



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DETERMINACIÓN DE LA TASA DE INFILTRACIÓN DE LOS PAVIMENTOS DE ADOQUINES EN EL CASCO URBANO DE LA CIUDAD DE PIURA

Edwin Palacios-Elías

Piura, abril de 2016

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Palacios, E. (2016). *Determinación de la tasa de infiltración de los pavimentos de adoquines en el casco urbano de la ciudad de Piura* (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

U N I V E R S I D A D D E P I U R A

FACULTAD DE INGENIERIA



“Determinación de la tasa de infiltración de los pavimentos de adoquines en el casco urbano de la ciudad de Piura”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Bach. Edwin Enrique Palacios Elías

ASESORA: Mgtr. Ing. Gaby Ruiz Petrozzi

Piura, Abril de 2016

*A Dios;
por iluminar mi camino.
A mis Padres, Roger y Rossana;
por darme tanto amor durante todos los días de mi vida.
A mis hermanos, Roger y Yesenia y a mi novia, Anylu;
por su apoyo incondicional y comprensión.
A mis abuelos, Roger Emilio y Clodermina;
por ser un gran ejemplo de vida.*

Prólogo

Los pavimentos son estructuras compuestas por capas de diferentes materiales, que se construyen sobre un terreno natural, para que personas, animales y vehículos puedan transitar sobre ellos, en cualquier época del año, de manera segura, cómoda y económica.

Desde el punto de vista estructural, los pavimentos de adoquines intertrabados constituyen un caso intermedio entre los pavimentos rígidos y los flexibles, con respecto a estos últimos fundamentalmente en lo que se refiere a las propiedades de distribución de tensiones y desarrollo de deformaciones. Por ello la falla típica de los pavimentos de adoquines de hormigón intertrabados es la acumulación de deformaciones permanentes (ahuellamiento).

En la Universidad de Piura (UDEP), se han desarrollado varios trabajos de Tesis acerca del Diseño de Sub Drenajes de Pavimentos en la ciudad de Piura (Chuyes, 2005; Azabache, 2002). Sin embargo en ninguno de ellos se incluyen los pavimentos de adoquines. Con base en lo que se especifica en las diferentes normas; se evalúan como si fueran pavimentos flexibles, sólo que en vez de considerar la carpeta asfáltica, se debe considerar los bloques de concreto.

Es evidente que las condiciones de permeabilidad de cada capa de rodadura influyen significativamente en el paquete estructural del pavimento, determinando en algunos casos, su performance y durabilidad. Cuando se han propuesto los parámetros de diseño de los pavimentos de asfalto y de concreto, las especificaciones técnicas de los materiales del paquete estructural son diferentes, debido a que la tasa de infiltración que presentan es diferente. Esto es muy razonable. Sin embargo esto, que parece lógico, no se aplica en los pavimentos de adoquines, a pesar que presentan una tasa de infiltración mucho mayor que los pavimentos convencionales.

Existe una organización internacional compuesta por académicos, consultores y profesionales llamada SETP (Small Element Pavement Technologists), que promueve el uso de los pavimentos de adoquines. Esta organización, a través de su página web, ofrece abundante información acerca del uso de los pavimentos de adoquines, en lo que se refiere a las técnicas de construcción, equipos usados en la colocación de los bloques, etc.; pero tampoco aborda el tema del drenaje.

La valoración de la tasa de infiltración de los pavimentos de adoquines en el medio local permitiría explicar su desempeño en la ciudad y quizás proponer soluciones más precisas en el diseño del sub drenaje de este tipo de pavimentos.

Resumen

En la actualidad la mayor parte de los pavimentos adoquinados del casco urbano de la ciudad de Piura presentan asentamientos. Diferentes autores coinciden en que la causa principal de las fallas de este tipo de pavimento es la inadecuada selección del material de la capa de base, por lo que el diseño de los pavimentos de adoquines requiere una estructura de pavimentos distinta a la especificada para los pavimentos convencionales de asfalto y de concreto, debido a la mayor tasa de infiltración que presentan.

Con el permeámetro LCS se midió la tasa de infiltración in situ de los pavimentos adoquinados en cuatro zonas del casco urbano de la ciudad de Piura y se calculó la permeabilidad que debería tener el material de la capa de base para hacerse cargo de toda el agua que se infiltra a través de la superficie de rodadura.

Los resultados indican que el material de base requiere aproximadamente una permeabilidad de 527 cm/seg, mientras que lo que se especifica y se viene colocando en obra es un material con 0.042 cm/seg, por lo que se puede suponer que ésta es una de las causas de los asentamientos y hundimientos que presentan los pavimentos adoquinados de la ciudad de Piura.

Índice General

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1: Infiltración en los pavimentos de adoquines..... | 3 |
| 1.1 Introducción | 3 |
| 1.2 Comportamiento estructural y falla típica de los pavimentos de adoquines..... | 4 |
| 1.3 Infiltración y permeabilidad..... | 8 |
| 1.4 Influencia de las juntas y de los patrones de armado de los adoquines en la infiltración | 9 |
| 1.5 Factores que influyen en la permeabilidad de las bases de los pavimentos de adoquines..... | 12 |
| 1.5.1 Influencia de la composición del material..... | 143 |
| 1.5.2 Influencia de la estructura del material..... | 14 |
| 1.5.3 Influencia del grado de saturación del material..... | 155 |
| 1.5.4 Influencia de la relación de vacíos del material | 155 |
| 1.5.5 Influencia de la distribución de los tamaños de las partículas del material..... | 18 |
| | |
| Capítulo 2: Especificaciones de diseño estructural para pavimentos de adoquines según la norma técnica peruana C.E 010 de pavimentos urbanos..... | 23 |
| 2.1 Consideraciones para el diseño estructural | 23 |
| 2.1.1 Medio ambiente | 23 |
| 2.1.2 Tráfico | 24 |
| 2.1.3 Soporte de la sub-rasante..... | 25 |
| 2.2 Características de los diferentes materiales utilizados en la construcción de los pavimentos de adoquines..... | 27 |
| 2.2.1 Adoquines, bloquetas o bloques de concreto | 27 |
| 2.2.2 Arena utilizada en el sellado de las juntas en la superficie de rodadura | 31 |
| 2.2.3 Arena utilizada en la capa de soporte de los adoquines | 33 |
| 2.2.4 Capa de base granular en los pavimentos de adoquines..... | 35 |
| 2.3 Estimación de la capacidad permeable de las bases de los pavimentos adoquinados según los criterios de filtros de Huang. | 39 |

Capítulo 3: Medida de la tasa de infiltración in-situ que presentan los pavimentos de adoquines del casco urbano de la ciudad de Piura utilizando el permeámetro LCS...43

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Permeámetro LCS..... | 43 |
| 3.2 | Procedimiento de medida y toma de resultados | 44 |
| 3.3 | Medida de la infiltración de los pavimentos in situ..... | 46 |
| 3.3.1 | Selección de las zonas de estudio..... | 46 |
| 3.3.2 | Medida de la infiltración in situ | 51 |

Capítulo 4: Análisis de resultados.....55

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Caracterización de los pavimentados de adoquines medidos en campo | 55 |
| 4.1.1 | Efecto del ancho de la junta en la condición del pavimento | 56 |
| 4.1.2 | Efecto del bisel del adoquín en la condición del pavimento | 57 |
| 4.1.3 | Efecto del espesor del adoquín en la condición del pavimento..... | 58 |
| 4.2 | Análisis de los resultados de las tasas de infiltración de los pavimentos adoquinados medidos en campo | 59 |
| 4.3 | Cálculo de la permeabilidad de los materiales de base requeridos para las tasas de infiltración medidas en las zonas de estudio. | 62 |
| 4.4 | Cálculo de la permeabilidad de los materiales de base que recomienda la norma CE 010 de pavimentos urbanos | 65 |
| 4.5 | Permeabilidad de los materiales de base colocados en los pavimentos adoquinados del casco urbano de la ciudad de Piura. | 66 |
| 4.6 | Permeabilidad que presenta la sub rasante de los pavimentos adoquinados en cada una de las zonas de estudio | 66 |
| 4.7 | Comparación entre los valores de permeabilidad requeridos y los valores de permeabilidad reales de las capas del pavimento en cada una de las zonas de estudio. . | 67 |
| 4.8 | Medida de la tasa de infiltración en los pavimentos de asfalto y concreto. | 68 |

Conclusiones.....71

Bibliografía.....73

Anexo A: Curvas granulométricas del material de sub rasante de los suelos de las zonas de estudio

Anexo B: Curvas granulométricas de las gradaciones propuestas por la norma técnica peruana CE. 010 de pavimentos urbanos para materiales de bases granulares

Anexo C: Esquema del permeámetro de carga fija LCS usado para la medida de la tasa de infiltración in-situ

Anexo D: Valores de las tasas de infiltración medidas

Anexo E: Ensayo de permeabilidad de un afirmado usado como material de base en un pavimento adoquinado

Anexo F: Panel fotográfico

Introducción

Sañudo (2014) señala que los pavimentos adoquinados forman parte de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que se vienen utilizando en Europa fundamentalmente con el objetivo de evacuar en el menor tiempo posible las aguas presentes en la superficie de rodadura de los pavimentos. Sin embargo, esta evacuación se hace a través de la estructura del pavimento, no sobre ella, requiriendo de las capas de base y sub rasante unas ciertas condiciones de permeabilidad mínimas.

En Piura, la mayor cantidad de pavimentos adoquinados son empleados en vías locales, vías colectoras y en algunas arterias principales. De todas las vías donde se ha usado este tipo de pavimento se ha observado que la mayor cantidad de problemas de asentamiento se han presentado en las vías de uso local, donde a pesar de no estar expuestas a un gran número de aplicaciones de carga presentan ondulaciones en su superficie de rodadura. Por ello, se puede llegar a pensar que el problema no se debe únicamente a un inadecuado cálculo de la carga a la que va a estar expuesta la vía, sino también a la calidad y tipo de materiales con que se ha construido el paquete estructural del pavimento.

Los adoquines de concreto son una alternativa al asfalto y concreto tradicionales. Tienen la habilidad única de transferir y distribuir las cargas hacia las unidades vecinas, a través de una acción de trabajo en conjunto que ocurre entre las unidades. Las cargas del tráfico, pueden ser soportadas por estos elementos sencillos, sin requerir grandes espesores de concreto, y en algunos casos de refuerzo con acero.

La gran permeabilidad que tienen respecto a los pavimentos de asfalto y de concreto convencionales constituye una ventaja para evitar la acumulación del agua pluvial sobre el pavimento, pero también puede significar un problema para el buen funcionamiento del paquete estructural que se encuentra por debajo de los adoquines, lo que podría ser una de las causas de los hundimientos que son frecuentes en algunas zonas de los pavimentos del casco urbano de la ciudad de Piura.

Con esta tesis se busca cuantificar la tasa de infiltración que presenta la superficie de rodadura de los pavimentos adoquinados del casco urbano de la ciudad de Piura, de tal manera que se pueda establecer el valor de permeabilidad requerido para la capa de base y usarla como un parámetro de interpretación del desempeño de este tipo de pavimentos.

Esta tesis se ha desarrollado en cinco capítulos que se describen a continuación:

En el primer capítulo se introduce al comportamiento estructural y las causas de las fallas típicas de los pavimentos de adoquines producto de la infiltración del agua; así mismo, se detalla los diferentes factores que influyen en la infiltración del agua en la superficie de rodadura de estos pavimentos y los factores que influyen en la permeabilidad de los materiales de base.

El segundo capítulo trata de las diferentes características que deben cumplir los materiales que se usarán como base en estos tipos de pavimentos, de tal manera que sean los suficientemente permeables y puedan permitir el libre paso del agua sin afectar su estructura interna. Así mismo se puntualiza las diferentes especificaciones de diseño que nos presenta la Norma Técnica Peruana CE 010 acerca de los Pavimentos Urbanos.

En el tercer capítulo se detallan las características, procedimiento de medición con el permeámetro LCS, y los sectores del casco urbano de la ciudad de Piura muestreados.

En el cuarto capítulo se realiza el cálculo de la permeabilidad requerido para el material de base a partir de la tasa de infiltración medida y se discutirá sobre los materiales que se vienen usando en la actualidad y con los que recomienda la norma. Se incluye en el presente capítulo una descripción de las vías medidas para identificar cómo influyen las características de los pavimentos en la tasa de infiltración medida.

Finalmente, se ofrecen las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó después de haber realizado las pruebas de campo y los cálculos correspondientes.

Capítulo 1

Infiltración en los pavimentos de adoquines

1.1 Introducción

Los pavimentos de adoquines son aquellos cuya capa de rodadura está conformada por adoquines o bloques de concreto, colocados sobre una capa de arena y con un sello de arena entre sus juntas. De la misma manera que los pavimentos de asfalto, pueden tener una base, o una base con una sub-base, que pueden presentar espesores menores.

Este tipo de pavimento, es una vieja idea de los pavimentos de piedras traída al presente, pero con el uso de un material diferente: los bloques de concreto, lo que supone diferencias significativas en relación a los pavimentos de piedra o los de arcilla cocida del pasado.

Los pavimentos de adoquines están compuestos, casi siempre, por tres capas: la capa de rodadura (los adoquines), la capa o cama de arena de asiento, que generalmente es arena suelta, gruesa y limpia, la cual no se compacta antes de colocar los adoquines y la capa de base. Todas son importantes ya que los adoquines sin base terminarían por hundirse en el terreno y la base sin los adoquines se deteriora muy rápido ya que no tiene la resistencia suficiente para soportar las cargas de tránsito bajo las cuales va a estar sometida. En la figura 1.1 se muestran las diferentes capas que constituyen un pavimento de adoquines.

Los espesores de las capas dependen del tránsito que va a soportar el pavimento, de la dureza del suelo y de los materiales con que se van a construir estas capas; estas capas deben tener la suficiente resistencia para que el pavimento soporte el peso del tránsito, durante un tiempo determinado, sin deformarse ni deteriorarse. Estos pavimentos tienen un rango de aplicación casi tan amplio como el de los otros tipos de pavimentos convencionales (pavimentos de asfalto y de concreto).

La capa de rodadura, constituida por los bloques de adoquines, es una capa muy permeable, debido a que los adoquines son elementos macizos, prefabricados, de espesores uniformes e iguales entre sí, que por su forma de prisma recto, facilita el encaje de unos con otros al colocarlos sobre una superficie plana, de manera que solamente queden juntas entre ellos, originando que el agua se pueda infiltrar con una mayor facilidad que en los otros tipos de pavimentos. Es por esto que, es importante seleccionar adecuadamente los materiales a utilizar en cada una de las capas que conformarán el pavimento, para evitar

hundimientos o fallas por saturación de las capas que se encuentran por debajo de los adoquines.

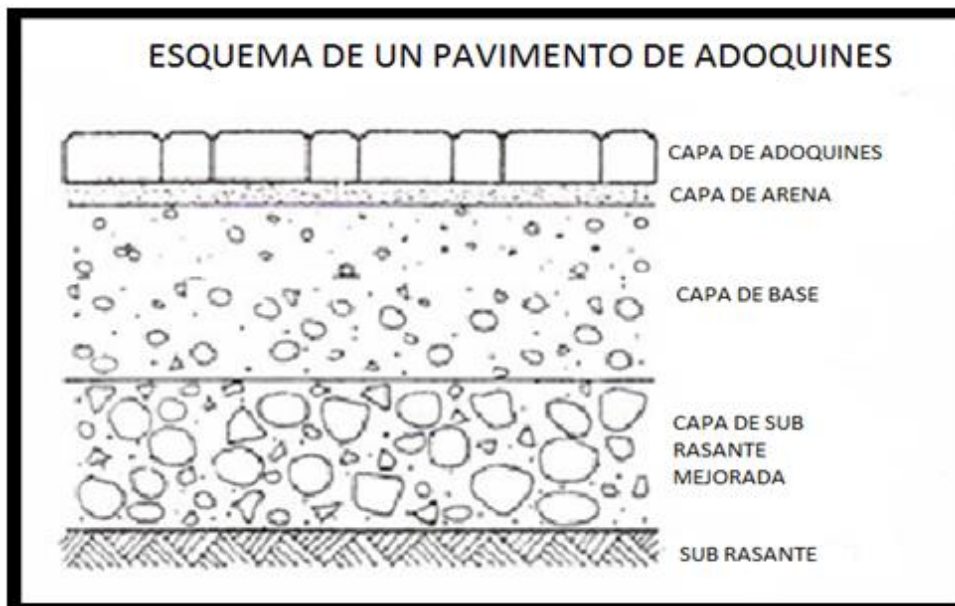


Fig. 1.1. Esquema de las capas de un pavimento de adoquines.
(Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

1.2 Comportamiento estructural y falla típica de los pavimentos de adoquines

La superficie de rodadura de estos pavimentos está conformada por bloques de concreto que se colocan en yuxtaposición, adosados y, que debido al contacto lateral, a través de la arena de sellado, permiten una transferencia de cargas por fricción desde el elemento que la recibe hacia todos sus adyacentes, trabajando solidariamente y con la posibilidad de desmontaje individual.

Según la Norma Técnica C.E 010 del Reglamento Nacional de Edificaciones acerca de Pavimentos Urbanos, este tipo de pavimento se comporta elásticamente como un pavimento flexible gozando simultáneamente de las cualidades que le ofrecen los bloques de concreto. Desde el punto de vista estructural, los pavimentos de adoquines constituyen un caso intermedio entre los pavimentos rígidos y los pavimentos flexibles; con respecto a estos últimos, fundamentalmente en lo que se refiere a las propiedades de distribución de tensiones y desarrollo de deformaciones. Por ello, la falla típica de los pavimentos de adoquines de concreto intertrabados es la acumulación de deformaciones permanentes o también llamadas ahuellamientos.

La capa de adoquines y su capa de asiento de arena, al recibir la carga de los vehículos, la transmiten prácticamente igual a la capa siguiente, que es la capa de base. Investigaciones de campo y de laboratorio realizadas por Moncayo (1995), indican que las capas de adoquín – cama de asiento, absorben una carga mínima de los vehículos. Por lo tanto, se considera que el “adoquín - cama de asiento” funciona como una carpeta especial, cuya función es principalmente la de transmitir cargas y no de absorber presiones, por lo que la capa de base y sub base deben diseñarse como en los pavimentos flexibles.

La preparación de la base y sub-base se realiza de la misma forma que para los otros tipos de pavimentos convencionales. La sub-base y/o base tienen por objeto absorber las presiones que reciben de las capas superficiales y transmitir las uniformemente al terreno de fundación.

Del mismo modo, los pavimentos de adoquines precisan de un elemento (cordón cuneta o simplemente cordón) que los confine lateralmente con el fin de evitar los desplazamientos de los adoquines, aberturas excesivas de las juntas o pérdidas de trabazón entre ellos. En la figura 1.2, se puede apreciar la sección transversal típica, donde se muestran estas restricciones de borde comúnmente llamados sardineles.

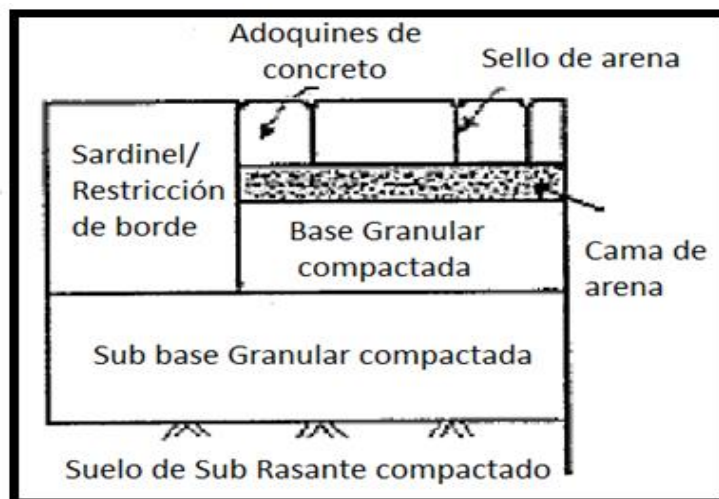


Fig. 1.2. Sección transversal típica de los pavimentos de adoquines. (Norma Técnica C.E. 010 de Pavimentos Urbanos)

Las cargas dinámicas originadas por los vehículos en movimiento actúan simultáneamente en dos direcciones (fig. 1.3):

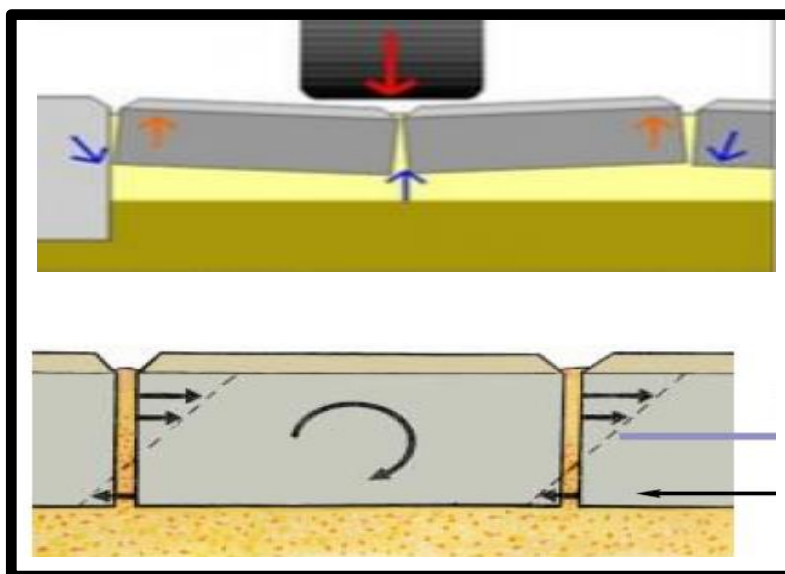


Fig. 1.3. Esquema de cargas dinámicas que actúan en un pavimento adoquinado. (Página web: SETP – Small Element Pavement Technologists)

- Vertical: esfuerzos que se transmiten directamente a las capas inferiores del firme.
- Horizontal: esfuerzos tangenciales que producen un movimiento de rotación en el adoquín transmitiéndose lateralmente a los adoquines contiguos.

Para aumentar la estabilidad de la superficie de adoquines es preciso colocarlos en una cierta disposición respecto a la dirección del tráfico. La trabazón óptima se logra con una disposición de los adoquines a 90° en diagonal respecto a la dirección del tráfico. De esta manera los esfuerzos horizontales se minimizan repartiéndose entre las cuatro caras de los adoquines. Respecto al espesor de los adoquines, se recomienda un espesor nominal mínimo de 80 mm, dado que cuanto mayor sea el espesor del adoquín, más estable y duradero será el pavimento sometido al tráfico. Esto se debe a que un mayor espesor supone mayor superficie de contacto lateral y una menor concentración de esfuerzos.

Como se mencionó líneas arriba, el principal problema de los pavimentos de adoquines es la acumulación de deformaciones permanentes, lo cual origina que se produzcan asentamientos o hundimientos. Diferentes autores (Moncayo, 1980; Gallegos, 1987), coinciden en que la causa principal de estos asentamientos es una inadecuada selección del material para la base, considerando que los pavimentos de adoquines son pavimentos permeables que facilitan la infiltración del agua.

Los intersticios entre los bloques ocupan un bajo porcentaje del área del pavimento, por lo que permiten un uso cómodo por parte de peatones y automóviles. Sin embargo, la capacidad de infiltración de aguas de lluvia que presentan es suficiente para hacerse cargo de toda lluvia que se precipite sobre él; incluso, puede infiltrar las aguas de lluvia presentadas en otras superficies.

En la figura 1.4 se muestra como el agua que llega a la superficie de rodadura de los pavimentos adoquinados se puede evacuar de dos formas: la primera, a través de los sistemas de drenaje superficial que presenta el pavimento como son canaletas, cunetas, sistema de drenaje francés, etc. y la segunda a través de la infiltración por las diferentes capas del paquete estructural, para lo cual la permeabilidad de la cama de arena, de la capa de base y la capa de sub base deben ser mayores que la tasa de infiltración que presenta la superficie de rodadura. En caso contrario, se originaría la saturación de las capas del pavimento produciendo una disminución de esfuerzos efectivos y posibles hundimientos o asentamientos en el pavimento.

Por ello, si se llegase a colocar estos adoquines sobre una capa de base con un alto contenido de finos, como son los limos y arcillas, se produciría la saturación de la capa de base. Cuando un suelo de baja permeabilidad se encuentra saturado y sometido a un esfuerzo externo adicional, se produce en él un aumento de su presión de poros o también llamada presión de vacíos o presión intersticial, ocasionando que el esfuerzo efectivo que se desarrolla debido al contacto entre las diferentes partículas del suelo disminuya. Este esfuerzo efectivo depende de que los granos del suelo sean pocos compresibles y que el área de contacto entre ellos sea pequeña. Al disminuir los esfuerzos efectivos entre las partículas, se produce una pérdida de la capacidad portante del suelo, debido a que se pierde el contacto entre las diferentes partículas del suelo, facilitando los hundimientos.

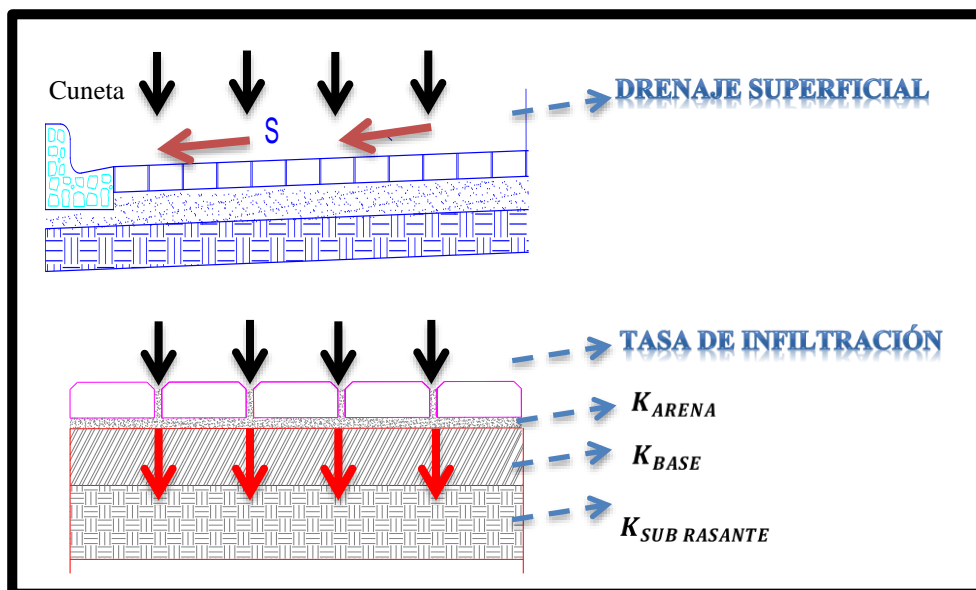


Fig. 1.4. Formas de evacuación del agua en la superficie de los pavimentos adoquinados.
(Fuente: Elaboración propia)

En la figura 1.5 se puede observar una idealización de las partículas sólidas y de los intersticios que conforman la estructura del suelo y como el agua se infiltra a través de ellos. La disminución de la capacidad portante del suelo también se debe a que el agua sólo es capaz de transmitir esfuerzos normales y no esfuerzos cortantes, es decir no es compresible y, por consiguiente, transmite la presión directamente; por lo que se produce una disminución de la resistencia al corte del terreno.

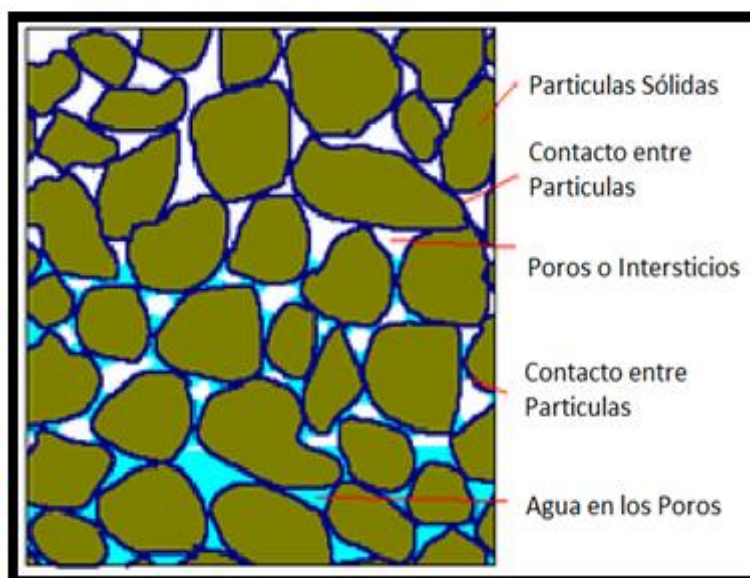


Fig. 1.5. Idealización de las partículas y poros que conforman la estructura de un suelo.
(Fuente: Mecánica de Suelos. Marín, Luis. 1991)

Ante las diferentes solicitaciones de carga bajo las cuales estará sometida la vía se producirán los asentamientos y/o hundimientos de toda la estructura del pavimento. Se puede concluir por tanto, que los materiales que se colocarán como base, cama de arena y sub base (en caso sea necesaria) del pavimento de adoquines deben ser lo suficientemente permeables para que permitan el libre paso del agua sin que se altere su estructura interna,

o en todo caso, ser estables ante el efecto de saturación, es decir que no pierda capacidad resistente al saturarse.

1.3 Infiltración y permeabilidad

El movimiento del agua y de otros líquidos en el suelo se realiza a través de sus vacíos que se encuentran interconectados entre sí, por los cuales el agua fluye de puntos de alta energía a puntos de baja energía.

El concepto de infiltración se refiere al movimiento del agua a través de la superficie interior del suelo. Este flujo de agua no es uniforme sobre toda el área perpendicular al flujo, es decir los componentes horizontal y vertical de la velocidad varían de punto a otro en la sección transversal de la masa del suelo.

Braja (1985), define la infiltración como un parámetro físico que permite cuantificar la cantidad de lámina de agua que está penetrando por los espacios porosos del suelo, en un tiempo determinado. Los suelos de texturas gruesas tendrán tasas de infiltración más altas que los suelos de texturas finas, ya que la presencia de poros de mayor tamaño permite un mayor caudal de entrada del agua en el suelo. Además, cuando un suelo tiene menor contenido de humedad, mayor es su tasa de infiltración ya que existe mayor cantidad de espacios libres.

Para el cálculo de la cantidad de infiltración en un suelo así como para determinar las presiones de infiltración se utilizan gráficas llamadas redes de flujo, basadas en la ecuación de continuidad de Laplace. Estas gráficas describen dos series de curvas ortogonales entre sí: las líneas equipotenciales, que representan una carga constante y las líneas de corriente, que representan cantidades de flujo constantes.

Braja (1985), también diferencia la infiltración de la permeabilidad. Para él, la permeabilidad del suelo es una medida inversa a la infiltración y es cuantificada mediante el parámetro de la conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica permite medir la posibilidad del agua de moverse dentro del suelo. De esta forma, se encontrarán mayores valores de conductividad hidráulica cuando el suelo está saturado (todos los espacios porosos llenos de agua) y muy baja cuando los espacios porosos están libres. Esto se debe a que en un suelo saturado, sus granos ya han absorbido toda el agua que pueden, por ende el agua que sigue ingresando fluye con mayor facilidad.

Otros autores, como Whitlow (1994), definen la permeabilidad como la propiedad que presenta el suelo para permitir el paso del agua a través de él, sin que dicho tránsito altere su estructura interna. Dicha propiedad se determina objetivamente mediante la imposición de un gradiente hidráulico en una sección del cuerpo y a lo largo de una trayectoria determinada. Se dice que un suelo es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de agua en un tiempo determinado e impermeable si la cantidad de agua es despreciable.

La permeabilidad se cuantifica en base al coeficiente de permeabilidad, definido como la velocidad de traslación del agua en el seno del terreno y para un gradiente unitario. El valor de este coeficiente se usa como una medida de la resistencia al flujo ofrecida por el suelo.

Lo que se espera en las diferentes capas que conforman los pavimentos es que el agua no se pueda infiltrar a través de ellas, porque esto les haría perder su capacidad portante y generar futuros problemas de hundimientos y/o asentamientos. Por eso, se deben construir adecuados sistemas de drenaje, como son: los sistemas de canaletas, sistemas de drenaje francés, etc. para poder evacuar las aguas antes de que lleguen a las capas del pavimento o hacer las superficies de rodadura lo más impermeables posible.

Sin embargo, cuando se trata de pavimentos de adoquines intertrabados resulta imposible tener una capa de rodadura impermeable debido a las juntas que quedan entre los diferentes bloques de adoquines, por lo que desde el punto de vista de la capacidad de drenaje, lo que se busca en las diferentes capas que conforman los pavimentos de adoquines, es que permitan el libre paso del agua que se infiltra a través de la capa de rodadura, para evitar que se saturen y se pierda la fricción entre los diferentes granos del suelo, que es lo que determina su capacidad portante.

En los pavimentos, la mayor cantidad de agua a la que están sometidos es producto de las precipitaciones pluviales que originan un flujo de agua unidireccional, por lo que al hablar de infiltración en pavimentos se estaría hablando también de permeabilidad.

1.4 Influencia de las juntas y de los patrones de armado de los adoquines en la infiltración

Los adoquines de concreto se colocan siguiendo un patrón de colocación, que es la manera como van puestos, unos al lado de otros; y con un alineamiento, que es la posición del patrón con respecto al eje de la vía.

La colocación de los primeros adoquines demanda cuidado especial con el propósito de que los ángulos y direcciones que allí se inician sean los adecuados y se pueda seguir el patrón escogido. Fuera de ese cuidado inicial, ningún otro procedimiento de medición, ajuste o espaciamiento es necesario.

Para la instalación de los adoquines no se emplea ni regla ni cordel. El procedimiento consiste en irlos colocando de uno en uno y con una sola mano, de manera que queden juntos. No se les debe ajustar ni tampoco espaciar más allá de lo que resulte de su simple y natural colocación. Procediendo de este modo se conseguirá, como consecuencia de la uniformidad de los adoquines, que exista una separación mínima entre ellos, la cual si bien no tendrá una dimensión constante, cumplirá con el objetivo de permitir luego, el ingreso de la arena en las juntas.

Es importante recalcar que no se debe ajustar los adoquines ni con la mano ni con herramientas, porque el trabado correcto sólo se logra mediante la arena que penetra en las juntas y no por contacto directo entre los adoquines. Si estos se ajustan, impidiéndose el ingreso de la arena, se pueden romper al poner en servicio el pavimento.

