

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.INTRODUCCIÓN

Un pavimento es una estructura de múltiples capas, diseñado para soportar los esfuerzos y deformaciones que se generan por el paso repetido de vehículos y por las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra construido. La principal dificultad en el diseño y análisis de estas estructuras es que se encuentran sometidas a cargas dinámicas de difícil caracterización y a condiciones climáticas cambiantes que alteran las propiedades mecánicas, químicas y termodinámicas de los materiales que las componen.

Los materiales que se emplean en estructuras de pavimento incluyen, principalmente materiales granulares (agregados) no estabilizados o estabilizados, cemento, mezclas asfálticas compuestas por la combinación de agregados y asfalto, y concreto hidráulico, conformado básicamente por agregados y cemento Portland, dependiendo de la capa a trabajar.

Siempre nos hemos cuestionado que es lo que realmente ocurre dentro de las capas granulares, si realmente se cumplen los parámetros considerados en el diseño, en el caso de presentarse fallas, cual fue la causa de dicha falla, con el avance de la tecnología se ha logrado una mejora en las técnicas usadas para la caracterización de materiales, debido a la necesidad de reevaluar la validez de métodos de diseño de las capas granulares y el mejor conocimiento sobre factores mecánicos que afectan el comportamiento y respuesta de los materiales empleados.

La tomografía computarizada con rayos-X se basa en la obtención de imágenes digitalizadas por rayos-X, para poder valorizar su comportamiento interno de los agregados y su efecto del mismo. Esta técnica ha ganado amplia aceptación en los últimos años y ha sido empleada exitosamente para analizar la microestructura de diversos medios porosos. La importancia de la tomografía computarizada con rayos-

X en capas granulares radica en que ha permitido contar con información confiable de su estructura interna para: determinar las características de sus vacíos, analizar el daño potencial por humedad, modelar el flujo de agua en su interior caracterizar aspectos relacionados con su compactación, identificar la degradación de los agregados que componen estos materiales.

Esta técnica nos permite estudiar el contenido, tamaño, distribución, conectividad de los vacíos y el arreglo de los agregados, la relación de estas variables con la susceptibilidad al deterioro por presencia de humedad, debido a que la resistencia a la desintegración depende de las condiciones de contacto agregado-agregado desarrollados en las capas del pavimento y asociados al contenido de vacíos almacenado.

1.2.JUSTIFICACIÓN

Se realizara un análisis a los agregados de las capas granulares del pavimento para poder conocer el comportamiento de los agregados a través de tomografías computarizadas por rayos-x, a las capas granulares de la base y sub-base las cuales serán elaboradas y compactadas en moldes de CBR en laboratorio.

La importancia de la tomografía computarizada con rayos-x, permite contar con información confiable de su estructura interna para determinar las características de sus vacíos y contacto agregado-agregados en las capas granulares de un pavimento y tiene por objetivo poder visualizar al interior de las mismas.

El aporte académico es implementar nuevas metodologías con el avance de la tecnologías a través de tomografías computarizadas por rayos-x, para poder visualizar y analizar el comportamiento de los agregados al interior de las capas granulares en un pavimento, y así poder adquirir, ampliar y fortalecer nuestro conocimiento en conjunto con el avance de la ciencia, logrando vencer las competencias que se presentan en el desarrollo profesional del estudiante y durante su futura vida laboral, las nuevas tecnologías son útiles para alcanzar objetivos deseados.

La importancia de conocer las características y propiedades de los agregados empleados al interior de un pavimento es para poder observar y valorizar su comportamiento interno y su efecto que presenta en cada una de sus capas, ya que es fundamental para garantizar la vida útil del pavimento y dar seguridad y durabilidad en una construcción.

Por lo antes señalado se puede verificar que esta técnica de imágenes computarizadas, podría ser un método que permita realizar el diseño de las capas granulares del pavimentos con mayores garantías.

Esta investigación servirá a estudiantes, autoridades y empresas que deseen investigar o construir capas granulares como base y sub-base en el pavimento, tomando en cuenta nuevas técnicas a través de tecnologías para el comportamiento de los agregados a utilizar a través de ensayos para poder obtener resultados esperados, beneficiando a la sociedad en general. Este trabajo de investigación es aplicable en vías urbanas de la ciudad de Tarija.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA

La observación del acomodo de los agregados en las capas granulares de un pavimento definirá su desempeño, por lo que garantiza una óptima distribución de los componentes de las capas granulares es de importancia para el funcionamiento de la misma.

Los parámetros usados en el diseño de las capas granulares varían debido a que las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados no son iguales, varían según el banco de materiales utilizados, por lo que la visualización de la estructura interna formada por las capas granulares diseñadas, es una metodología que permitirá observar lo que sucede dentro de la misma.

La falta de un estudio del comportamiento del agregado por dentro, la disgregación y mala distribución de los agregados en los proyectos que se realizan en diferentes lugares que disponen de agregados de distintos bancos de préstamos que estén más

cerca de la zona del proyecto como también podemos decir que cada proyecto es diferente en calidad y cantidad que obliga a utilizar diferentes tipos de agregados y a su vez también a estudiarlos al interior de las capas granulares.

A través de tomografías computarizadas con rayos-x se realizara un análisis interno de los agregados, mediante imágenes digitalizadas se observara su forma, textura, granulometría, resistencia, absorción y humedad de las diferentes capas del pavimento.

Los sistemas de rayos-x empleados en el análisis de pavimentos son similares a los utilizados en el ámbito médico, sin embargo a diferencia de estos, en el área de ingeniería de pavimentos la intensidad de los rayos-x y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución, observando el comportamiento de los componentes del pavimento.

