cociente entre la frecuencia absoluta y el tamaño de la muestra (N).

Es decir, siendo el f_i para todo el conjunto i . Se presenta en una tabla o nube de puntos en una distribución de frecuencias. Si multiplicamos la frecuencia relativa por 100 obtendremos el porcentaje o tanto por ciento (p_i)

- **Frecuencia absoluta acumulada (N_i)**

Se refiere al total de las frecuencias absolutas para todos los eventos iguales o anteriores que un cierto valor, en una lista ordenada de eventos.

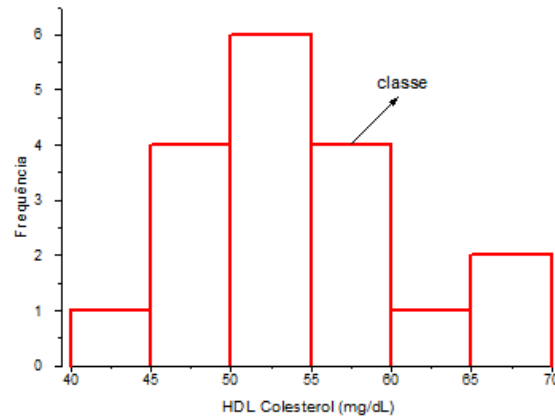
- **Frecuencia relativa acumulada (F_i)**

Es el cociente entre la frecuencia absoluta acumulada y el total de la muestra.

2.7.1.2. Histogramas

En estadística, un **histograma** es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Sirven para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la población, o de la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua (como la longitud o el peso). De esta manera ofrece una visión de grupo permitiendo observar una preferencia, o tendencia, por parte de la muestra o población por ubicarse hacia una determinada región de valores dentro del espectro de valores posibles (sean infinitos o no) que pueda adquirir la característica. Así pues, podemos evidenciar comportamientos, observar el grado de homogeneidad, acuerdo o concisión entre los valores de todas las partes que componen la población o la muestra, o, en contraposición, poder observar el grado de variabilidad, y por ende, la dispersión de todos los valores que toman las partes, también es posible no evidenciar ninguna tendencia y obtener que cada miembro de la población toma por su lado y adquiere un valor de la característica aleatoriamente sin mostrar ninguna preferencia o tendencia, entre otras cosas.

FIGURA 2.27. Gráfica de un histograma.



Fuente: Wikipedia la enciclopedia libre

En el eje vertical se representan las frecuencias, es decir, la cantidad de población o la muestra, según sea el caso, que se ubica en un determinado valor o sub-rango de valores de la característica que toma la característica de interés, evidentemente, cuando este espectro de valores es infinito o muy grande el mismo es reducido a sólo una parte que muestre la tendencia o comportamiento de la población, en otras ocasiones este espectro es extendido para mostrar el alejamiento o ubicación de la población o la muestra analizada respecto de un valor de interés.

Se utilizan para relacionar variables cuantitativas continuas. Para variables cuantitativas discretas las barras se dibujan separadas y el gráfico se llama diagrama de frecuencias, porque la variable representada en el eje horizontal ya no representa un espectro continuo de valores, sino valores cuantitativos específicos, igual que ocurre en un diagrama de barras, usado para representar una característica cualitativa o categórica. Su utilidad se hace más evidente cuando se cuenta con un gran número de datos cuantitativos y que se han agrupado en intervalos de clase.

Ejemplos de su uso es la representación de edades o estaturas de una población. Por comodidad, sus valores se agrupan en clases, es decir, en intervalos continuos. En los

casos en los que los datos son cualitativos (no numéricos), como sexto grado de acuerdo o nivel de estudios, es preferible un diagrama de sectores.

Los histogramas son más frecuentes en ciencias sociales, humanas y económicas que en ciencias naturales y exactas. Y permite la comparación de los resultados de un proceso.

- **Histograma de frecuencias absolutas**

Representa la frecuencia absoluta mediante la altura de las barras. Se usa mucho en educación no universitaria por su sencillez, pero sólo se puede aplicar cuando todos los intervalos son iguales, ya que en ese caso las alturas y las superficies son proporcionales. En esos niveles educativos se introduce una estadística elemental y todavía no se puede profundizar en estos detalles.

- **Histograma de frecuencias relativas**

Representa la frecuencia relativa mediante la altura de las barras. Igual que en el caso anterior se usa mucho en educación no universitaria. La elaboración del gráfico es más complicada pues los números ya no son enteros. Como en el caso anterior sólo se puede aplicar cuando todos los intervalos son iguales, ya que en ese caso las alturas y las superficies son proporcionales.

- **Histograma**

Representa la frecuencia relativa mediante la superficie de las barras. Aunque esto sea cierto en todos los histogramas, cuando se agrupan los datos en intervalos desiguales hay que atender a la superficie de las barras, que no se corresponderá con la altura como ocurría en los casos anteriores. Es el que se suele usar en educación universitaria. Para su elaboración debe introducirse el concepto de altura de histograma, que es un concepto equivalente al de densidad de probabilidad, y que se calcula dividiendo la frecuencia relativa de ese intervalo (o sea la superficie que queremos darle) entre la anchura del intervalo (la base del rectángulo). Ahora las barras tendrán siempre

superficie igual a la frecuencia relativa y la suma de todas esas superficies (de todas las barras) será 1, o sea el 100%.

- **Función densidad**

Representa la probabilidad mediante la superficie de las barras. Es un gráfico idéntico al histograma pero aplicado a distribuciones teóricas. El concepto de frecuencia relativa se cambia por el de probabilidad, pero también se representa por superficies y la suma de todas esas superficies (de todas las barras) será 1, como en el histograma, o sea el 100% de probabilidad.

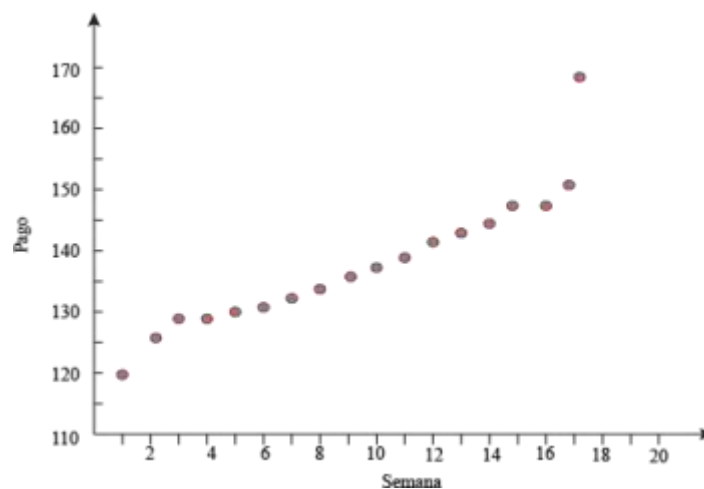
2.7.2. Diagrama de dispersión y correlación

2.7.2.1. Diagramas de dispersión

Los diagramas de dispersión son una forma fenomenal de expresar datos de dos variables, y hacer predicciones basadas en los datos. Al contrario de los histogramas y los diagramas de caja, los de dispersión muestran valores de datos individuales.

Este es el diagrama de dispersión que expresa la cantidad de dinero que se ganó Mateo cada semana trabajando en la tienda de su padre.

FIGURA 2.28. Ejemplo de un diagrama de dispersión.



Fuente: Estadística básica y probabilidades – diagrama de dispersión y correlación.

Las semanas están diagramadas en el eje x , y la cantidad de dinero q se ganó en esa semana en el eje y . En general, la variable independiente (la variable que no está influida por nada) está en el eje x y la variable dependiente (la que es modificada por la variable independiente) está en el eje y .

En este diagrama podemos ver que en la semana 2 Mateo se ganó alrededor de \$125, y en la semana 18 estuvo cerca de los \$165. Pero más importante aún es la tendencia. Por ejemplo, con estos datos podemos ver que Mateo gana cada vez más según pasan las semanas. Quizá su padre le da más horas a la semana o más responsabilidades.

2.7.2.2. Correlación

Con los diagramas de dispersión podemos ver cómo se relacionan ambas variables entre sí. Esto es lo que se conoce como correlación. Hay tres tipos de correlación: positiva, negativa y nula (sin correlación).

- **Correlación positiva**

Ocurre cuando una variable aumenta y la otra también. Por ejemplo, la altura de una persona y el tamaño de su pie; mientras aumenta la altura, el pie también.

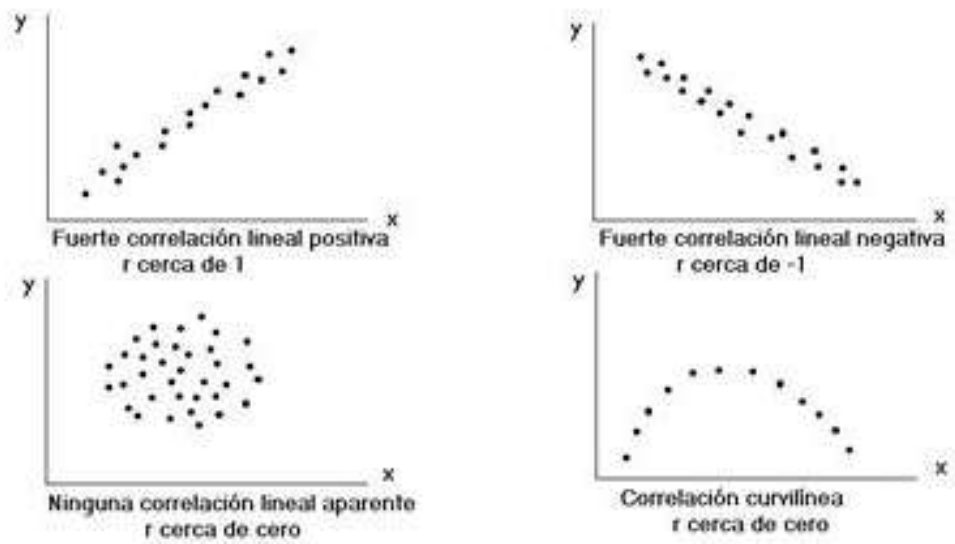
- **Correlación negativa**

Es cuando una variable aumenta y la otra disminuye. El tiempo de estudio y el tiempo que pasas jugando videojuegos, tienen una correlación negativa, ya que cuando tu tiempo de estudio aumenta, no te queda tanto tiempo para jugar videojuegos.

- **Sin correlación**

No hay una relación aparente entre las variables. Los puntos en tus videojuegos y tu talla de zapato no parecen tener ninguna correlación; mientras una aumenta, la otra no tiene ningún efecto.

FIGURA 2.29. Tipos genéricos de correlación entre dos variables X e Y.



Fuente: Tomado de Probabilidad y estadística de Henry Mendoza R. - Estadística descriptiva capítulo I

3.1. OBTENCIÓN DE DATOS

3.1.1. Método del densímetro PQI 380

Se tomó cinco lecturas en forma de hoja de trébol, para obtener un promedio de estas lecturas en cada punto de aplicación dentro de cada tramo en estudio, luego se procedió al trabajo en gabinete mediante la descarga de datos a través de USB.

FIGURA N° 3.1. Modo de lectura promedio



Fuente: Elaboración propia.