El patrón de armado escogido en sí, no tiene mayor influencia en la resistencia que debe alcanzar el pavimento, ya que la transmisión de cargas entre los bloques y la trabazón de los mismos se realiza por rozamiento, a través de la arena fina que se colocará dentro de las juntas y cualquiera sea el entramado usado, deberá tener juntas entre sus bloques.

La existencia de juntas con espesores consistentes a lo largo de la superficie de rodadura ayuda a que las cargas se distribuyan de manera uniforme. Las juntas pequeñas (estrechas, con arena dentro de ellas), distribuirán mejor las cargas que las grandes (anchas). Por esta razón es importante que las juntas entre los bloques queden lo más cerradas posibles, para que haya un buen funcionamiento del pavimento, sea lo más impermeable que se pueda y lo ataque menos el agua de lluvia. Lo anterior equivale a colocar los adoquines a tope, sin dejar, a propósito, una junta abierta.

Por las irregularidades de los adoquines y de la colocación, se genera una junta que en promedio debe tener 2.5 mm y que nunca debe ser mayor a 5 mm (medio centímetro), en cuyo caso se debe cerrar con la ayuda de un martillo de caucho.

Las juntas entre los bloques constituyen un elemento estructural completamente necesario para el buen funcionamiento de los pavimentos de adoquines, por lo que a pesar que hay diferentes patrones de armado para las diversas formas de los bloques de concreto que existen en el mercado, es inevitable dejar juntas entre ellos, por lo que es casi imposible evitar la percolación del flujo de agua a través de la superficie de rodadura de estos tipos de pavimentos.

Lo que sí se puede es controlar la infiltración del agua a través de la superficie de los adoquines lo cual se logra controlando la textura de la superficie de los bloques, de tal manera que sean lo más impermeables que se pueda, esto se logra utilizando adoquines con una superficie de textura fina.

Los tipos de armados o patrones más usados para los adoquines rectangulares, que son los más prácticos por su facilidad en la fabricación y en la colocación, son en “espina de pescado”, en “hiladas trabadas” y en “tejido de canasto”. En la figura 1.6 se puede observar los diferentes patrones de armado más comunes de los bloques de adoquines rectangulares.

Para el tránsito vehicular, sólo se pueden colocar en “espina de pescado” o en “hiladas trabadas”, atravesadas a la dirección de la circulación de los vehículos, es decir sin dejar juntas continuas en el sentido de la circulación, porque se originaría una disminución de la resistencia al desplazamiento horizontal que podría producir el giro, frenado y aceleración de las llantas de los vehículos, por lo cual hay que buscar que no queden alineadas con el eje de la vía, o con el sentido del mayor tráfico.

Asimismo hay patrones que sólo se pueden usar para el paso del tránsito peatonal como es el caso de la colocación en hileras y el patrón tipo *parquet*, debido a que las juntas que resultan de la colocación de los adoquines son continuas, por lo que estos aparejos se suelen emplear para fines decorativos en pasajes, parques y veredas.

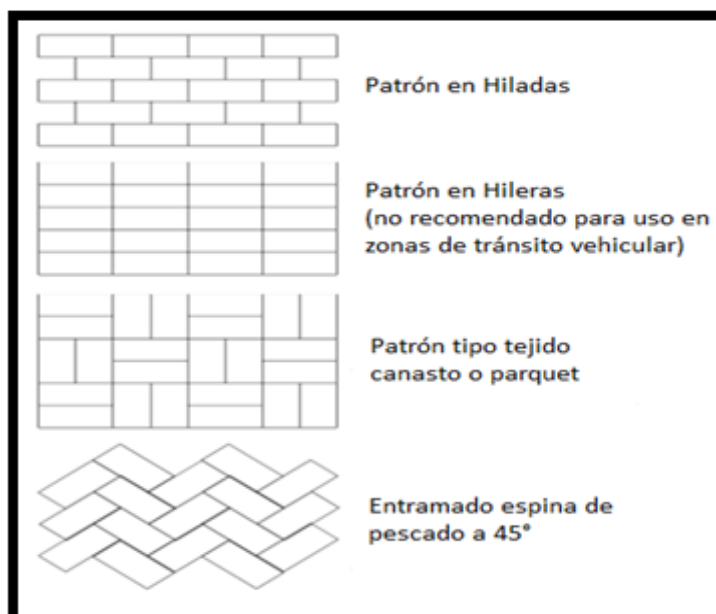


Fig. 1.6. Patrones de armado más comunes de los bloques rectangulares de concreto.
(Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

A pesar que los adoquines rectangulares son los más usados en Piura, también existen pavimentos donde se utilizan los adoquines en forma de “I”, los cuales pueden ser tomados con una sola mano pero que debido a su forma, no se pueden colocar en patrón de espina de pescado. Estos se colocan en hiladas trabadas tratando que las juntas queden atravesadas con respecto a la dirección de circulación de los vehículos.

También existen adoquines que, por su peso y su tamaño no pueden ser tomados con una sola mano y sólo se pueden colocar en hiladas. También se debe tratar que las hiladas queden atravesadas respecto a la dirección de circulación de los vehículos. Este tipo de adoquines son llamados adoquines en forma de cruz o trébol. En la figura 1.7 y 1.8 se muestran los diferentes tipos de armado que pueden darse utilizando los adoquines en forma de “I” y los adoquines en forma de cruz respectivamente.

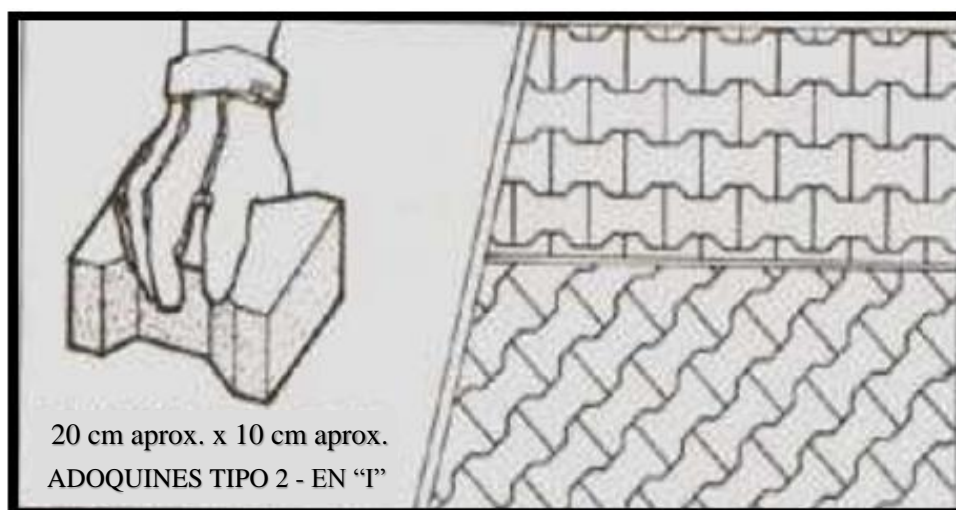


Fig. 1.7. Patrones de armado de los adoquines en forma de “I”.
(Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

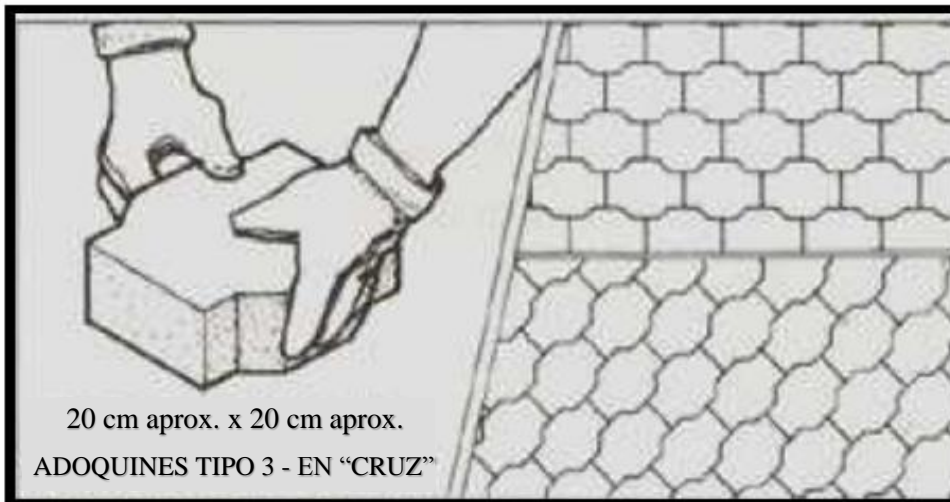


Fig. 1.8. Patrones de armado de los adoquines en forma de cruz.
(Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

Como la principal fuente de agua que se infiltra a través de la superficie de rodadura de estos pavimentos es producto de las precipitaciones pluviales, se puede suponer que la cantidad de agua infiltrada depende, en gran medida, del espesor de las juntas y de la longitud de juntas según el patrón de armado que se les ha dado a los adoquines.

1.5 Factores que influyen en la permeabilidad de las bases de los pavimentos de adoquines.

Los poros o canales presentes en un material de base, son tan delgados, sinuosos e irregulares en su sección transversal y complejos en su intersección y subdivisión, de manera que el análisis del flujo a través de todos los poros individuales no sería posible. Sin embargo, en aquellos problemas de ingeniería que involucran la absorción del agua a través del suelo, el flujo que ocurre en cada poro no es de interés. Por el contrario, el flujo que se desea conocer es el flujo combinado a través de todos los poros de un elemento cuyo volumen sea suficientemente grande para dar una representación típica de toda la masa de suelo que se trate. En la figura 1.9 se puede observar la forma como circula el agua dentro de un material de base.

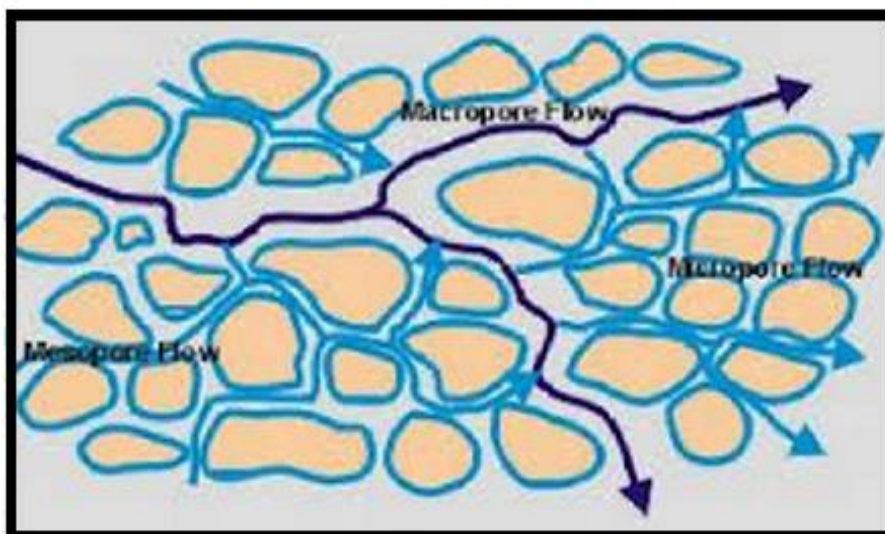


Fig. 1.9. Representación de los canales sinuosos e irregulares que forman los vacíos o poros de un material de base (Fuente: Lambe, 1972).

La permeabilidad que tendrá un material de base dependerá de muchos factores, entre los que se consideran: aquellos que tiene que ver con las características del fluido (agua), como son su viscosidad, peso específico y polaridad; y los que tienen que ver con la estructura del material de base, tanto la microestructura o disposición de las partículas como la macroestructura, estratificación, etc.

Badillo (1974) y Lambe (1972), concuerdan que los principales factores inherentes al material que influyen en su permeabilidad son: su composición, estructura, grado de saturación, relación de vacíos y el tamaño de las partículas.

1.5.1 Influencia de la composición del material

La influencia de la composición del material de base sobre la permeabilidad suele ser de pequeña importancia en los limos, arenas y gravas (con la excepción de la mica y la materia orgánica); sin embargo tiene gran importancia en los materiales que contienen arcillas.

Las arcillas, prácticamente están formadas por minerales de estructura foliada. La mayoría de estos minerales se pueden clasificar en tres grupos conocidos: las caolinitas, las ilitas y las montmorilonita. Cada uno de ellos se caracteriza por una distribución de átomos que producen una carga eléctrica negativa en las superficies chatas de los cristales.

Una partícula simple de arcilla puede estar formada por muchas hojas apiladas unas sobre otras. Cada hoja tiene un espesor definido, pero no está limitada en sus dimensiones perpendiculares a su espesor. Por ello, las partículas de arcilla tienden a adquirir formas de láminas o adoptar disposiciones que asemejan terrazas chatas. Las superficies chatas llevan cargas eléctricas residuales negativas, pero los bordes rotos de las láminas o de las terrazas pueden ser asientos de cargas positivas o negativas, según cual sea el ambiente en que se encuentren.

Al estar en contacto con el agua, los minerales de arcilla empiezan a atraer a los iones de H^+ o a los iones hidroxilo OH^- y a otros cationes de las impurezas que presente el agua a la superficie de las partículas. Esto constituye la formación de una capa eléctrica doble, que rodea a las partículas, formada por los aniones de los minerales arcillosos y los cationes del agua y sus impurezas.

Esta doble capa eléctrica que se forma alrededor de las partículas produce que éstas se repelen entre sí y esto, sumado con otras fuerzas de atracción y repulsión originadas por otros campos de fuerzas que rodean a los minerales, ocasionan una redistribución de las partículas. En algunos casos, esta redistribución hace disminuir lentamente la porosidad de estos tipos de suelos. Por ejemplo, las arcillas que contienen mayor cantidad de cationes de sodio y potasio, tendrán permeabilidades mucho más bajas que las que presenten cationes de calcio y magnesio.

Es complicado definir cómo afectará cada formación de iones a la estructura del material de base, debido a que no se puede controlar las fuerzas de atracción eléctrica que se producen, además, también juega un papel muy importante las diferentes condiciones del medio en la que estén presentes los minerales.

La magnitud de la variación de permeabilidad con la composición del material es muy amplia, pero cuanto menor es la capacidad de cambio iónico de un suelo, es decir, cuando se evite la presencia de arcillas, menor será la influencia que tenga.

En el caso que se coloque como material de base el afirmado, la presencia de arcilla influirá en su grado de permeabilidad; cuando mayor índice de plasticidad presente el afirmado menos permeable será la base. Al ser menos permeable, se saturará en menor tiempo; frente a las cargas del tránsito a las que estará expuesto el pavimento la condición de saturación podría producir problemas de asentamientos.

1.5.2 Influencia de la estructura del material

La estructura que presenta el material de base se define como el arreglo geométrico de sus partículas, una con respecto a las otras. Los diferentes factores que afectan su estructura son: la forma, tamaño y la mineralogía de las partículas. Es una de las características más importantes del material que influyen sobre la permeabilidad, especialmente en materiales de grano fino. Los materiales de bases granulares (no cohesivos), presentan dos tipos de estructuras (Fig. 1.10): *la estructura simple o de grano individual* donde las partículas del material están en una posición estable y en contacto con cada una de las partículas que se encuentran a su alrededor y la *estructura en panal o de celdas* donde las partículas forman pequeños arcos como si fueran un panaloide. Ambos tipos de estructuras originan espacios porosos relativamente grandes, lo que ayuda al flujo del agua.

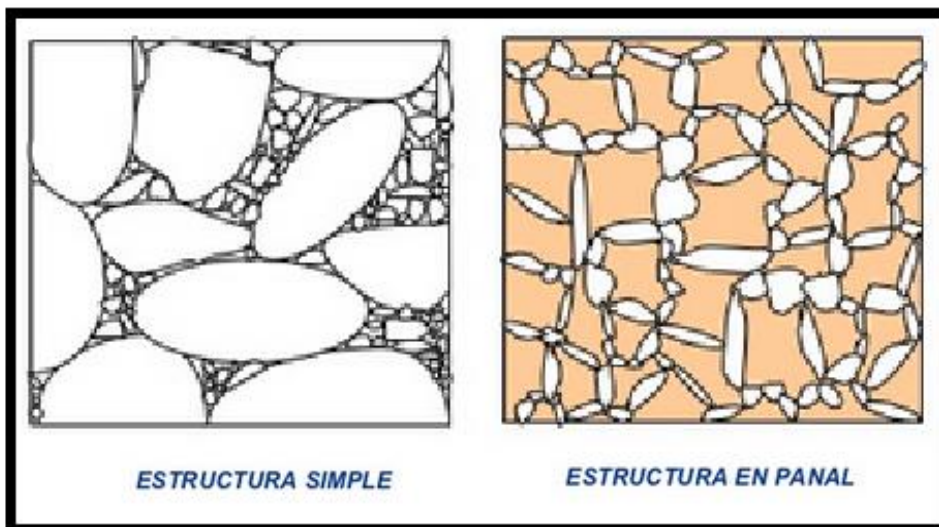


Fig. 1.10. Representación de los tipos de estructuras que presentan los suelos granulares (Fuente: Lambe, 1972).

En los materiales cohesivos, cuando se comparan muestras de suelo con la misma relación de vacíos se encuentran que la muestra en estado más floculado tendrá la mayor permeabilidad y que lo que se encuentre en el estado más disperso, tendrá lo mínimo (Fig. 1.11). Esto se debe a que cuando más dispersas estén las partículas, es decir, cuanto más paralelamente estén orientadas, más tortuoso será el recorrido del fluido en el sentido normal a las partículas. Mientras que, en un suelo en estado floculado la existencia de grandes canales permite un mayor flujo de agua que varios canales pequeños de la misma sección total que el grande.

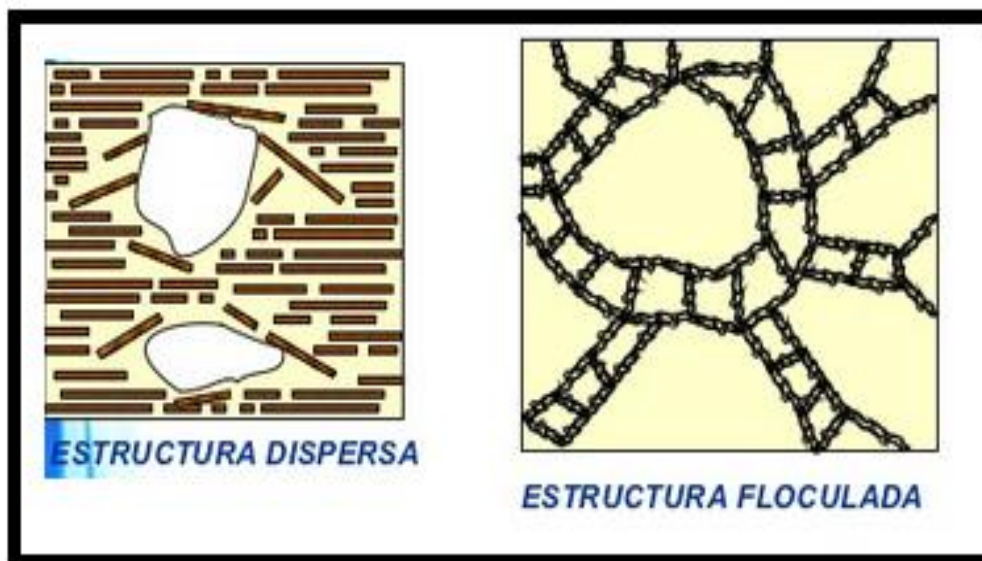


Fig. 1.11. Representación de los tipos de estructuras que presentan los suelos cohesivos (Fuente: Lambe, 1972).

Todo lo mencionado hace referencia a la microestructura que presentan las bases, pero la macroestructura es también de considerable importancia. Por ejemplo, un material estratificado formado por una capa de limo y una capa de arena tiene una permeabilidad mucho mayor para el flujo paralelo a la estratificación que el sentido normal de la misma.

En una base de afirmado, la presencia de arcilla ocasiona que el flujo de agua se torne tortuoso y lento, debido a la forma alargada y chatas de sus partículas, por lo que el agua que ingresa a través de la superficie de rodadura de los pavimentos adoquinados a las capas del pavimento no fluye a través del material de base, sino que la satura. Sin embargo, el grado de acomodo de las partículas es tal que la saturación se da en un tiempo grande. Si el flujo de agua se elimina a tiempo, es posible evitar que las capas de la estructura del pavimento se saturen a pesar del ingreso del agua a través de la superficie de rodadura.

1.5.3 Influencia del grado de saturación del material

El grado de saturación que presenta un material de base se define como el porcentaje de volumen de agua, respecto al volumen de vacíos en una porción de material en condiciones naturales. Cuanto mayor sea el grado de saturación del material, mayor será su permeabilidad. Esto se debe a que en un material saturado los granos del suelo ya han absorbido toda el agua que pueden, por ende el agua que sigue ingresando, fluye con mayor facilidad. No es factible deducir una relación directa entre la permeabilidad y el grado de saturación del material de base, debido a las diferentes tipos de estructuras (simple, panaloide, dispersa y floculada) que presentan los diferentes tipos de suelos.

1.5.4 Influencia de la relación de vacíos del material

La relación de vacíos, también llamada índice de poros, es una medición del volumen de los espacios vacíos entre las partículas del material. Representa el volumen del material no ocupado por las partículas sólidas. Al igual que la porosidad, expresa la proporción de vacíos que presenta un determinado material pero relacionándolo con el volumen de sólidos.

Según Terzaghi (1955), los espacios vacíos o poros son consecuencia de la textura y estructura que presentan los suelos, distinguiéndose dos tipos: los macroscópicos y los microscópicos. Los primeros son de notables dimensiones y están generalmente llenos de aire; y en efecto, el agua los atraviesa rápidamente impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio, están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares de las partículas. Los terrenos arenosos, por ejemplo, son ricos en macroporos, permitiendo un rápido pasaje del agua, pero tienen una muy baja capacidad de retener el agua, mientras que los suelos arcillosos son ricos en microporos y pueden manifestar una escasa aeración, pero tiene una elevada capacidad de retención del agua.

Lambe (1972), afirma que la relación de vacíos vincula el volumen de vacíos con una magnitud constante, para un determinado tipo de suelo en el tiempo; mientras que la porosidad lo hace con un valor que varía en el tiempo (por cargas, desecamiento o humectación).

En los materiales granulares, los rangos de valores de relación de vacíos que se encuentran comúnmente dependen de la organización de las partículas en el esqueleto del suelo. Es claro que el conocimiento de la relación de vacíos de un suelo en su estado natural no proporciona en sí mismo una información suficiente para establecer si el material se encuentra en un estado suelto o denso. Esta información puede obtenerse sólo si la relación de vacíos “in situ” (e) se compara con la relación de vacíos máxima y mínima ($e_{máx}$ y $e_{mín}$). Tal comparación puede expresarse numéricamente en términos de la densidad relativa a través de la ecuación 1.1.

$$Dr = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{mín}} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 1.1}$$

Esta ecuación indica que $0 < Dr < 1$. Valores bajos de Dr indican que el material natural se encuentra en estado suelto, en tanto que los valores altos indican que el material está en estado denso. Por lo que se puede concluir que cuanto mayor sea la relación de vacíos más suelta estará la base.

Los materiales cohesivos generalmente poseen una proporción de vacíos mucho más alta que la que es posible en suelos granulares, debido a la actividad electroquímica asociada con las partículas de mineral de arcilla, que dan lugar a la formación de estructuras muy abiertas del tipo panal de abejas o similar. Cuando un suelo es comprimido o vibrado, el volumen ocupado por sus elementos sólidos permanece invariante, mientras que el volumen de vacíos disminuye, por lo tanto la permeabilidad del suelo también disminuye.

La figura 1.12 (Terzaghi, 1955), muestra la influencia que la relación de vacíos ejerce sobre la permeabilidad. Las abscisas representan la relación de vacíos y las ordenadas la relación ($k / k_{0.85}$) entre el coeficiente de permeabilidad k del material a una relación de vacíos dada e y ese mismo coeficiente cuando $e = 0.85$.

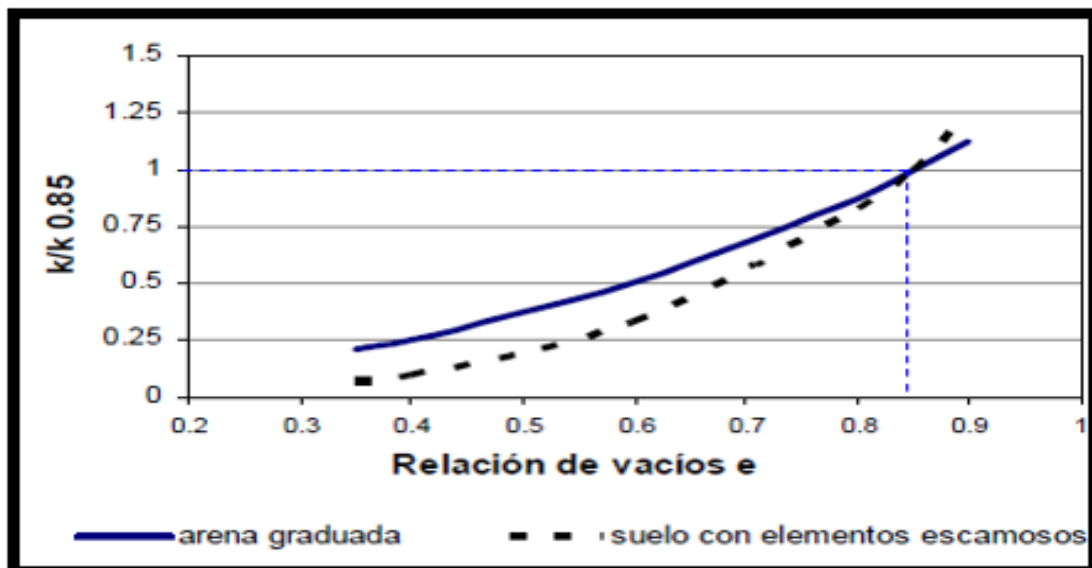


Fig. 1.12. Relación entre la permeabilidad y la relación de vacíos de una arena graduada (línea continua) y de un suelo con elementos escamosos (línea punteada) (Karl Terzaghi, 1955)

La curva en trazos llenos es válida para arenas finas y medianas con granos de buena cubicidad. Dicha curva puede ser expresada matemáticamente por medio de varias ecuaciones simples, tal como la ecuación 1.2 propuesta por A. Casagrande:

$$K = 1.4 e^2 k_{0.85} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

k = permeabilidad bajo una relación de vacíos e

$K_{0.85}$ = valor correspondiente a una relación de vacíos de 0.85

Si la arena contiene un alto porcentaje de partículas en forma de escamas, como son las partículas de mica, la correspondencia entre e y $k / k_{0.85}$ se asemeja a la indicada por la curva punteada de la figura 1.12. Los suelos de granos finos siempre contienen partículas en forma de escamas, pero como su proporción es distinta para los diferentes tipos de suelos, las curvas que relacionan e y $k / k_{0.85}$ son también distintas.

En las arcillas que contienen agujeros o fisuras abiertas, la circulación del agua trae casi siempre aparejada una erosión interna y las partículas erosionadas van a llenar poco a poco los pasajes más estrechos, con lo cual el coeficiente de permeabilidad disminuye a un valor muy pequeño. Por otro lado, si un suelo contiene burbujas de aire, el tamaño de las burbujas disminuye al aumentar la presión del agua, de modo que el coeficiente de permeabilidad aumenta con la carga hidráulica.

Esta correlación entre la permeabilidad y la relación de vacíos propuesta por Terzaghi, se puede aplicar para la capa de arena que se coloca como cama de los bloques de la superficie de rodadura, pero no es factible aplicarla al material que se coloque en las capas de base y sub base de los pavimentos adoquinados. En cualquier caso, es claro concluir que la cama de arena sobre la que descansan los adoquines sí tiene permeabilidad, siendo

radicalmente diferente de las capas inferiores, que alcanzan grados de compactación máxima.

1.5.5 Influencia de la distribución de los tamaños de las partículas del material

La permeabilidad, también se relaciona con las características del tamaño de las partículas. La distribución de los tamaños de las partículas del material se refiere a la gradación de las partículas que conforman los suelos. Un suelo de buena gradación tiene una amplia distribución de tamaños de partícula, mientras que otro de mala gradación, o gradación uniforme sólo contiene un intervalo estrecho de tamaños de partícula.

Cuando se tiene un material con una gradación uniforme y el tamaño de las partículas que predominan son las de grano grueso, se dice que presenta un alto grado de permeabilidad, debido a que sus partículas no se encastran entre sí, creando bolsas de aire que permiten el paso del flujo de agua. Si el material presenta una buena gradación contendrán partículas de grano fino en su estructura y esto originaría que no se formen espacios vacíos o poros entre ellas, por lo que reducen o bloquean por completo el flujo del agua en un área determinada.

Diferentes autores como Whitlow (1994), Nieto (1969) y Lambe (1972), establecen un análisis cuantitativo alterno de las curvas granulométricas, que se lleva a cabo usando algunos valores geométricos llamados características de gradación, que ayudan a definir si un material presenta una mala o buena gradación. Estas características de gradación se muestran en las ecuaciones 1.3 y 1.4 respectivamente.

$$\text{Coeficiente de Uniformidad : } Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots \text{Ec. 1.3}$$

$$\text{Coeficiente de Curvatura : } Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} \dots\dots\dots \text{Ec. 1.4}$$

Donde:

D_{10} es el tamaño máximo del 10% más pequeño de la muestra.

D_{30} es el tamaño máximo del 30% más pequeño de la muestra.

D_{60} es el tamaño máximo del 60% más pequeño de la muestra.

Cuando $Cu < 3$ se dice que el material presenta una gradación uniforme mientras que cuando el $Cu > 5$ se dice que el material presenta una muy buena gradación. La mayor parte de los materiales de buena gradación tiene curvas granulométricas casi planas o ligeramente cóncavas, que dan valores de Cc entre 0.5 y 2.0.

Partiendo de estas características de gradación, Hazen (1892) estableció una correlación, que se muestran en la ecuación 1.5, donde vincula el tamaño de las partículas con el coeficiente de permeabilidad.

$$\text{Coeficiente de Permeabilidad : } k = C_k * (D_{10})^2 \dots\dots\dots \text{Ec. 1.5}$$

Donde:

C_k = coeficiente variable entre 41 y 146. Se recomienda un valor promedio de $C=116$.

D_{10} = diámetro efectivo (cm)

K = (cm/s)

Esta aproximación que hace Hazen (1892) es válida para las arenas sueltas y gravas, debido a que en estos tipos de suelos las partículas son más aproximadamente equidimensionales y las diferencias de estructura no son tan dispares. Una pequeña cantidad de limos y arcillas, al estar presentes en un material, cambian considerablemente la permeabilidad hidráulica.

La lógica y los datos experimentales obtenidos por el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, sugieren que la mayor influencia sobre la permeabilidad se debe a las partículas más finas del suelo. La ecuación de Hazen (1892), por ejemplo, utiliza D_{10} como el diámetro que relaciona el tamaño de las partículas con la permeabilidad. Esta relación supone que la distribución de tamaños es suficientemente extensa para evitar que las partículas más pequeñas sean arrastradas por la fuerza de filtración del agua; es decir, el material de base debe poseer “estabilidad hidrodinámica”.

Las bases de materiales gruesos uniformes que contienen finos no suelen presentar tal estabilidad. La filtración en estas bases puede producir un arrastre de los finos y provocar, por tanto, una disminución de la permeabilidad con la filtración.

De igual manera la forma de los granos tiene gran influencia en la permeabilidad de los materiales. Las diferentes formas que presentan las partículas de los suelos pueden ser muy diferentes aun para suelos que tengan granulometrías idénticas.

La norma técnica peruana CE 010 de pavimentos urbanos recomienda unas gradaciones de los materiales que se utilizan como capa de base y sub base en los pavimentos adoquinados, los cuales contienen una cantidad mínima de finos en su composición, por lo que la correlación que realiza Hazen (1892) se puede aplicar sólo a la cama de arena pero no a las bases ni sub bases.

La temperatura también influye en el valor de permeabilidad, por alterar la viscosidad del agua. Tomando en cuenta este factor, la fórmula de Hazen (1892) se modifica como se muestra en la ecuación 1.6.

$$\text{Coeficiente de Permeabilidad : } k = C * (0.7 + 0.03t) * (D_{10})^2 \dots\dots\dots \text{Ec. 1.6}$$

Donde:

C_k = coeficiente variable entre 41 y 146. Se recomienda un valor promedio de $C=116$.

D_{10} = diámetro efectivo (cm)

t = temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

$$K = (\text{cm/s})$$

Otra fórmula de correlación para obtener el coeficiente de permeabilidad es la propuesta por Schlichter (1988), donde se toma en cuenta además de la temperatura, la compacidad a través de la porosidad que presenta el material. La fórmula de correlación que establece Schlichter (1988) se muestra en la ecuación 1.7.

$$\text{Coeficiente de Permeabilidad : } k = 771 * (0.7 + 0.03t) * \frac{D_{10}^2}{c} \dots\dots\dots \text{Ec. 1.7}$$

Donde:

n= porosidad del material.

C= es una función de n que responde a:

$$\text{Si } n=0.26 \text{ } c=83.4 ; n=0.38 \text{ } c=24.1 ; n=0.46 \text{ } c=12.8$$

D_{10} = diámetro efectivo (cm), es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10% en peso del suelo.

t= temperatura (°C)

$$K = (\text{cm/s})$$

Así mismo Terzaghi (1955), establece otra forma de correlacionar el valor del coeficiente de permeabilidad con la granulometría del material, a través de la ecuación 1.8, utilizando el diámetro efectivo (D_{10}) y la temperatura. En su correlación Terzaghi (1955) también hace uso de la porosidad que presenta el material y de un coeficiente que depende de la forma que presentan los granos.

$$\text{Coeficiente de Permeabilidad : } k = C_1 * (0.7 + 0.03t) * (D_{10})^2 \dots\dots\dots \text{Ec. 1.8}$$

Donde:

$$C_1 = C_0 * \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-p}} \right)^2$$

Donde “p” es la porosidad y C_0 un coeficiente en función de la forma del grano:

- | | |
|--------------------------------|-----------|
| ✓ Arenas de granos redondeados | $C_0=800$ |
| ✓ Arenas de granos angulosos | $C_0=460$ |
| ✓ Arenas con limos | $C_0<400$ |

D_{10} = diámetro efectivo (cm)

t= temperatura (°C)

$$K = (\text{cm/s})$$

Todas las fórmulas anteriores suponen que el coeficiente de permeabilidad es directamente proporcional al cuadrado del diámetro efectivo; sin embargo, esta afirmación se ha revelado como discutible, sobre todo en ciertos tipos de suelos. Otros autores han propuesto exponentes diferentes: 1.28 (Knappen, 1965), 2.26 (Dore, 1978) y 1.5 (Turnbull, 1985).