TABLA N° 3.1. Tabla de los datos tomados con el densímetro PQI 380

Numeros de datos N°	Densidad kg/m ³	Compactación %	Temperatura °C
1	2302.729	100.119	34.600
2	2224.950	96.737	32.800
3	2322.829	100.993	35.800
4	2217.619	96.418	31.200
5	2292.561	99.677	34.800
6	2213.730	96.249	34.400
7	2283.603	99.287	35.600
8	2140.771	93.077	35.000
9	2047.233	89.010	30.800
10	2136.460	92.890	36.000
11	2131.319	92.666	35.400
12	2121.195	92.226	34.800
13	2361.729	102.684	37.200
14	2205.046	95.872	36.800
15	2209.910	96.083	38.800
16	2113.714	91.901	37.000
17	2245.426	97.627	40.000
18	2151.132	93.528	38.600
19	2181.964	94.868	38.600
20	2226.861	96.820	40.200
21	2292.536	99.676	39.800
22	2151.114	93.527	38.200
23	2162.613	94.027	41.600
24	2224.566	96.721	39.800
25	2187.350	95.102	41.400
26	2123.827	92.341	42.000
27	2161.393	93.974	41.800
28	2240.017	97.392	38.200
29	2196.818	95.514	39.600
30	2042.066	88.786	38.200
31	2182.119	94.875	40.400
32	2107.450	91.628	38.600
33	2202.866	95.777	40.000
34	2062.805	89.687	40.400
35	2075.477	90.238	43.800
36	2160.560	93.938	43.000
37	2124.917	92.362	39.800
38	2212.468	96.195	40.800
39	2217.137	96.397	41.200
40	2136.161	92.877	40.600
41	2078.303	90.361	41.200
42	2082.345	90.537	41.600

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Método de Cono de arena

- Para el ensayo del cono de arena se aprovechó la extracción de briquetas y se realizó el ensayo del cono de arena adaptado a la carpeta asfáltica.

TABLA N° 3.2. Tabla resumen de los pesos del material, volúmenes y densidades de los diferentes puntos de aplicación.

Número de datos	Punto de Aplicación progresiva	Peso de arena calibrada mas aparato	peso de arena despues del ensayo	peso de arena en hoyo y embudo	peso de arena en embudo	peso de la arena en hoyo	volumen del hoyo	Densidad del material del material grs./cm³	Densidad del material Kg./m³
1	20+000	5580.000	5250.000	330.000	109.000	221.000	522.800	2.349	2349.000
2	19+500	5325.000	5030.000	295.000	109.000	186.000	491.300	2.346	2346.000
3	19+000	5110.000	4800.000	310.000	109.000	201.000	538.100	2.355	2355.000
4	18+000	4878.000	4599.000	279.000	109.000	170.000	524.200	2.350	2350.000
5	17+000	4692.000	4395.000	297.000	109.000	188.000	536.700	2.346	2346.000
6	16+000	4502.000	4214.000	288.000	109.000	179.000	507.300	2.338	2338.000
7	15+500	4301.000	3966.000	335.000	109.000	226.000	543.500	2.340	2340.000
8	15+000	4087.000	3781.000	306.000	109.000	197.000	513.600	2.327	2327.000
9	14+000	3865.000	3665.000	300.000	109.000	191.000	514.900	2.330	2330.000
10	13+000	3704.000	3414.000	290.000	109.000	181.000	542.200	2.326	2326.000
11	12+500	3527.000	3216.000	311.000	109.000	202.000	494.000	2.330	2330.000
12	12+000	3308.000	3028.000	280.000	109.000	171.000	533.700	2.315	2315.000
13	11+000	3103.000	2813.000	290.000	109.000	181.000	535.100	2.306	2306.000
14	10+000	2939.000	2623.000	316.000	109.000	207.000	501.800	2.311	2311.000
								Promedio	2333.500

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Método de extracción de briquetas

- Para la extracción de briquetas de la carretera en estudio se tomó un total de 14 briquetas a lo largo del kilómetro 20 al kilómetro 10.

TABLA N° 3.3. Tabla de distancia de extracción de briquetas y pesos seco saturado y sumergido

Número de datos	Punto de aplicación	Punto de aplicación	Peso Briqueta		
			seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua
N°	prog.	m	grs.	grs.	grs.
1	20+000	0	1228.30	1229.80	707
2	19+500	500	1152.40	1153.30	662
3	19+000	1000	1267.10	1268.10	730
4	18+000	2000	1231.70	1232.20	708
5	17+000	3000	1259.30	1260.70	724
6	16+000	4000	1186.20	1187.30	680
7	15+500	4500	1271.60	1272.50	729
8	15+000	5000	1195.10	1196.60	683
9	14+000	6000	1199.70	1200.90	686
10	13+000	7000	1261.00	1262.20	720
11	12+500	7500	1150.80	1152.00	658
12	12+000	8000	1235.30	1236.70	703
13	11+000	9000	1233.90	1235.10	700
14	10+000	10000	1159.50	1160.80	659

Fuente: Elaboración propia.

3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el procesamiento de datos se realizó una tabla de dos variables Densidad y el punto de aplicación, donde se obtuvo el valor promedio de la densidad y la variable del punto de aplicación se la represento en metros (distancia).

3.2.1. Método del densímetro PQI 380

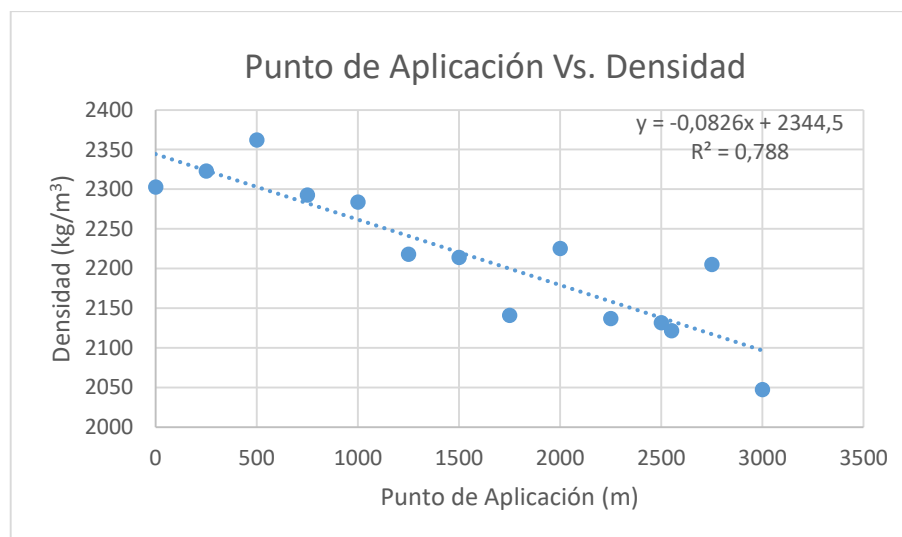
- Tramo 1 (entre los kilómetros 20 y 17)

TABLA N° 3.4. Tabla de densidad y distancia del primer tramo

Número de datos	Densidad	Punto de Aplicación
N°	kg/m ³	m
1	2302.729	0
2	2322.829	250
3	2361.729	500
4	2292.561	750
5	2283.603	1000
6	2217.619	1250
7	2213.730	1500
8	2140.771	1750
9	2224.950	2000
10	2136.460	2250
11	2131.319	2500
12	2121.195	2550
13	2205.046	2750
14	2047.233	3000

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO N° 3.1. Distancia del punto de aplicación vs. densidad



Fuente: Elaboración propia.

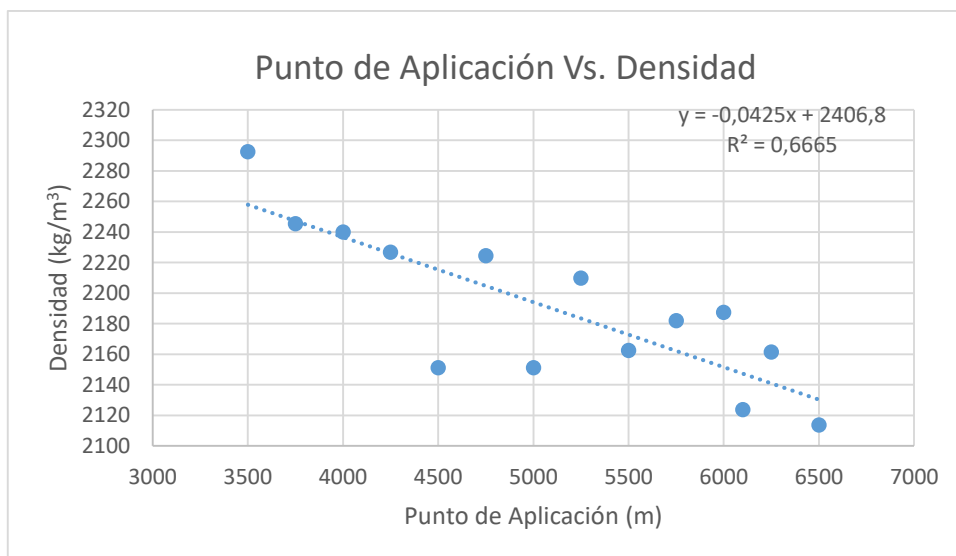
- Tramo 2 (entre los kilómetros 17 y 14)

TABLA N° 3.5. Tabla de densidad y distancia del segundo tramo

Número de datos	Densidad	Punto de aplicación
N°	kg/m ³	m
1	2292.536	3500
2	2245.426	3750
3	2240.017	4000
4	2226.861	4250
5	2151.132	4500
6	2224.566	4750
7	2151.114	5000
8	2209.910	5250
9	2162.613	5500
10	2181.964	5750
11	2187.350	6000
12	2123.827	6100
13	2161.393	6250
14	2113.714	6500

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO N° 3.2. Distancia del punto de aplicación vs. densidad



Fuente: Elaboración propia.

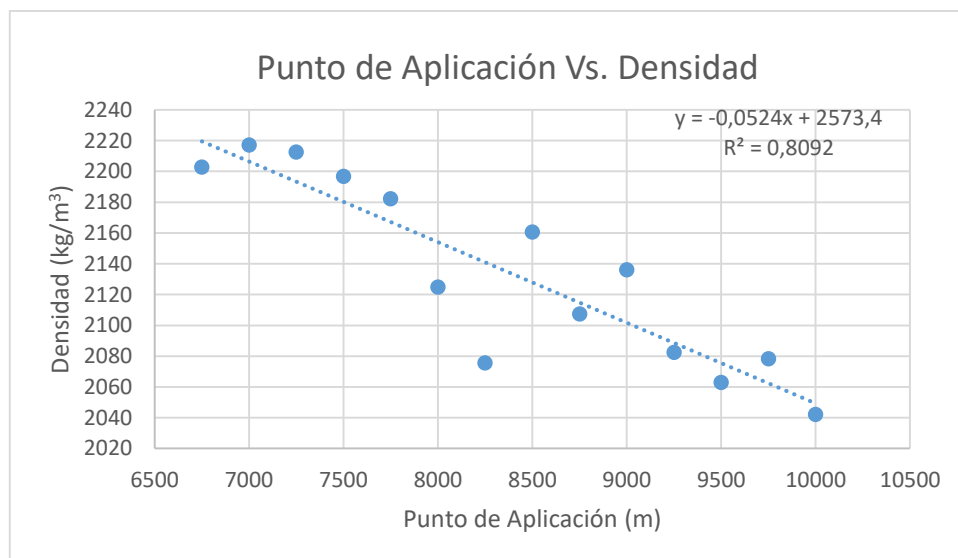
- Tramo 3 (entre los kilómetros 13 y 10)

TABLA N° 3.6. Tabla de densidad y distancia del tercer tramo

Número de datos	Densidad	Distancia
N°	Kg/m ³	m
1	2202.866	6750
2	2217.137	7000
3	2212.468	7250
4	2196.818	7500
5	2182.119	7750
6	2124.917	8000
7	2075.477	8250
8	2160.560	8500
9	2107.450	8750
10	2136.161	9000
11	2082.345	9250
12	2062.805	9500
13	2078.303	9750
14	2042.066	10000

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO N° 3.3. Distancia del punto de aplicación vs. densidad



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Método de Cono de arena

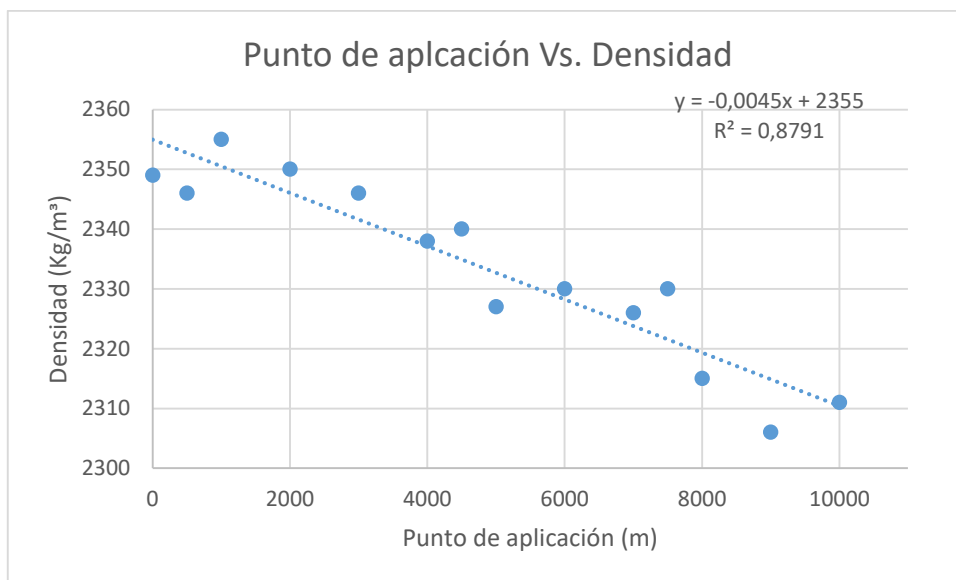
Para el procesamiento de datos por el método del cono de arena, se tuvo que adaptar el ensayo a la profundidad de la briqueta de cemento asfáltico, para obtener resultados confiables.