Las investigaciones realizadas por Casagrande y Fadum (1970) concluyeron que la correlación que más se ajusta para la determinación del coeficiente de permeabilidad para las gravas y arenas sin cohesión es la fórmula de Hazen, por ello en el capítulo 4 se utilizará esta correlación para realizar una primera aproximación del coeficiente de permeabilidad de las bases granulares para los pavimentos adoquinados a partir de las granulometrías que recomienda la Norma Técnica Peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos, teniendo en cuenta las limitaciones de esta correlación.

Capítulo 2

Especificaciones de diseño estructural para pavimentos de adoquines según la Norma Técnica Peruana C.E 010 de Pavimentos Urbanos

2.1 Consideraciones para el diseño estructural

Los pavimentos de adoquines constituyen un sistema múltiple de capas, igual que los pavimentos flexibles, por lo que la falla puede producirse en cualquier capa del sistema o en varias capas a la vez.

Según la Norma Técnica Peruana C.E 010 del Reglamento Nacional de Edificaciones en su Anexo F, establece que el procedimiento de diseño estructural para vías de pavimentos con adoquines intertrabados está basado en un procedimiento simplificado del método descrito en la Structural Design of Concrete Block Pavements (American Society of Civil Engineers, 1990) y en la Guide for Design of Paviment Structures (ASSHTO, 1993) debido a que la distribución de cargas y modos de fallas de este tipo de pavimento son muy similares a los que ocurren en los pavimentos flexibles.

Esta norma también establece que al igual que los pavimentos flexibles convencionales, el diseño de las diferentes capas del paquete estructural de los pavimentos de adoquines intertrabados de concreto está basado en una evaluación de cuatro factores que interactúan entre sí. Estos factores son: medio ambiente, tráfico, resistencia del suelo de la sub-rasante y materiales de la estructura del pavimento.

2.1.1 Medio ambiente

En los diferentes procedimientos de diseño, los efectos de la temperatura del medio se incluyen en la caracterización de la resistencia del suelo de la sub-rasante y en los materiales de la estructura del pavimento.

La temperatura se considera en el diseño de los pavimentos principalmente por dos aspectos: las bajas temperaturas, que pueden derivar en la aparición de heladas, con el consiguiente cambio en las propiedades de muchos de los materiales utilizados; y también en los gradientes térmicos, con influencia en las tensiones y deformaciones (y por tanto en la durabilidad del pavimento).

Cabe distinguir dos tipos de gradientes de temperatura: los estacionales y los diarios. Los primeros provocan aumentos y reducciones del volumen de las capas utilizadas en la infraestructura, mientras que los segundos provocan fundamentalmente combamientos, ya que su variación es mucho más rápida.

La susceptibilidad térmica de los materiales es fundamental en estas variaciones. De este modo, en climas con variaciones más fuertes será necesario recurrir a materiales menos susceptibles, incluso recurrir a soluciones estructurales diferentes en la vía. En zonas con climas menos fuertes se podrá recurrir a un espectro mayor de soluciones, con lo que en general, primaría la economía de la solución proyectada.

Tiene gran efecto sobre los pavimentos la aparición de heladas, con los consiguientes ciclos de hielo-deshielo. Estos ciclos generan una fatiga muy importante en el pavimento, por lo que en estas zonas el diseño es muy diferente al resto. En estos casos la variable que se debe tener en cuenta en el diseño no es tanto la temperatura, sino la profundidad de penetración de la helada. Existen diversas investigaciones, como la de Sánchez (1998), donde en función de los ciclos de hielo-deshielo y de las propiedades del pavimento, estiman la profundidad de penetración de la helada, para diseñar unos pavimentos más ajustados a las condiciones de funcionamiento.

Si la acción de hielo-deshielo es una consideración de diseño, el valor de soporte del suelo de la sub-rasante se reduce de acuerdo con su categoría de susceptibilidad al congelamiento, afectando la capacidad de soporte en las capas de la explanada, ya que un exceso de agua derretida puede quedarse sobre las capas inferiores.

El clima que presenta Piura es un clima cálido durante todo el año, por lo que no es necesario considerar en el diseño de los pavimentos de adoquines la condición de hielo-deshielo. Por otro lado, en comparación con los pavimentos de asfalto, donde los cambios de gradiente térmico originan variaciones sustanciales en la carpeta asfáltica, los bloques de concreto permanecen inalterables sobre la superficie de rodadura.

2.1.2 Tráfico

La evaluación del tráfico deberá tomarse en cuenta para diferenciar las cargas vehiculares, configuraciones de ejes, ruedas y número de cargas de cada tipo de vehículos durante el período de diseño. El daño a la estructura del pavimento debido a las cargas por eje se expresa típicamente como el daño de la carga de un eje estándar (EAL). Esta carga por eje estándar es una carga por eje simple de 8,16 toneladas (80 KN).

Los pavimentos se diseñan para determinado número de repeticiones de carga durante una vida útil. Para determinar el número de ejes equivalente es necesario identificar el tipo de eje y su peso, más que el peso en sí del vehículo. (esta información se encuentra en el Reglamento Nacional de Vehículos dado por el D.S. N° 058 – 2003 del MTC).

Es evidente que, ante una misma carga aplicada a pavimentos con diferentes espesores y diferentes materiales en cada una de sus capas, se obtendrán diferentes deformaciones y tensiones. En la tabla 2.1 se muestran los factores de equivalencia para diferentes cargas por eje. Asimismo en la tabla 2.2 se puede observar un listado de los EAL's en función de la clase de vía, se ha incorporado un nivel deseado de confiabilidad en el proceso de diseño por medio de un factor aplicado al tráfico de diseño. En esta tabla también se muestran los factores de confiabilidad recomendados por tipo de vía, junto con los correspondientes EAL's de diseño.

**Tabla 2.1. Factores de Equivalencia de Cargas por Eje
(Según Norma Técnica Peruana C.E 010)**

| Eje Simple t (KN) | F. de E. | Eje Doble t (KN) | F. de E. |
|-------------------|----------|------------------|----------|
| 0,9 (9) | 0,0002 | 4,5 (44) | 0,008 |
| 2,7 (27) | 0,01 | 6,4 (62) | 0,03 |
| 4,5 (44) | 0,08 | 8,2 (80) | 0,08 |
| 6,4 (62) | 0,34 | 10,0 (98) | 0,17 |
| 8,2 (80) | 1,00 | 11,8 (115) | 0,34 |
| 10,0 (98) | 2,44 | 13,6 (133) | 0,63 |
| 11,8 (115) | 5,21 | 15,4 (157) | 1,07 |
| 13,6 (133) | 10,0 | 17,2 (169) | 1,75 |
| 15,4 (157) | 17,9 | 19,1 (186) | 2,73 |
| 17,2 (169) | 29,9 | 20,9 (204) | 4,11 |

Nota: Tabla elaborada para un valor de serviciabilidad final, pt de 2,0.

**Tabla 2.2. Ejemplos de EAL's de Diseño
(Según Norma Técnica Peruana C.E 010)**

| Clase de Vía | EAL's (millones) | Nivel de Confiabilidad | Factor de Confiabilidad | EAL's de diseño (millones) |
|--------------|------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Expresa | 7,5 | 90 | 3,775 | 28,4 |
| Arteriales | 2,8 | 85 | 2,929 | 8,3 |
| Colectoras | 1,3 | 80 | 2,390 | 3,0 |
| Locales | 0,43 | 75 | 2,010 | 0,84 |

Nota: Datos basados en una vida de diseño de 20 años, 4% de crecimiento, 50% de tráfico direccional y en una desviación estándar de 0,45.

2.1.3 Soporte de la sub-rasante

La resistencia del suelo de la sub-rasante tiene gran efecto en la determinación del espesor total de la estructura de los pavimentos de adoquines intertrabados de concreto. Se deben conducir ensayos de laboratorio del Módulo Resiliente o de Relación Soporte de California (CBR) en suelos típicos de sub-rasante para evaluar su resistencia. Estos ensayos deben conducirse con las condiciones de campo más probables de densidad y humedad que se pronostican durante la vida de diseño del pavimento.

Si no es posible realizar ensayos de laboratorio, existen valores típicos del Módulo Resiliente en la literatura. Por ejemplo, la Norma Técnica Peruana C.E 010 de Pavimentos Urbanos, ha asignado valores típicos del Módulo Resiliente (Mr.) a cada tipo de suelos definidos en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y en el sistema de la ASSHTO. En las tablas 2.3 y 2.4 que se muestran a continuación se observan los valores de resistencia de la sub-rasante en función del tipo de suelo según la clasificación SUCS y ASSHTO, respectivamente. En estas tablas se proporcionan tres valores de módulos para

cada tipo de suelo (SUCS o ASSHTO), dependiendo de las condiciones medioambientales y de drenaje anticipadas para el sitio.

Tabla 2.3. Resistencia de la Sub-rasante en Función del Tipo de suelo SUCS (Según Norma Técnica Peruana C.E 010)

| Grupo de suelo | Módulo Resiliente (10^3 psi) | | | Módulo Reducido (10^3 psi) |
|----------------|---------------------------------|----------|----------|-------------------------------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | |
| SUCS | | | | |
| GW, GP, SW, SP | 20,0 | 20,0 | 20,0 | --- |
| GW-GM, GW-GC | --- | --- | --- | --- |
| GP-GM, GP-GC | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 12,0 |
| GM, GM-GC, GC | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 4,5 |
| SW-SM, SW-SC | --- | --- | --- | --- |
| SP-SM | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 4,5 |
| SP-SC | 17,5 | 20,0 | 20,0 | 4,5 |
| SM, SM-SC | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 4,5 |
| SC | 15,0 | 20,0 | 20,0 | 4,5 |
| ML, ML-CL, CL | 7,5 | 15,0 | 20,0 | 4,5 |
| MH | 6,0 | 9,0 | 12,0 | 4,5 |
| CH | 4,5 | 6,0 | 7,5 | 4,5 |

Nota: 1 psi = 0.0068 MPa y 1500 psi asumido = 1% CBR

Tabla 2.4. Resistencia de la Sub-rasante en Función del Tipo de suelo AASHTO (Según Norma Técnica Peruana C.E 010)

| Grupo de suelo | Módulo Resiliente (10^3 psi) | | | Módulo Reducido (10^3 psi) |
|---------------------|---------------------------------|----------|----------|-------------------------------|
| | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | |
| AASHTO | | | | |
| A-1-a | 20,0 | 20,0 | 20,0 | --- |
| A-1-b | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 12,0 |
| A-2-4, A-2-5, A-2-7 | 20,0 | 20,0 | 20,0 | 4,5 |
| A-2-6 | 7,5 | 15,0 | 20,0 | 4,5 |
| A-3 | 15,0 | 20,0 | 20,0 | 9,0 |
| A-4 | 7,5 | 15,0 | 20,0 | 4,5 |
| A-5 | 4,5 | 6,0 | 9,0 | 4,5 |
| A-6 | 4,5 | 10,5 | 20,0 | 4,5 |
| A-7-5 | 4,5 | 6,0 | 7,5 | 4,5 |
| A-7-6 | 7,5 | 15,0 | 20,0 | 4,5 |

Nota: 1 psi = 0.0068 MPa y 1500 psi asumido = 1% CBR.

En la tabla 2.5 se resumen las pautas para seleccionar el valor del Mr. apropiado según las diferentes condiciones que se tengan.

Tabla 2.5. Opciones de medioambiente y drenaje para caracterización de la sub-rasante (Según Norma Técnica Peruana C.E 010)

| Calidad de drenaje | Porcentaje de tiempo que el pavimento estará expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación | | | |
|--------------------|---|--------|---------|-------|
| | < 1% | 1 a 5% | 5 a 25% | > 25% |
| Excelente | 3 | 3 | 3 | 2 |
| Bueno | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Regular | 3 | 2 | 2 | 1 |
| Pobre | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Muy Pobre | 2 | 1 | 1 | 1 |

A cada tipo de suelo descrito en las tablas 2.3 y 2.4 también se le ha asignado un valor reducido de Mr. (columna de la derecha), para ser usado solamente cuando la acción de las heladas es una consideración de diseño.

Esta misma norma recomienda que la compactación del suelo de la sub-rasante durante la construcción deberá ser por lo menos del 95% tanto para los suelos cohesivos como para los suelos sin cohesión y una profundidad de compactación efectiva en ambos casos de por lo menos 12 pulgadas (300 mm) superficiales.

Asimismo la norma sugiere que los suelos que tengan un Mr. de 4500 psi (31 MPa) o menos (CBR de 3% o menos), deban evaluarse para ser reemplazados por un material más apropiado o mejorarlos mediante algún proceso de estabilización. En este caso se recalcula el nuevo CBR del suelo mejorado y con este nuevo valor se realiza el diseño del paquete estructural.

La ciudad de Piura presenta un suelo que está constituido en su gran mayoría por depósitos de arenas sueltas limosas pero que en algunos casos cuenta con la presencia de horizontes delgados de arcilla, lo que origina una disminución de su valor de soporte.

La calidad de drenaje que presentan estos tipos de suelos es de pobre a regular y el tiempo que el pavimento estará expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación mayor al 25%, por lo tanto debería usarse la opción 1, donde para suelos SP-SM, SM, SM-SC se recomienda utilizar un valor de módulo resiliente de 20×10^3 psi, que equivale a un CBR de 13%.

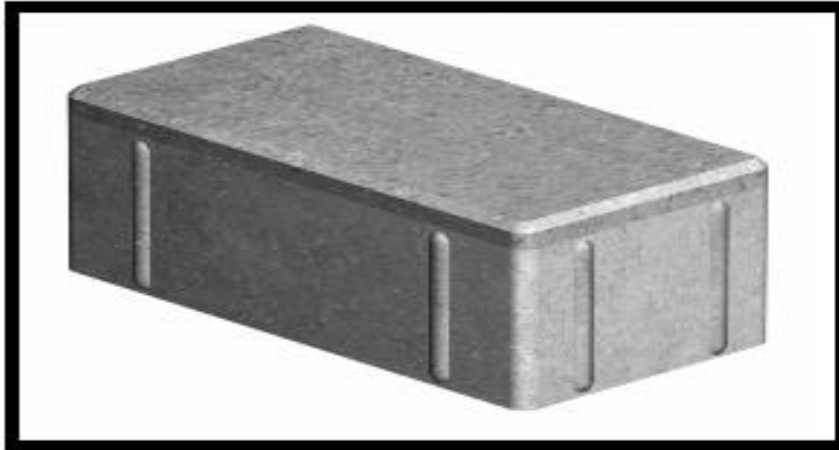
En los diferentes expedientes técnicos de pavimentaciones adoquinadas revisadas para la elaboración de la presente investigación se puede observar que casi en todas se coloca una capa de material hormigonado con el fin de mejorar el suelo de la sub rasante. Esta capa de hormigón funciona también como una capa de sub base del pavimento.

2.2 Características de los diferentes materiales utilizados en la construcción de los pavimentos de adoquines

2.2.1 Adoquines, bloquetas o bloques de concreto

Los adoquines son elementos macizos de concreto prefabricado, con paredes verticales que se ajustan bien unos con otros para formar una superficie completa, dejando sólo juntas entre ellos.

Estas bloquetas de concreto simple son hechas a base de cemento, agua, áridos finos y/o gruesos con o sin aditivos, incluidos pigmentos que se encargan de darle un color determinado. Los adoquines presentan separadores en sus cuatro caras verticales que evitan el contacto entre las caras y permiten dejar las juntas respectivas entre ellos, las que posteriormente se llenarán de arena fina para que puedan transmitirse las cargas. En la figura 2.1 que se muestra a continuación se puede apreciar un adoquín rectangular con sus separadores.



**Fig. 2.1. Adoquín rectangular de concreto con separadores
(Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)**

En un adoquín también se distinguen los siguientes elementos:

- Cara Superior (o superficie de desgaste): sobre la cual circula el tránsito y es la que define la forma del adoquín.
- Cara Inferior: igual a la superior, sobre la que se apoya el adoquín en la capa de arena.
- Caras Laterales o Paredes: curvas o rectas, pero verticales y sin llaves, que conforman el volumen del adoquín y determinan su espesor.
- Aristas y esquinas: los bordes o aristas serán agudos, es decir sin desbordamientos, encombamientos o torceduras; y no tendrán rebabas horizontales (en la cara inferior), ni verticales (en la cara superior del adoquín). Esto mismo se debe cumplir para las esquinas y para el bisel.
- Bisel: es un chaflán o plano inclinado en las aristas o bordes de la cara superior que se puede o no hacer en el momento de la fabricación. No debe tener más de 1 cm de ancho y no es indispensable, pero mejora la apariencia de los adoquines, facilita su manejo y contribuye al llenado de la junta. En la figura 2.2 se muestra una imagen de adoquines rectangular con bisel y sin bisel.
- Dimensiones: el tamaño y la forma de los adoquines serán lo más uniforme posible, para que se traben unos con otros y la superficie final sea plana. Para esto, la diferencia máxima en las dimensiones con respecto a las dadas por el productor, no será de $\pm 1,6$ mm para el largo y ancho y de $\pm 3,2$ mm para el espesor.
- Superficie: las superficies de los adoquines serán uniformes, parejas, es decir sin fisuras, huecos, hormigueros, descascaramientos o materiales extraños (madera, semillas, piedras grandes, etc.). El color y tipo de la superficie se acordará entre el productor y el comprador porque no existe una forma práctica para medirlos.

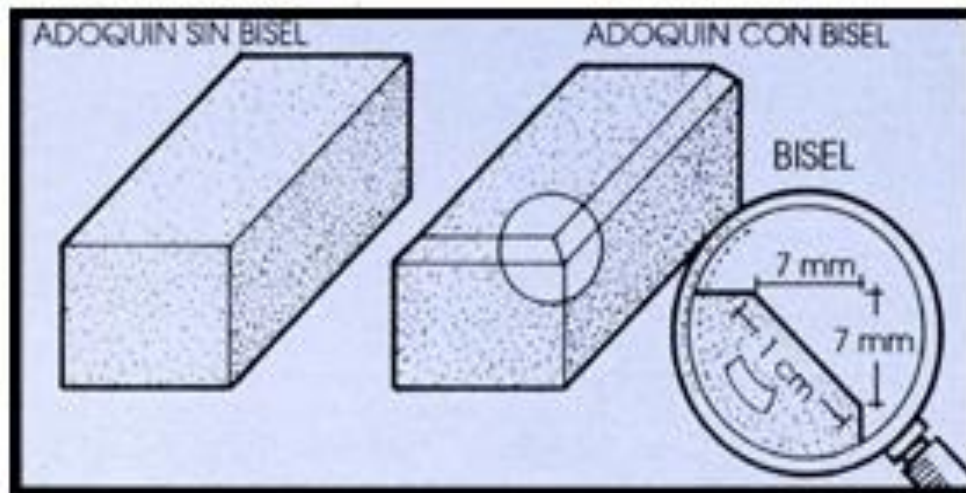


Fig. 2.2. Imagen de adoquines de concreto con bisel y sin bisel.
(Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

La forma del adoquín no influye mucho en el funcionamiento del pavimento; pero por facilidad para su producción, transporte y colocación, se prefieren adoquines pequeños, que se puedan tomar con una sola mano; que no tengan más de 25 cm de longitud, para manejarlos con facilidad y para que no se partan bajo las cargas del tránsito.

Según las cargas de tráfico esperado en la zona de pavimentación, se seleccionan los espesores de los adoquines, ya que el espesor del adoquín influye directamente sobre la estabilidad del pavimento. Las diferentes cargas dinámicas que causan las ruedas de los vehículos actúan sobre los adoquines en dos direcciones: las cargas verticales, que se transmiten a las capas de soporte que se encuentran debajo de los adoquines y las cargas horizontales que producen un movimiento de rotación en el adoquín, que es soportado por las caras laterales de los adoquines contiguos.

Cuanto mayor sea el espesor del adoquín mayor resistencia tendrá a la rotación a la que se somete por las cargas del tráfico, mientras que cuando menor sea el espesor de los adoquines la base ha de ser más resistente para evitar roturas y giros de los adoquines. En la figura 2.3 se muestra la rotación que se produce en un adoquín por efecto del tráfico.

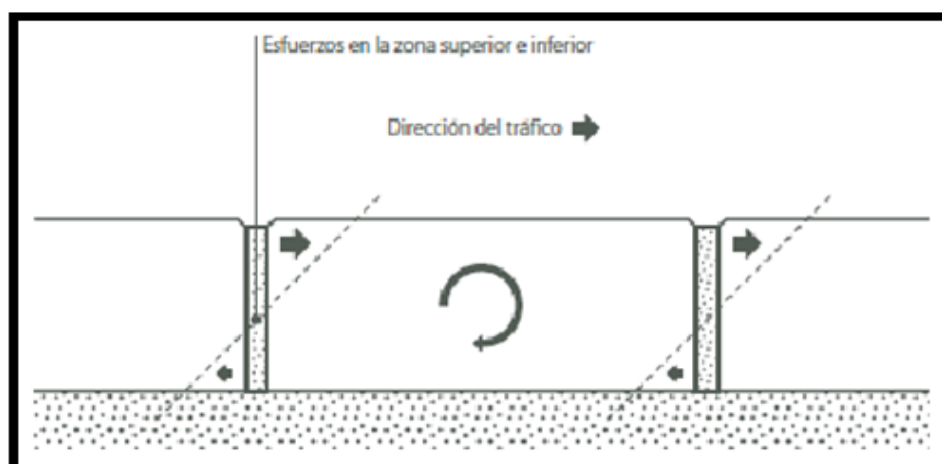


Fig. 2.3. Rotación producida en un adoquín por efecto del tráfico.
(Fenollar, 2001: Pavimentos con Adoquines de Concreto)

Los adoquines de concreto utilizados en pavimentos, deben seguir las especificaciones dadas en la Norma Técnica Peruana (NTP) 399.611, la cual distingue tres tipos adoquines según el tipo de tránsito al que van a estar expuestos. Así mismo, se establece una serie de requisitos que deben cumplir en cuanto a su espesor nominal y su resistencia a la compresión. (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Espesor mínimo y resistencia a la compresión de los adoquines (Según Norma Técnica Peruana 399.611)

| Tipo de adoquín | Espesor nominal (mm) | Resistencia a la compresión mínima MPa (kg/cm ²) | |
|--|----------------------|--|-------------------|
| | | Promedio de 3 unidades | Unidad individual |
| I (Peatonal) | 40 | 31 (320) | 28 (290) |
| | 60 | 31 (320) | 28 (290) |
| II (Vehicular ligero) | 60 | 41 (420) | 37 (380) |
| | 80 | 37 (380) | 33 (340) |
| | 100 | 35 (360) | 32 (325) |
| III (Vehicular pesado, patios industriales o de contenedores) | 80 | 55 (561) | 50 (510) |

El ensayo de compresión deberá ser realizado sobre todo el adoquín, aplicando la carga perpendicular a la sección de mayor superficie. Si la máquina de ensayo no tiene la fuerza suficiente para romper la unidad completa, la unidad se debe cortar por la mitad a lo largo del eje más corto y se ensayará una mitad.

La Norma Técnica Peruana (NTP) 399.611, también enfatiza sobre la textura de los adoquines, para que sean lo más impermeables posible, por lo que establece que el porcentaje de absorción máxima permitido para cada unidad debe de ser 7% y que el promedio de 3 unidades debe de ser 5%. Los adoquines tipo III, usados para pavimentos de tránsito vehicular pesado, patios industriales y contenedores no deben desgastarse en abrasión más de 3 mm, ni tampoco tener una pérdida de volumen menor a 15 cm³ / 50 cm².

A pesar que los adoquines de concreto son elementos que poseen gran rigidez, la ausencia de ligante entre ellos hace que las cargas aplicadas afecten a un número limitado de piezas, por lo cual las deformaciones pueden considerarse localizadas. La transmisión de cargas verticales entre los bloques, que es lo que determinará el grado de flexibilidad o rigidez del pavimento, se realiza por rozamiento, a través de la arena fina situada entre sus juntas. En consecuencia, una serie de aspectos constructivos, como la separación entre los adoquines y el grado de colmatación de las juntas, afectarán directamente el comportamiento del pavimento.

Los adoquines utilizados en los pavimentos en la ciudad de Piura son generalmente rectangulares de 8 cm de espesor, y en algunos casos en calles pequeñas (de una a dos cuadras) como las que se encuentran en el cercado del distrito de Castilla se emplean adoquines de 6 cm de espesor. El patrón de armado que se sigue en las vías es el de espina de pescado a 90°, con un espesor de juntas de aproximadamente 2.5 a 7 mm.

2.2.2 Arena utilizada en el sellado de las juntas en la superficie de rodadura

La arena utilizada en el sellado de las juntas de los adoquines cumple tres funciones principales:

- 1) Proporcionar a los bloques de concreto trabazón vertical y transferencia de corte frente a las cargas.
- 2) Evitar los desplazamientos individuales de los bloques.
- 3) Impermeabilizar lo más que se pueda la superficie de rodadura del pavimento.

Nunca se le debe adicionar cemento, cal o reemplazarla por mortero, pues debido a la flexibilidad del conjunto, el sello quedaría quebradizo y se saldría con el tiempo originando que los bloques queden sueltos, con lo que se reduce su capacidad de transmisión de cargas.

La arena utilizada para el sello de las juntas de los pavimentos de adoquines intertrabados, debe ser una arena fina, de origen aluvial, sin trituración, libre de materia orgánica; como la que se utiliza para revocar (pañetar, frisar, etc.). No se recomienda utilizar arenas con limos ni arcillas, debido a que si existen demasiados finos se produciría el vaciado de las juntas con el uso y limpieza del pavimento; además este exceso de finos facilitará su migración hacia la cama de arena por arrastre originando consecuencias no deseables.

No es necesario lavarla, pero sí es indispensable pasarla por una zaranda con huecos de 2.5 mm de ancho para quitarle sobre tamaños, el material vegetal, otros contaminantes y para que quede suelta. En la figura 2.4 se muestra la malla requerida para el zarandeo de la arena de sellado.

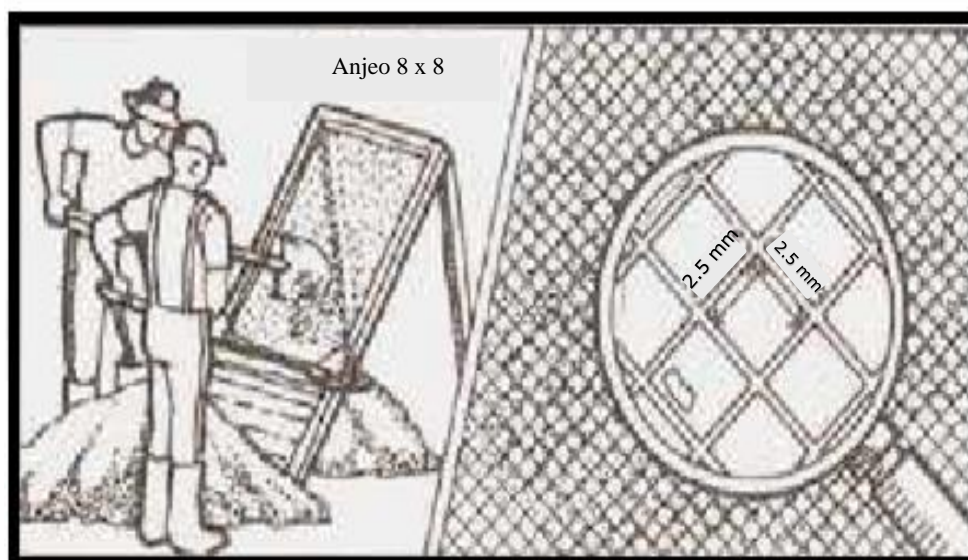


Fig. 2.4. Malla cuadrada usada para el zarandeo de la arena de sellado (Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

Esta arena deberá estar lo más seca posible en el momento de utilizarla para que penetre en las juntas, por lo cual se debe almacenar bajo techo (si se esperan lluvias) y revolverla con frecuencia para que seque. Mientras más seca esté la arena, más fácil será su manejo.

Según los requisitos de la Norma Técnica Peruana C.E 010 acerca de Pavimentos Urbanos del Reglamento Nacional de Edificaciones, la arena utilizada en el sellado de las juntas de los pavimentos de adoquines debe cumplir con las características granulométricas presentadas en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Granulometría de la arena utilizada en el sellado de las juntas de los pavimentos de adoquines (Según Norma Técnica Peruana C.E 010)

| Malla | % Pasante |
|-------|-----------|
| N°4 | 100 |
| N°8 | 95-100 |
| N°16 | 70-100 |
| N°30 | 40-75 |
| N°50 | 10-35 |
| N°100 | 02-15 |
| N°200 | 00-05 |

Inmediatamente después de la compactación inicial, se debe esparcir la arena de sello sobre la superficie de adoquines ya colocada, formando una capa delgada de aproximadamente tres milímetros, luego se barre con escobas o con cepillos de cerdas largas y duras tantas veces como sea necesario para que se llenen las juntas. Este barrido se hace alternado con la compactación final del pavimento o simultáneamente con él.

Es muy importante que la arena no se empaste sobre los adoquines ni que forme morros que hagan hundir los bloques al momento de la compactación. Las juntas entre los adoquines deben permanecer siempre llenas. Si se pierde más de 1 cm de arena de sellado, se debe buscar la causa de esta pérdida, corregirla y barrer arena hasta que la junta vuelva a quedar llena de nuevo.

La experiencia ha demostrado que se producen importantes daños en el pavimento si éste es sometido al tráfico sin haber completado el relleno de sus juntas. No debe entrar en servicio ninguna zona que no haya sido totalmente sellada con arena y compactada. La adaptación de las juntas es gradual y, en general, requiere sucesivas fases de vertido de arena y relleno de juntas. La limpieza final ha de realizarse mediante un barrido dejando una mínima cantidad de arena sobre el pavimento, de forma que con el uso se rellenen las juntas de forma natural.

La arena de sellado que se viene utilizando en las vías adoquinadas de la ciudad de Piura es arena de médano, o también llamada arena eólica, la cual contiene una gran cantidad de limos y arcillas en su composición.

El hecho que se venga utilizando este tipo de arena en el sellado de las juntas de los pavimentos adoquinados puede ser una de las causas de los asentamientos que se observan en las vías, debido a que este tipo de arena tiende a desplazarse rápidamente frente a la acción del viento originando que las juntas entre los bloques queden vacías y no haya una transferencia de cargas adecuada entre las unidades. Al no ver una transferencia de carga entre los bloques y al estar sometido el pavimento al constante paso de los vehículos cada

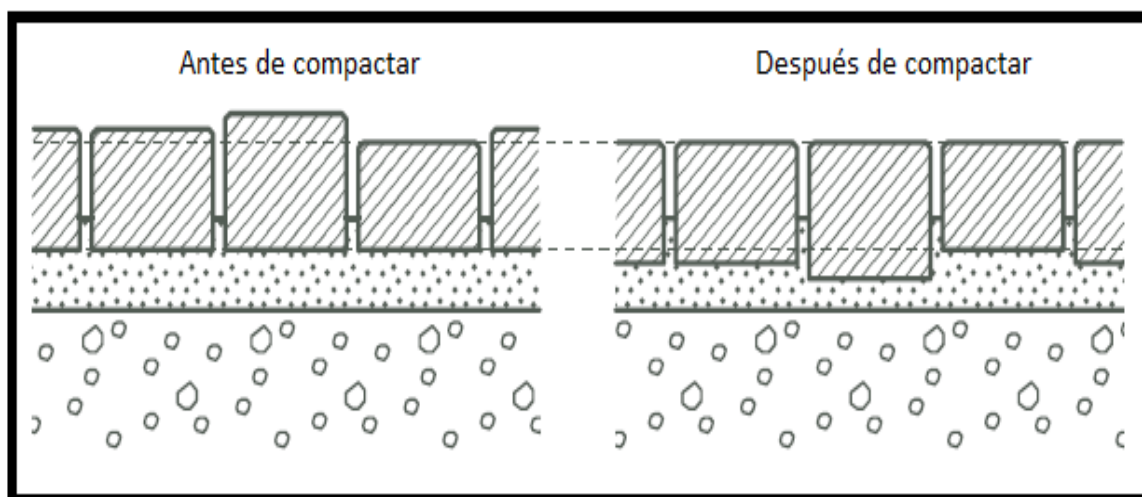
unidad trabajará de forma individual y no en conjunto, originando hundimientos en diferentes zonas de la vía.

2.2.3 Arena utilizada en la capa de soporte de los adoquines

Esta capa de arena tiene tres funciones principales:

- 1) Servir de filtro para el agua que pueda penetrar por las juntas.
- 2) Servir de soporte para los adoquines.
- 3) Al penetrar por las juntas, ayudar a que los bloques se amarren entre sí.

Desde el punto de vista constructivo, esta capa de arena sirve para corregir las irregularidades que presentan tanto los adoquines como la capa de base, además para compactar la capa adoquinada se requiere de una capa no rígida que la sostenga. En la figura 2.5 se puede apreciar como la capa de arena sirve para compensar las pequeñas diferencias admisibles en el espesor de los adoquines debido a la tolerancia de su fabricación, de manera que éstos una vez compactados formen una superficie homogénea.



**Fig. 2.5. Incrustación de los adoquines en la capa de arena
(Fenollar, 2001: Pavimentos con Adoquines de Concreto)**

El espesor de la cama de arena no deberá ser mayor a 40 mm ni menor de 25 mm después de la compactación de los adoquines de concreto. No conviene utilizar una capa de arena de mayor espesor porque puede causar asentamientos en los adoquines debido a que el peso de los vehículos al que va estar expuesto el pavimento puede hacer que se comprima o se consolide la arena.

Después de compactar la capa adoquinada, el espesor de la capa de arena se reducirá porque la arena se habrá compactado y porque algo de ella penetrará ascendiendo en las juntas entre los adoquines. Debido a esto se deberá considerar un sobre espesor de alrededor de 1 o 1.5 cm dependiendo de la humedad que presente la arena.

Esta capa de arena no se debe utilizar para corregir grandes desniveles originados por la compactación de la base porque luego aparecerán estas irregularidades en forma de ondulaciones en la superficie del pavimento, tampoco se debe usar para hacer las pendientes del drenaje; por lo que su espesor debe ser constante en toda la obra.