TABLA N° 3.7. Tabla de densidad del material extraído y el punto de aplicación (distancia en metros)

Número de datos	Punto de Aplicación progresiva	Punto de Aplicación (distancia en metros)	Densidad del material grs./cm ³	Densidad del material kg./m ³
1	20+000	0	2.349	2349.00
2	19+500	500	2.346	2346.00
3	19+000	1000	2.355	2355.00
4	18+000	2000	2.350	2350.00
5	17+000	3000	2.346	2346.00
6	16+000	4000	2.338	2338.00
7	15+500	4500	2.340	2340.00
8	15+000	5000	2.327	2327.00
9	14+000	6000	2.330	2330.00
10	13+000	7000	2.326	2326.00
11	12+500	7500	2.330	2330.00
12	12+000	8000	2.315	2315.00
13	11+000	9000	2.306	2306.00
14	10+000	10000	2.311	2311.00
			Promedio	2333.50

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO N° 3.4. Distancia del punto de aplicación Vs. densidad



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Método de extracción de briquetas

- Se realizó una tabla resumen del procesamiento de datos para encontrar la densidad con el método de la extracción de briquetas.

TABLA N° 3.8. Tabla de resultados de volúmenes de briquetas y densidad

Número de datos	punto de aplicación	punto de aplicación	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta	
			seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad REAL
N°	prog.	m	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm³	Kg/m³
1	20+000	0	1228.30	1229.80	707	522.80	2.349464	2349.464
2	19+500	500	1152.40	1153.30	662	491.30	2.345614	2345.614
3	19+000	1000	1267.10	1268.10	730	538.10	2.354767	2354.767
4	18+000	2000	1231.70	1232.20	708	524.20	2.349676	2349.676
5	17+000	3000	1259.30	1260.70	724	536.70	2.346376	2346.376
6	16+000	4000	1186.20	1187.30	680	507.30	2.338261	2338.261
7	15+500	4500	1271.60	1272.50	729	543.50	2.339650	2339.650
8	15+000	5000	1195.10	1196.60	683	513.60	2.326908	2326.908
9	14+000	6000	1199.70	1200.90	686	514.90	2.329967	2329.967
10	13+000	7000	1261.00	1262.20	720	542.20	2.325710	2325.710
11	12+500	7500	1150.80	1152.00	658	494.00	2.329555	2329.555
12	12+000	8000	1235.30	1236.70	703	533.70	2.314596	2314.596
13	11+000	9000	1233.90	1235.10	700	535.10	2.305924	2305.924
14	10+000	10000	1159.50	1160.80	659	501.80	2.310682	2310.682
							PROMEDIO	2333.368

Fuente: Elaboración propia.

3.3. ESTADÍSTICA INFERENCIAL

Para tratar la estadística de los datos se procedió a utilizar el programa estadístico minitab y Excel que no brinda una ayuda de la media, la desviación estándar y otras cualidades del programa.

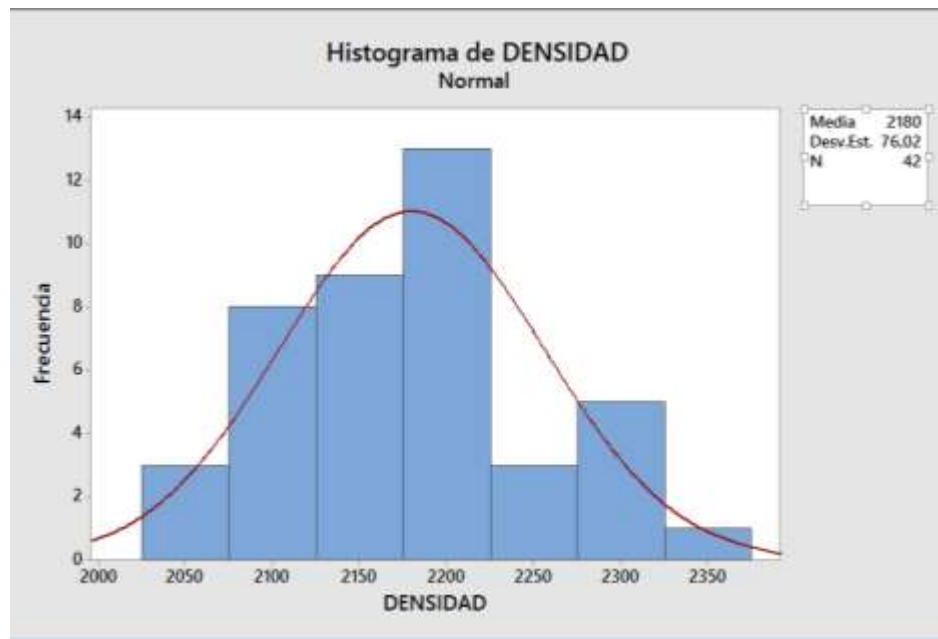
3.3.1. Método del densímetro PQI 380

- Con ayuda del programa estadístico minitab se puede obtener un histograma dandonos valores de la media y desviación estándar para el caso de la densidad.

Media = 2180

Desviacion estandar = 76.02 (en porcentaje 0.7602)

GRÁFICO N° 3.5. Histograma de Densidad con el densímetro PQI 380



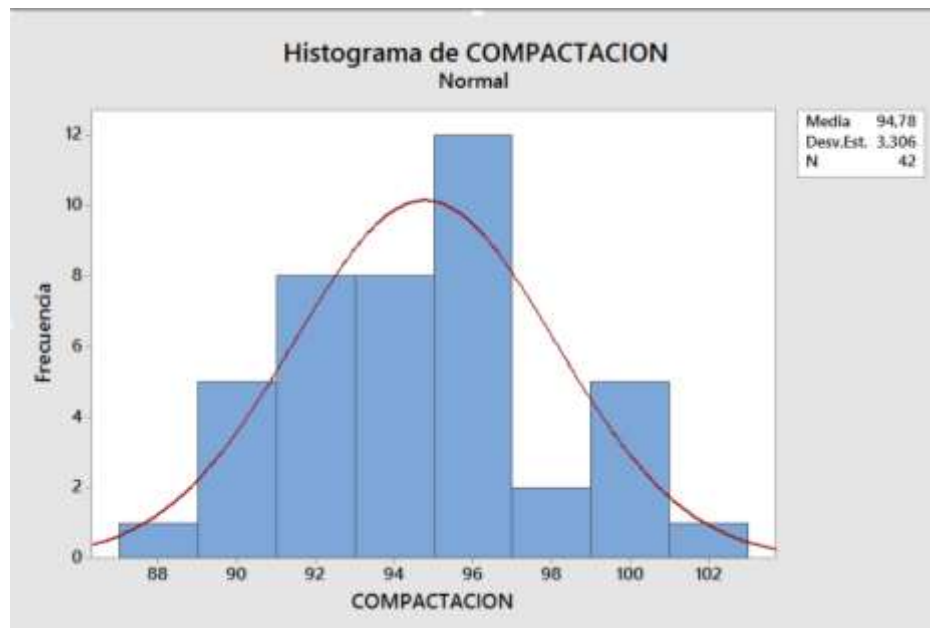
Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

- Con ayuda del programa minitab se puede obtener un histograma dandonos valores de la media y desviacion estandar para el caso de la compactacion.

Media = 94.78

Desviacion estandar = 3.306 (en porcentaje 0.0033)

GRÁFICO N° 3.6. Histograma de compactación con el densímetro PQI 380



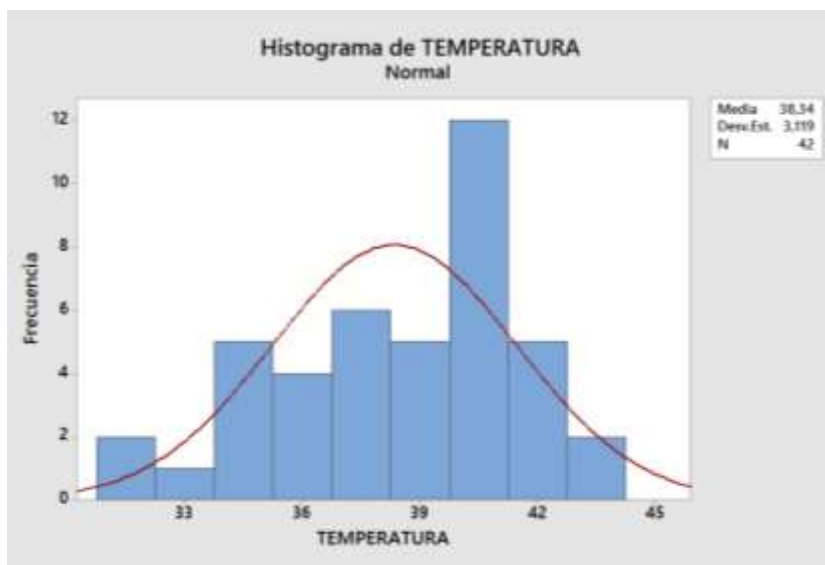
Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

- Con ayuda del programa minitab se puede obtener un hitograma dantonos valores de la media y desviacion estandarpara el caso de la temperatura.

Media = 38.34

Desviacion estandar = 3.119 (en porcentaje 0.0031)

GRÁFICO N° 3.7. Histograma de temperatura con el densímetro PQI 380



Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

- Con ayuda del programa minitab se puede obtener un hitograma dantonos valores de la media y desviacion estandar para el caso de la densidad con una distribución normal con un nivel de significancia de significancia 0.05 o un 5%.

El valor de p nos indica que si es menor que 0.05 estos datos aplican a una distribución normal con un 95 % de confianza

GRÁFICO N° 3.8. Gráfica de probabilidad de densidad con el densímetro PQI 380



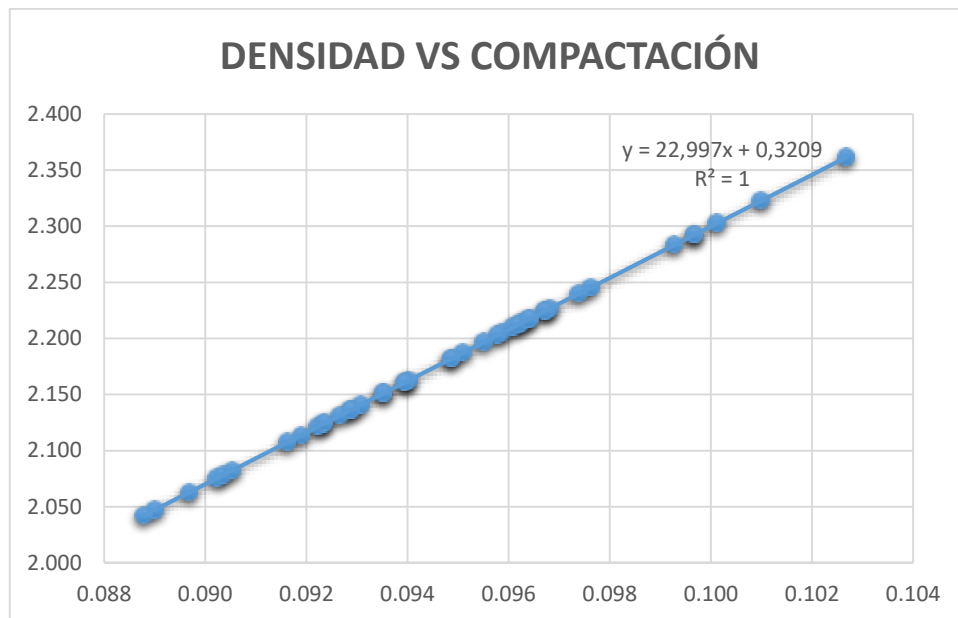
Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

- Tramo en general, graficas de correlación entre las variables

A continuación tenemos las gráficas de correlación lineal entre las diferentes variables identificadas en el capítulo uno de la presente tesis.

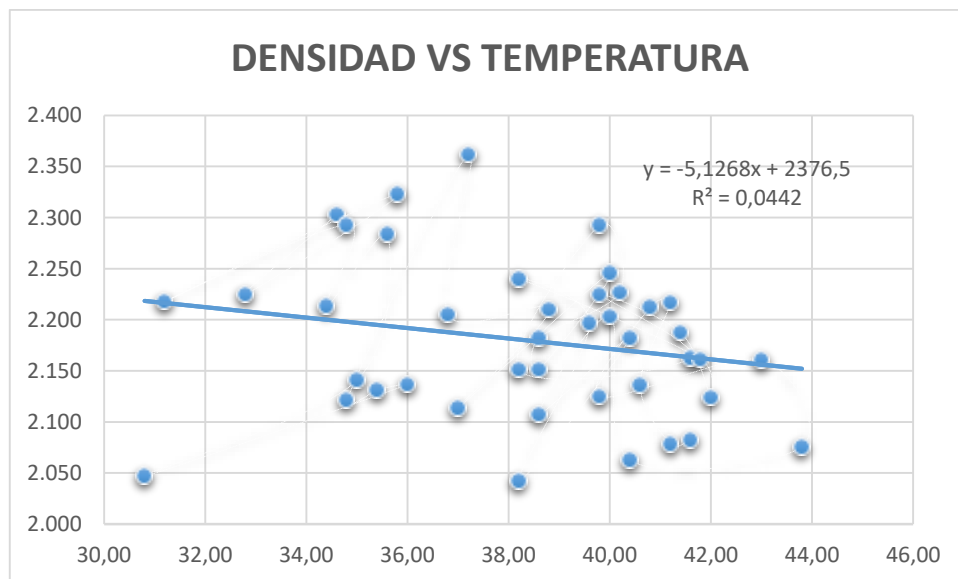
En grafica 3.9. se puede apreciar que la distribución de los puntos establecidos por las variables densidad y compactación tiene una fuerte correlación lineal positiva obteniendo un valor de $R^2 = 1$ dándonos un valor verdadero de nuestra hipótesis. Mientras en las figuras 3.10. y 3.11. la correlación de los puntos establecidos por las variables densidad-temperatura y compactación-temperatura no tienen ninguna correlación lineal aparente.

GRÁFICO N° 3.9. Densidad Vs. grado de compactación (%)



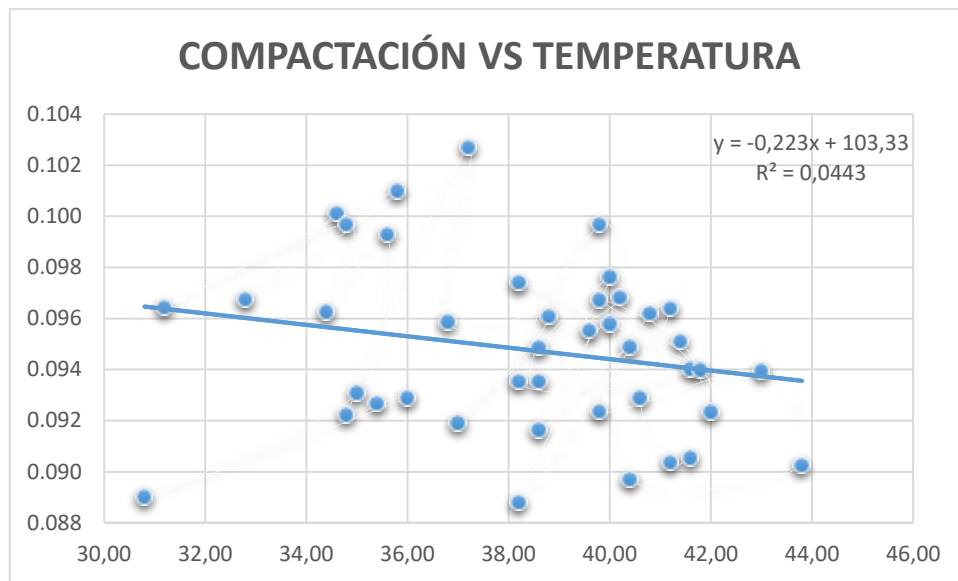
Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

GRÁFICO N° 3.10. Densidad Vs. temperatura superficial



Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

GRÁFICO N° 3.11. Densidad Vs. Temperatura superficial



Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

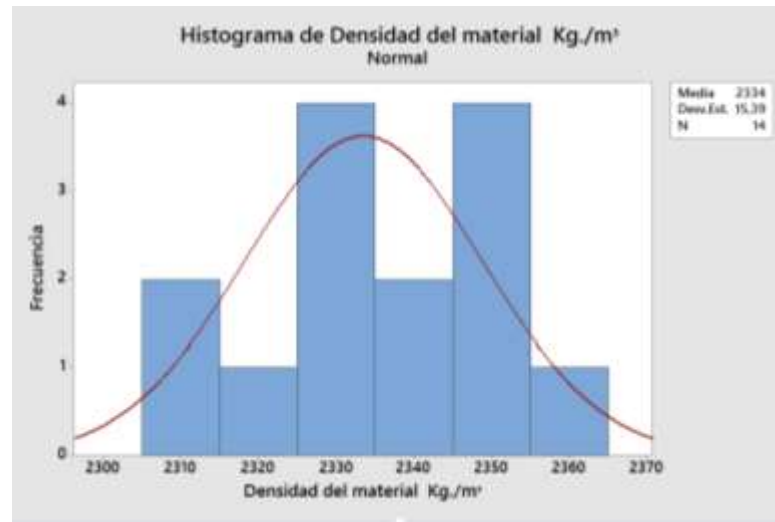
3.3.2. Método de Cono de arena

- Con ayuda del programa minitab se puede obtener un histograma con valores de la media y desviación estandar para el caso de la densidad.

Media = 2334

Desviación estandar = 15.39 (en porcentaje 0.1539)

GRÁFICA 3.12. Histograma de densidad por el método densidad in situ (cono de arena)



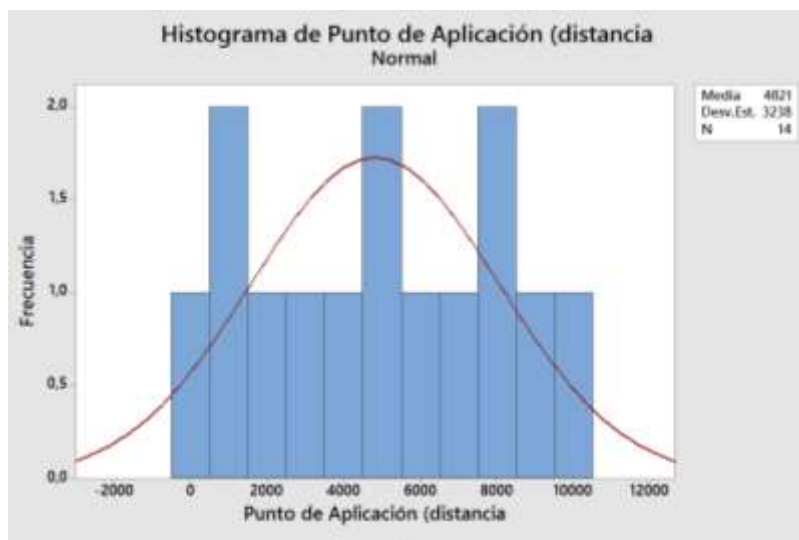
Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

- Con ayuda del programa minitab se puede obtener un histograma con valores de la media y desviación estándar para el caso de la distancia o el punto de aplicación.

Media = 2180

Desviación estándar = 76.02 (en porcentaje 0.7602)

GRÁFICA 3.13. Histograma de punto de aplicación por el método densidad in situ (cono de arena).



Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

3.3.3. Método de extracción de briquetas

- Con ayuda del programa minitab se puede obtener un histograma con valores de la media y desviación estándar para el caso de la distancia o el punto de aplicación.

Media = 2333

Desviación estándar = 15.47 (en porcentaje 0.1547)

GRÁFICA 3.14. Histograma de la densidad por el método de laboratorio



Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

- Con ayuda del programa minitab se puede obtener un histograma con valores de la media y desviación estándar para el caso de la distancia o el punto de aplicación.

Media = 4821

Desviación estándar = 32.38 (en porcentaje 0.3238)

GRÁFICA 3.15. Histograma de punto de aplicación o distancia por el método de laboratorio



Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa estadístico minitab.

3.4. RESULTADOS

3.4.1. Método del densímetro PQI 380

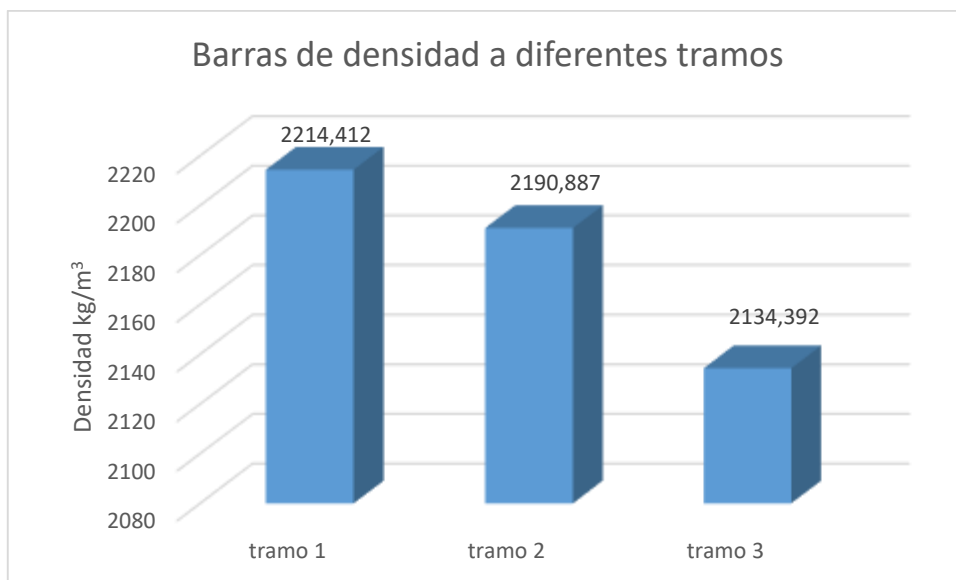
Densidad promedio por tramo

Tramo 1 = 2214.412 Kg/m³

Tramo 2 = 2190.887 Kg/m³

Tramo 3 = 2134.392 Kg/m³

GRÁFICA 3.16. Histograma de la densidad promedio por cada tramo



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.16. se observa la densidad in situ obtenida por el densímetro PQI en tres diferentes tramos, siendo la barra de la densidad de 2214.412 kg/m³ en el tramo 1 de mayor elevación, ya que este se encontraría en la parte final de la carretera donde la compactación fue mayor según gráfica 3.9. que nos demuestra una fuerte correlación lineal positiva y a su vez nos indica que la densidad es proporcional al grado de compactación.