La arena utilizada deberá ser suelta, gruesa y limpia, como la que se usa para la elaboración de concreto o para pegar ladrillo. Por ello, debe ser arena de río, no de peña ni triturada, debido a que la arena de río por lo general es boleada, sin aristas, lo que permite un mejor acomodo de las partículas y un pasaje mucho más rápido del flujo de agua.

Para asegurar la regularidad y calidad del pavimento, la arena debe ser uniforme tanto en su granulometría como en su contenido de humedad. No debe mezclarse con cemento ni cal, debido a que esta capa no debe ser rígida, para que no se quiebre, fracture o desintegre provocando serias deformaciones en la capa adoquinada y para que, cuando se tengan que levantar algunos adoquines, no se dificulte esta operación.

No es recomendable que tenga una gran cantidad de partículas finas (no debe contener más del 3% de limos y arcillas), porque se impermeabilizaría y afectaría el sub drenaje del pavimento. En la figura 2.6 se muestra como se debe trabajar una arena que tenga una gran cantidad de partículas finas.

Después de lavada y cuando esté ligeramente seca, se pasa por una zaranda de huecos de 1 cm de ancho, para quitarle las piedras grandes (sobre tamaños), el material vegetal (hojas, maderas, etc.) y otros contaminantes (plástico, metal, papel, etc.). Esto sirve también para que quede suelta.

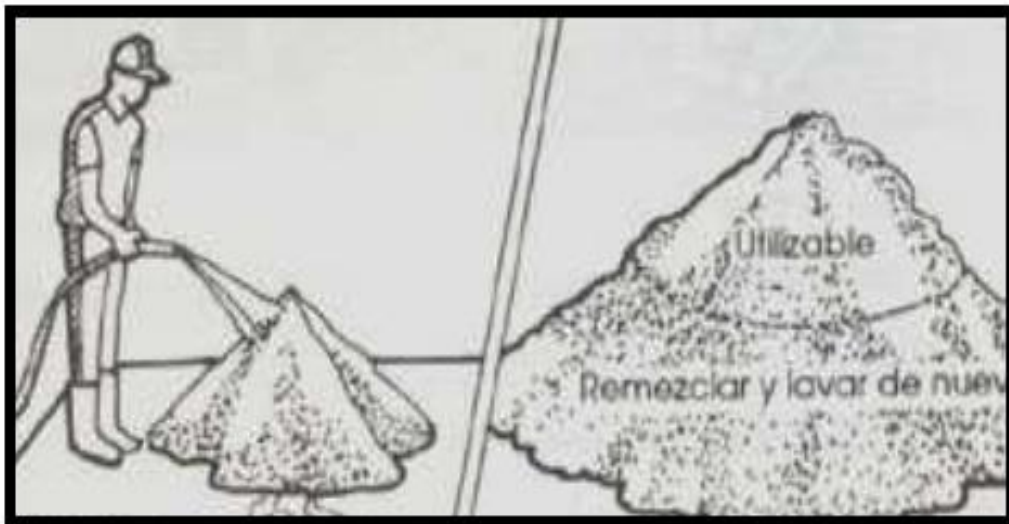


Fig. 2.6. Procedimiento a seguir para separar partículas finas de la arena (Madrid, 1998 – Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

Según los requisitos de la Norma Técnica Peruana C.E 010 de Pavimentos Urbanos del Reglamento Nacional de Edificaciones, la arena utilizada como soporte de los adoquines deberá cumplir con las características granulométricas presentadas en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Granulometría de la arena utilizada como soporte de los adoquines (Según Norma Técnica C.E 010)

| Malla | % Pasante |
|-------|-----------|
| 3/8 ” | 100 |
| N°4 | 95-100 |
| N°8 | 80-100 |
| N°16 | 50-80 |
| N°30 | 25-60 |
| N°50 | 05-30 |
| N°100 | 00-10 |

Esta granulometría que indica la norma, garantiza que la arena a utilizar tenga una distribución uniforme, es decir que sólo contiene un intervalo estrecho de tamaños de partículas, con un mínimo de partículas finas en su composición, lo que no establece es la forma que deben tener los granos.

Si los granos de la arena usada tienen forma angulosa el paso del agua a través de ella será tortuoso, mientras que si presentan una forma boleada sin aristas, el paso del agua será fluido, lo cual impedirá que se sature y se puedan originar asentamientos de los bloques de concreto.

2.2.4 Capa de base granular en los pavimentos de adoquines

Esta capa constituye el principal elemento portante de la estructura del pavimento, o lo que es lo mismo, la que debe absorber en mayor proporción, las cargas verticales transmitidas por el tráfico. Esta capa debe tener una densidad uniforme en toda su extensión y profundidad y este requisito se observa de manera especial en las zonas cercanas a las estructuras de confinamiento, como sumideros, cajas de inspección, etc., donde el proceso de compactación es más difícil de llevar a cabo.

El material usado en una base granular debe ser pétreo, de río o triturado de una cantera, de partículas duras, resistentes y durables; sin exceso de partículas planas o blandas debido a que se pueden presentar problemas de asentamientos irregulares durante la compactación.

Este material debe estar limpio, libre de lodo, materia orgánica y terrones de arcilla. No debe contener piedras muy grandes, porque la falta de uniformidad también puede generar fallas, por lo que se tienen que retirar todas las piedras que midan más de 5 cm (2 pulgadas).

Según la EG. 2013 (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción) del Manual de Carreteras, establece que la composición final de los materiales que se usarán como base granular en pavimentos, deben presentar una granulometría continua, bien graduada, que contenga granos de todo tamaño, desde arena hasta piedras de 5 cm, para que al compactarlo, las partículas se puedan amarrar bien.

A continuación en la tabla 2.9 se muestran los requerimientos granulométricos de los materiales para base granular en la estructura de pavimentos extraída de la EG 2013.

**Tabla 2.9. Requerimientos granulométricos para bases granulares
(Según las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción del Manual de Carreteras EG 2013)**

| Tamiz | Porcentaje que pasa en peso | | | |
|-------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Gradación A | Gradación B | Gradación C | Gradación D |
| 2 ” | 100 | 100 | --- | --- |
| 1” | --- | 75 - 95 | 100 | 100 |
| 3/8 ” | 30 – 65 | 40 - 75 | 50 - 85 | 60 - 100 |
| N°4 | 25 – 55 | 30 - 60 | 35 - 65 | 50 - 85 |
| N°10 | 15 – 40 | 20 - 45 | 25 - 50 | 40 - 70 |
| N°40 | 8 – 20 | 15 - 30 | 15 - 30 | 25 - 45 |
| N°200 | 2 – 8 | 5 - 15 | 5 - 15 | 8 - 15 |

Asimismo el material de base granular empleado deberá cumplir con tener un valor relativo de soporte (CBR) de 100% cuando las cargas de tráfico aplicadas son mayores a 10^6 ejes equivalentes y un valor de 80% cuando las cargas aplicadas son menores a 10^6 .

Tanto el agregado grueso (materiales retenidos en la malla N°4) y el agregado fino (materiales que pasan la malla N°4) deberán cumplir con lo indicado en las tablas 2.10 y 2.11, respectivamente.

**Tabla 2.10. Requerimientos del agregado grueso para bases granulares
(Según Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción del Manual de Carreteras EG 2013)**

| Ensayo | Norma MTC | Norma ASTM | Normas AASHTO | Requerimientos de altitud | |
|--------------------------------------|-----------|------------|---------------|---------------------------|------------|
| | | | | <3000 msnm | ≥3000 msnm |
| Partículas con una cara fracturada | E 210 | D 5821 | --- | 80 % mín. | 80 % mín. |
| Partículas con dos caras fracturadas | E 210 | D 5821 | --- | 40 % mín. | 50 % mín. |
| Abrasión los Ángeles | E 207 | C 131 | T 96 | 40 % máx. | 40 % máx. |
| Partículas chatas y alargadas | --- | D 4791 | --- | 15 % máx. | 15 % máx. |
| Sales solubles totales | E 219 | D 1888 | --- | 0.5 % máx. | 0.5 % máx. |
| Durabilidad al sulfato de magnesio | E 209 | C 88 | T 104 | --- | 18 % máx. |

**Tabla 2.11. Requerimientos del agregado fino para bases granulares
(Según Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción del Manual de Carreteras
EG 2013)**

| Ensayo | Norma | Requerimientos de altitud | |
|------------------------------------|-----------|---------------------------|------------|
| | | <3000 msnm | ≥3000 msnm |
| Índice plástico | MTC E 111 | 4 % máx. | 2 % mín. |
| Equivalente de arena | MTC E 114 | 35 % mín. | 45 % mín. |
| Sales solubles | MTC E 219 | 0.5 % máx. | 0.5 % máx. |
| Durabilidad al sulfato de magnesio | MTC E 209 | --- | 15 % |

También, esta norma establece que antes de colocar la capa de base sobre el terreno natural, se debe de retirar completamente la capa de materia orgánica (tierra y material vegetal) y las zonas pequeñas de material más blando que el común (como las arcillas). También se deben investigar las zonas que permanecen húmedas o se inundan, porque pueden tener nacimientos de agua o un mal drenaje. Cuando las condiciones lo ameriten, se tiene que colocar antes de la capa de base una capa de sub base con el fin de mejorar la calidad del terreno donde se asentará la estructura del pavimento.

Según la Norma Técnica Peruana CE 010, también se pueden usar bases tratadas con asfalto y con cemento. Las bases tratadas con asfalto deberán cumplir con las especificaciones de un concreto asfáltico de gradación densa, bien compactado, con una estabilidad Marshall de por lo menos 1800 libras (8000 N). Mientras que, una base tratada con cemento deberá tener una resistencia a la compresión no confinada a los 7 días de por lo menos 650 psi (4,5 MPa). Los espesores mínimos de las capas de base tratadas con asfalto y cemento deberán ser de 75 mm y 100 mm respectivamente.

Hoy en día, en la mayoría de los pavimentos urbanos de la ciudad de Piura, no sólo en los pavimentos de adoquines sino también en los pavimentos convencionales de asfalto y de concreto se viene colocando como material de base y/o sub base granular el afirmado.

El afirmado es una mezcla de tres tamaños o tipos de materiales: piedra, arena y finos o arcilla. Si no existe una buena combinación de estos tres tamaños, el afirmado será pobre. El afirmado contiene un porcentaje de piedra con el fin de soportar las cargas, se recomienda que sean partículas rugosas y no canto rodado. Asimismo tiene un porcentaje de arena para llenar los vacíos entre las piedras y dar estabilidad a la capa y, necesariamente un porcentaje de finos plásticos para cohesionar o aglutinar los materiales.

La colocación del afirmado como material de base y/o sub base granular en los pavimentos adoquinados, de una cierta manera contradice lo especificado en la Norma CE 010 de Pavimentos Urbanos, ya que ésta establece en la tabla N° 06 (requerimientos granulométricos para bases granulares), que las bases para este tipo de pavimentos deben tener sólo una pequeña cantidad de partículas finas plásticas, debido a que al estar en contacto con el agua pueden originar problemas de hinchamiento o asentamientos.

Según Montejo (1997), el afirmado se puede utilizar como capa de base y/o sub base en la construcción de carreteras, autovías, autopistas y demás vías pavimentadas con asfalto, debido a que estas obras no tienen elementos de confinamiento lateral ni transversal, por lo que los finos (las arcillas) ayudan a que las partículas de grava y arena queden aglutinadas entre sí y puedan actuar frente a las cargas del tráfico bajo las cuales van a estar sometidas. Como el asfalto es un material muy impermeable, adherente y cohesivo (comparado con una superficie adoquinada), y siguiendo un adecuado proceso constructivo se puede lograr impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de las precipitaciones, para que de esta manera no haya problemas de asentamientos de las arcillas presentes en el afirmado.

Lo contrario ocurre en los pavimentos adoquinados, donde la gran permeabilidad de la superficie de rodadura puede ocasionar problemas de hinchamientos o asentamientos en el afirmado. Este tipo de pavimento como se mencionó líneas arriba utiliza unos bordes de confinamiento lateral para los bloques de concreto, los mismos que pueden servir de confinamiento para el material que se usará de base, por lo que no se necesita un material aglutinante para mantener juntas las partículas del material.

La Norma Técnica Peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos se vuelve a contradecir diciendo muy claramente que el material de base para pavimentos de adoquines no debe contener material arcilloso ni limoso (partículas finas), sin embargo luego admite como buenas las gradaciones A, B, C y D (tabla N° 6 de la norma CE 010) y las recomienda usar como material de base en este tipo de pavimento a pesar que tienen una buena gradación y contienen una gran cantidad de partículas finas.

La gran permeabilidad que presenta este tipo de pavimento respecto a los pavimentos convencionales de asfalto y de concreto constituye una gran ventaja para evitar la acumulación del agua pluvial sobre la superficie del pavimento. Pero asimismo puede significar un problema para el buen funcionamiento del paquete estructural que se encuentra por debajo de los adoquines, que por concepción se diseñan en un estado seco, por lo que se hace necesario tomar en cuenta el comportamiento, la durabilidad y performance del paquete estructural desde el punto de vista de la infiltración a la cual va a estar sometido.

Muchos de los diseños en la ciudad de Piura de los pavimentos adoquinados han utilizado como material de base el afirmado, por lo que se podría pensar que ésta puede haber sido una de las causas por la que se hayan producido fallas en el paquete estructural de estos pavimentos.

Las especificaciones para el material de base descritas en la EG 2013 y en la Norma Técnica Peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos están orientadas al comportamiento estructural de los pavimentos, es decir a su resistencia mecánica; pero no hacen referencia alguna acerca de las características que deben presentar los materiales que conforman las diferentes capas del paquete estructural desde el punto de vista de su capacidad de drenaje.

Si bien el método de diseño de la AASHTO incluye un coeficiente de drenaje en el diseño del pavimento, este coeficiente es considerado como un factor de diseño para los espesores de la capas del pavimento, debido a que aumentan el numero estructural de diseño, pero en ningún caso toma en cuenta las características ni composición del material empleado en cada capa, por lo que no se puede decir que este método de diseño considera parámetros de permeabilidad de los materiales.

2.3 Estimación de la capacidad permeable de las bases de los pavimentos adoquinados según los criterios de filtros de Huang.

Huang (1993) establece que, un material para que sea considerado permeable debe presentar algunas características que vinculan al material que se encuentra adyacente a él, para que se asegure su adecuado funcionamiento ante la presencia del agua. Un material utilizado como una base permeable debe presentar un equilibrio en su constitución; es decir debe estar conformado tanto por partículas finas como por partículas gruesas. Debe contener una determinada cantidad de finos, para que, de esta manera se obstruya la posible migración de los finos del material adyacente hacia él, o dicho de otro modo los espacios de los poros en el material permeable que están en contacto con los suelos y rocas erosionadas deben de ser lo suficientemente pequeños para prevenir o evitar que las partículas sean lavadas hacia adentro o a través de ellos. Este criterio es llamado criterio de tubificación o erosión interna y se resume en la ecuación 2.1.

$$\frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{85} \text{ de la sub base}} < 5 \dots\dots\dots \text{E.c. 2.1}$$

Así como la capa de base debe de contener partículas finas como se menciona líneas arriba, también debe contener partículas gruesas para que se pueda transportar el agua sin ninguna resistencia significativa, o dicho de otro modo los espacios de los poros del material deben de ser suficientemente grandes para otorgarle suficiente permeabilidad, de manera que permita desplazarse a la filtración libremente y así impedir el fortalecimiento de las fuerzas de filtración y de las presiones hidrostáticas en el filtro.

Este requisito se le conoce como relación de permeabilidad y se muestra en la ecuación 2.2, donde se indica que el 15% del tamaño del material del filtro debe ser al menos 5 veces el tamaño del suelo protegido.

$$\frac{D_{15} \text{ del filtro}}{D_{15} \text{ de la sub base}} > 5 \dots\dots\dots \text{E.c. 2.2}$$

Por otro lado el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, establece como criterio adicional, el de uniformidad, que se muestra en la ecuación 2.3, el cual busca que las curvas granulométricas de las capas adyacentes sean algo paralelas, para asegurar una buena granulometría y que los esfuerzos a los que van a estar sometidas las capas se distribuyan de una mejor manera.

$$\frac{D_{50} \text{ del filtro}}{D_{50} \text{ de la sub base}} < 25 \dots\dots\dots \text{E.c. 2.3}$$

En ciertas ocasiones cuando las características granulométricas que presenta el material de base no cumplen con las relaciones mencionadas con respecto al material de sub base o de la sub rasante, se procede a la colocación de una capa adicional, llamada capa separadora, la cual se coloca por lo general debajo de la capa permeable. También se puede utilizar un geo textil como parte de la capa separadora.

Esta capa separadora no cumplirá una función estructural, el único requisito que deberá cumplir es que sea lo suficientemente resistente para proporcionar una plataforma adecuada para la construcción de la base permeable.

Los criterios de obstrucción y uniformidad deberán aplicarse tanto a la capa separadora como a la capa permeable drenante. Las ecuaciones se aplican primero considerando la capa separadora como filtro y la subyacente como suelo y luego considerando la base permeable como filtro y la separadora como suelo. En cambio el criterio de permeabilidad sólo se aplica a la capa separadora en relación con el suelo que la soporta, dado que la base permeable la satisface siempre por su alta permeabilidad.

Si partimos que el suelo característico que presenta la ciudad de Piura está constituido por depósitos de arenas limosas con intercalaciones de arenas de grano medio a fino en la superficie y con presencia de horizontes delgados de arcillas arenosas en profundidad, podemos determinar si las gradaciones que presenta la norma para el material de base para los pavimentos adoquinados tiene una capacidad de drenaje adecuada.

A continuación en la tabla 2.12 se muestra un perfil estratigráfico característico del terreno que presenta la ciudad de Piura, en base a los diferentes estudios de suelos desarrollados en diferentes zonas de la ciudad. A partir de estos datos se han obtenido curvas granulométricas similares, (que se incluyen en el anexo A), y se ha calculado los diámetros necesarios para aplicar los criterios de filtros de Huang.

Tabla 2.12. Perfil estratigráfico del suelo característico de la ciudad de Piura (Campos Muñoz, 2011: Estudio de la variabilidad del suelo de Piura)

| Profundidad (m) | Excavación | Nivel Freático | Descripción del Suelo | Clasificación SUCS/AASHTO |
|-----------------|------------|----------------|---|---------------------------|
| 0.00 | 0.85 m | No | Arena de grano fino | SM |
| 0.85 | 1.15 m | No | Arenas limosas mal graduada sin cohesión color beige de textura firme húmeda. | SP – SM A – 2 – 4 |
| 2.00 | | | | |

Los parámetros necesarios de la sub rasante extraídos del análisis granulométrico de los diferentes estudios de suelos realizados son:

- D_{15} = diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 15% del suelo, en peso.
- $D_{15} = 0.15 \text{ mm}$
- D_{50} = diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 50% del suelo, en peso.
- $D_{50} = 0.28 \text{ mm}$
- D_{85} = diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 85% del suelo, en peso.
- $D_{85} = 0.40 \text{ mm}$

A partir de las granulometrías dadas por la norma C.E 010 de Pavimentos Urbanos para las bases de pavimentos adoquinados que se muestran en la tabla 2.9 y cuyas curvas granulométricas se muestran en el anexo B, se procede a calcular los parámetros necesarios para aplicar los criterios de filtros de Huang. En la tabla 2.13 se pueden apreciar los valores de D_{15} y D_{50} tanto del límite superior y límite inferior de cada una de las gradaciones.

Tabla 2.13. Tabla resumen de parámetros D_{15} y D_{50} para las gradaciones B, C y D dadas por la norma C.E 010 de pavimentos urbanos para bases granulares.

| | Gradación B | | Gradación C | | Gradación D | |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Lím. Superior | Lím. Inferior | Lím. Superior | Lím. Inferior | Lím. Superior | Lím. Inferior |
| D_{15} | 0.07 mm | 0.43 mm | 0.07 mm | 0.43 mm | 0.07 mm | 0.16 mm |
| D_{50} | 2.90 mm | 13.00 mm | 2.00 mm | 9.52 mm | 0.68 mm | 4.76 mm |

Nota: La gradación "A" que presenta la norma no se ha tomado en cuenta debido a que se utiliza sólo para aquellos lugares con altitudes iguales o mayores a 3000 msnm.

Considerando cada uno de estos valores y los obtenidos de los estudios de suelos de la sub rasante detallados líneas arriba se procede a realizar el cálculo de cada uno de los criterios. En la tabla 2.14 se muestra el resumen de cada uno de los criterios que cumplen las diferentes curvas granulométricas para los materiales de base dadas por la norma C.E 010 de pavimentos urbanos.

Tabla 2.14. Tabla resumen de los criterios de filtros de Huang para cada una de las gradaciones dadas por la norma C.E 010 de Pavimentos Urbanos.

| | Gradación B | | Gradación C | | Gradación D | |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Lím. Superior | Lím. Inferior | Lím. Superior | Lím. Inferior | Lím. Superior | Lím. Inferior |
| Criterio de Tubificación | Sí cumple | Sí cumple | Sí cumple | Sí cumple | Sí cumple | Sí cumple |
| Criterio de Permeabilidad | No cumple | No cumple | No cumple | No cumple | No cumple | No cumple |
| Criterio de Uniformidad | Sí cumple | No cumple | Sí cumple | No cumple | Sí cumple | Sí cumple |

De la tabla anterior se concluye que ninguna gradación de los materiales de base que propone la norma puede actuar como filtro según los criterios adoptados por Huang para el tipo de suelo que presenta la ciudad de Piura.

Otra forma de verificar, si las curvas granulométricas del material de base son lo suficientemente permeables, es utilizando los criterios de caracterización granulométrico que se mencionaron en el apartado 1.5.5, a través de sus coeficientes de curvatura (C_c) y

de uniformidad (Cu). Con estos criterios se buscaría que los materiales de base no tengan finos, por lo que deberían mostrar una gradación uniforme.

Se pudo concluir que todas las curvas presentan una buena gradación, lo cual no es recomendable, debido a que la presencia de partículas finas obstruyen los poros del material, impidiendo el libre paso del flujo del agua.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que para el tipo suelo que presenta la ciudad de Piura, tanto por el criterio de filtros de Huang y el método de caracterización granulométrico; las bases granulares que plantea la norma, no garantizan una adecuada permeabilidad para actuar como filtros y permitir el libre paso del agua que se infiltra a través de la superficie de rodadura.

Capítulo 3

Medida de la tasa de infiltración in-situ que presentan los pavimentos de adoquines del casco urbano la ciudad de Piura utilizando el permeámetro LCS

La humedad es una característica muy especial en los pavimentos, ya que ésta reviste gran importancia sobre las propiedades de los materiales que conforman la estructura de los pavimentos y sobre el comportamiento de los mismos. El drenaje del agua debe ser considerado como parte importante en el diseño de carreteras, debido a que el exceso de agua combinado con el incremento de volúmenes de tránsito y cargas, se anticipan con el tiempo para ocasionar daño a las estructuras del pavimento.

El agua que penetra dentro de la estructura del pavimento ocasiona la reducción de la resistencia de los materiales granulares, reduce la resistencia de los suelos de la sub rasante cuando se satura y succiona los finos de los agregados de las bases, haciendo que las partículas de suelo se desplacen, ocasionando la pérdida de soporte por la erosión provocada.

3.1 Permeámetro LCS

El permeámetro LCS, es un permeámetro de carga fija; que evalúa la permeabilidad superficial del pavimento a partir del tiempo que tarda en evacuarse a través de la superficie del pavimento una cantidad fija de agua. Esta permeabilidad es en realidad infiltración, porque no se sabe si el flujo se mantiene vertical a lo largo de toda la estructura del pavimento o se disipa a través de las capas permeables más superficiales. Este instrumento fue elaborado por el Laboratorio de la Escuela de Caminos de Santander, en España (LCS), y su procedimiento de medida está descrito en la norma española NLT – 327/00 (2000). La característica principal de este instrumento es que permite evaluar la capacidad de drenabilidad o de infiltración de una manera fácil, rápida y barata.

El permeámetro LCS no necesita ningún tipo de calibración previa ya que cuenta con las marcas necesarias que permiten realizar la correspondiente medición del tiempo que tarda en infiltrarse el volumen de agua contenida entre ellas. En el anexo C se muestra un esquema del permeámetro.

El permeámetro LCS está constituido en esencia por las siguientes partes:

- a) Una base de apoyo formada por una placa rígida circular de acero, de 165 mm de diámetro y 10 mm de espesor, con un orificio circular en su centro de 40 mm de diámetro.
- b) Un tubo cilíndrico circular, de unos 40 mm de diámetro exterior, 30 mm de diámetro interior y 45 mm de altura, embutido como se indica la figura 3.1 en el orificio circular de la base de apoyo.
- c) Un tubo cilíndrico transparente de 94 mm de diámetro interior y unos 500 mm de altura, unido firmemente y con cierre estanco en la base de apoyo. El tubo llevara marcadas dos señales de medida, grabadas en toda su periferia y situadas respectivamente a 100 y 350 mm del fondo de la base de apoyo.
- d) Una carga de forma teórica de (20 ± 0.5) kg de masa, cuyo orificio y base permitan un apoyo estable sobre la placa circular.
- e) Un anillo circular estanco de caucho celular de 16 mm de espesor, que se adapte perfectamente a las irregularidades superficiales del pavimento para impedir el escape superficial del agua durante el ensayo. Para ello, su deformación o reducción de espesor bajo la carga de la pesa teórica deberá ser del (8 ± 0.5) % a los 30 segundos de carga, alcanzando una deformación final constante del (12 ± 0.5) % a los 5 minutos.

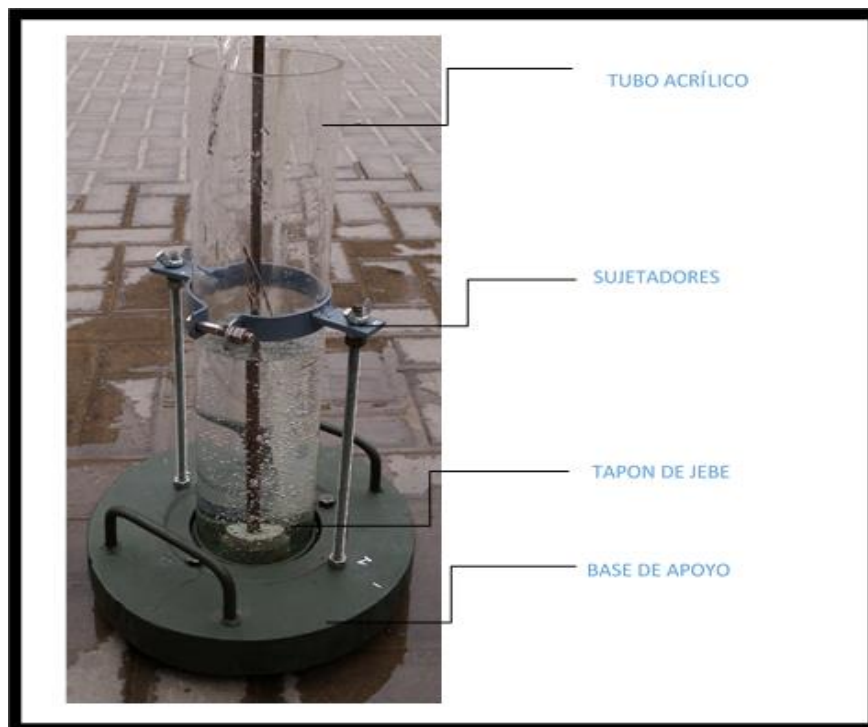


Fig. 3.1. Imagen del Permeámetro LCS usado en la presente investigación.
(Fuente: Elaboración propia)

3.2 Procedimiento de medida y toma de resultados

El procedimiento que se sigue es muy sencillo y práctico, pero tiene el inconveniente de que es un ensayo puntual y que, para su ejecución es necesario cortar el tránsito en la zona o carril de medida, con las consiguientes molestias para el tránsito y problemas de

seguridad para el personal y equipo de medida. Los pasos que se siguen para la medición son:

- a) Se sitúa el permeámetro en el punto elegido para el ensayo y se coloca la carga teórica sobre la base.
- b) A continuación se llena de agua el tubo transparente del permeámetro hasta unos 15 cm por encima de la marca superior de medida, y se deja que se vacíe a continuación para mojar y saturar el pavimento en la zona de medida.
- c) Seguidamente se vuelve a llenar de la misma forma el permeámetro y se anota el tiempo de evacuación en segundos que tarda el nivel del agua en descender desde la marca superior de medida hasta la inferior.

El resultado del ensayo realizado sobre un punto del pavimento será el tiempo en segundos obtenido en el apartado c) del procedimiento. Para cada ensayo se debe tener una reserva de agua a aproximadamente 20 litros. Así mismo, el cronómetro que se utilice en la medición del tiempo debe tener una precisión de 0.5 segundos, para que no se obtengan resultados alejados de la realidad. En la figura 3.2 se muestra como se desarrollaron las mediciones de la tasa de infiltración en campo.



Fig. 3.2. Mediciones de la tasa de infiltración en campo con el uso del permeámetro LCS.
(Fuente: Elaboración propia)

Para medir la tasa de infiltración que presenta el pavimento se debe de calcular el volumen de agua en el tubo de acrílico desde la marca superior hasta la marca inferior, dividirlo entre el tiempo que se demora en bajar el agua entre las marcas y ese resultado dividirlo nuevamente entre al área del orificio por donde sale el agua hacia el pavimento.

Si se trabaja con las unidades de longitud en centímetros y el tiempo en segundos, al calcular el volumen del agua se tiene cm^3 , al dividirlo entre el tiempo se tiene cm^3/seg y nuevamente al dividirlo entre el área menor se tiene $\text{cm}^3/\text{seg}/\text{cm}^2$; que es lo mismo que cm/seg .

3.3 Medida de la infiltración de los pavimentos in situ

3.3.1 Selección de las zonas de estudio

Para la presente investigación se seleccionaron cuatro zonas representativas de la ciudad, tanto en el distrito de Castilla como en el distrito de Piura, que presentan un tipo de suelo similar hasta los dos metros de profundidad. Las zonas seleccionadas presentan vías de uso similar (locales/vecinales); tanto para transporte público como para transporte privado.

Las zonas seleccionadas en el Distrito de Piura fueron: Urbanización Santa Isabel, Urbanización Ignacio Merino y Av. Sánchez Cerro. En el distrito de Castilla: el Cercado de Castilla. En el mapa que se muestra en la figura 3.3 se observan las cuatro zonas donde se realizaron las mediciones de la tasa de infiltración, y en las figuras 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 se detallan cada una de estas zonas.