Densidad promedio total

$$\text{Densidad} = 2179.897 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Grado de Compactación} = 94.778$$

3.4.2. Método de Cono de arena

Densidad promedio total

$$\text{Densidad} = 2333.50 \text{ Kg/m}^3$$

3.4.3. Método de extracción de briquetas

Densidad promedio total

Densidad = 2333.368 Kg/m³

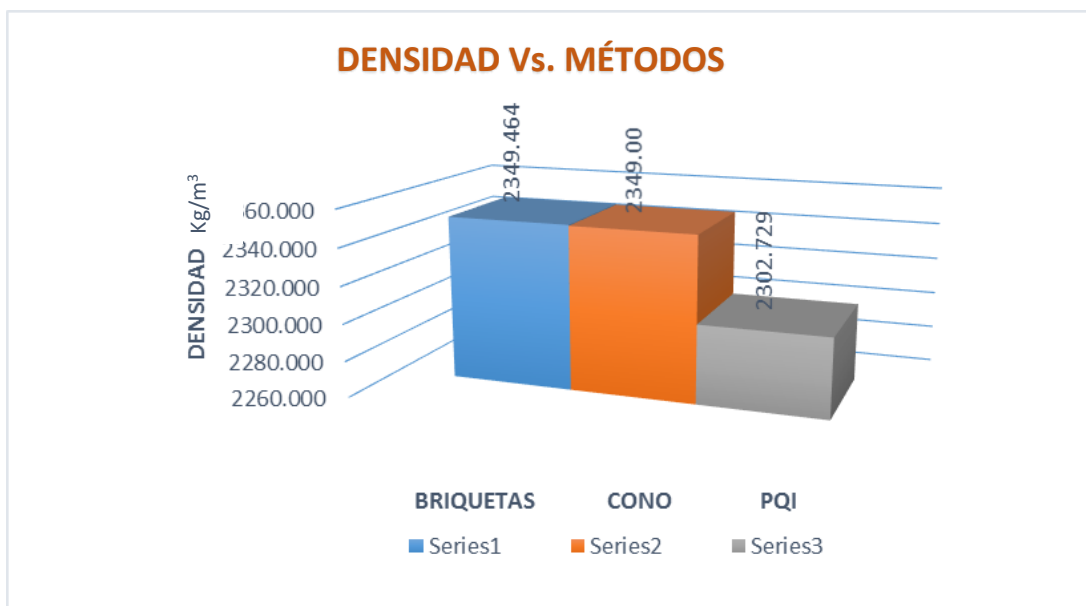
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.5.1. Comparación de las densidades obtenidas por los diferentes métodos

Para la comparación de las densidades obtenidas por los tres diferentes métodos, la extracción de briquetas, el cono de arena y el densímetro PQI 380 se las ara por cada punto de aplicación dentro de la carretera en estudio

- Punto de aplicación N° 1

GRÁFICA 3.17. Comparación de la densidad obtenida por los tres metodos para el punto de aplicación 1.

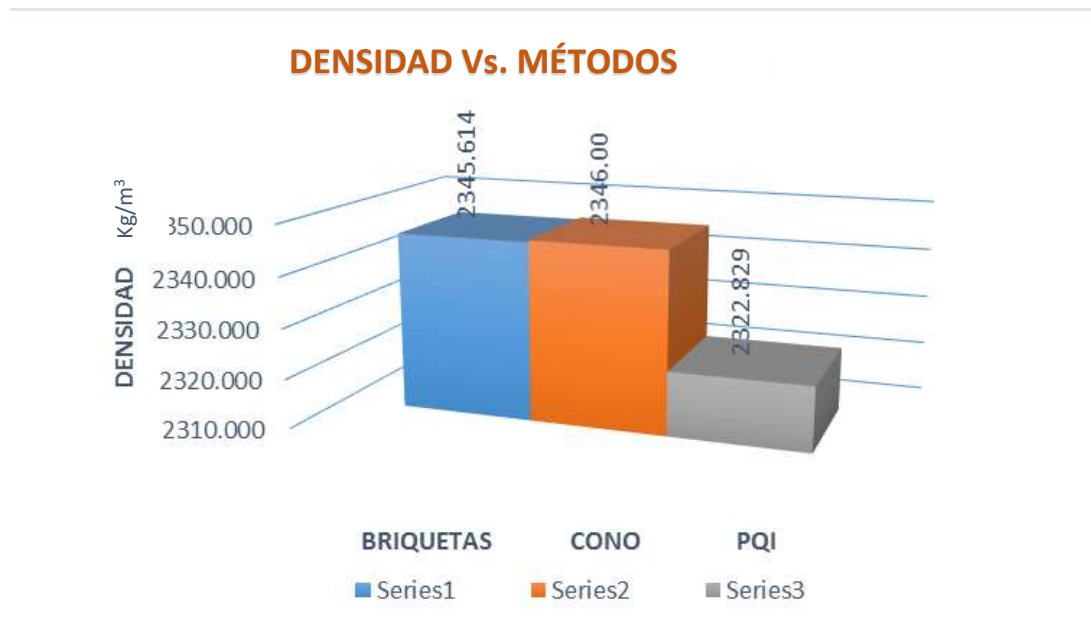


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.17. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación uno y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 2

GRÁFICA 3.18. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 2.

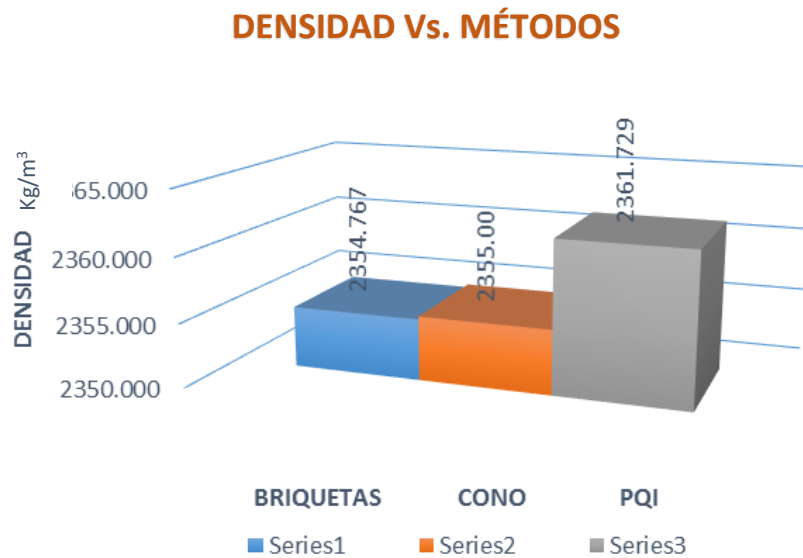


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.18. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación dos y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 3

GRÁFICA 3.19. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 3.

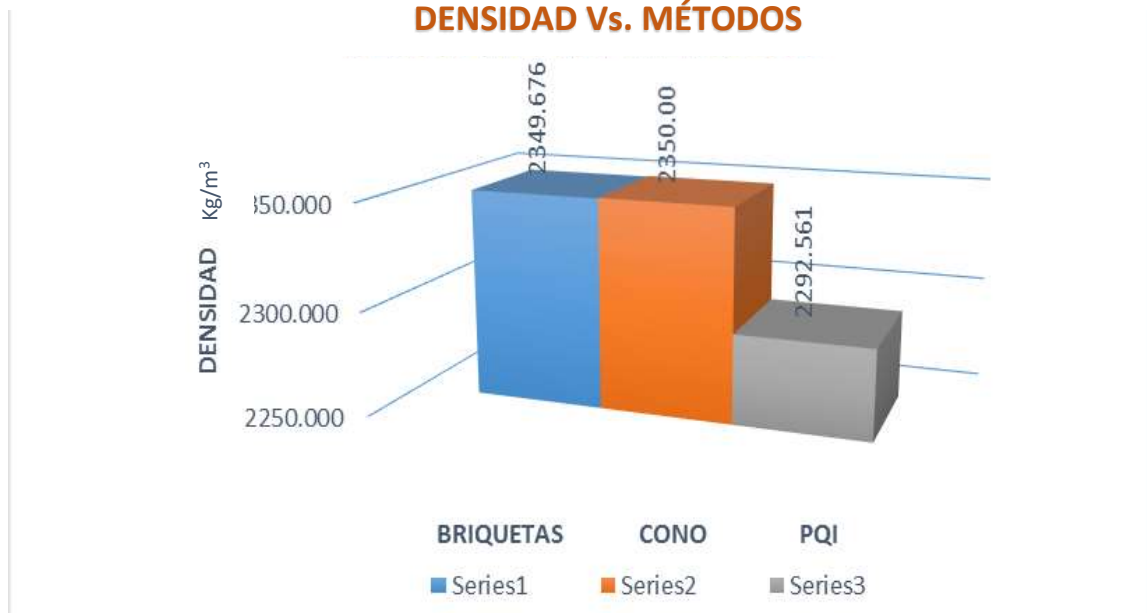


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.19. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación tres y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad sin embargo en este caso la densidad obtenida por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 4

GRÁFICA 3.20. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 4.

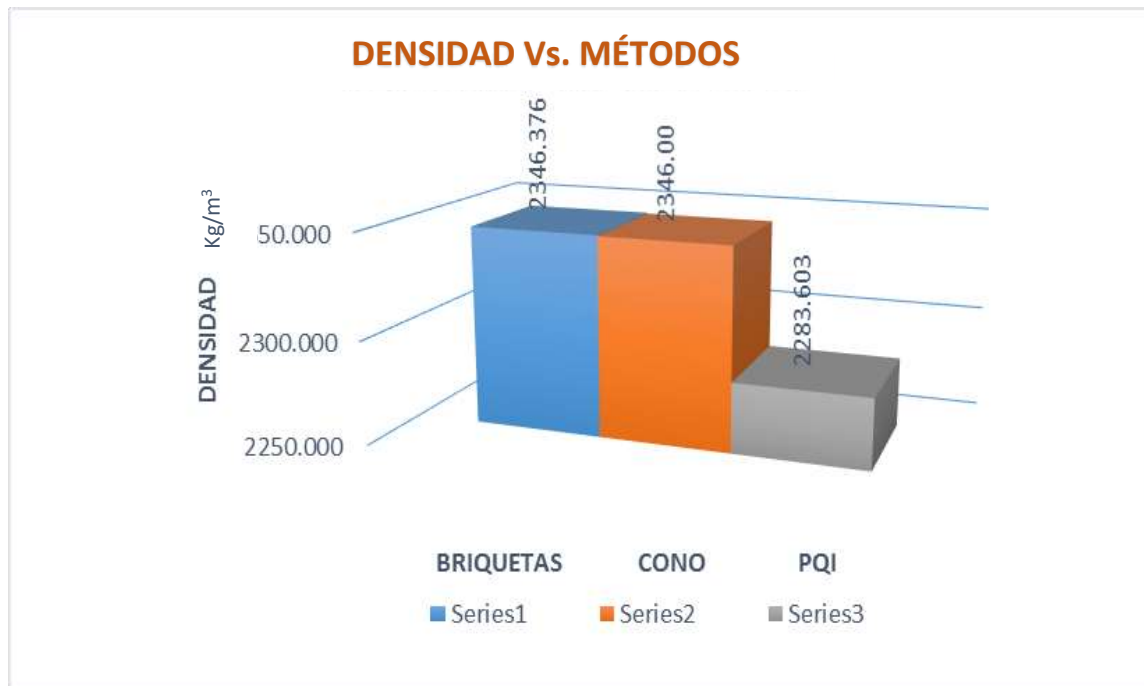


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.20. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación cuatro y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 5

GRÁFICA 3.21. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 5.