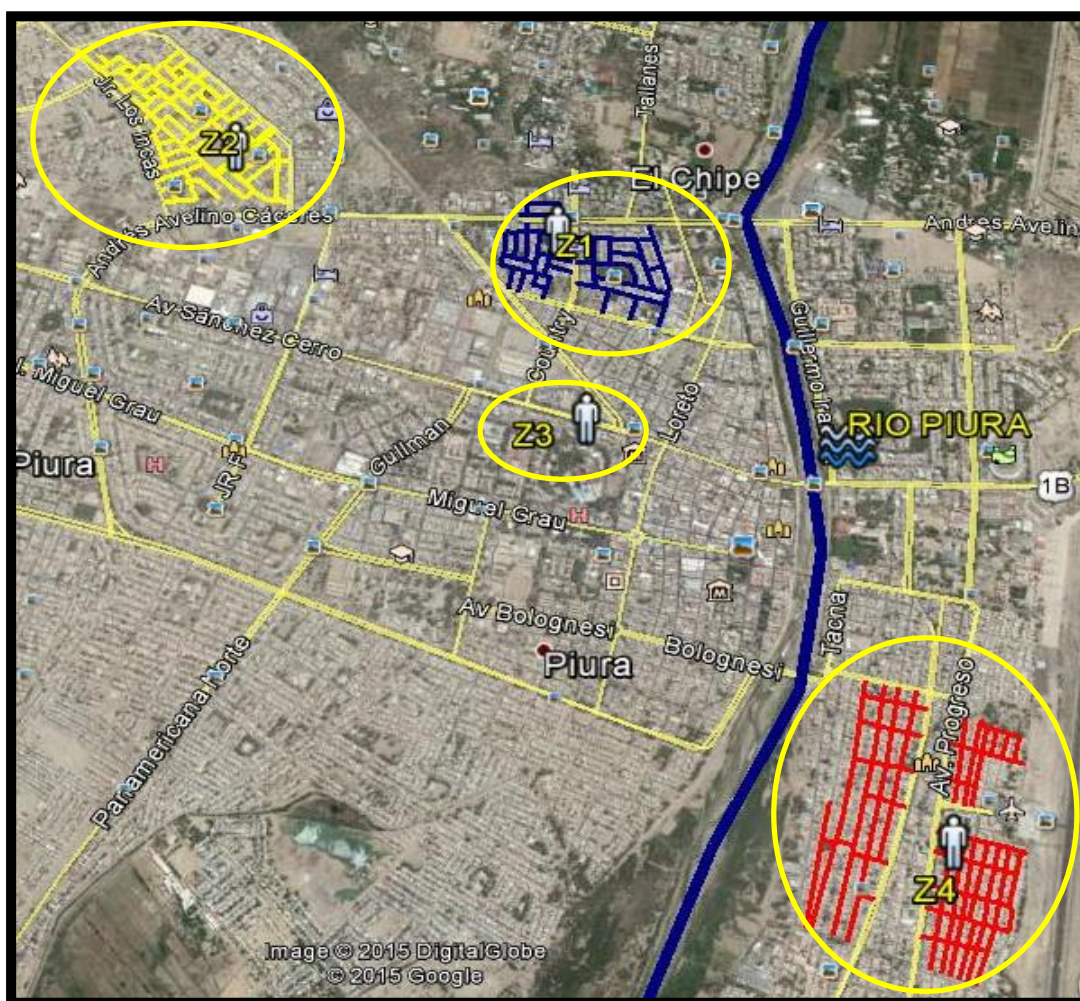


Fig. 3.3. Mapa de ubicación de las cuatro zonas de estudio. (Fuente Google Earth)

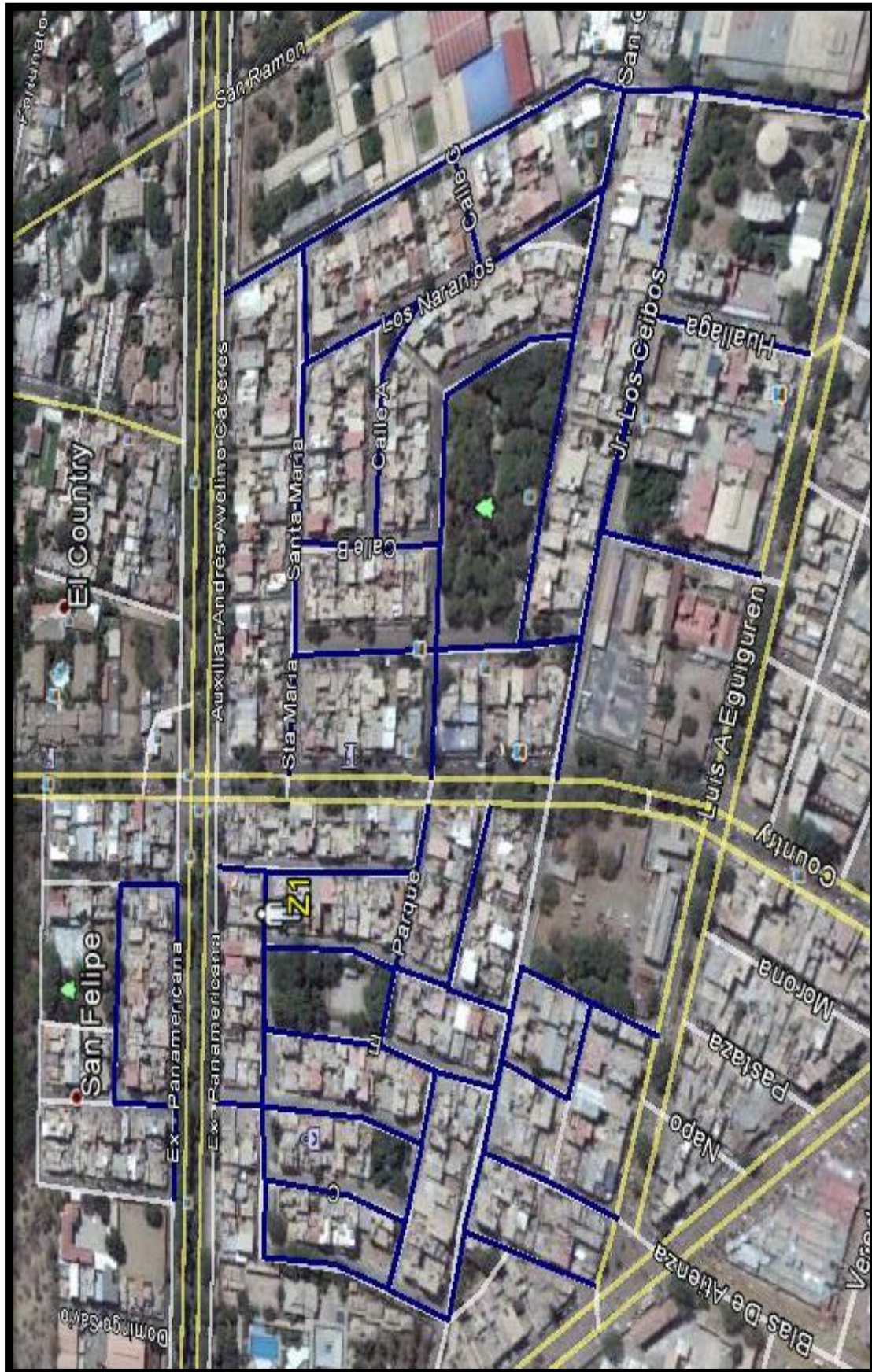


Fig. 3.4. Mapa de ubicación de la zona 1: Urbanización Santa Isabel. (Fuente Google Earth)



Fig. 3.6. Mapa de ubicación de la zona 3: Av. Sánchez Cerro. (Fuente Google Earth)

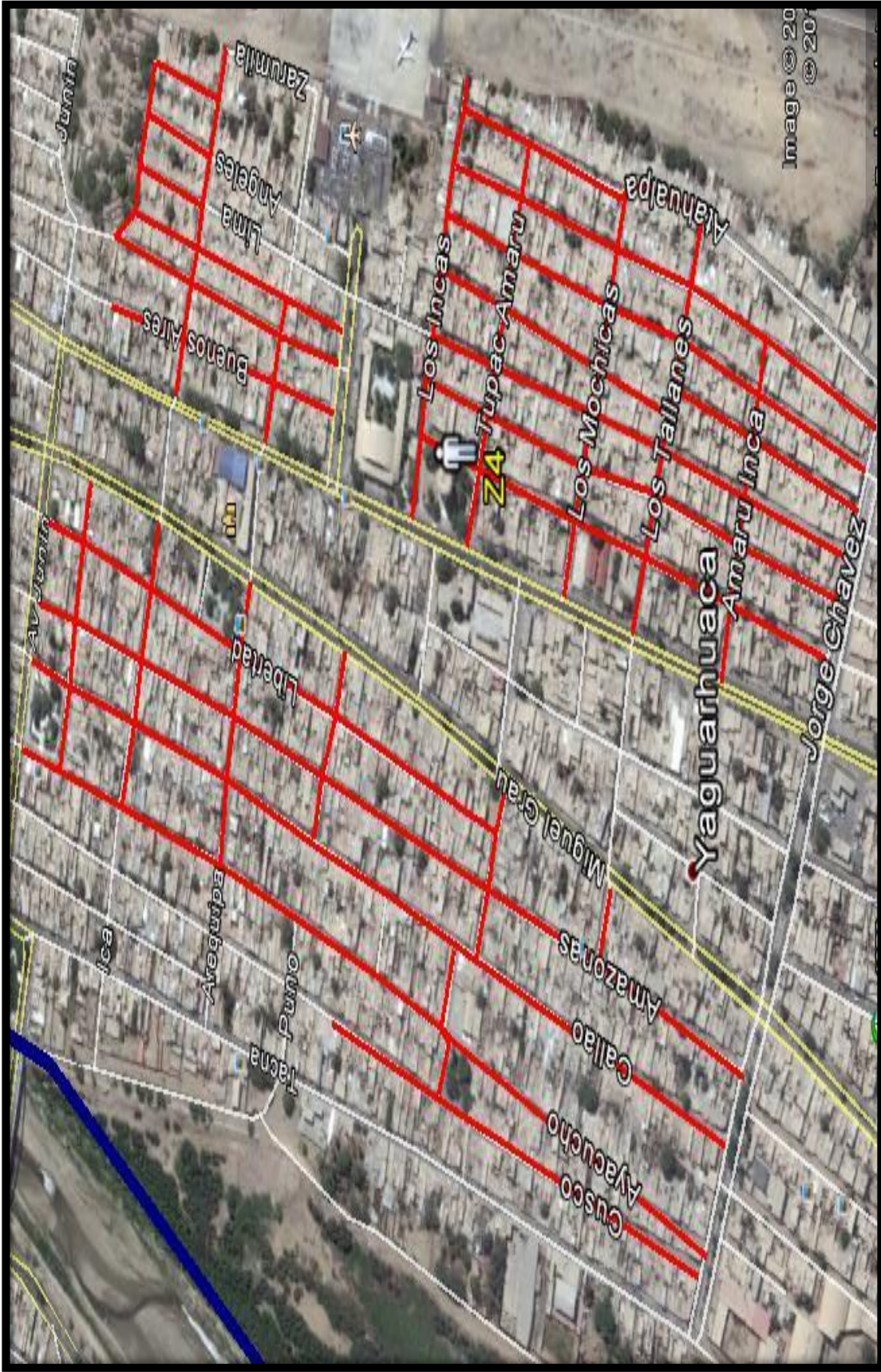


Fig. 3.7. Mapa de ubicación de la zona 4: Cercado de Castilla. (Fuente Google Earth)

3.3.2 Medida de la infiltración in situ

Para el cálculo de la tasa de infiltración de la superficie de los pavimentos de adoquines se dispusieron de cuatro medidas por cuadra. Cada medida se realizó cada 3 metros aproximadamente de forma alternada, es decir una a la derecha y la que le sigue a la izquierda, tal y como se ve en el esquema de la figura 3.8.

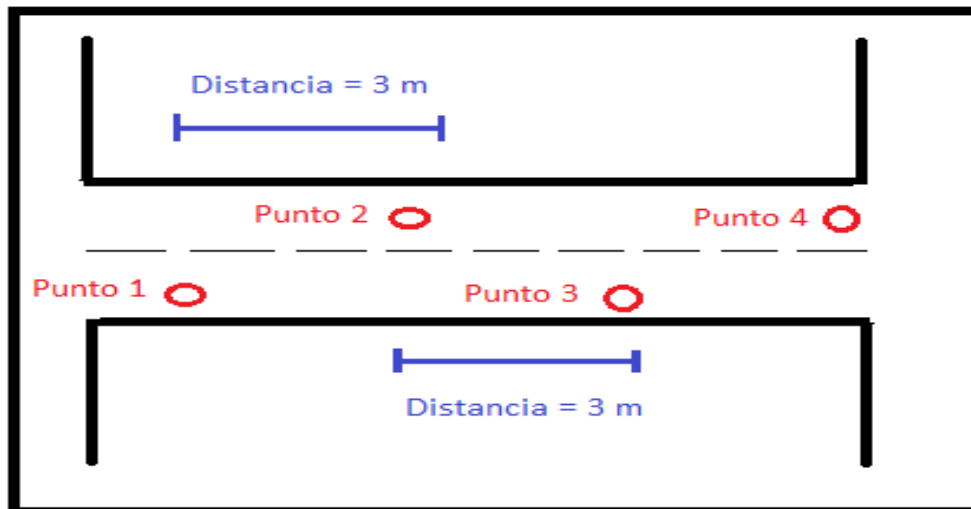


Fig. 3.8. Esquema de toma de medidas. (Fuente: Elaboración propia)

Como el permeámetro LCS no es un instrumento de precisión, se decidió realizar cuatro medidas en cada punto y trabajar con el promedio. Si existía algún resultado que se alejara mucho de los otros tres se despreciaba y sólo se consideraban los restantes para el cálculo del promedio, para que de esta forma no se obtuvieran resultados que no estén de acuerdo con la realidad.

En las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 que se muestran a continuación sólo se presenta el valor promedio de las cuatro mediciones y en el anexo D se presentan los valores de las cuatro mediciones realizadas en cada uno de los puntos.

Por diseño del permeámetro LCS se sabe que el tubo de acrílico tiene un diámetro interior de 94 mm, la diferencia entre la marca superior y la marca inferior es de 25 cm y que el diámetro del orificio embutido en la base es de 40 mm.

Tabla 3.1. Tasas de infiltración medidas en la zona 1.
(Fuente: Elaboración propia)

| Zona | Calle | Punto | Tiempo (seg) | Tasa de Infiltración (cm/seg) | Observaciones |
|---|----------------|-------|--------------|-------------------------------|--------------------------|
| Zona 1: Urbanización Santa Isabel | Calle F | 1 | 5.34 | 25.85 | Punto cercano a un buzón |
| | | 2 | 9.25 | 14.93 | |
| | | 3 | 6.14 | 22.49 | Presenta asentamiento |
| | | 4 | 8.17 | 16.90 | |
| | Calle D | 1 | 9.23 | 14.96 | |
| | | 2 | 11.06 | 12.48 | |
| | | 3 | 8.41 | 16.42 | |
| | | 4 | 9.45 | 14.61 | |
| | Jr. Los Ceibos | 1 | 7.56 | 18.26 | |
| | | 2 | 6.78 | 20.36 | Presenta asentamiento |
| | | 3 | 8.79 | 15.71 | |
| | | 4 | 9.56 | 14.44 | |
| | Calle C | 1 | 4.78 | 28.88 | |
| | | 2 | 8.23 | 16.78 | |
| | | 3 | 7.56 | 18.26 | |
| | | 4 | 4.78 | 28.88 | Presenta asentamiento |
| | Calle E | 1 | 6.98 | 19.78 | |
| | | 2 | 4.67 | 29.56 | |
| | | 3 | 5.89 | 23.44 | |
| | | 4 | 7.96 | 17.34 | Presenta asentamiento |

Tabla 3.2. Tasas de infiltración medidas en las zonas 2.
(Fuente: Elaboración propia)

| Zona | Calle | Punto | Tiempo (seg) | Tasa de Infiltración (cm/seg) | Observaciones |
|--|--------------------|-------|--------------|-------------------------------|-----------------------|
| Zona 2: Urbanización Ignacio Merino | Calle 15 | 1 | 8.69 | 15.89 | |
| | | 2 | 3.06 | 45.12 | Presenta asentamiento |
| | | 3 | 7.56 | 18.26 | |
| | | 4 | 4.02 | 34.34 | Presenta asentamiento |
| | Calle 10 | 1 | 7.56 | 18.26 | |
| | | 2 | 4.75 | 29.07 | Presenta asentamiento |
| | | 3 | 3.55 | 38.89 | Presenta asentamiento |
| | | 4 | 4.25 | 32.48 | Presenta asentamiento |
| | Calle 11 | 1 | 7.89 | 17.50 | |
| | | 2 | 6.98 | 19.78 | |
| | | 3 | 4.67 | 29.56 | |
| | | 4 | 6.54 | 21.11 | |
| | Calle 9 | 1 | 9.23 | 14.96 | |
| | | 2 | 8.56 | 16.13 | Presenta asentamiento |
| | | 3 | 9.12 | 15.14 | |
| | | 4 | 9.34 | 14.78 | |
| | Av. Ignacio Merino | 1 | 8.56 | 16.13 | Presenta asentamiento |
| | | 2 | 7.67 | 18.00 | |
| | | 3 | 7.76 | 17.79 | |
| | | 4 | 8.05 | 17.15 | Presenta asentamiento |

Tabla 3.3. Tasas de infiltración medidas en las zonas 3.
(Fuente: Elaboración propia)

| Zona | Calle | Punto | Tiempo (seg) | Tasa de Infiltración (cm/seg) | Observaciones |
|---------------------------------|------------------------------------|-------|--------------|-------------------------------|-----------------------|
| Zona 3: Av. Sánchez Cerro | Frente a Ittsa | 1 | 9.87 | 13.99 | |
| | | 2 | 6.57 | 21.01 | Presenta asentamiento |
| | | 3 | 7.23 | 19.10 | |
| | | 4 | 8.35 | 16.53 | Presenta asentamiento |
| | Frente a Transporte Chiclayo | 1 | 4.65 | 29.69 | |
| | | 2 | 4.23 | 32.64 | |
| | | 3 | 5.51 | 25.06 | Presenta asentamiento |
| | | 4 | 3.08 | 44.82 | Presenta asentamiento |

Tabla 3.4. Tasas de infiltración medidas en las zonas 4.
(Fuente: Elaboración propia)

| Zona | Calle | Punto | Tiempo (seg) | Tasa de Infiltración (cm/seg) | Observaciones |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|--------------|-------------------------------|-----------------------|
| Zona 4: Cercado de Castilla | Calle Hipólito Unanue | 1 | 6.75 | 20.45 | |
| | | 2 | 8.98 | 15.37 | |
| | | 3 | 8.70 | 15.87 | |
| | | 4 | 7.56 | 18.26 | |
| | Calle Libertad | 1 | 8.36 | 16.51 | |
| | | 2 | 7.52 | 18.36 | |
| | | 3 | 8.05 | 17.15 | |
| | | 4 | 6.63 | 20.82 | |
| | Calle Túpac Yupanqui | 1 | 7.04 | 19.61 | |
| | | 2 | 4.15 | 33.27 | Presenta asentamiento |
| | | 3 | 5.65 | 24.44 | |
| | | 4 | 7.52 | 18.36 | |
| | Calle Amaru Inca | 1 | 4.10 | 33.67 | Presenta asentamiento |
| | | 2 | 4.75 | 29.07 | Presenta asentamiento |
| | | 3 | 5.23 | 26.40 | Presenta asentamiento |
| | | 4 | 4.63 | 29.82 | Presenta asentamiento |
| | Calle Puno | 1 | 6.87 | 20.10 | |
| | | 2 | 7.98 | 17.30 | |
| | | 3 | 6.89 | 20.04 | |
| | | 4 | 8.78 | 15.72 | |

Capítulo 4

Análisis de resultados

4.1 Caracterización de los pavimentados de adoquines medidos en campo

Se realizó una caracterización inicial para determinar los atributos que presentan los pavimentos analizados y cómo podrían influir en la tasa de infiltración medida. Los resultados se muestran en la tabla 4.1 para cada zona de estudio respectivamente.

Se registró el tipo de vía, el grado de conservación en que se encuentra la vía, el tipo de adoquín empleado en el pavimento, el patrón de armado de los adoquines y el ancho promedio de las juntas.

Tabla 4.1. Caracterización de los pavimentos a ensayar.
(Fuente: Elaboración propia)

| Zona | Calles | Tipo de Vía | Estado general de la Vía | Tipo de Adoquín | Dimensiones del Adoquín | Patrón de Armado de la Vía | Ancho promedio de Junta (mm) |
|--|-------------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Zona 1: Urbanización Santa Isabel | Calle F | Local / Vecinal | Regular | Rectangular con Bisel | 20 x 10 x 8 | Espina de pescado a 90 ° | 4 |
| | Calle D | | Bueno | | | | 2.5 |
| | Los Ceibos | | Bueno | | | | 3 |
| | Calle C | | Bueno | | | | 4 |
| | Calle E | | Regular | | | | 6 |
| Zona 2: Urbanización Ignacio Merino | Calle 15 | Local / Vecinal | Regular | Rectangular sin Bisel | 20 x 10 x 8 | Espina de pescado a 90 ° | 4.5 |
| | Calle 10 | | Malo | | | | 5 |
| | Calle 11 | | Regular | | | | 4.5 |
| | Calle 9 | | Malo | | | | 7 |
| | Av. Ignacio Merino | | Regular | | | | 5 |
| Zona 3: Av. Sánchez Cerro | Frente a Ittsa | Local | Malo | Rectangular con Bisel | 20 x 10 x 8 | Espina de pescado a 90 ° | 6.5 |
| | Frente a Transportes Chiclayo | | Malo | | | | 7 |

| Zona | Calles | Tipo de Vía | Estado general de la Vía | Tipo de Adoquín | Dimensiones del Adoquín | Patrón de Armado de la Vía | Ancho promedio de Junta (mm) |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Zona 4: Cercado de Castilla | Calle Hipólito Unanue | Local / Vecinal | Bueno | Rectangular con Bisel | 20 x 10 x 6 | Espina de pescado a 45 ° | 3.5 |
| | Calle Libertad | | Bueno | | | | 4 |
| | Calle Túpac Yupanqui | | Regular | | 20 x 10 x 8 | Espina de pescado a 90 ° | 5.5 |
| | Calle Amaru Inca | | Malo | | | | 6.5 |
| | Calle Puno | | Regular | | | | 20 x 10 x 6 |

Se han graficado los resultados obtenidos para establecer algunas relaciones entre el estado de conservación en que se encuentran los pavimentos y las características de los adoquines usados, el patrón de armado empleado y el ancho de junta.

4.1.1 Efecto del ancho de la junta en la condición del pavimento

La longitud de junta que presenta las superficie de rodadura de los pavimentos adoquinados también influye en tasa de infiltración, pero como en la ciudad de Piura los pavimentos adoquinados sometidos al tránsito vehicular son construidos con bloques rectangulares, la longitud de junta siempre será la misma, es decir en un metro cuadrado, la longitud de junta será constante independientemente del patrón de armado que se use. Si se utilizaran adoquines de diferentes formas en los pavimentos si hubiera influido la longitud de junta en el valor de la tasa de infiltración obtenida. Por eso sólo se analizó el ancho.

En la figura 4.1 se muestra la relación que existe entre el estado de la vía y el ancho promedio de las juntas.

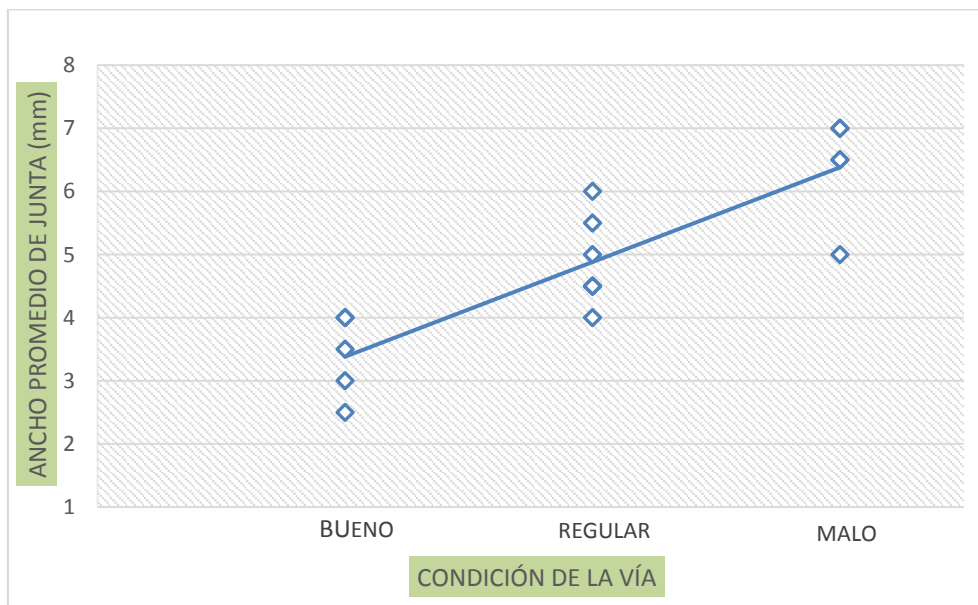


Fig. 4.1. Relación entre el ancho promedio de junta y el estado general de la vía en el casco urbano de la ciudad de Piura. (Fuente: Elaboración propia)

El gráfico nos muestra como varía el estado de la vía conforme va aumentando el ancho promedio de las juntas. Se observa una cierta tendencia, de modo que a menor ancho de junta, el pavimento se encuentra en mejores condiciones; mientras que, cuando mayor es el ancho de junta, más deteriorada se encuentra la vía.

No se pueden establecer valores específicos de ancho de juntas a partir de los cuales un pavimento sea considerado bueno, malo o regular, ya que el estado de la vía también se ve influenciado por otros factores como son: espesor de la cama de arena de asiento, el material usado en la base y la arena usada en el sellado de las juntas.

4.1.2 Efecto del bisel del adoquín en la condición del pavimento

Los adoquines empleados en los pavimentos analizados son en su totalidad bloques rectangulares. El 71% de los pavimentos medidos ha sido construido con adoquines rectangulares con bisel y el restante 29% ha utilizado adoquines sin bisel. El bisel, es un chaflán o plano inclinado que se encuentra en los bordes de la cara superior de los bloques, que no tiene más de 1 cm de ancho y mejora la apariencia de los adoquines.

En la figura 4.2 se observa que del total de pavimentos que utilizaron los adoquines con bisel, el 41.67% se encuentra en buen estado, el 33.33% se encuentra en un estado regular y solo un 25% está en malas condiciones.

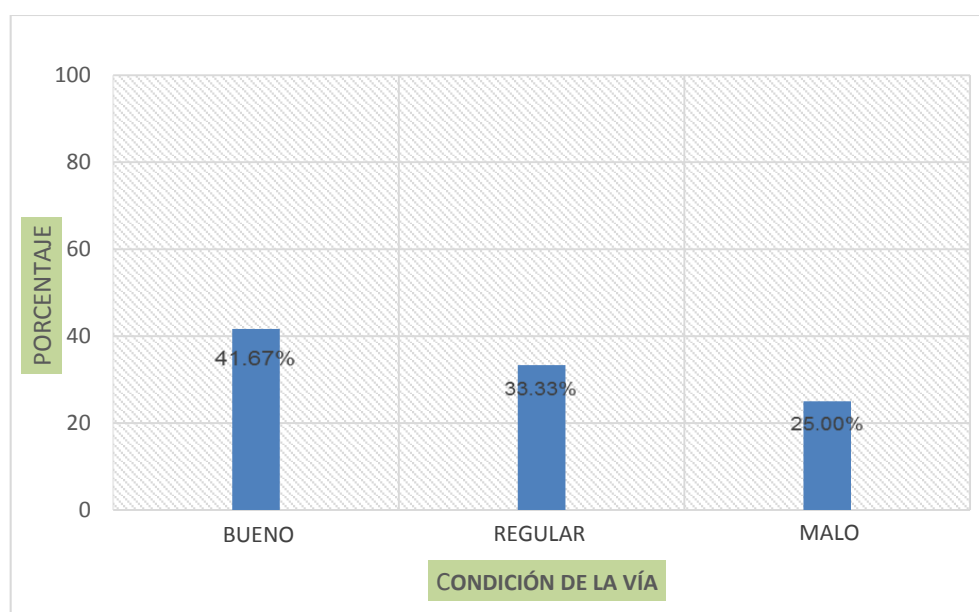


Fig. 4.2. Estado de conservación de los pavimentos construidos con adoquines con bisel en el casco urbano de la ciudad de Piura. (Fuente: Elaboración propia)

La figura 4.3 nos muestra que del total de pavimentos adoquinados construidos con bloques sin bisel, el 60% se encuentra en regular estado y el 40% en malas condiciones. Se observa que de todos los pavimentos analizados no hay ninguno donde se haya utilizado los adoquines sin bisel y que se encuentre en buenas condiciones.

Esto se debe a que el plano inclinado que presentan los adoquines en su cara superior facilita el ingreso de la arena de sellado en el interior de la junta, manteniendo la trabazón y transmisión de cargas entre las unidades. Los bloques que no presentan este plano

inclinado se les hace mucho más difícil el ingreso de la arena de sellado en las juntas y por tanto, la trabazón y transmisión de cargas.

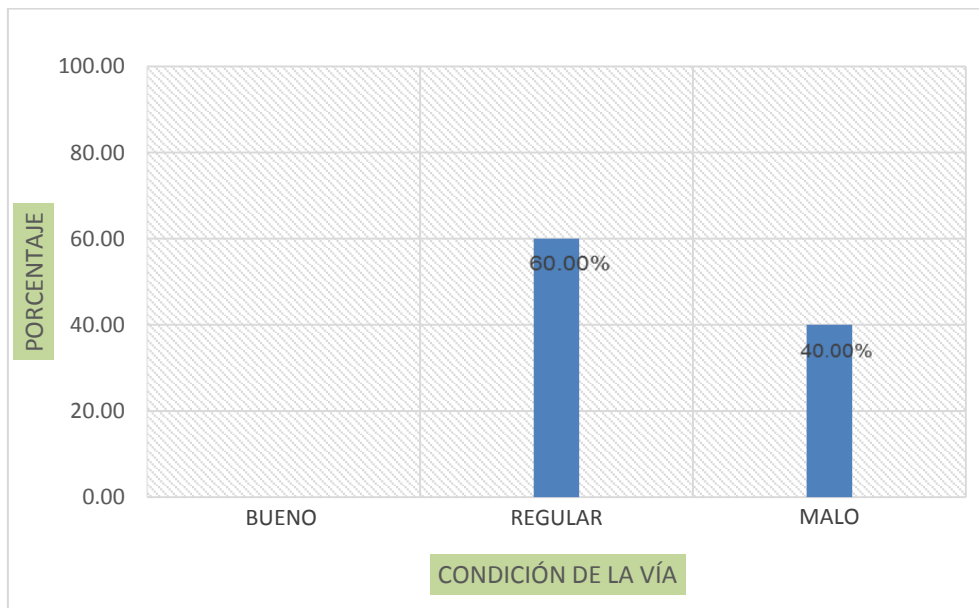


Fig. 4.3. Estado de conservación de los pavimentos construidos con adoquines sin bisel en el casco urbano de la ciudad de Piura. (Fuente: Elaboración propia)

4.1.3 Efecto del espesor del adoquín en la condición del pavimento

El espesor de los bloques dependerá de las cargas de tránsito bajo las cuales estará sometido el pavimento, ya que el espesor influye directamente en la estabilidad de la vía pero no tiene gran influencia en la cantidad de agua que se infiltra a través de la superficie de rodadura, debido a que el agua que ingresa al paquete estructural lo hace a través de las juntas que hay entre los bloques y cualquier sea el tipo de bloque usado siempre habrán juntas entre ellos.

En la figura 4.4 se muestra las condiciones en que se encuentran las vías que han sido construidas con adoquines de 8 y 6 cm respectivamente. No se puede establecer una relación directa entre el estado en que se encuentra la vía con respecto al espesor de los bloques debido a que el estado del pavimento se ve influenciado por la calidad de la base que se coloque. En la gráfica se observa que el mayor porcentaje de los pavimentos que se encuentran en buenas condiciones han sido construidos con bloquetas de 6 cm, mientras que el mayor porcentaje de pavimentos que están en malas condiciones han sido construidos con bloques de 8 cm. Lo que podemos concluir de esta gráfica es que no siempre el colocar bloques de mayor espesor en la superficie de rodadura nos asegura una mejor calidad de pavimento. También puede ser que algunos pavimentos estén siendo esforzados más allá de su propia capacidad lo que está generando un rápido deterioro del paquete estructural, por lo que se debe evaluar el nivel de tráfico bajo el cual este sometida la vía.

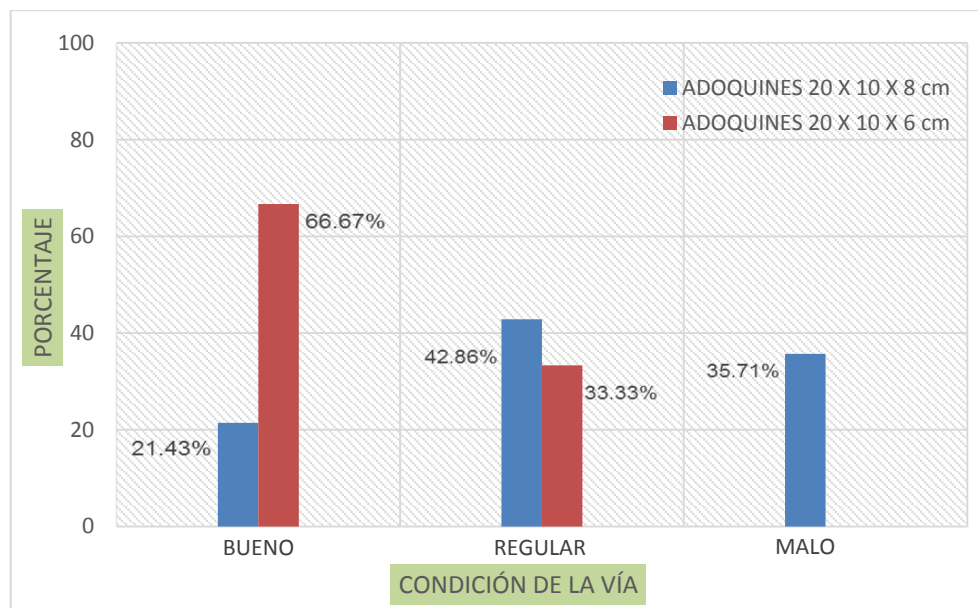


Fig. 4.4. Estado de conservación de los pavimentos construidos con adoquines de 20x10x8 cm y 20x10x6 cm en el casco urbano de la ciudad de Piura. (Fuente: Elaboración propia)

4.2 Análisis de los resultados de las tasas de infiltración de los pavimentos adoquinados medidos en campo

Tomando los valores de las tasas de infiltración medidas en el capítulo 3 y el valor de los anchos de juntas promedio medidos en la tabla 4.1 se han elaborado las gráficas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, donde se muestra la relación que existe entre estos dos parámetros para cada una de las zonas de estudio.

Se observa que en las zonas 1, 3 y 4 hay una relación marcada entre ambos parámetros, donde a mayor ancho de junta se tiene una mayor tasa de infiltración y viceversa, lo cual es lógico debido a que cuanto mayor espacio haya entre los adoquines de concreto mayor cantidad de agua pasara a través de ellos. En la zona 2 pasa lo contrario, ya que a mayor ancho de junta se tiene una menor tasa de infiltración.

La zona donde se registra un ancho de junta mayor y una menor tasa de infiltración es en la calle 9, (Urbanización Ignacio Merino), calle que al momento de ser pavimentada se ha colocado como material de base el afirmado con un índice de plasticidad de 6%, mientras que en las demás calles analizadas en esta zona se ha colocado un material que presentan un índice de plasticidad promedio entre 3 y 4%, es decir contiene menos finos, por lo que permite un mayor paso de agua a través de él a pesar que estas calles presenten un ancho de junta menor al de la calle 9.

Cabe indicar que la medida de la tasa de infiltración de los pavimentos adoquinados a través del permeámetro LCS mide el tiempo en que la película de agua desaparece de la superficie de rodadura de los pavimentos adoquinados. El agua que se infiltra en el pavimento se almacena en la cama de arena y su permanencia puede saturar la capa de base, la cual es susceptible a asentamientos por ser menos permeable.

En la tabla F7 de la Norma Técnica Peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos hay límites máximos de índice de plasticidad (IP) indicados para los materiales de base y sub base, los cuales no se podría decir que deban modificarse, debido a que la plasticidad no es el único

parámetro que influye en la permeabilidad del material. El contenido de partículas finas es el parámetro que se relaciona directamente con el grado de permeabilidad según lo detalla Hazen en su fórmula de correlación (ver capítulo 1), la cual es empleada en la presente investigación para determinar el coeficiente de permeabilidad del material.