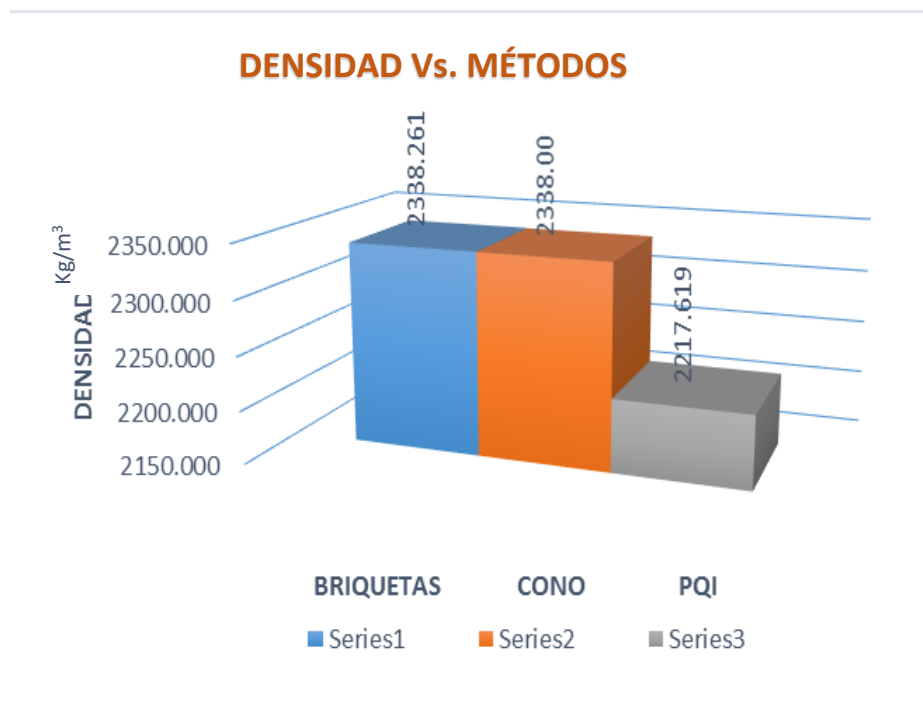


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.21. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación cinco y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 6

GRÁFICA 3.22. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 6.

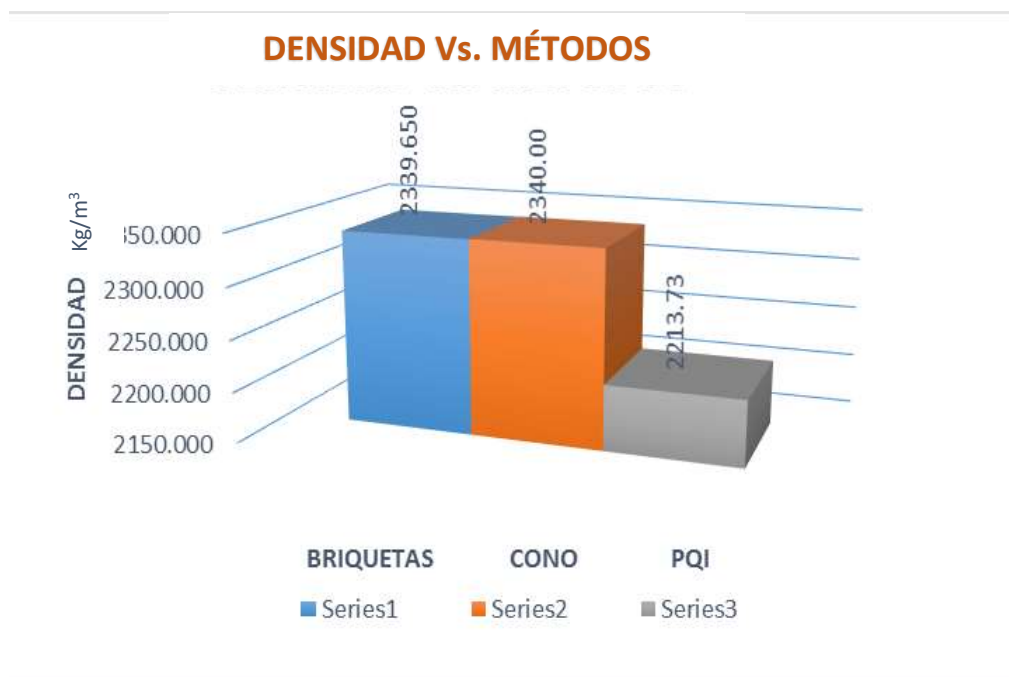


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.22. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación seis y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 7

GRÁFICA 3.23. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 7.

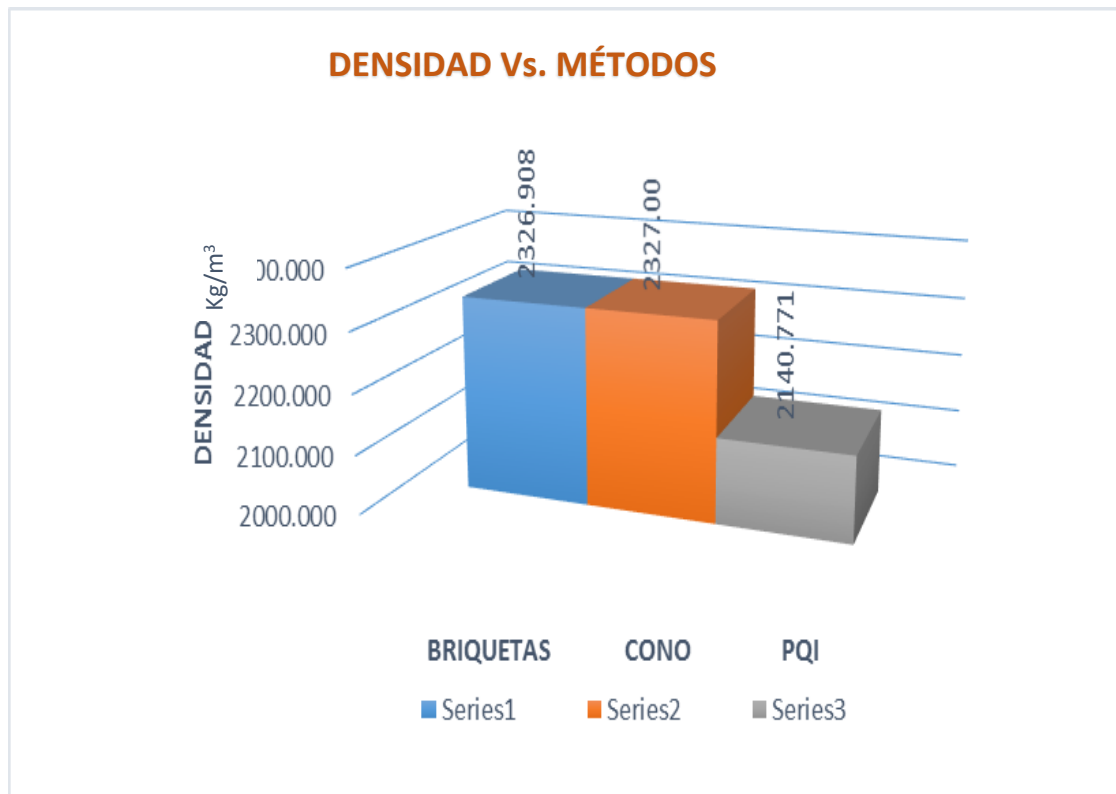


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.23. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación siete y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 8

GRÁFICA 3.24. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 8.

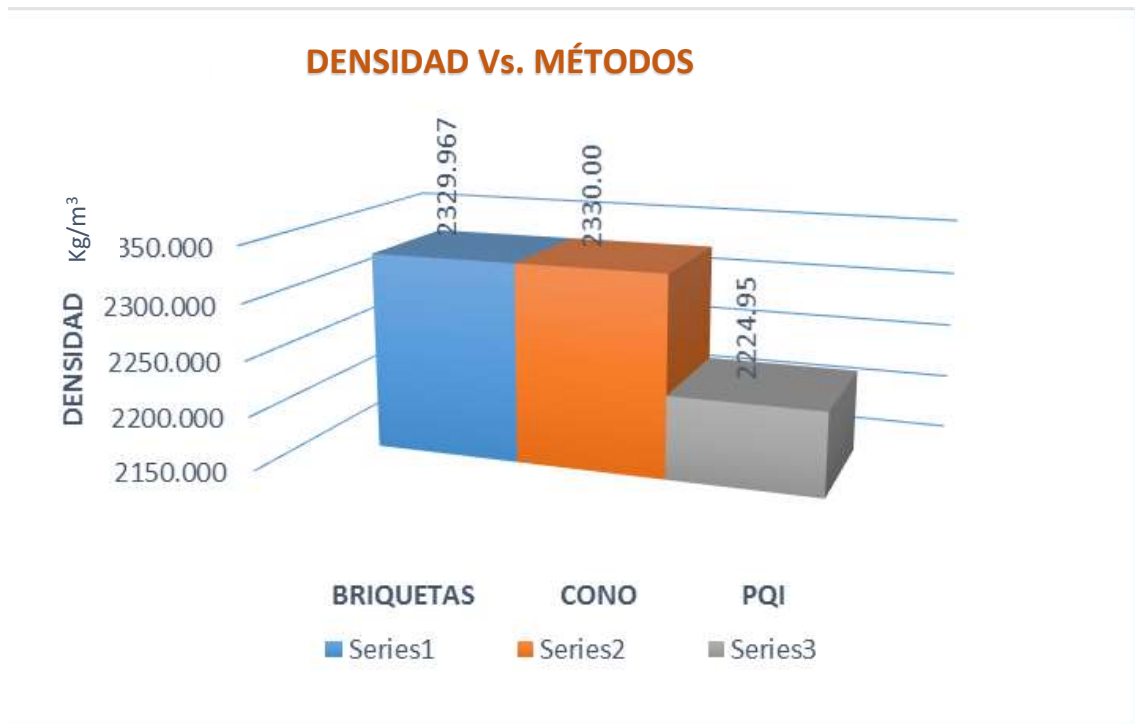


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.24. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación ocho y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 9

GRÁFICA 3.25. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 9.

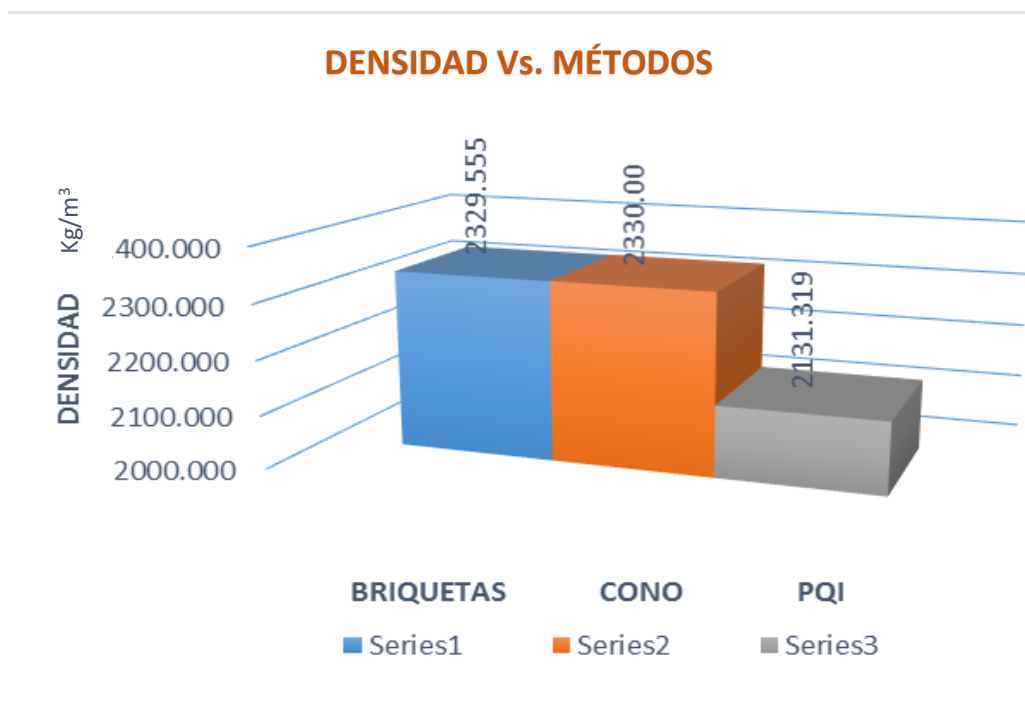


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.25. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación nueve y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 10

GRÁFICA 3.26. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 10.

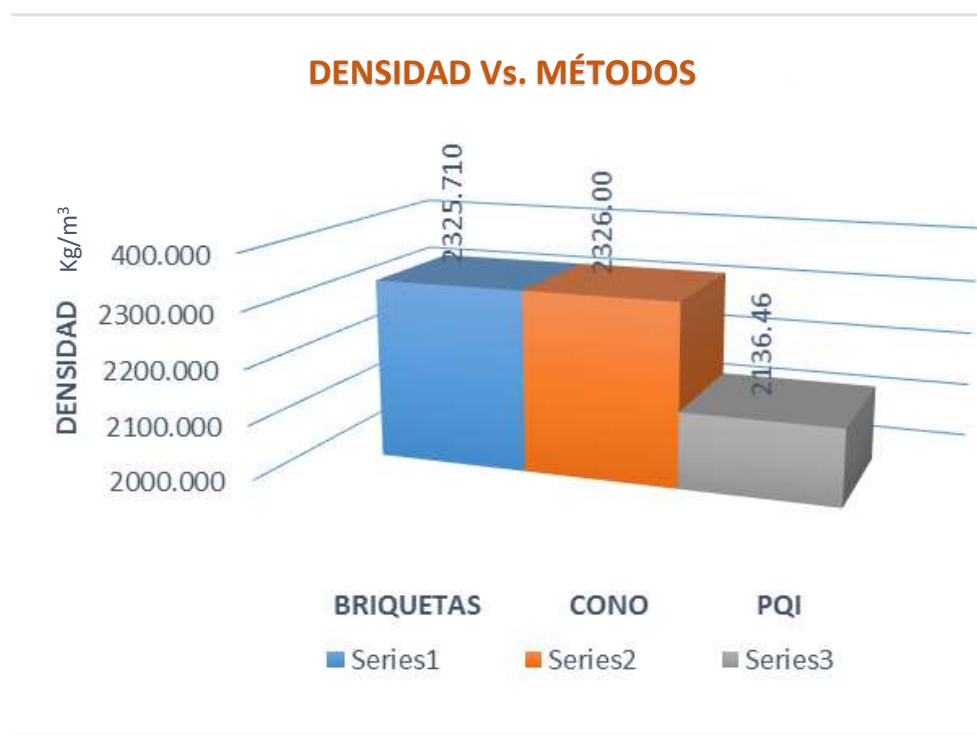


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.26. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación diez y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 11

GRÁFICA 3.27. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 11.

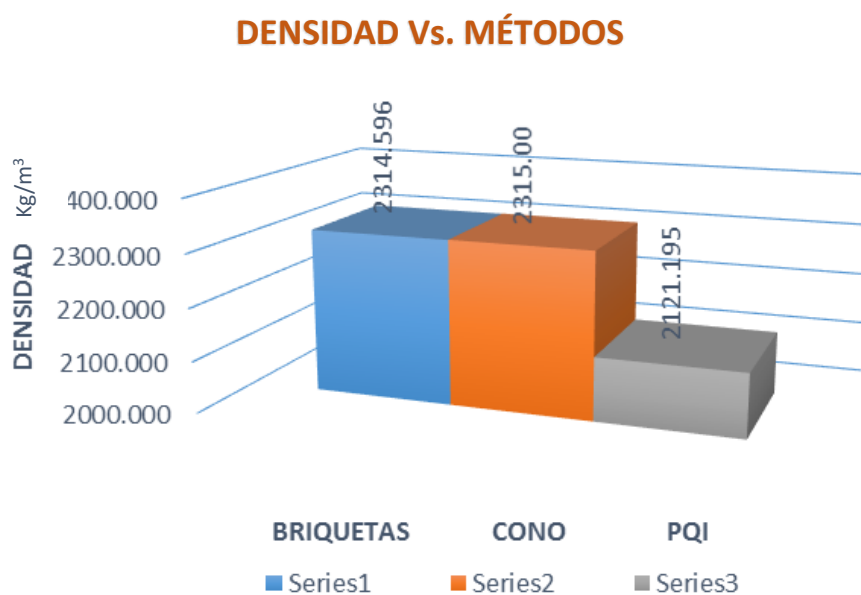


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.27. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación once y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 12

GRÁFICA 3.28. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 12.

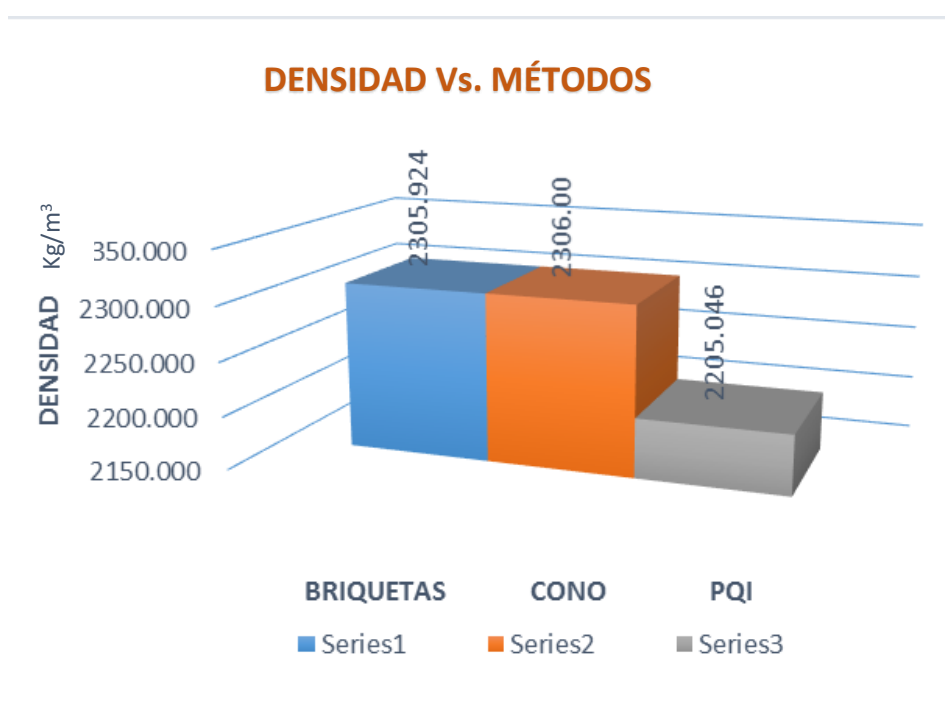


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.28. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación doce y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 13

GRÁFICA 3.29. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 13.

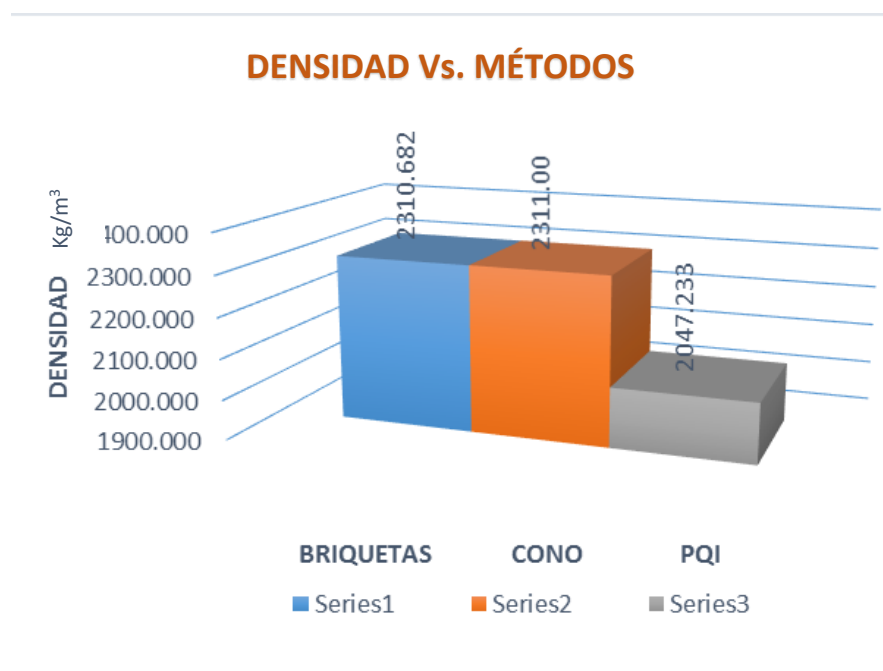


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.29. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación trece y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Punto de aplicación N° 14

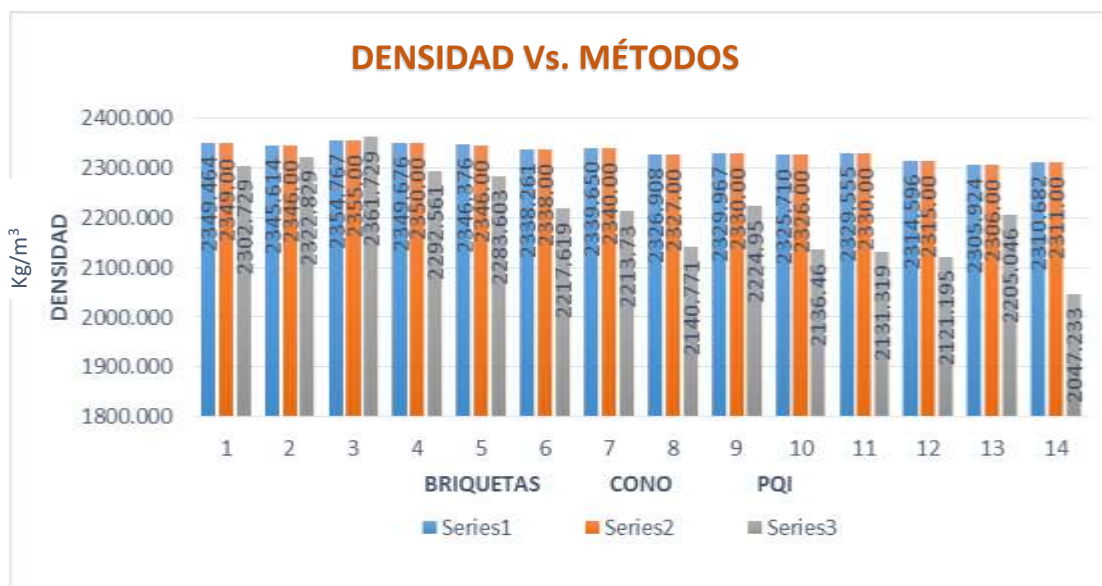
GRÁFICA 3.30. Comparación de la densidad obtenida por los tres métodos para el punto de aplicación 14.



En la gráfica 3.30. se presenta la comparación de la densidad por los diferentes métodos en el punto de aplicación catorce y se puede apreciar que la densidad obtenida a través del método de la briqueta y el cono de arena tienen bastante afinidad, mientras que el obtenido por el método del densímetro está por debajo del obtenido por las briquetas considerado como valor patrón.

- Gráfica resumen de todos los puntos de aplicación del tramo de la carretera en estudio.