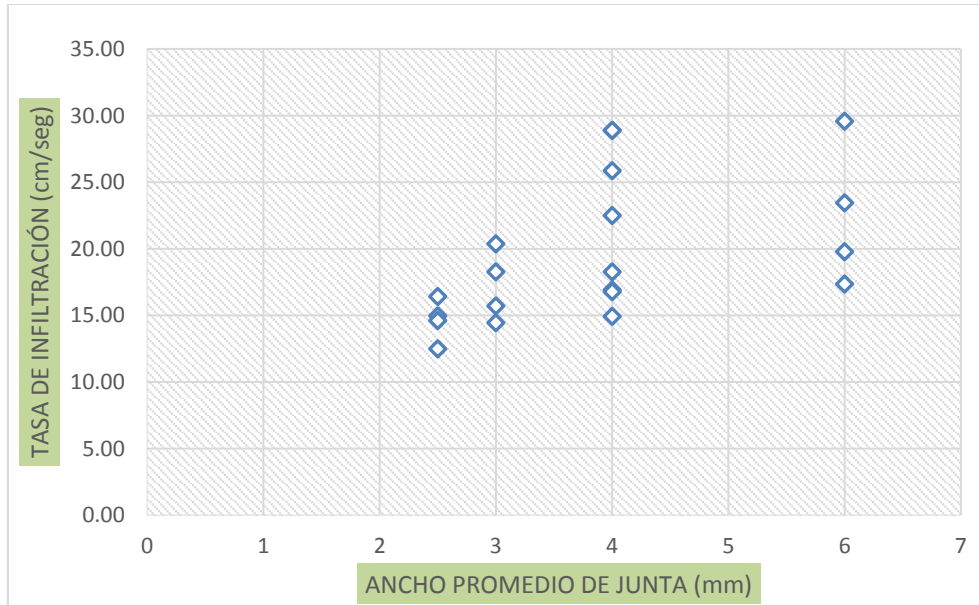


Fig. 4.5. Relación entre el ancho promedio de junta y la tasa de infiltración en la zona 1.
(Fuente: Elaboración propia)



Fig. 4.6. Relación entre el ancho promedio de junta y la tasa de infiltración en la zona 2.
(Fuente: Elaboración propia)

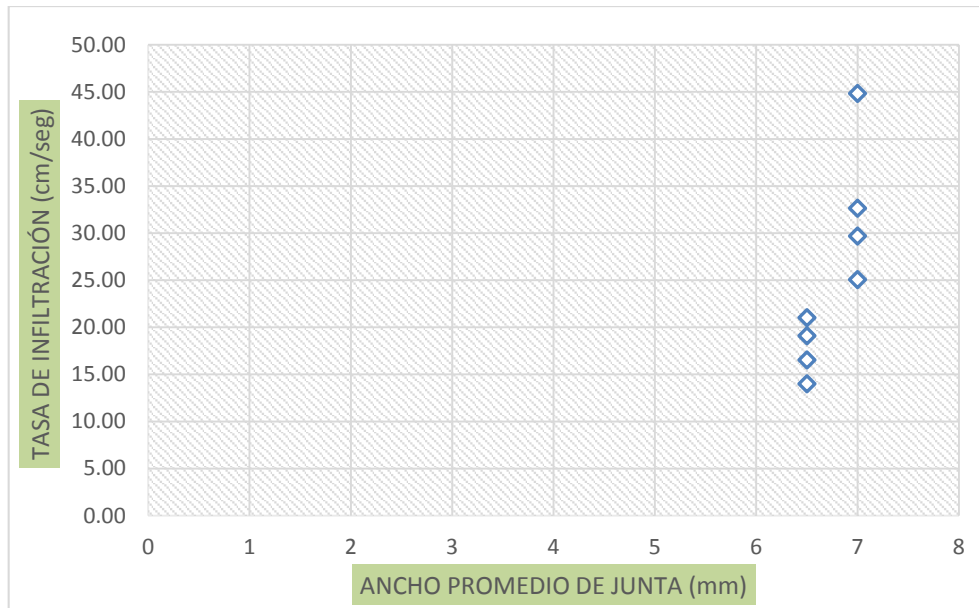


Fig. 4.7. Relación entre el ancho promedio de junta y la tasa de infiltración en la zona 3.
(Fuente: Elaboración propia)

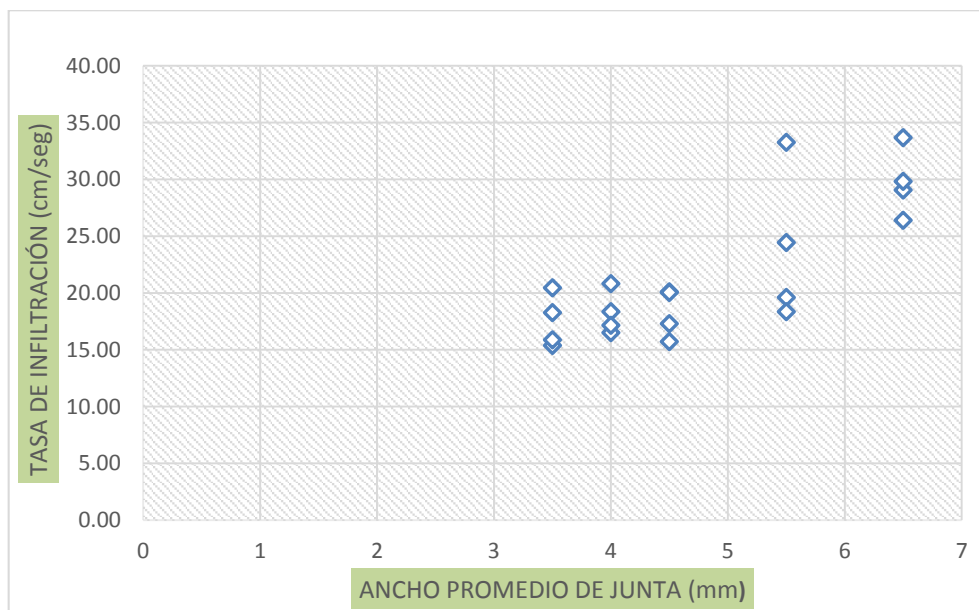


Fig. 4.8. Relación entre el ancho promedio de junta y la tasa de infiltración en la zona 4.
(Fuente: Elaboración propia)

A partir de cada una de las gráficas anteriores se ha calculado la tasa de infiltración promedio para cada una de las zonas de análisis. Para que a partir de ella se pueda realizar el cálculo de la permeabilidad que requiere tener el material de base para que permita la infiltración del agua que ingresa por la superficie de rodadura. En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.2. Valores de la tasa de infiltración promedio para cada una de las zonas de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de medición | Ancho de junta promedio (mm) | Valores de tasa de infiltración (cm/seg) | | |
|------------------|------------------------------|--|--------------|----------------|
| | | Valor mínimo | Valor máximo | Valor promedio |
| 1 | 3.90 | 14.62 | 22.53 | 18.99 |
| 2 | 5.50 | 15.25 | 25.20 | 21.30 |
| 3 | 6.75 | 17.66 | 33.05 | 25.36 |
| 4 | 4.80 | 17.49 | 29.74 | 21.53 |

Las zonas 1 y 4, que son las zonas correspondientes a la Urbanización Santa Isabel y el Cercado de Castilla respectivamente, presentan un ancho de junta promedio que se encuentra dentro de los valores permitidos por la norma (entre 2 y 5 mm); mientras que las zonas de Ignacio Merino y la Av. Sánchez Cerro superan este rango. Esto se ve reflejado en el estado en que se encuentran los pavimentos en cada zona, donde en las zonas 2 y 3 las vías adoquinadas presentan grandes ahuellamientos.

En la figura 4.9 se muestra la condición en que se encuentran las vías y el valor de las tasa de infiltración que presentan. Se observa que el rango de variación de los valores de infiltración es más amplio cuando la condición del pavimento es mala, pero el valor mínimo, independientemente de la condición del pavimento, es muy similar (15 cm/seg), lo cual coincide con lo que dice la literatura (Sánchez, 1998 y Montejo, 1997).

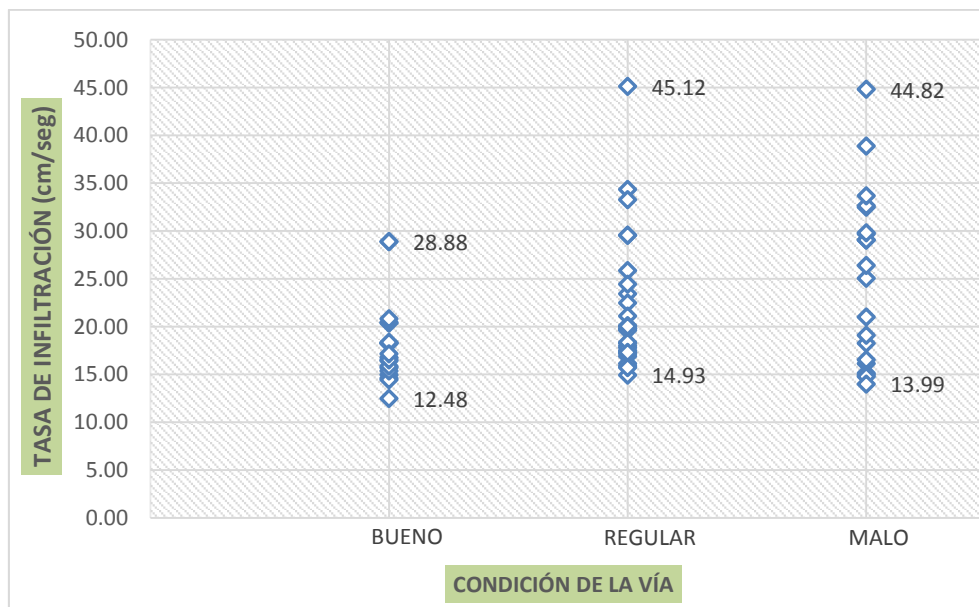


Fig. 4.9. Relación entre la condición de la vía y la tasa de infiltración medida. (Fuente: Elaboración propia)

4.3 Cálculo de la permeabilidad de los materiales de base requeridos para las tasas de infiltración medidas en las zonas de estudio.

Investigaciones realizadas por Sánchez (1998), permitieron establecer los parámetros de diseño necesarios para determinar el coeficiente de permeabilidad que debería tener un material de base a partir de la tasa de infiltración que presente la superficie de rodadura del pavimento.

Este cálculo de la permeabilidad se basa en el cálculo previo del paquete estructural del pavimento, donde se define el espesor que necesita la capa de base para soportar las cargas del tránsito bajo las cuales va a estar expuesta la vía.

Además del espesor de la capa de base se necesitan los datos geométricos del tramo a pavimentar como son: la longitud de la vía, la pendiente longitudinal y la pendiente transversal.

A continuación en la tabla 4.3 se muestra un resumen de los datos necesarios para el cálculo en cada una de las zonas de estudio.

Tabla 4.3. Datos requeridos para el cálculo de la permeabilidad requerida de las bases para cada una de las zonas de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de medición | Espesor (cm) | Longitud de la vía (cm) | Pendiente longitudinal (%) | Pendiente transversal (%) |
|------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1 | 20 | 100 | 2% | 1 |
| 2 | 20 | 100 | 2% | 1 |
| 3 | 25 | 100 | 2% | 1.5 |
| 4 | 20 | 100 | 2% | 1 |

Todas las zonas de estudio presentan una topografía casi plana, por lo que se considera una pendiente longitudinal de 2%. La pendiente transversal que se está considerando es el bombeo que presentan las vías.

En todas las zonas de estudio se han encontrado pavimentos de diferente longitud, calles cortas entre 100 y 200 metros de largo y avenidas principales de más de 500 metros de largo. Se ha decidido escoger un patrón de longitud de 1 metro de vía pavimentada para de esta manera expresar los valores obtenidos por cada metro de pavimento.

El espesor de la capa de base ha sido determinado en función de información recolectada de los expedientes técnicos de las obras de pavimentaciones realizadas en cada una de las zonas de estudio.

Con los datos anteriores, se procede a realizar el cálculo de la pendiente resultante mediante la ecuación 3.1.

$$S_R = \sqrt{S^2 + S_x^2} \dots\dots\dots \text{E.c. 3.1}$$

Dónde: S_R = pendiente resultante.

S = pendiente longitudinal.

S_x = pendiente transversal

Utilizando el espesor de la capa de base y la longitud de vía se calcula el coeficiente “X” mediante la ecuación 3.2.

$$X = \frac{L_R}{H} \dots\dots\dots \text{E.c. 3.2}$$

Dónde: X = coeficiente.

L_R = longitud del tramo a pavimentar.

H = espesor de la capa de base obtenida del diseño estructural.

En la tabla 4.4 se muestra el resumen de los cálculos realizados para cada una de las zonas de estudio.

Tabla 4.4. Resumen de la pendiente resultante y coeficiente X para cada una de las zonas de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de medición | Pendiente resultante (S_R) | Coficiente X |
|------------------|--------------------------------|--------------|
| 1 | 0.02 | 5 |
| 2 | 0.02 | 5 |
| 3 | 0.03 | 4 |
| 4 | 0.02 | 5 |

Haciendo uso de los valores mostrados en la tabla anterior se ingresa a la gráfica 4.10 y se observa el valor de “p”. El valor de la variable “p”, como se muestra en la ecuación 3.3, es función de la tasa de infiltración que presenta la superficie de rodadura del pavimento y la permeabilidad de la capa drenante.

$$p = \frac{q_i}{K} \dots\dots\dots \text{E.c. 3.3}$$

Dónde: p = valor obtenido de gráfica.

q_i = tasa de infiltración que presenta el pavimento.

K = coeficiente de permeabilidad que presenta la capa drenante.

En la tabla 4.5 se muestra los valores de la variable “p”, los valores promedios de la tasa de infiltración y el valor de permeabilidad que debería tener la capa de base en cada una de las zonas de estudio.

Tabla 4.5. Resumen de los valores de permeabilidad requeridos para cada una de las zonas de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de medición | Variable “p” ($p=q_i/k$) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) | Permeabilidad requerida en la base (cm/seg) |
|------------------|----------------------------|--|---|
| 1 | 4×10^{-2} | 18.99 | 474.75 |
| 2 | 4×10^{-2} | 21.30 | 532.50 |
| 3 | 4.5×10^{-2} | 25.36 | 563.56 |
| 4 | 4×10^{-2} | 21.53 | 538.25 |

Los valores obtenidos de permeabilidad requerida para los materiales de base de pavimentos adoquinados es aproximadamente 25 veces tasa de infiltración que presenta la superficie de rodadura. Este resultado obtenido concuerda con lo que Sañudo (2014) obtiene como resultado de su investigación en su tesis doctoral.

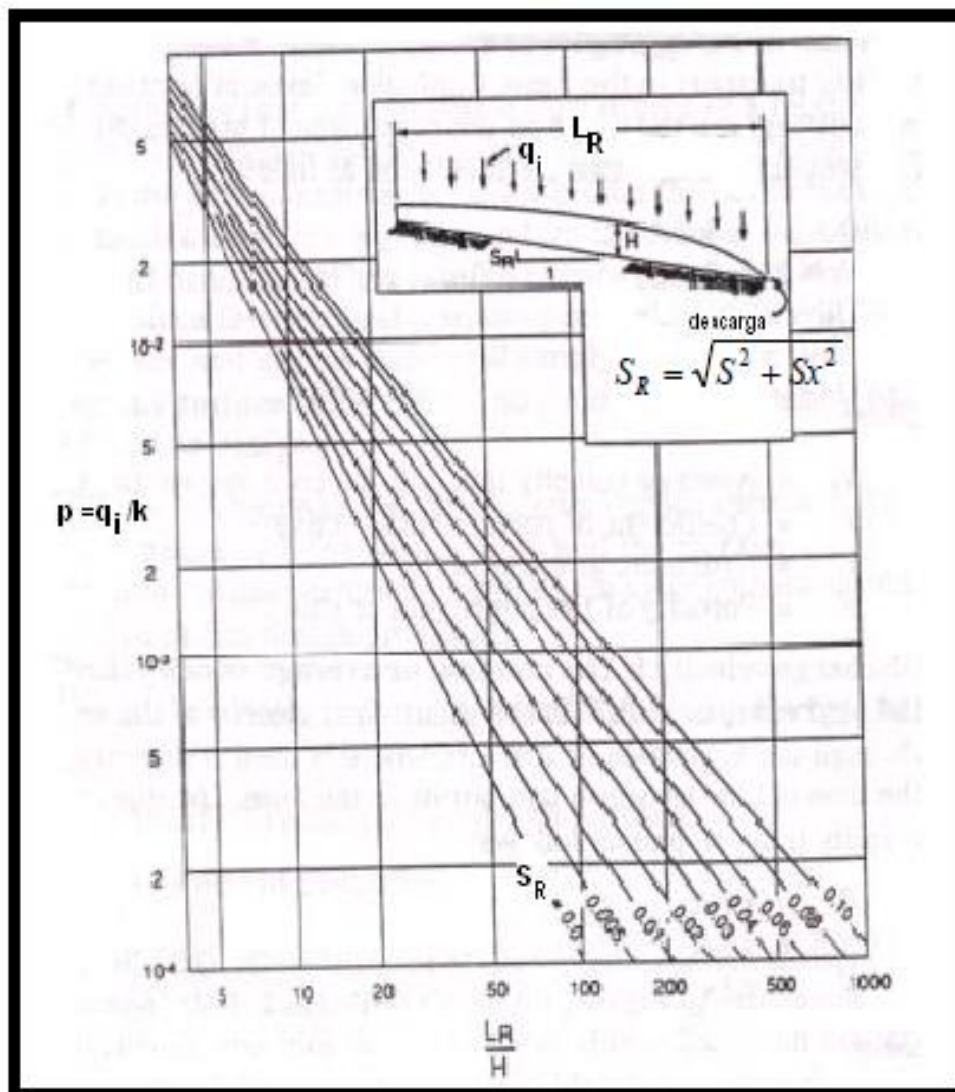


Fig. 4.10. Gráfica 4.10. q_i vs k (Sánchez Sabogal, 1998).

4.4 Cálculo de la permeabilidad de los materiales de base que recomienda la norma CE 010 de pavimentos urbanos

A partir de cada una de las gradaciones que presenta la Norma Técnica Peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos es posible estimar un coeficiente de permeabilidad esperado para esos materiales. De todas las correlaciones que existen para el cálculo de la permeabilidad, la de Hazen es la que más se ajusta, debido a que uno de los requisitos para su aplicación es que el diámetro efectivo de las partículas este comprendido entre 0.1 y 3 mm. Además esta ecuación es la que más se ajusta a materiales granulares como los que recomienda la norma.

Haciendo uso de la correlación que propone Allen Hazen (1892), se procede a determinar el coeficiente de permeabilidad “ k ” (cm/seg) para cada una de ellas. En la tabla 4.6 se muestra los valores de permeabilidad obtenidos de cada una de las curvas granulométricas que plantea la norma.

**Tabla 4.6. Valores de permeabilidad de las gradaciones que presenta la NTP CE 010.
(Fuente: Elaboración propia)**

| Gradación | Diámetro efectivo (D ₁₀) mm | Permeabilidad (k) cm/seg |
|-----------|--|-----------------------------|
| B | 0.18 | 0.038 |
| C | 0.19 | 0.042 |
| D | 0.10 | 0.012 |

Los resultados obtenidos muestran que las gradaciones que recomienda la norma presentan una muy baja permeabilidad, lo cual puede deberse a la cantidad de partículas finas que contienen en su granulometría. La norma no especifica un valor de permeabilidad que deban tener los materiales usados como base en los pavimentos adoquinados, pero se puede observar que existe una gran diferencia entre el valor requerido por la tasa de infiltración de agua que ingresa a través de la superficie de rodadura y los que se obtienen de las gradaciones propuestas.

4.5 Permeabilidad de los materiales de base colocados en los pavimentos adoquinados del casco urbano de la ciudad de Piura.

Analizando diferentes expedientes técnicos de pavimentaciones realizadas en cada una de las zonas de estudio de la ciudad de Piura, se observó que la mayoría de los pavimentos adoquinados emplean como material de base el afirmado.

En el anexo E, se muestra un ensayo de permeabilidad elaborado por el laboratorio de suelos de la Universidad de Piura; el material de afirmado procedente de la cantera de Vice cuyo IP es de 4%, que se utilizó como material de base, presentó una permeabilidad de 1.37×10^{-6} cm/seg.

En el capítulo 1 se concluyó que mientras más cantidad de finos presenta un material, menor es la permeabilidad que tiene, por ende se puede concluir que, un material de afirmado cuanto mayor IP presente menos permeable será y menor será el tiempo que demore en saturarse. Al estar saturada la capa de base y al estar expuesta la vía continuamente a las cargas de tránsito, el esfuerzo efectivo que desarrollan sus partículas disminuirá, produciendo hundimientos en el pavimento.

Se podría afirmar que, dada la alta permeabilidad de los pavimentos de adoquines, el contenido de finos en el afirmado es un factor negativo para su desempeño como parte de la estructura de los pavimentos urbanos.

4.6 Permeabilidad que presenta la sub rasante de los pavimentos adoquinados en cada una de las zonas de estudio

En el anexo A, se muestran las curvas granulométricas obtenidas de los estudios de suelos realizados en cada una de las zonas de estudio del material de sub rasante. A partir de dichas curvas se determinó la permeabilidad de la sub rasante utilizando la ecuación de correlación de Allen Hazen (1892).

En la tabla 4.7 se muestra los valores de diámetro efectivo que presentan cada una de las curvas granulométricas y los valores de permeabilidad obtenidos.

Tabla 4.7. Valores de permeabilidad de la sub rasante obtenidos a partir de sus curvas granulométricas en cada una de las zonas de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de estudio | Diámetro efectivo (D ₁₀) mm | Permeabilidad (k) cm/seg |
|-----------------|---|--------------------------|
| 1 | 0.165 | 0.032 |
| 2 | 0.115 | 0.015 |
| 3 | 0.124 | 0.018 |
| 4 | 0.154 | 0.028 |

Como se mencionó en capítulo 2 el suelo de la ciudad de Piura está constituido en su gran mayoría por depósitos de arenas limosas en su superficie y por la presencia de horizontes delgados de arcillas arenosas en profundidad, lo cual puede ser una de las causas de que se hayan obtenido valores bajos de permeabilidad, debido a que las partículas finas presentes en el material reducen las cantidad de vacíos originando que el flujo del agua se torne lento y tortuoso.

4.7 Comparación entre los valores de permeabilidad requeridos y los valores de permeabilidad reales de las capas del pavimento en cada una de las zonas de estudio.

En la tabla 4.8 se realiza una comparación entre los valores de permeabilidad requeridos por los materiales de base para hacerse cargo de las tasas de infiltración que presentan las superficie de rodadura de los pavimentos adoquinados de la ciudad de Piura, los valores de permeabilidad recomendados por la norma técnica peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos y los valores de permeabilidad de la sub rasante en cada una de las zonas de estudio.

Tabla 4.8. Resumen de las permeabilidades requeridas y permeabilidades reales para cada una las zonas de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de estudio | Tiempo promedio de infiltración (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) | Permeabilidad requerida (k _{req.}) cm/seg | Permeabilidad estimada (cm/seg) | |
|-----------------|---------------------------------------|--|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | | Permeabilidad de base (NTP CE 010) | Permeabilidad de sub rasante (Hazen) |
| 1 | 7.27 | 18.99 | 474.75 | 0.042 | 0.032 |
| 2 | 6.48 | 21.30 | 532.50 | 0.042 | 0.015 |
| 3 | 5.44 | 25.36 | 563.56 | 0.042 | 0.018 |
| 4 | 6.41 | 21.53 | 538.25 | 0.042 | 0.028 |

Podemos observar que para las tasas de infiltración medidas en cada una de las zonas de estudio, se necesitan materiales con grandes valores de permeabilidad, mayores a los que las diferentes gradaciones de la norma pueden ofrecer, y mayores a los que presentan los suelos de sub rasante de la ciudad de Piura. Es claro que las capas del paquete estructural no facilitan el flujo del agua que se infiltra a través de la superficie de rodadura y eso puede estar ocasionando la saturación de las diferentes capas y a su vez, los hundimientos localizados en el pavimento.

4.8 Medida de la tasa de infiltración en los pavimentos de asfalto y concreto.

Se realizó la medición de las tasas de infiltración que presentan los pavimentos de asfalto y de concreto para realizar una comparación entre el tiempo que le toma a los pavimentos convencionales absorber una cantidad de agua dada con respecto a los pavimentos adoquinados.

En la tabla 4.9 y 4.10 se muestran los valores de las tasas de infiltración que presentan los pavimentos de concreto y asfalto respectivamente. Las mediciones se realizaron en zonas del Cercado de Castilla, en la Urbanización Santa Isabel y en el centro de Piura (Av. Sullana).

Tabla 4.9. Tasa de infiltración de los pavimentos de concreto medidas en el casco urbano de la ciudad de Piura. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de medición | Ubicación de la zona de medición | Descripción del estado del pavimento | Tiempo de infiltración (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) |
|--|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Calle Emilio Vignolo (cuadra 1) | Cercado de Castilla | Buena condición | 1140 | 0.12 |
| Calle Amazonas (cuadra 4) | Cercado de Castilla | Buena condición | 670 | 0.21 |
| Calle Piura (cuadra 3) | Cercado de Castilla | Buena condición | 720 | 0.19 |
| Calle Callao (cuadra 3) | Centro de Piura | Buena condición | 865 | 0.16 |
| Av. Sullana (entre Av. Bolognesi y Av. Grau) | Centro de Piura | Buena condición | 1345 | 0.10 |

Tabla 4.10. Tasa de infiltración de los pavimentos de asfalto medidas en el casco urbano de la ciudad de Piura. (Fuente: Elaboración propia)

| Zona de medición | Ubicación de la zona de medición | Descripción del estado del pavimento | Tiempo de infiltración (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Calle Tacna (cuadra 4) | Cercado de Castilla | Presenta baches | 49 | 2.82 |
| Av. Grau (cuadra 7) | Cercado de Castilla | Buena condición | 40 | 3.45 |
| Av. Progreso (cuadra 8) | Cercado de Castilla | Presenta baches | 56 | 2.46 |
| Calle Santa María | Urbanización Santa Isabel | Malas condiciones | 78 | 1.77 |
| Calle A | Urbanización Santa Isabel | Malas condiciones | 123 | 1.12 |
| Calle B | Urbanización Santa Isabel | Malas condiciones | 96 | 1.44 |

De la misma manera que para los pavimentos adoquinados, se realizaron medidas de forma alternada en cada una de las calles (lado izquierdo y derecho de la vía). Se tomaron cuatro medidas en cada uno de los puntos y se trabajó con el valor promedio. En la tabla 4.11 se muestran las tasas de infiltración promedio que se han obtenido para cada tipo de pavimento.

Tabla 4.11. Tasa de infiltración promedio para cada tipo de pavimento.
(Fuente: Elaboración propia)

| Tipo de Pavimento | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|------------------------|--|
| Pavimento de concreto | 0.16 |
| Pavimento de asfalto | 2.18 |
| Pavimento de adoquines | 21.80 |

Los resultados coinciden con los obtenidos por Sañudo (2014), donde señala que la tasa de infiltración de agua de lluvia de los pavimentos adoquinados es mayor que la de los pavimentos convencionales. Sañudo (2014) señala que los pavimentos adoquinados forman parte de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que se vienen utilizando en Europa fundamentalmente con el objetivo de evacuar en el menor tiempo posible las aguas presentes en la superficie de rodadura de los pavimentos. Sin embargo, esta evacuación se hace a través de la estructura del pavimento, no sobre ella, requiriendo de las capas de base y sub rasante unas ciertas condiciones de permeabilidad mínimas.

Se concluye que la tasa de infiltración que presentan los pavimentos de asfalto es aproximadamente el 10% de la tasa que presentan los pavimentos adoquinados y la tasa de infiltración de los pavimentos de concreto es aproximadamente el 7% de la tasa que presentan los pavimentos de asfalto y el 0.7% la de los adoquinados.

Con los resultados obtenidos, se puede confirmar que la tasa de infiltración que presentan los pavimentos adoquinados es mayor a la de los pavimentos convencionales de asfalto y concreto, por lo que se puede concluir que el diseño de este tipo de pavimento debe considerar este parámetro de infiltración al considerar los requisitos de los materiales de las capas del pavimento, ya que es claro que tendrá un efecto en ellas.

Conclusiones

1. La alta tasa de infiltración de los pavimentos de adoquines en la ciudad de Piura exige unas especificaciones de permeabilidad de los materiales de base diferentes a los indicados en la normativa vigente. Esta diferencia posiblemente esté contribuyendo al mal desempeño de los pavimentos de adoquines en zonas donde el drenaje superficial es deficiente.
2. La tasa de infiltración que presentan los pavimentos adoquinados en el casco urbano de la ciudad de Piura, que se encuentran en regular y mal estado es aproximadamente 1.6 veces mayor a la que presentan los pavimentos que se encuentran buenas condiciones.
3. Al parecer, hay una relación entre la cantidad de agua que se infiltra en la superficie de rodadura de los pavimentos adoquinados y el espesor de junta que se tenga entre los bloques: A mayor ancho de junta más cantidad de agua se infiltra y viceversa.
4. Los pavimentos de adoquines tiene una tasa de infiltración mínima de 15.00 cm/seg, respecto a los pavimentos de asfalto que tienen 2.18 cm/seg y los pavimentos de concreto, que tienen 0.16 cm/seg. Esto evidencia una capacidad de infiltración muy alta en relación a los pavimentos convencionales capaz de absorber la totalidad del agua de lluvia que se precipita sobre él y facilitando su infiltración hacia las capas de la estructura del pavimento.
5. La tasa de infiltración que presentan los pavimentos adoquinados en la ciudad de Piura, sugiere que la capa de base, sub base y la cama de arena deberían tener una permeabilidad aproximada del orden de 527 cm/seg.
6. Los valores estimados y medidos de permeabilidad para la capa de base, sub base y cama de arena sugieren que estos materiales tengan una permeabilidad de aproximadamente 0.042 cm/seg mientras que la requerida por la infiltración de los pavimentos de adoquines es de 527 cm/seg por lo que se puede suponer que ésta es una de las causas de los asentamientos y hundimientos que presentan los pavimentos adoquinados de la ciudad de Piura.

7. El estado en que se encuentran los pavimentos adoquinados en Piura podría estar relacionado con el ancho de junta que presentan. Los pavimentos con ancho de juntas menores se encuentran en mejores condiciones que pavimentos con ancho de juntas mayores.
8. Se puede afirmar que, dada la alta permeabilidad de los pavimentos de adoquines, el contenido de finos en el afirmado es un factor negativo para su desempeño como parte de la estructura de los pavimentos urbanos, debido a que su capacidad de infiltración se ve reducida. Se pueden tener pavimentos con ancho de juntas mayores que otros, pero que tienen una tasa de infiltración menor, debido a que la capa de base al contener una gran cantidad de finos (material arcilloso), se satura más rápido.
9. La capacidad de infiltración de los pavimentos adoquinados requiere de una base con un contenido de finos muy bajo o de un sistema de drenaje interior que garantice que la base no se sature.

OTRAS INVESTIGACIONES

Se sugiere explorar otras alternativas a los materiales de base y sub base que se actualmente se usan en los pavimentos adoquinados, de modo que además de tener la resistencia adecuada para soportar las cargas de tránsito bajo las cuales estará sometida la vía, ofrezca un comportamiento permeable para permitir el libre paso del agua que se infiltra a través de la superficie de rodadura.

Con la presente investigación no es posible indicar algún límite máximo de IP para los pavimentos urbanos. Pero sí queda claro que se requiere reformular el contenido de finos y su grado de plasticidad para lograr una permeabilidad tal que garantice el buen comportamiento de la estructura del pavimento cuando se sature por la infiltración del agua. Esto podría ser el objetivo de futuras investigaciones. Además, se podrían explorar alternativas de drenaje interno del pavimento para facilitar el drenaje que ingresa por infiltración.

También se sugiere realizar una evaluación del nivel de tráfico que soportan los pavimentos adoquinados en la ciudad de Piura, debido a que muchos de estos pavimentos parece que estuvieran siendo esforzados más allá de su propia capacidad, debido a que pavimentos construidos con bloque de menor espesor se encuentran en mejores condiciones que los construidos con adoquines de mayor espesor.

Bibliografía

1. Angelone, S., Garibay, M. y Cauhapé, M. (2006). *Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos*. Argentina: Universidad Nacional de Rosario – Facultad de ciencias exactas e ingeniería. Accesible en: <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>.
2. Braja M, Das. (1985). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. California State University: Thomson Learning ed.
3. Campos Muñoz, D. D. “*Estudio de la variabilidad del suelo de Piura a través del SPT para la valoración del F.S.*”. Tesis de grado. Universidad de Piura.
4. Coronado Iturbide, J. (2002). *Manual centroamericano para diseño de pavimentos*. Accesible en: <http://www.camineros.com/docs/cam060.pdf>.
5. Corredor M, G. *Experimento vial de la AASHTO y guías de diseño de la AASHTO*. Accesible en: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/aashto-931.pdf>.
6. Fenollar, A (2001). *Manual completo de colocación de adoquines y fichas resumen de colocación de losas*. Fenollar – Pre fabricados de hormigón S.A. Valencia. Accesible en: http://www.alfredofenollar.com/pdf/hz_colocacionadoquines.pdf.
7. Gallegos Vargas, H. (1987). *Pavimentos urbanos de adoquines de concreto*. Lima: Lacasa.
8. Instituto de Tecnología de la Construcción de Catalunya (1987). *Manual de pavimentos de adoquines de hormigón* (2^{da} edición). Madrid: Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones. Accesible en: <http://datos.bne.es/edicion/bimo0000114608.html>.
9. Interlocking Concrete Pavement Institute: “*Selección y colocación de los adoquines de concreto*”. Accesible en: http://ich.cl/descargas/wp-content/uploads/12-11-19_PAV_CON_seleccion-de-adoquines.pdf.
10. Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A (1974). *Mecánica de suelos* (3^{da} edición). México, DF: Limusa.
11. Lambe, W. y Whitman, R. (1972). *Mecánica de suelos*. México, DF: Limusa.

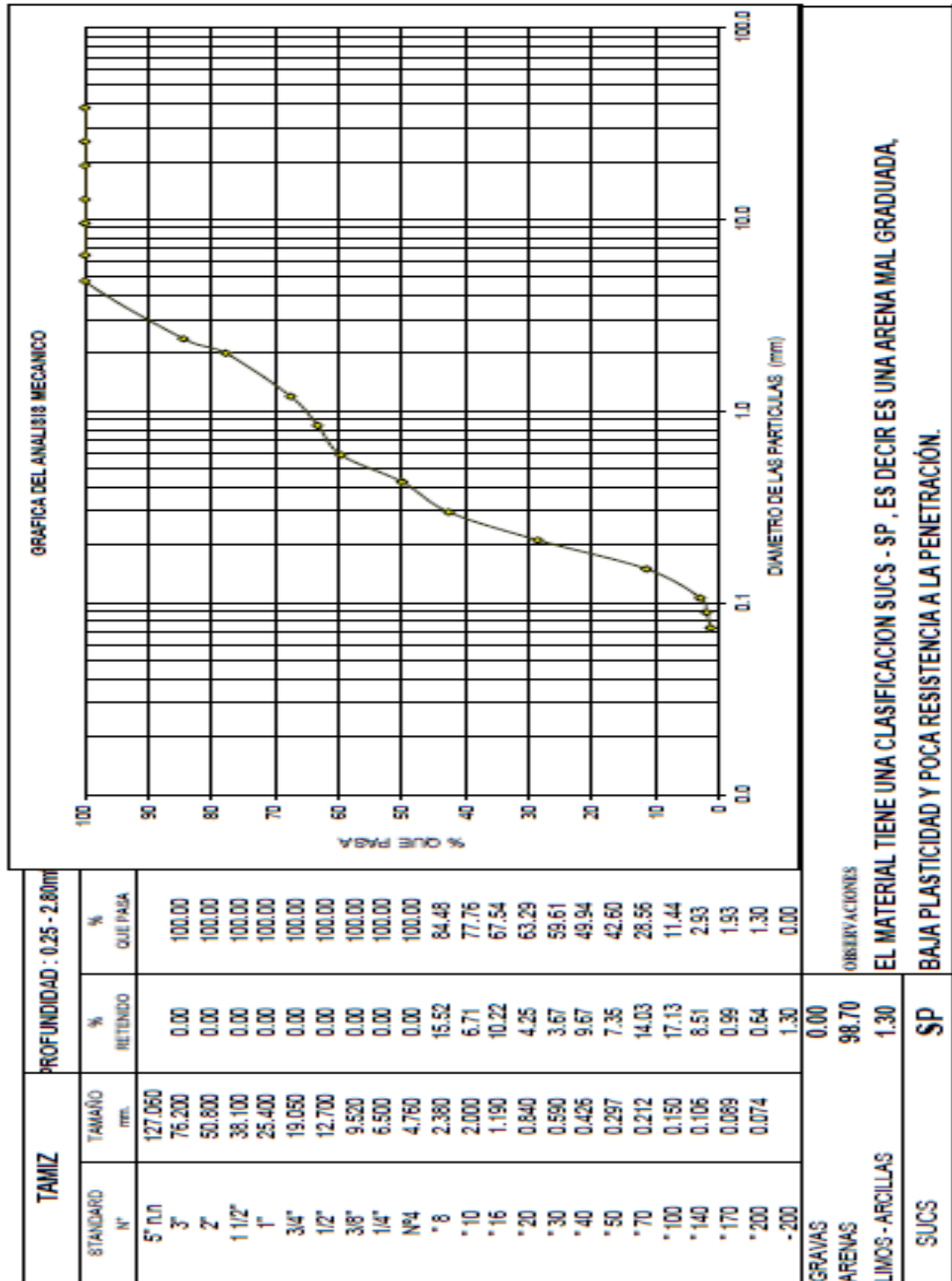
12. Madrid, G. (1998). *Construcción de pavimentos de adoquines de concreto*. Colombia: Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Accesible en http://www.construdata.com/BancoConocimiento/C/cartilla_de_adoquines/adoquines1.html.
13. Marín Nieto, L. (1991). *Mecánica de suelos* (5^{ta} edición). Guayaquil: Universidad de Guayaquil ed.
14. Martínez Vargas, A. (1991). *Mecánica de suelos – Geotecnia para ingenieros*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
15. MTC. Especificaciones técnicas generales para la construcción. EG – 2013. Manual de carreteras.
16. MTC. Manual de Carreteras 2013: *Suelo, Geología, Geotecnia y Pavimentos – sección suelos y pavimentos*. Lima: MTC
17. Moncayo, J. (1980). *Manual de pavimentos: asfalto, adoquín, empedrado y concreto*. México, DF: Cecsa.
18. Montejo Fonseca, A. (1997). *Ingeniería de pavimentos* (3^{era} edición). Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
19. Murai, S. y Takahashi, H. *Study on the Behaviour of Concrete Blocks Under Vehicular Loads*. Website: Small Element Pavement Technologists (SEPT). Accesible en : <http://www.sept.org/techpapers/27.pdf>
20. Norma Técnica Peruana (NTP) 399.611. *Unidades de albañilería – Adoquines de concreto para pavimentos*.
21. Norma NLT – 327/00. “*Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS*” – Laboratorio de la escuela de caminos de Santander. España.
22. Permeabilidad del suelo. Accesible en: ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm.
23. Reglamento Nacional de Edificaciones (2015). *Norma Técnica Peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos*.
24. Rico Rodríguez, A., Téllez Gutiérrez, R. y Garnica Anguas, P. (1998). *Pavimentos flexibles, problemática, metodologías de diseño y tendencias*. México, DF: Sanfandila. Accesible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt104.pdf>.
25. Salgado Torres, M. “*Diseño y evaluación de pavimentos de adoquín de hormigón*”. Santiago: Instituto del cemento y del hormigón de Chile. Accesible en: http://ich.cl/descargas/wp-content/uploads/10-12-01_PAV_CON_Presentacion-Adoquines_MST.pdf.

26. Sánchez Sabogal, F. (1998). *Módulo 5: “Consideraciones sobre el drenaje en los pavimentos”*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería – Curso de diseño de pavimentos. Accesible en: http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/modulos.html.
27. Sánchez Sabogal, F. (1998). *Módulo 16: “Construcción de pavimentos rígidos y de adoquines”*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería – Curso de diseño de pavimentos. Accesible en: http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/modulos.html.
28. Sánchez Sabogal, F. (1998). *Módulo 21: “Vías en material de afirmado”*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería – Curso de diseño de pavimentos. Accesible en: http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/modulos.html.
29. Sañudo Fontaneda, L. (2014). *Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones*. Santander – España: Universidad de Cantabria. Tesis doctoral.
30. Terzaghi, K. V. y Peck, R. B. (1963). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Barcelona: El Ateneo.
31. Whitlow, R. (1994). *Fundamentos de mecánica de suelos* (2^{da} edición). México, DF: Cecsá.

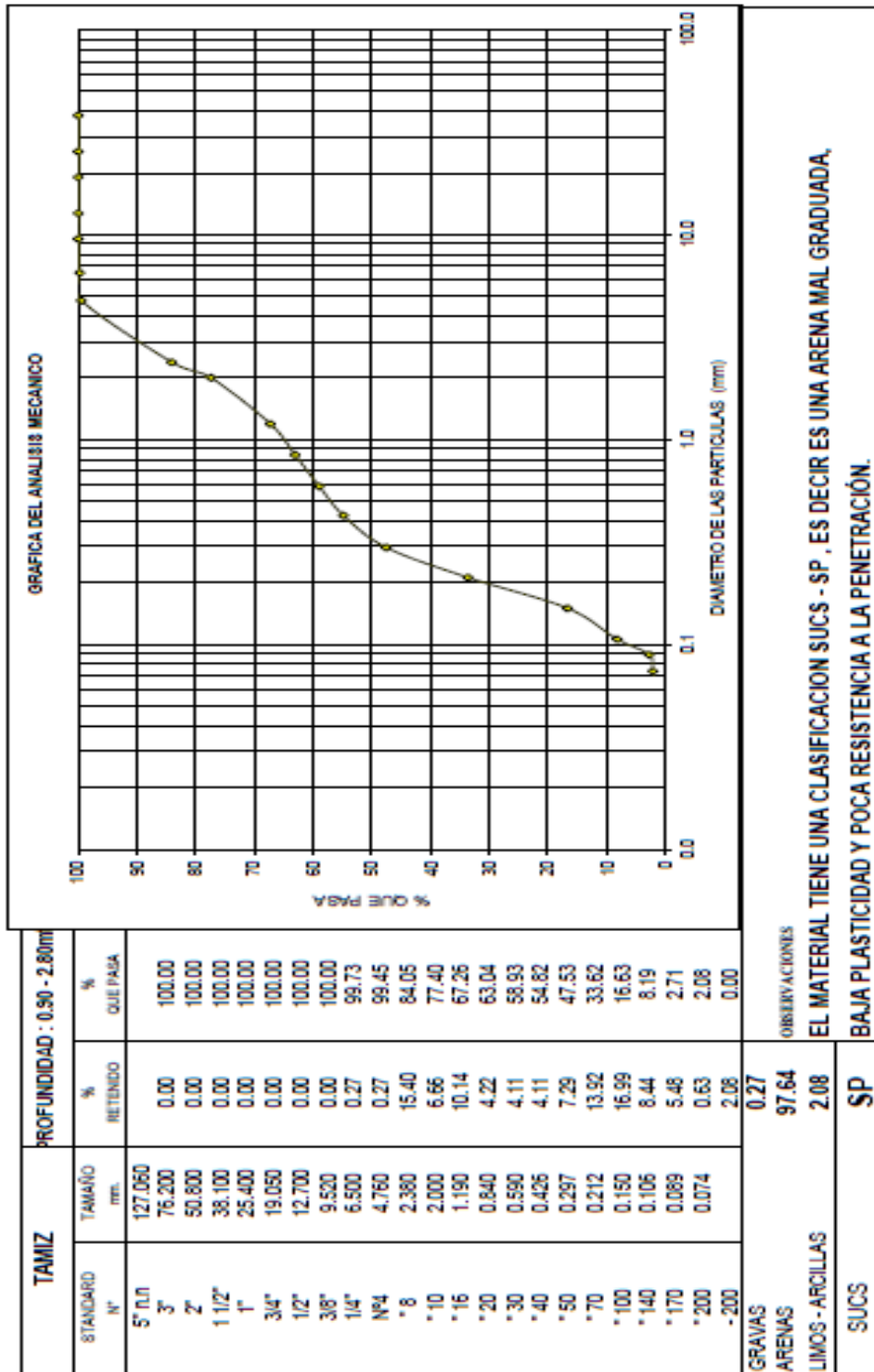
Anexo A

Curvas granulométricas del material de sub rasante de los suelos de cada una de las zonas de estudio.

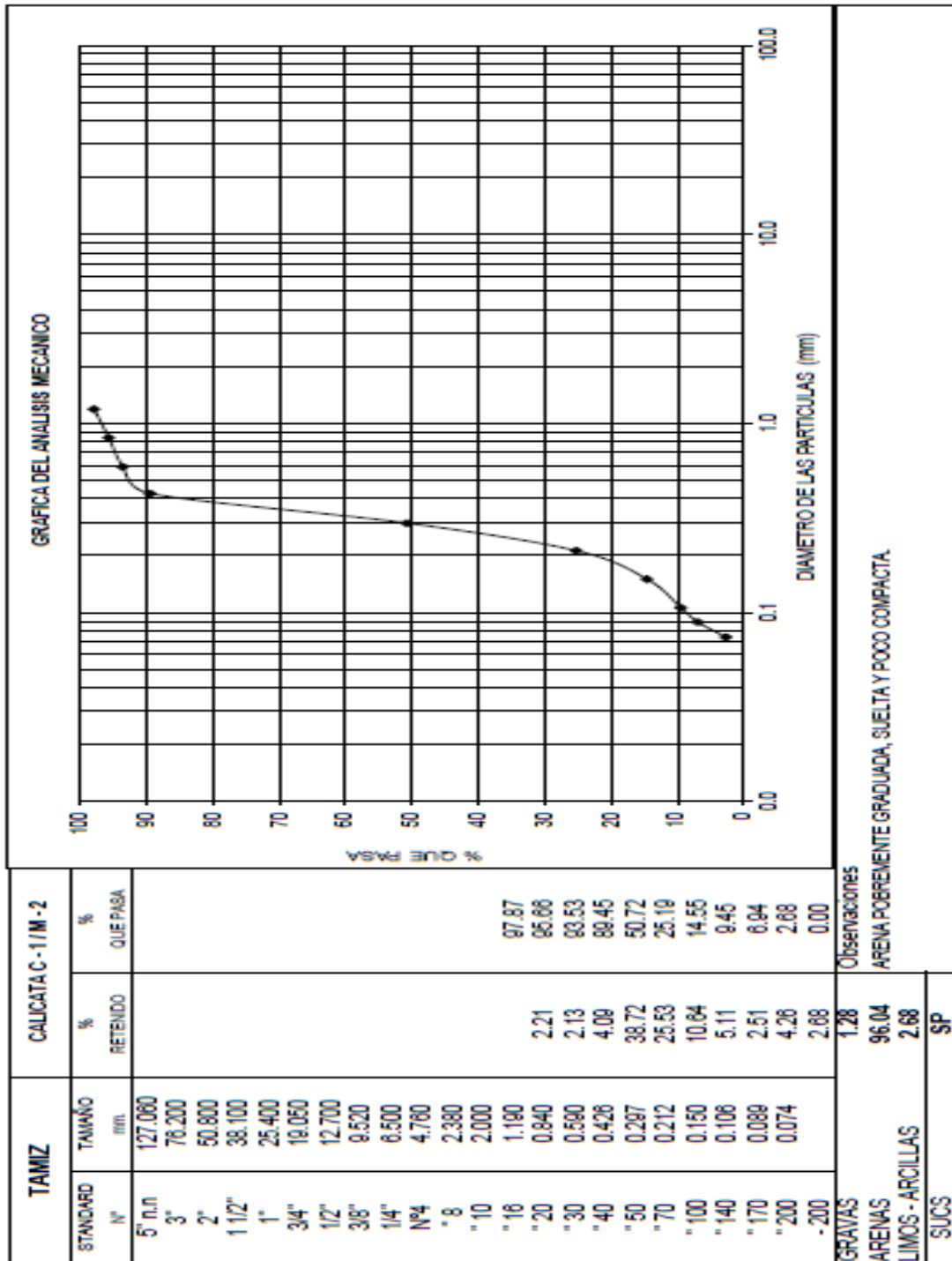
Gráfica A.1. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 1: Urb. Santa Isabel



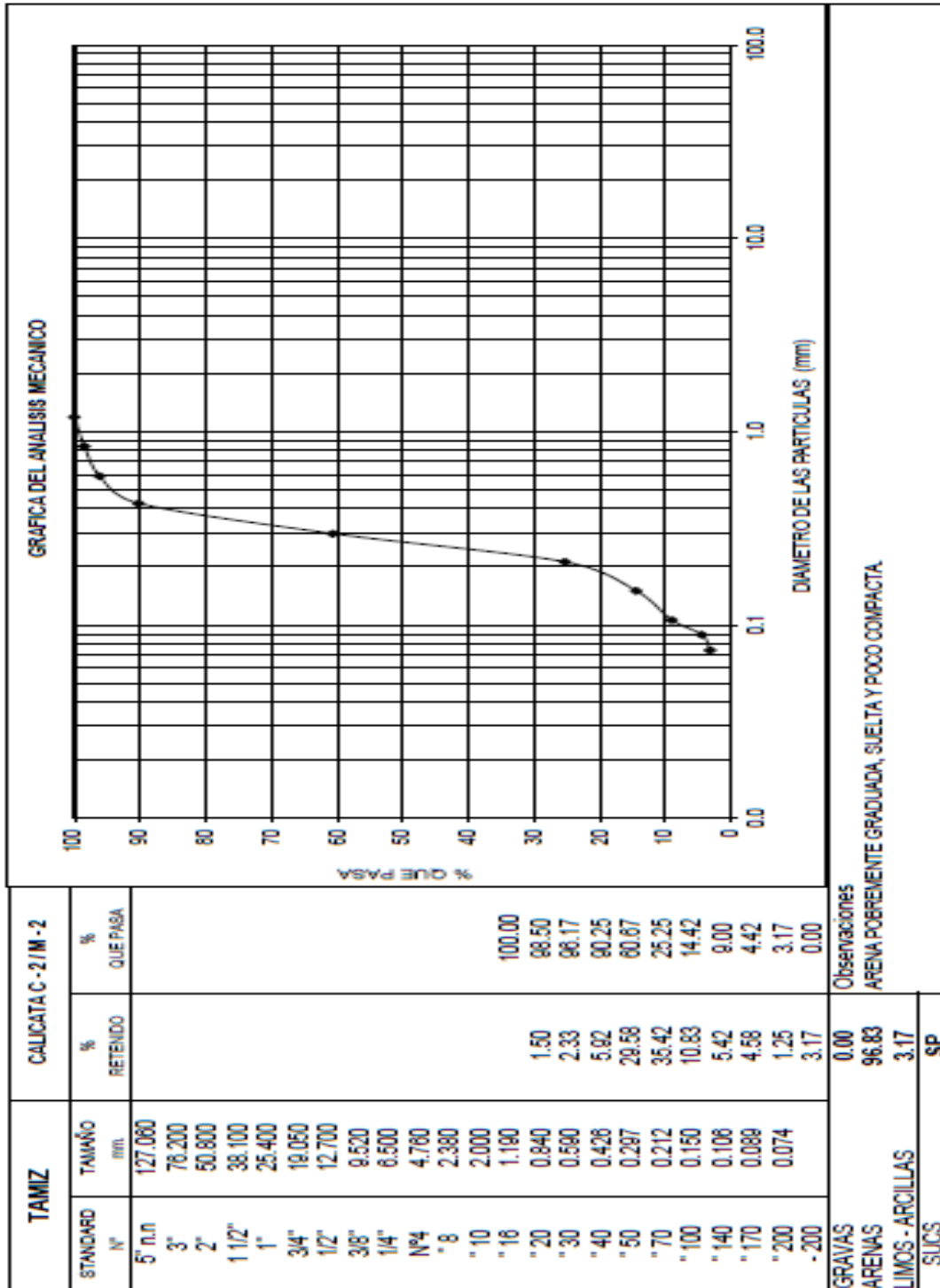
Gráfica A.2. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 1: Urb. Santa Isabel



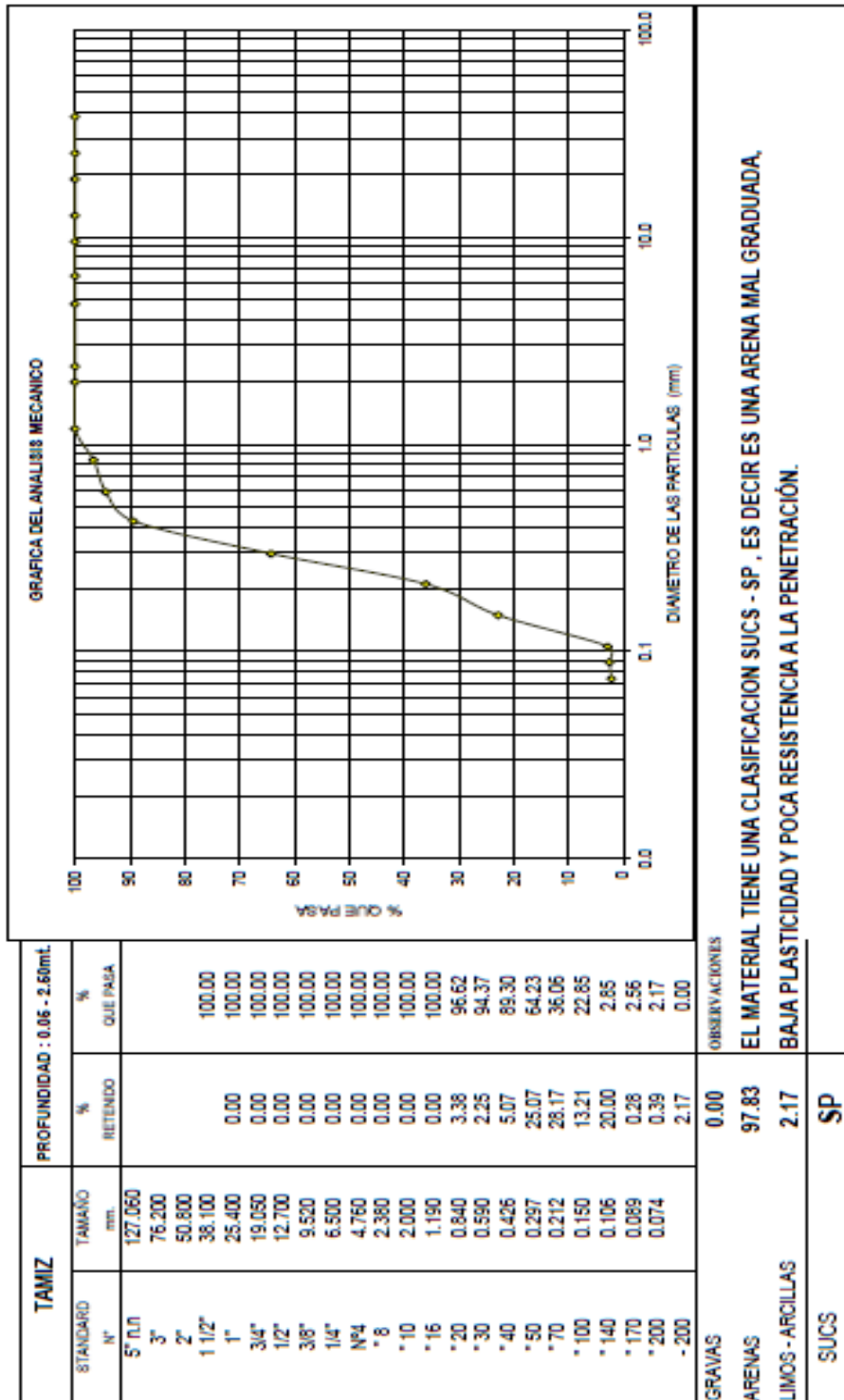
Gráfica A.3. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 2: Ignacio Merino



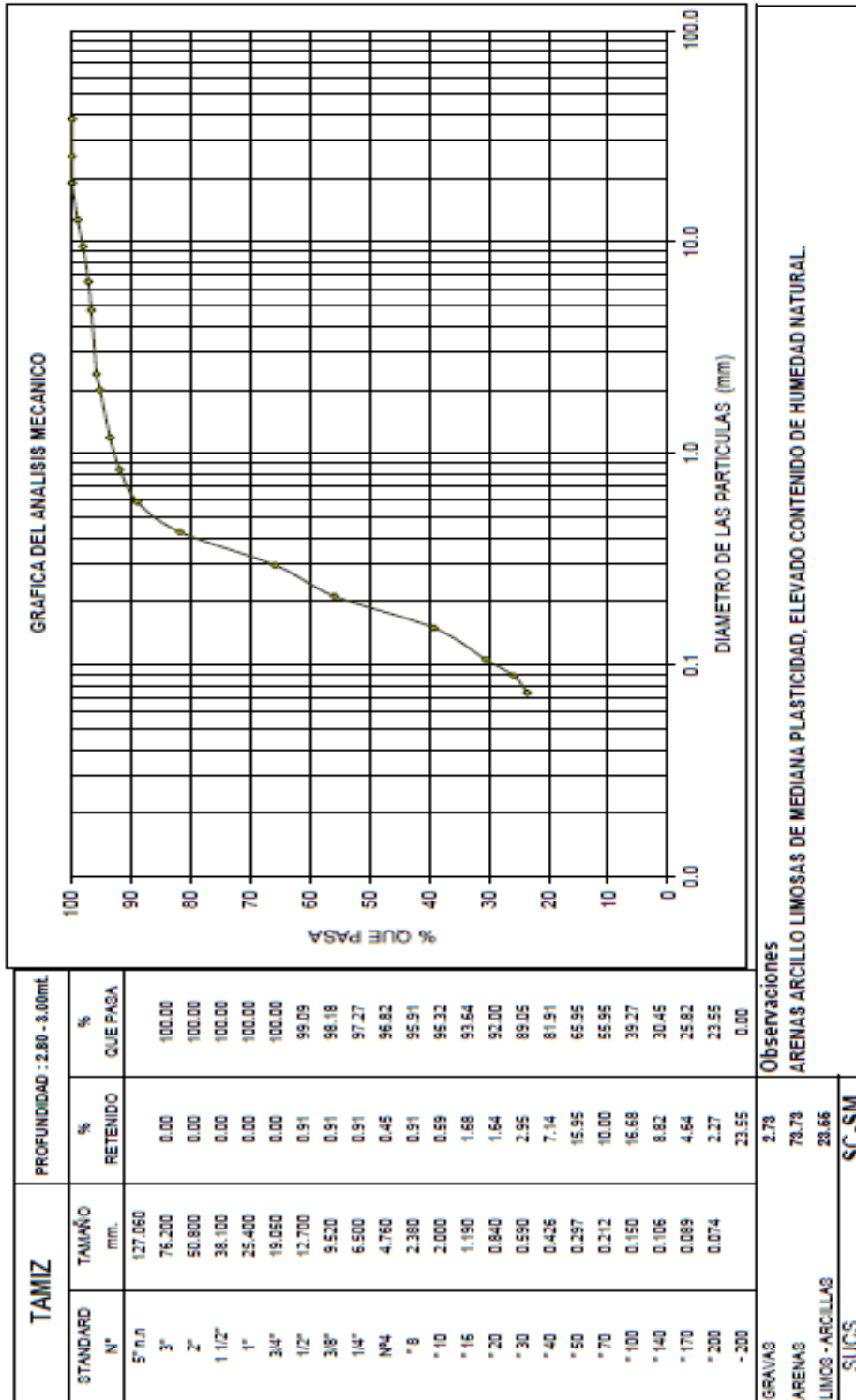
Gráfica A.4. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 2: Urb. Ignacio Merino



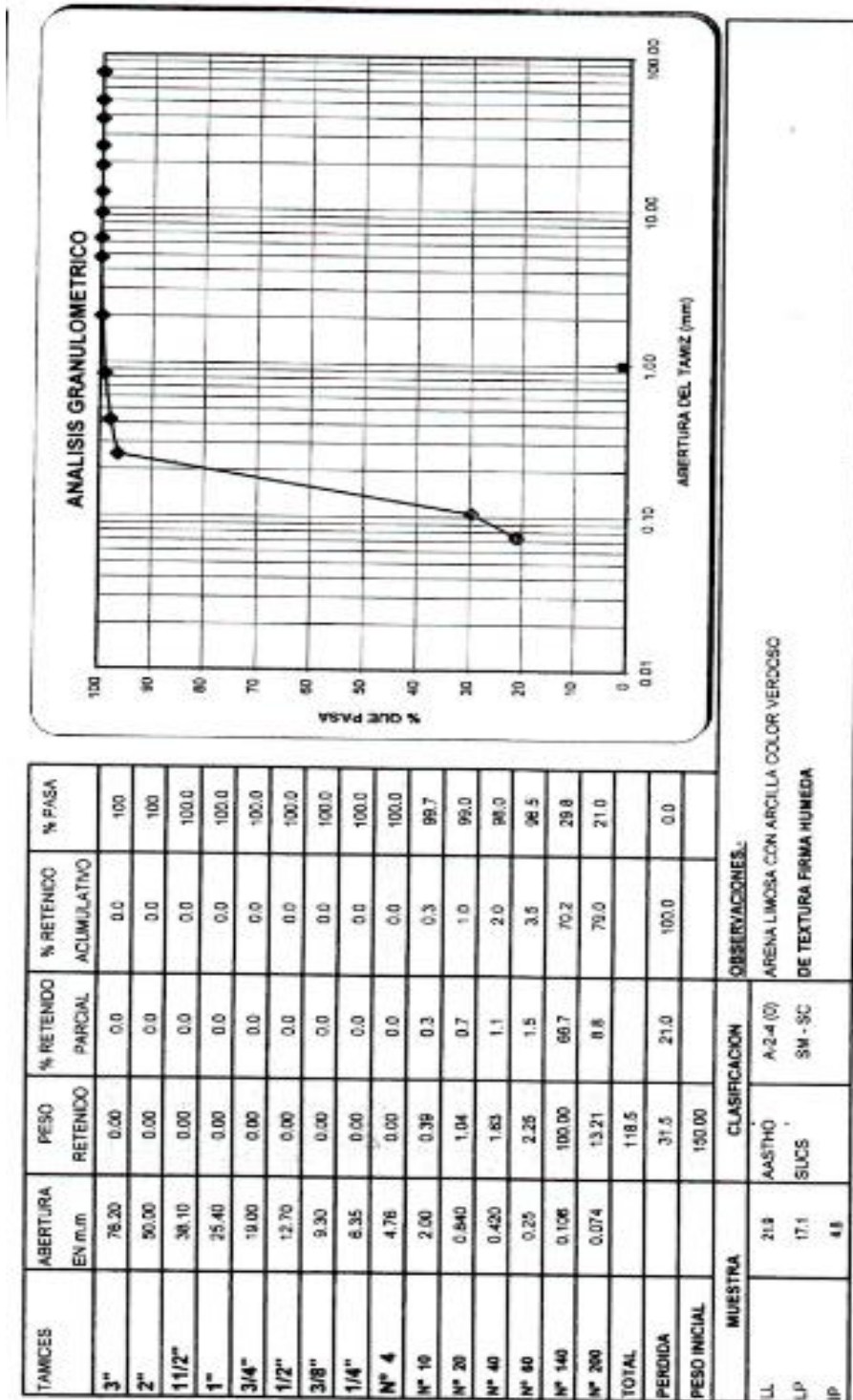
Gráfica A.5. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 3: Av. Sánchez Cerro



Gráfica A.6. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 3: Av. Sánchez Cerro



Gráfica A.7. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 4: Av. Cercado de Castilla



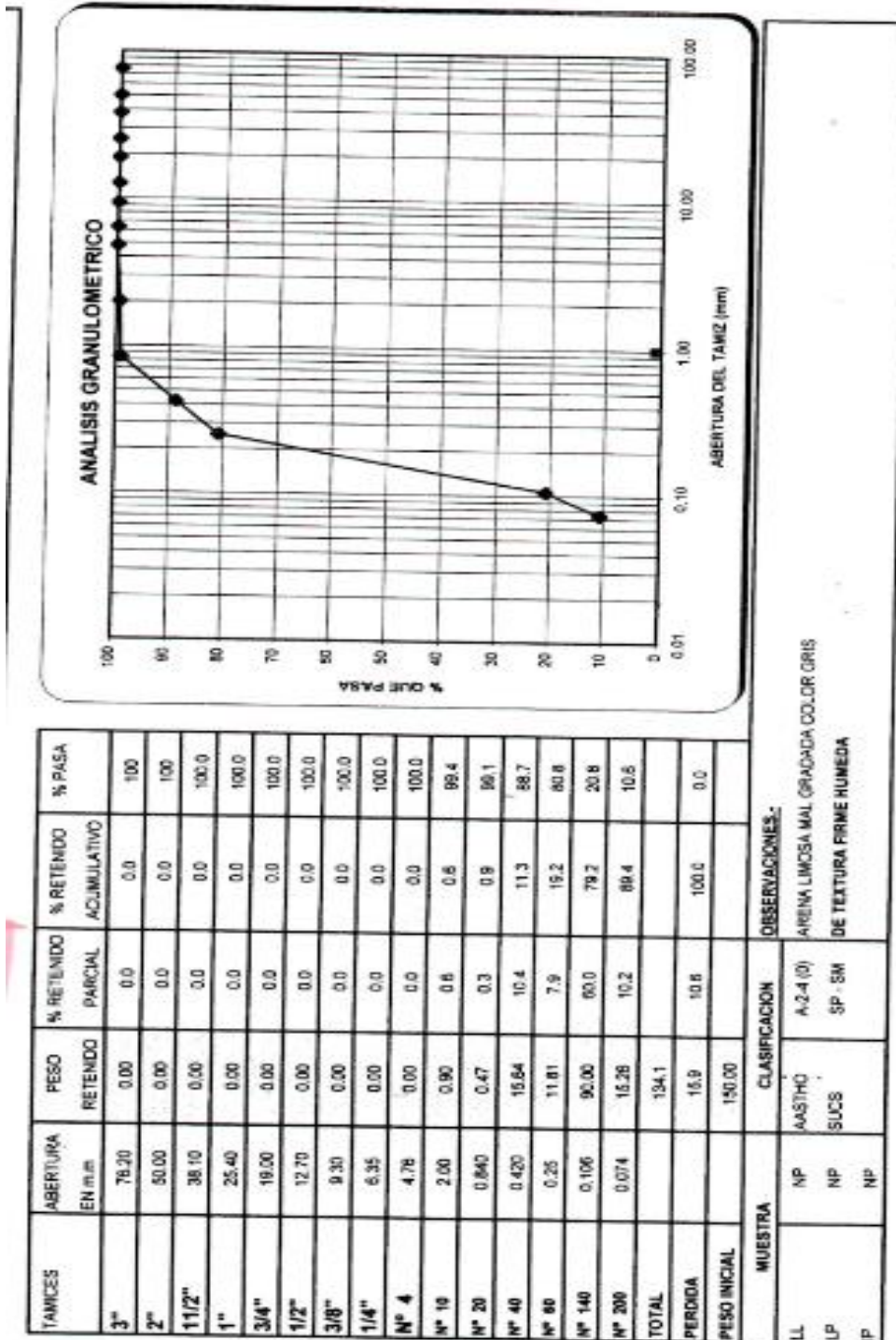
| TAMICES | ABERTURA EN m.m | PESO RETENIDO | % RETENIDO PARCIAL | % RETENIDO ACUMULATIVO | % PASA |
|--------------|-----------------|---------------|--------------------|------------------------|--------|
| 3" | 76.20 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100 |
| 2" | 50.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100 |
| 1 1/2" | 38.10 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 1" | 25.40 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 3/4" | 19.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 1/2" | 12.70 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 3/8" | 9.30 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 1/4" | 6.35 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| Nº 4 | 4.76 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| Nº 10 | 2.00 | 0.39 | 0.3 | 0.3 | 99.7 |
| Nº 20 | 0.840 | 1.04 | 0.7 | 1.0 | 99.0 |
| Nº 40 | 0.420 | 1.83 | 1.1 | 2.0 | 98.0 |
| Nº 60 | 0.25 | 2.25 | 1.5 | 3.5 | 96.5 |
| Nº 140 | 0.106 | 100.00 | 66.7 | 70.2 | 29.8 |
| Nº 200 | 0.074 | 13.21 | 8.8 | 79.0 | 21.0 |
| TOTAL | | 118.5 | | | |
| PERDIDA | | 31.5 | 21.0 | 100.0 | 0.0 |
| PESO INICIAL | | 150.00 | | | |