GRÁFICA 3.31. Comparación de la densidad obtenida por los diferentes métodos.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3.31. se puede apreciar que todos los valores de las densidades obtenidas por los diferentes métodos en función a los puntos de aplicación, que las densidades obtenidas por el método de laboratorio, mediante la extracción de briquetas y el método del cono de arena tienen una mayor relación por alcanzar densidades semejantes, a diferencia de la densidad obtenida del densímetro PQI 380

3.5.2. Comparación de la densidad promedio obtenida por los tres métodos

En la tabla 3.23. se puede observar que la densidad obtenida por mediante el densímetro PQI 380 es la densidad que más lejos está de la densidad que tomamos como patrón, la densidad de laboratorio extraída de las briquetas, con una diferencia de 153.471 Kg./m³

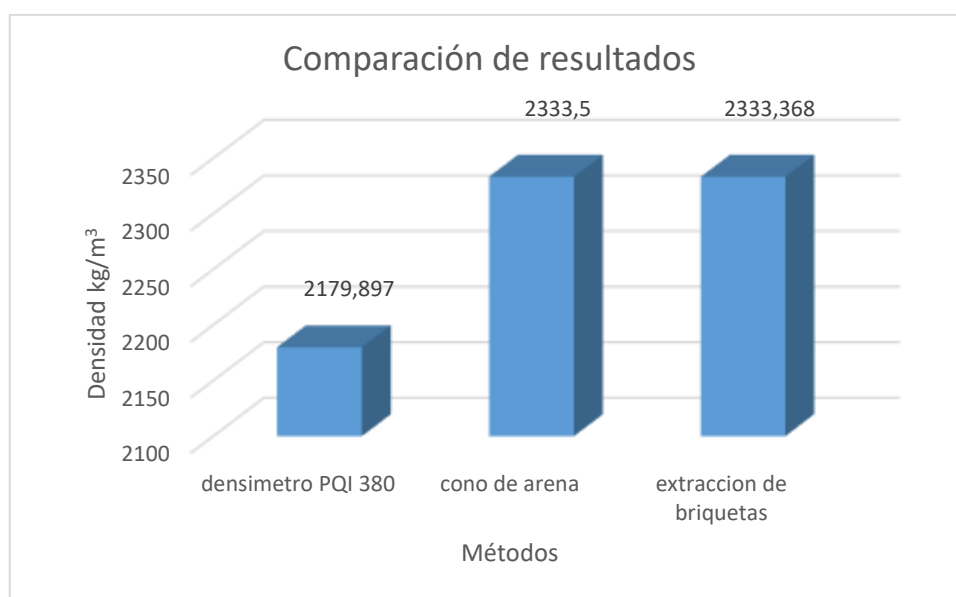
También se puede apreciar que a pesar de haber utilizado el cono de arena como método experimental en pavimentos asfálticos, éste nos dio resultados más aproximados a la densidad extraída de laboratorio, dando una diferencia de 0.132 Kg./m³

TABLA N° 3.9. Tabla de comparación de resultados

Método	Densidad (kg/m ³)
Densímetro PQI 380	2179.897
Cono de arena	2333.500
Extracción de briquetas	2333.368

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 3.32. Comparación de la densidad por los diferentes métodos



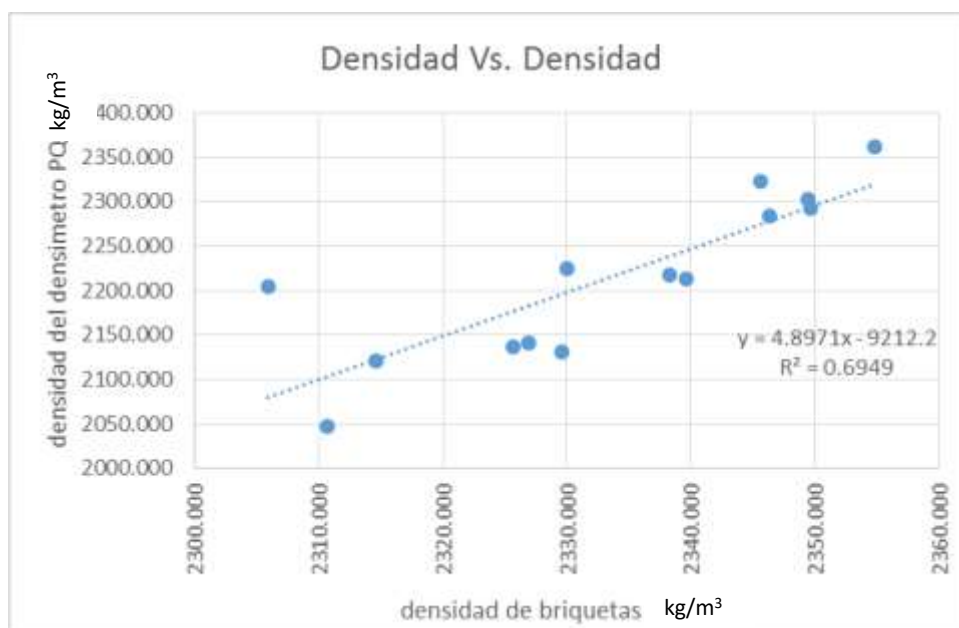
Fuente: Elaboración propia.

TABLA N° 3.10. Tabla de comparación de densidad de briquetas y densímetro

Densidad briquetas kg/m ³	Densidad PQI 380 kg/m ³
2349.464	2302.729
2345.614	2322.829
2354.767	2361.729
2349.676	2292.561
2346.376	2283.603
2338.261	2217.619
2339.650	2213.730
2326.908	2140.771
2329.967	2224.950
2325.710	2136.460
2329.555	2131.319
2314.596	2121.195
2305.924	2205.046
2310.682	2047.233

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 3.33. Comparación densidad estraida de las briquetas Vs. Densidad obtenida del densímetro.



Fuente: Elaboración propia.

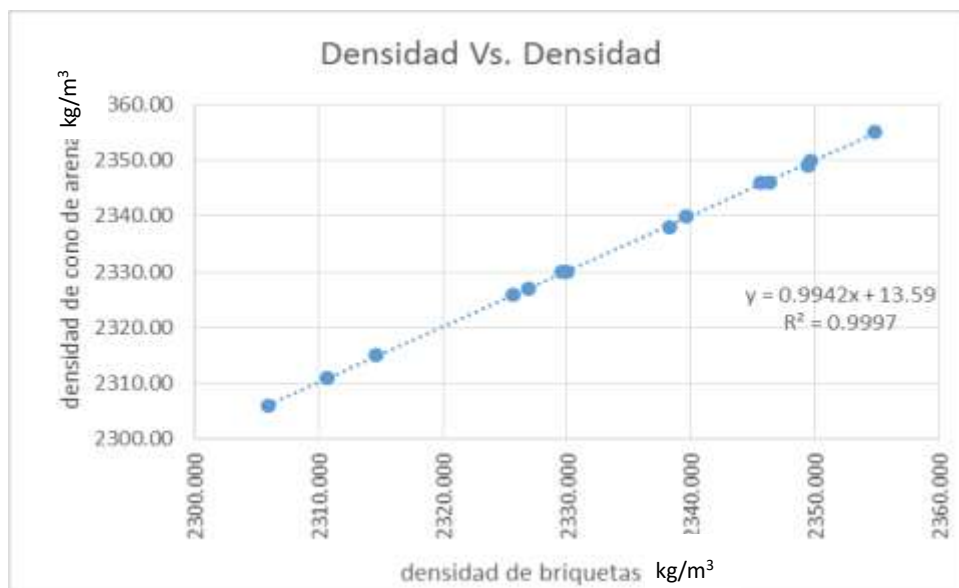
- En la gráfica 3.31. se puede observar la relación de dos variables dependientes la densidad obtenida de las briquetas y la densidad obtenida por el densímetro, obteniendo un valor de $R^2 = 0.6949$ (se encuentra por encima de 0.5 por lo que se lo considera normal) con una correlación lineal positiva de los resultados

TABLA N° 3.11. Tabla de comparación de densidad de briquetas y de cono de arena

Densidad briquetas kg/m ³	Densidad cono de arena kg/m ³
2349.464	2349.000
2345.614	2346.000
2354.767	2355.000
2349.676	2350.000
2346.376	2346.000
2338.261	2338.000
2339.650	2340.000
2326.908	2327.000
2329.967	2330.000
2325.710	2326.000
2329.555	2330.000
2314.596	2315.000
2305.924	2306.000
2310.682	2311.000

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 3.34. Comparación densidad estraida de las briquetas Vs. Densidad optenida de briqueta



Fuente: Elaboración propia.

- En la gráfica 3.34. se puede observar la relación de dos variables dependientes la densidad obtenida de las briquetas y la densidad obtenida por el cono de arena, obteniendo un valor de $R^2 = 0.99$ (se encuentra cerca de 1 por lo que se lo considera aceptable) con una correlación lineal positiva de los resultados.

4.1. CONCLUSIONES

- Después de haber analizado los resultados de densidades en el presente trabajo desarrollado, se concluye que las densidades obtenidas por el medidor de densidad in situ, densímetro PQI 380 tienen una aproximación del 93 % en relación a las densidades obtenidas por los métodos de extracción de briqueta y cono de arena.
- La ventaja de utilizar el densímetro PQI 380 para ensayos de densidad in situ es que éstos demandan menor tiempo que el obtenido en laboratorio y no causa daño a la carpeta asfáltica al ser un ensayo no invasivo.
- Los resultados obtenidos se compararon, con los diferentes métodos establecidos anteriormente y se puede apreciar que los valores de las densidades son análogos entre sí, dándonos resultados de 2179.897 kg/m³ con el densímetro PQI380, 2333.500 kg/m³ con el método del cono de arena y 2333.368 kg/m³ con el método de la extracción de briquetas.
- Se puede apreciar que la distribución de los puntos establecidos por las variables densidad y compactación tiene una fuerte correlación lineal positiva obteniendo un valor de $R^2 = 1$ dándonos un valor verdadero de nuestra hipótesis.
- Se comparó las densidades obtenidas por las briquetas como densidad patrón con la densidad del densímetro PQI380 se puede apreciar que tienen una correlación lineal positiva obteniendo un valor de $R^2 = 0.6949$, mientras que comparando la densidad patrón dada por la extracción de

briquetas con la obtenida a través del cono de arena se puede apreciar que se tiene una correlación lineal positiva, obteniendo un valor de $R^2 = 0.9997$.

- Se utilizó el modo de lectura promedio en los ensayos realizados con el equipo PQI 380, porque nos proporciona una lectura promedio de cinco puntos de aplicación dándonos mayor precisión.

4.2. RECOMENDACIONES

- Transportar y estandarizar el equipo PQI 380 dentro de la maleta de almacenamiento, cada vez que se desee cambiar de tramo y especificar las características de los puntos de aplicación dentro una nueva carpeta.
- Para futuras investigaciones, se recomienda aplicar este método de densidad in situ, por medio del densímetro a pavimentos nuevos o extendidos, para así poder ver la variación de la densidad y grado de compactación a diferentes temperaturas.
- Manipular cuidadosamente el equipo como indica la norma ASTM D7830/7830M-14, en especial la placa de estandarización que llega en la maleta de transporte, ya que si se llega a dañar la placa estabilizadora el equipo no tendría uso, porque la placa fue elaborada únicamente para el equipo.
- Usar el programa estadístico minitab manejando con el mayor criterio posible, porque es un programa de mayor precisión para datos que se ajustan a una distribución normal, además manejar los datos dentro del

programa en un formato correcto delimitado por punto y coma, ya q se debe llevar a un formato Excel para un mejor resultado.

- Ubicar el densímetro en campo, en una zona lo más estable y uniforme posible, ver que no haya movimiento del equipo debido a algunas partículas que hagan que el equipo se desestabilice.
- Prevenir toda clase de vibración cercana al sitio al momento de tomar una lectura con el densímetro, ya sea por el movimiento de una compactadora, vibradora que funcione cerca al equipo o por alguna movilidad cercana al ensayo que pueda influir en los resultados.
- En caso de falla o algún imprevisto que se tuviera con el equipo densímetro PQI 380, debe contactarse con la empresa proveedora en Bolivia a través de la página www.mertind.com porque son los directos responsables del funcionamiento de dicho equipo.