OBSERVAÇÕES:-

ARENA LIMOSA COM ARCILA COLOR VERDESO DE TEXTURA FIRMA HUMEDA

| MUESTRA | CLASIFICACION |
|---------|---------------|
| LL | A-2-4 (0) |
| LP | SM - SC |
| IP | 4.8 |

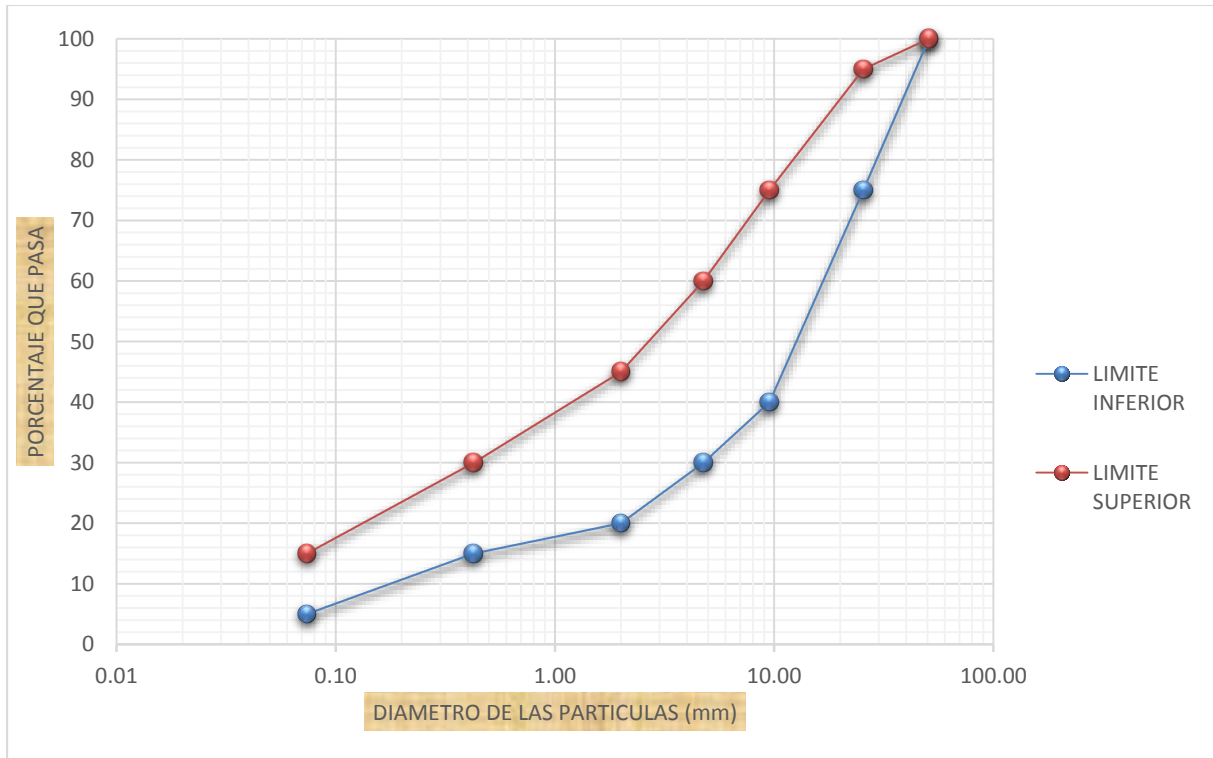
Gráfica A.8. Análisis granulométrico del suelo de la sub rasante de la zona 4: Av. Cercado de Castilla



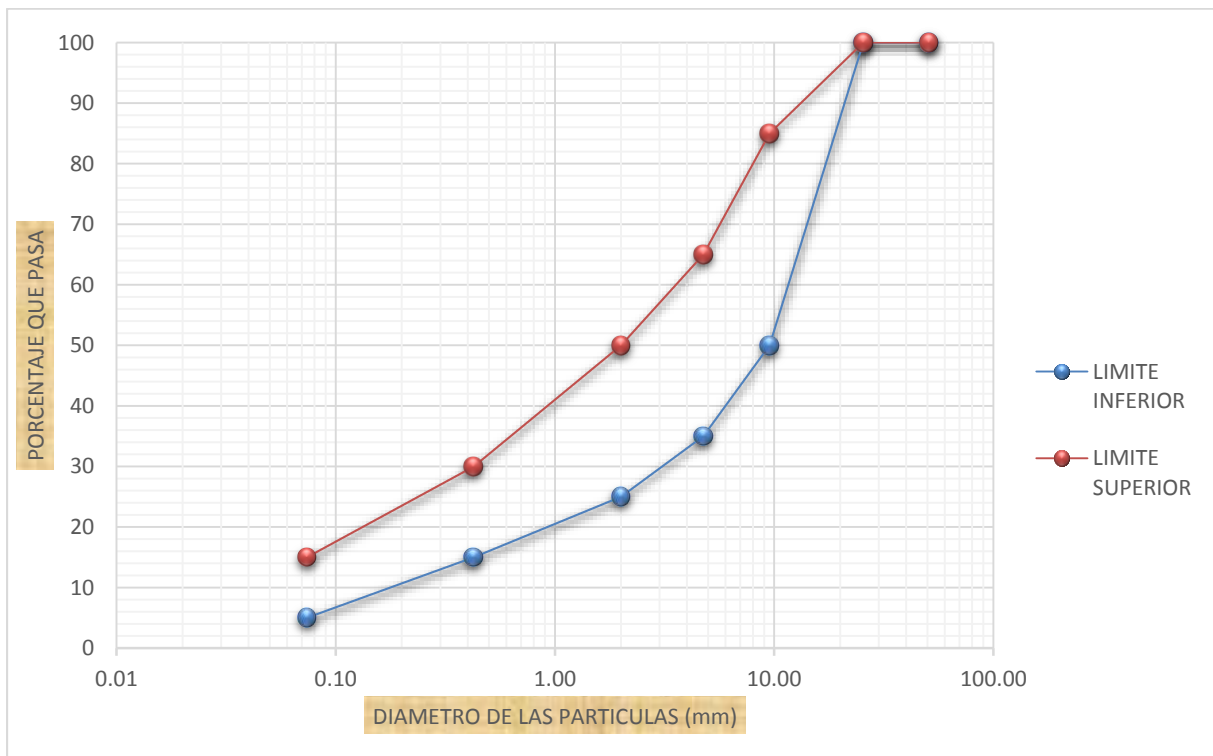
Anexo B

Curvas granulométricas de las gradaciones propuestas por la Norma Técnica Peruana CE 010 de Pavimentos Urbanos para los materiales de base granular.

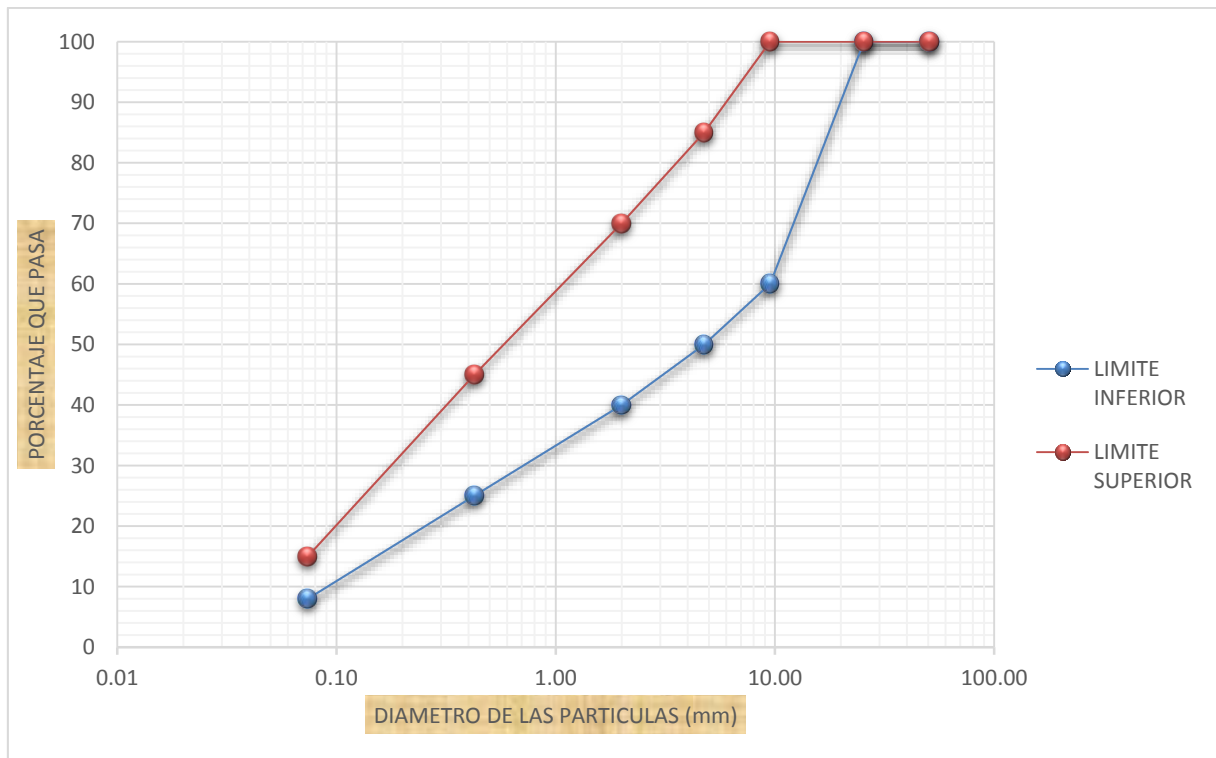
**Gráfica B.1. Curvas Granulométricas de la Gradación “B”
(Límites Inferior y Superior)**



**Gráfica B.2. Curvas Granulométricas de la Gradación “C”
(Límites Inferior y Superior)**

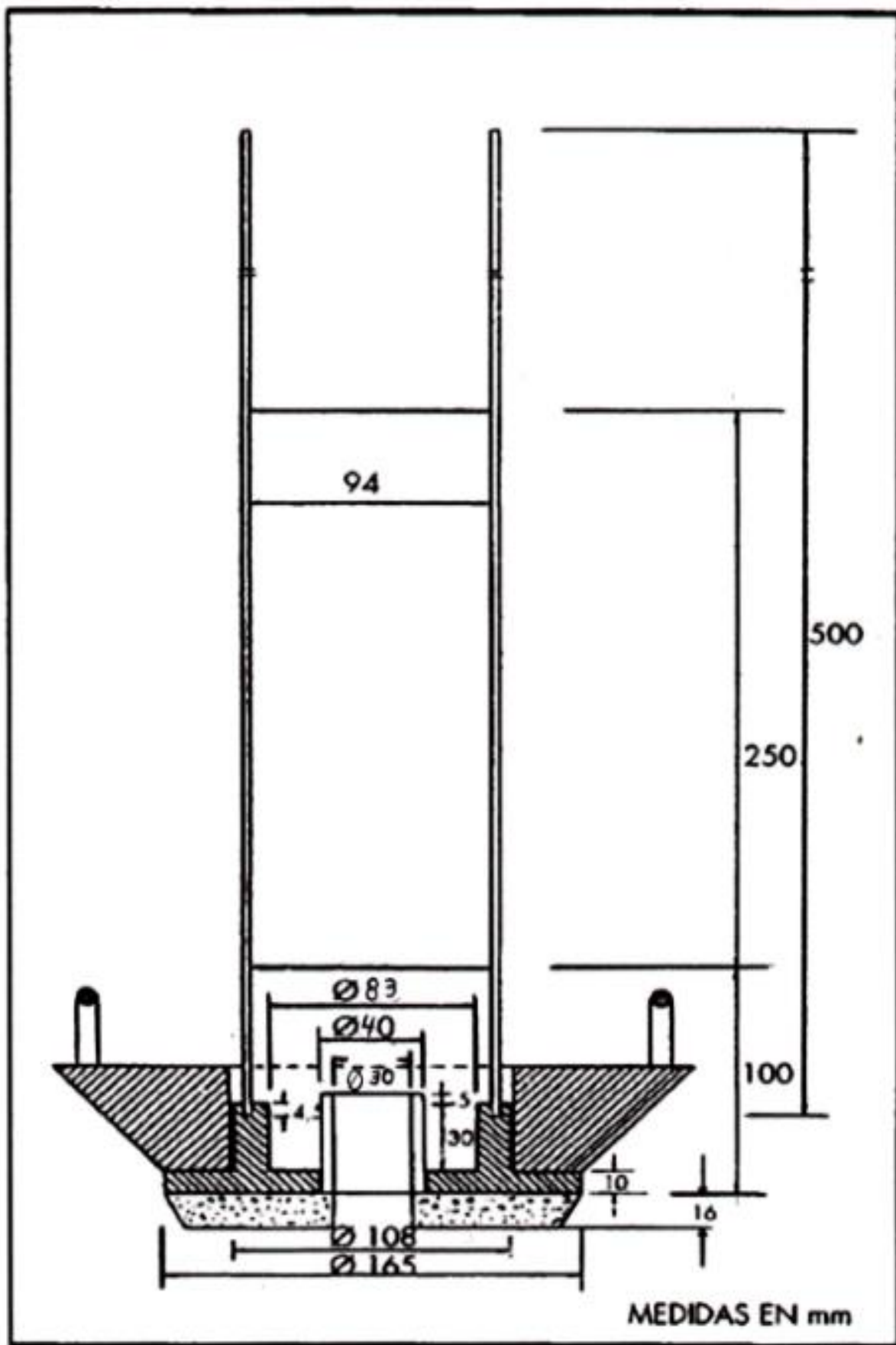


**Gráfica B.3. Curvas Granulométricas de la Gradación “D”
(Límites Inferior y Superior)**



Anexo C

**Esquema del permeámetro de carga fija LCS usado para la medida de la
tasa de infiltración in-situ**



Anexo D

Valores de las tasas de infiltración medidas en cada una de las zonas de estudio

Tabla D.1. Valores de tasa de infiltración de la zona 1: Calle F

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|---------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle F | 1 | 1 | 5.25 | 26.30 | 5.34 | 25.85 |
| | | 2 | 5.27 | 26.20 | | |
| | | 3 | 5.39 | 25.61 | | |
| | | 4 | 5.45 | 25.33 | | |
| | 2 | 1 | 9.11 | 15.15 | 9.25 | 14.93 |
| | | 2 | 9.20 | 15.01 | | |
| | | 3 | 9.45 | 14.61 | | |
| | | 4 | 9.24 | 14.94 | | |
| | 3 | 1 | 6.02 | 22.93 | 6.14 | 22.49 |
| | | 2 | 5.97 | 23.13 | | |
| | | 3 | 6.28 | 21.98 | | |
| | | 4 | 6.29 | 21.95 | | |
| | 4 | 1 | 8.29 | 16.65 | 8.17 | 16.90 |
| | | 2 | 8.10 | 17.04 | | |
| | | 3 | 8.05 | 17.15 | | |
| | | 4 | 8.24 | 16.75 | | |

Tabla D.2. Valores de tasa de infiltración de la zona 1: Calle D

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|---------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle D | 1 | 1 | 9.04 | 15.27 | 9.23 | 14.96 |
| | | 2 | 9.33 | 14.80 | | |
| | | 3 | 9.15 | 15.09 | | |
| | | 4 | 9.40 | 14.69 | | |
| | 2 | 1 | 10.85 | 12.72 | 11.06 | 12.48 |
| | | 2 | 11.56 | 11.94 | | |
| | | 3 | 11.23 | 12.29 | | |
| | | 4 | 10.60 | 13.02 | | |
| | 3 | 1 | 8.11 | 17.02 | 8.41 | 16.42 |
| | | 2 | 8.65 | 15.96 | | |
| | | 3 | 8.22 | 16.80 | | |
| | | 4 | 8.66 | 15.94 | | |
| | 4 | 1 | 9.02 | 15.31 | 9.45 | 14.61 |
| | | 2 | 9.65 | 14.31 | | |
| | | 3 | 9.22 | 14.97 | | |
| | | 4 | 9.91 | 13.93 | | |

Tabla D.3. Valores de tasa de infiltración de la zona 1: Jr. Los Ceibos

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|----------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Jr. Los Ceibos | 1 | 1 | 7.11 | 19.42 | 7.56 | 18.26 |
| | | 2 | 7.76 | 17.79 | | |
| | | 3 | 7.35 | 18.78 | | |
| | | 4 | 8.02 | 17.21 | | |
| | 2 | 1 | 6.88 | 20.07 | 6.78 | 20.36 |
| | | 2 | 6.45 | 21.40 | | |
| | | 3 | 6.67 | 20.70 | | |
| | | 4 | 7.12 | 19.39 | | |
| | 3 | 1 | 8.55 | 16.15 | 8.79 | 15.71 |
| | | 2 | 8.80 | 15.69 | | |
| | | 3 | 8.67 | 15.92 | | |
| | | 4 | 9.14 | 15.11 | | |
| | 4 | 1 | 9.50 | 14.53 | 9.56 | 14.44 |
| | | 2 | 9.67 | 14.28 | | |
| | | 3 | 9.49 | 14.55 | | |
| | | 4 | 9.58 | 14.41 | | |

Tabla D.4. Valores de tasa de infiltración de la zona 1: Calle C

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|---------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle C | 1 | 1 | 5.01 | 27.56 | 4.78 | 28.88 |
| | | 2 | 4.58 | 30.14 | | |
| | | 3 | 4.61 | 29.95 | | |
| | | 4 | 4.92 | 28.06 | | |
| | 2 | 1 | 8.11 | 17.02 | 8.23 | 16.78 |
| | | 2 | 8.43 | 16.38 | | |
| | | 3 | 8.05 | 17.15 | | |
| | | 4 | 8.33 | 16.57 | | |
| | 3 | 1 | 7.87 | 17.54 | 7.56 | 18.26 |
| | | 2 | 7.34 | 18.81 | | |
| | | 3 | 7.19 | 19.20 | | |
| | | 4 | 7.84 | 17.61 | | |
| | 4 | 1 | 4.94 | 27.95 | 4.78 | 28.88 |
| | | 2 | 4.68 | 29.50 | | |
| | | 3 | 4.49 | 30.75 | | |
| | | 4 | 5.01 | 27.56 | | |

Tabla D.5. Valores de tasa de infiltración de la zona 1: Calle E

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|---------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle E | 1 | 1 | 6.88 | 20.07 | 6.98 | 19.78 |
| | | 2 | 6.69 | 20.64 | | |
| | | 3 | 7.12 | 19.39 | | |
| | | 4 | 7.23 | 19.10 | | |
| | 2 | 1 | 4.22 | 32.72 | 4.67 | 29.56 |
| | | 2 | 4.78 | 28.88 | | |
| | | 3 | 4.56 | 30.28 | | |
| | | 4 | 5.12 | 26.96 | | |
| | 3 | 1 | 5.98 | 23.09 | 5.89 | 23.44 |
| | | 2 | 5.75 | 24.01 | | |
| | | 3 | 5.79 | 23.84 | | |
| | | 4 | 6.04 | 22.86 | | |
| | 4 | 1 | 7.79 | 17.72 | 7.96 | 17.34 |
| | | 2 | 8.14 | 16.96 | | |
| | | 3 | 7.79 | 17.72 | | |
| | | 4 | 8.12 | 17.00 | | |

Tabla D.6. Valores de tasa de infiltración de la zona 2: Calle 15

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|----------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle 15 | 1 | 1 | 8.49 | 16.26 | 8.69 | 15.89 |
| | | 2 | 8.79 | 15.71 | | |
| | | 3 | 8.75 | 15.78 | | |
| | | 4 | 8.73 | 15.81 | | |
| | 2 | 1 | 3.02 | 45.72 | 3.06 | 45.12 |
| | | 2 | 3.18 | 43.42 | | |
| | | 3 | 2.93 | 47.12 | | |
| | | 4 | 3.11 | 44.39 | | |
| | 3 | 1 | 7.24 | 19.07 | 7.56 | 18.26 |
| | | 2 | 7.79 | 17.72 | | |
| | | 3 | 7.51 | 18.38 | | |
| | | 4 | 7.70 | 17.93 | | |
| | 4 | 1 | 3.90 | 35.40 | 4.02 | 34.34 |
| | | 2 | 4.21 | 32.79 | | |
| | | 3 | 4.13 | 33.43 | | |
| | | 4 | 3.84 | 35.95 | | |

Tabla D.7. Valores de tasa de infiltración de la zona 2: Calle 10

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|----------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle 10 | 1 | 1 | 7.46 | 18.51 | 7.56 | 18.26 |
| | | 2 | 7.59 | 18.19 | | |
| | | 3 | 7.43 | 18.58 | | |
| | | 4 | 7.76 | 17.79 | | |
| | 2 | 1 | 4.65 | 29.69 | 4.75 | 29.07 |
| | | 2 | 4.89 | 28.23 | | |
| | | 3 | 4.66 | 29.63 | | |
| | | 4 | 4.80 | 28.76 | | |
| | 3 | 1 | 3.55 | 38.89 | 3.55 | 38.89 |
| | | 2 | 3.76 | 36.72 | | |
| | | 3 | 3.41 | 40.49 | | |
| | | 4 | 3.48 | 39.67 | | |
| | 4 | 1 | 4.12 | 33.51 | 4.25 | 32.48 |
| | | 2 | 4.39 | 31.45 | | |
| | | 3 | 4.37 | 31.59 | | |
| | | 4 | 4.12 | 33.51 | | |

Tabla D.8. Valores de tasa de infiltración de la zona 2: Calle 11

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|----------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle 11 | 1 | 1 | 7.99 | 17.28 | 7.89 | 17.50 |
| | | 2 | 7.67 | 18.00 | | |
| | | 3 | 7.74 | 17.84 | | |
| | | 4 | 8.16 | 16.92 | | |
| | 2 | 1 | 7.19 | 19.20 | 6.98 | 19.78 |
| | | 2 | 6.88 | 20.07 | | |
| | | 3 | 6.81 | 20.27 | | |
| | | 4 | 7.04 | 19.61 | | |
| | 3 | 1 | 4.78 | 28.88 | 4.67 | 29.56 |
| | | 2 | 4.51 | 30.61 | | |
| | | 3 | 4.79 | 28.82 | | |
| | | 4 | 4.60 | 30.01 | | |
| | 4 | 1 | 6.50 | 21.24 | 6.54 | 21.11 |
| | | 2 | 6.71 | 20.58 | | |
| | | 3 | 6.45 | 21.40 | | |
| | | 4 | 6.50 | 21.24 | | |

Tabla D.9. Valores de tasa de infiltración de la zona 2: Calle 9

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|---------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle 9 | 1 | 1 | 9.11 | 15.15 | 9.23 | 14.96 |
| | | 2 | 9.46 | 14.59 | | |
| | | 3 | 9.29 | 14.86 | | |
| | | 4 | 9.06 | 15.24 | | |
| | 2 | 1 | 8.68 | 15.91 | 8.56 | 16.13 |
| | | 2 | 8.45 | 16.34 | | |
| | | 3 | 8.60 | 16.05 | | |
| | | 4 | 8.51 | 16.22 | | |
| | 3 | 1 | 9.00 | 15.34 | 9.12 | 15.14 |
| | | 2 | 9.29 | 14.86 | | |
| | | 3 | 9.04 | 15.27 | | |
| | | 4 | 9.15 | 15.09 | | |
| | 4 | 1 | 9.26 | 14.91 | 9.34 | 14.78 |
| | | 2 | 9.48 | 14.56 | | |
| | | 3 | 9.22 | 14.97 | | |
| | | 4 | 9.40 | 14.69 | | |

Tabla D.10. Valores de tasa de infiltración de la zona 2: Av. Ignacio Merino

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|--------------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Av. Ignacio Merino | 1 | 1 | 8.42 | 16.40 | 8.56 | 16.13 |
| | | 2 | 8.49 | 16.26 | | |
| | | 3 | 8.69 | 15.89 | | |
| | | 4 | 8.64 | 15.98 | | |
| | 2 | 1 | 7.49 | 18.43 | 7.67 | 18.00 |
| | | 2 | 7.79 | 17.72 | | |
| | | 3 | 7.70 | 17.93 | | |
| | | 4 | 7.70 | 17.93 | | |
| | 3 | 1 | 7.71 | 17.91 | 7.76 | 17.79 |
| | | 2 | 7.89 | 17.50 | | |
| | | 3 | 7.56 | 18.26 | | |
| | | 4 | 7.88 | 17.52 | | |
| | 4 | 1 | 7.95 | 17.37 | 8.05 | 17.15 |
| | | 2 | 8.22 | 16.80 | | |
| | | 3 | 8.16 | 16.92 | | |
| | | 4 | 7.87 | 17.54 | | |

**Tabla D.11. Valores de tasa de infiltración de la zona 3: Av. Sánchez
Cerro: Frente a Ittsa**

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|------------------------------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Av. Sánchez Cerro - Frente a Ittsa | 1 | 1 | 9.69 | 14.25 | 9.87 | 13.99 |
| | | 2 | 9.81 | 14.07 | | |
| | | 3 | 9.98 | 13.83 | | |
| | | 4 | 10.00 | 13.81 | | |
| | 2 | 1 | 6.22 | 22.20 | 6.57 | 21.01 |
| | | 2 | 6.97 | 19.81 | | |
| | | 3 | 6.45 | 21.40 | | |
| | | 4 | 6.64 | 20.79 | | |
| | 3 | 1 | 7.35 | 18.78 | 7.23 | 19.10 |
| | | 2 | 7.11 | 19.42 | | |
| | | 3 | 7.45 | 18.53 | | |
| | | 4 | 7.01 | 19.69 | | |
| | 4 | 1 | 8.32 | 16.59 | 8.35 | 16.53 |
| | | 2 | 8.20 | 16.84 | | |
| | | 3 | 8.67 | 15.92 | | |
| | | 4 | 8.21 | 16.82 | | |

**Tabla D.12. Valores de tasa de infiltración de la zona 3: Av. Sánchez
Cerro: Frente a Transporte Chiclayo**

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|---|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Av. Sánchez Cerro - Frente a Transportes Chiclayo | 1 | 1 | 4.39 | 31.45 | 4.65 | 29.69 |
| | | 2 | 4.81 | 28.70 | | |
| | | 3 | 4.67 | 29.56 | | |
| | | 4 | 4.73 | 29.19 | | |
| | 2 | 1 | 4.45 | 31.02 | 4.23 | 32.64 |
| | | 2 | 4.01 | 34.43 | | |
| | | 3 | 4.49 | 30.75 | | |
| | | 4 | 3.97 | 34.78 | | |
| | 3 | 1 | 5.43 | 25.43 | 5.51 | 25.06 |
| | | 2 | 5.67 | 24.35 | | |
| | | 3 | 5.55 | 24.88 | | |
| | | 4 | 5.39 | 25.61 | | |
| | 4 | 1 | 3.02 | 45.72 | 3.08 | 44.82 |
| | | 2 | 3.12 | 44.25 | | |
| | | 3 | 3.08 | 44.82 | | |
| | | 4 | 3.10 | 44.54 | | |

Tabla D.13. Valores de tasa de infiltración de la zona 4: Calle Hipólito Unanue

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|-----------------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle Hipólito Unanue | 1 | 1 | 6.63 | 20.82 | 6.75 | 20.45 |
| | | 2 | 6.89 | 20.04 | | |
| | | 3 | 6.69 | 20.64 | | |
| | | 4 | 6.79 | 20.33 | | |
| | 2 | 1 | 9.11 | 15.15 | 8.98 | 15.37 |
| | | 2 | 8.78 | 15.72 | | |
| | | 3 | 9.05 | 15.26 | | |
| | | 4 | 8.98 | 15.37 | | |
| | 3 | 1 | 8.56 | 16.13 | 8.70 | 15.87 |
| | | 2 | 8.89 | 15.53 | | |
| | | 3 | 8.69 | 15.89 | | |
| | | 4 | 8.66 | 15.94 | | |
| | 4 | 1 | 7.36 | 18.76 | 7.56 | 18.26 |
| | | 2 | 7.84 | 17.61 | | |
| | | 3 | 7.61 | 18.14 | | |
| | | 4 | 7.43 | 18.58 | | |

Tabla D.14. Valores de tasa de infiltración de la zona 4: Calle Libertad

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|----------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle Libertad | 1 | 1 | 8.14 | 16.96 | 8.36 | 16.51 |
| | | 2 | 8.54 | 16.17 | | |
| | | 3 | 8.29 | 16.65 | | |
| | | 4 | 8.47 | 16.30 | | |
| | 2 | 1 | 7.46 | 18.51 | 7.52 | 18.36 |
| | | 2 | 7.68 | 17.98 | | |
| | | 3 | 7.59 | 18.19 | | |
| | | 4 | 7.35 | 18.78 | | |
| | 3 | 1 | 8.29 | 16.65 | 8.05 | 17.15 |
| | | 2 | 7.91 | 17.45 | | |
| | | 3 | 8.13 | 16.98 | | |
| | | 4 | 7.87 | 17.54 | | |
| | 4 | 1 | 6.69 | 20.64 | 6.63 | 20.82 |
| | | 2 | 6.46 | 21.37 | | |
| | | 3 | 6.58 | 20.98 | | |
| | | 4 | 6.79 | 20.33 | | |

Tabla D.15. Valores de tasa de infiltración de la zona 4: Calle Túpac Yupanqui

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|----------------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle Túpac Yupanqui | 1 | 1 | 6.89 | 20.04 | 7.04 | 19.61 |
| | | 2 | 7.29 | 18.94 | | |
| | | 3 | 7.13 | 19.36 | | |
| | | 4 | 6.85 | 20.15 | | |
| | 2 | 1 | 4.26 | 32.41 | 4.15 | 33.27 |
| | | 2 | 4.01 | 34.43 | | |
| | | 3 | 4.12 | 33.51 | | |
| | | 4 | 4.21 | 32.79 | | |
| | 3 | 1 | 5.41 | 25.52 | 5.65 | 24.44 |
| | | 2 | 5.84 | 23.64 | | |
| | | 3 | 5.78 | 23.89 | | |
| | | 4 | 5.57 | 24.79 | | |
| | 4 | 1 | 7.50 | 18.41 | 7.52 | 18.36 |
| | | 2 | 7.69 | 17.95 | | |
| | | 3 | 7.41 | 18.63 | | |
| | | 4 | 7.48 | 18.46 | | |

Tabla D.16. Valores de tasa de infiltración de la zona 4: Amaru Inca

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|------------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle Amaru Inca | 1 | 1 | 4.15 | 33.27 | 4.10 | 33.67 |
| | | 2 | 3.96 | 34.86 | | |
| | | 3 | 4.09 | 33.76 | | |
| | | 4 | 4.20 | 32.87 | | |
| | 2 | 1 | 4.88 | 28.29 | 4.75 | 29.07 |
| | | 2 | 4.62 | 29.88 | | |
| | | 3 | 4.69 | 29.44 | | |
| | | 4 | 4.81 | 28.70 | | |
| | 3 | 1 | 5.35 | 25.81 | 5.23 | 26.40 |
| | | 2 | 5.49 | 25.15 | | |
| | | 3 | 5.16 | 26.76 | | |
| | | 4 | 4.92 | 28.06 | | |
| | 4 | 1 | 4.79 | 28.82 | 4.63 | 29.82 |
| | | 2 | 4.70 | 29.37 | | |
| | | 3 | 4.59 | 30.08 | | |
| | | 4 | 4.44 | 31.09 | | |

Tabla D.17. Valores de tasa de infiltración de la zona 4: Calle Puno

| Calle | Punto | Medida | Tiempo (seg) | Tasa de infiltración (cm/seg) | Tiempo promedio (seg) | Tasa de infiltración promedio (cm/seg) |
|------------|-------|--------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Calle Puno | 1 | 1 | 6.80 | 20.30 | 6.87 | 20.10 |
| | | 2 | 6.98 | 19.78 | | |
| | | 3 | 6.71 | 20.58 | | |
| | | 4 | 6.99 | 19.75 | | |
| | 2 | 1 | 7.90 | 17.48 | 7.98 | 17.30 |
| | | 2 | 7.81 | 17.68 | | |
| | | 3 | 8.16 | 16.92 | | |
| | | 4 | 8.05 | 17.15 | | |
| | 3 | 1 | 6.80 | 20.30 | 6.89 | 20.04 |
| | | 2 | 6.98 | 19.78 | | |
| | | 3 | 6.80 | 20.30 | | |
| | | 4 | 6.98 | 19.78 | | |
| | 4 | 1 | 8.67 | 15.92 | 8.78 | 15.72 |
| | | 2 | 8.89 | 15.53 | | |
| | | 3 | 8.79 | 15.71 | | |
| | | 4 | 8.77 | 15.74 | | |

Anexo E

**Ensayo de permeabilidad de un afirmado usado como material de base
en un pavimento adoquinado**

Gráfica E.1. Prueba de permeabilidad de un material afirmado de la cantera de Vice usado en pavimentaciones

| | | | | | | | | |
|---|--|--------------|--------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|
| | | | | | | ORDEN DE SERVICIO N°: | 11565 | |
| | | | | | | INFORME N°: | 060467 | |
| PRUEBA DE PERMEABILIDAD EN SUELOS GRANULARES | | | | | | | | |
| METODO DE CARGA VARIABLE | | | | | | | | |
| Proyecto : | Pavimentación de calles de la Urbanización Ignacio Merino | | | | | | | |
| Ubicación: | Piura - Piura | | | | | | | |
| Datos del espécimen ensayado | | | | | | | | |
| Muestra del suelo proporcionada por : | El solicitante | | | | | | | |
| Procedencia: | Cantera Vice | | | | | | | |
| Descripción visual del suelo: | Grava arcillosa con arena | | | | | | | |
| Condiciones del espécimen : | Remoldeada, compactada al 95% de la máxima densidad seca. | | | | | | | |
| Diámetro (cm) : | 15.30 | Peso (gr.) : | 7690.0 | Humedad % : | | 8.1 | | |
| Área (cm ²) : | 183.85 | Fluido : | Agua potable | Densidad seca (g/cc) : | | 2.17 | | |
| Altura (cm) : | 17.80 | G.S. | 2.73 | Relación de vacíos : | | 0.25 | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Prueba N° | Carga de agua (cm) | | Q | tiempo | temperatura | K (t°C) | nt/n20 | K(20°C) |
| | ho | h1 | (cm ³) | (seg) | (°c) | (cm/seg) | | (cm/seg) |
| 1 | 1183 | 1168 | 6.63 | 360 | 24.0 | 0.0000015153 | 0.9097 | 1.38E-06 |
| 2 | 1183 | 1168 | 6.51 | 360 | 24.0 | 0.0000014878 | 0.9097 | 1.35E-06 |
| 3 | 1183 | 1168 | 6.66 | 360 | 24.0 | 0.0000015221 | 0.9097 | 1.38E-06 |
| | | | | | | | K(20°C) promedio: | 1.37E-06 |
| Observaciones: | Datos proporcionados por el solicitante: Máxima densidad seca: 2,17 gr./cm ³ Humedad Optima: 8,1% | | | | | | | |
| | | | | | | | | Densidad seca al 95%: 2,06 |

Anexo F

Panel Fotográfico

Figura F.1. Fotografía de ensayos en pavimentos adoquinados



Figura F.2. Fotografía de ensayos en pavimentos adoquinados



Figura F.3. Fotografía de ensayos en pavimentos de concreto



Figura F.4. Fotografía de ensayos en pavimentos de concreto