1.3.2. PROBLEMA

Es posible analizar las características y propiedades que desarrollan las capas granulares de un pavimento en su estructura interna a partir de sus componentes, sin recurrir a ensayos destructivos?

1.4. HIPÓTESIS

Si se aplica la metodología de las tomografías computarizadas por rayos-x, haciendo un análisis de la estructura interna de las capas granulares a través de imágenes digitalizadas, entonces se podrá obtener las características reales que estas presentan en su estructura interna mediante el análisis de imágenes que permiten la visualización detallada de las capas granulares.

1.5. OBJETIVOS

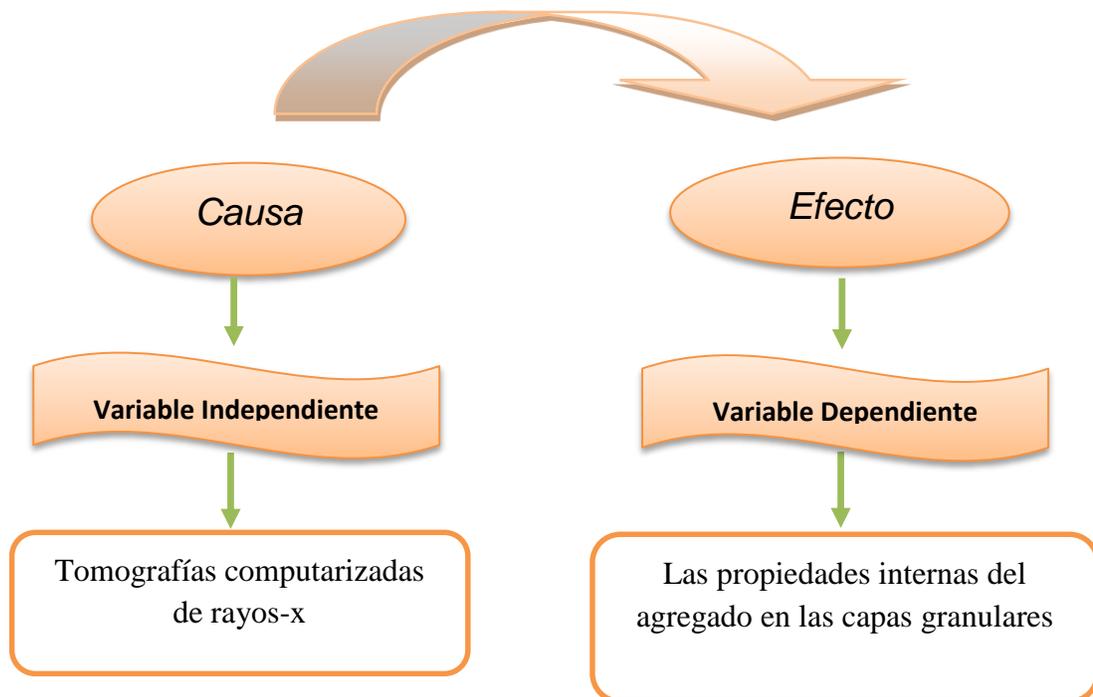
1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los agregados de las capas granulares del pavimento empleando tomografías por rayos-x, con el fin de evaluar las características internas sobre el porcentaje de vacíos y el contacto agregado-agregado en vías urbanas de la ciudad de Tarija.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Analizar las propiedades físico-mecánicas de los agregados utilizados en las capas granulares del pavimentos.
- ❖ Definir la ubicación de los tramos de vías urbanas para el estudio, utilizando materiales que han sido conformadas las mismas.
- ❖ Identificación de los bancos de préstamo para las vías urbanas definidas.
- ❖ Caracterización de los materiales utilizados de las capas granulares del pavimento en estudio.
- ❖ Elaboración y compactación de las muestras en los moldes de CBR con el T-180 en laboratorio, para determinar las características que estas presentan al haberse realizado en condiciones prácticamente ideales.
- ❖ Realizar tomografías computarizadas por rayos-x a las muestras, obteniendo imágenes de la estructura interna para el análisis de los agregados en las capas granulares, haciendo uso de un tomógrafo que comúnmente es usado en el campo médico.
- ❖ Analizar las imágenes obtenidas con las tomografías de rayos-x con algoritmos computacionales que permitan relacionar algunas propiedades presentes en las capas granulares.
- ❖ Analizar y comparar los resultados encontrados del comportamiento de los agregados ente las capas granulares.
- ❖ A partir de los resultados obtenidos de las tomografías a las muestras, establecer las conclusiones y las recomendaciones.

1.6.DEFINICIÓN DE VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES



- **Variable dependiente:** Para poder observar las características desarrolladas por las capas granulares en su estructura interna se pretende recurrir a una técnica no destructiva la cual usa imágenes computarizadas de rayos-x, metodología que brinda una especie de tomografías del interior de las capas granulares de pavimentos en vías urbanas.
- **Variable independiente:** Las propiedades que presentan las capas granulares varían de acuerdo a las características (acomodo de partículas) que estas desarrollan en su estructura interna y que no son de una observación a simple vista.

1.7. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente proyecto se enfocara en un análisis de los agregados de las capas granulares en el pavimento a partir de tomografías con imágenes digitalizadas por rayos-x, es una metodología relativamente nueva en nuestro ámbito, por lo tanto primero se recolectara toda la información referente al tema, posteriormente trazarnos los objetivos alcanzables para dar solución al problema que se nos presenta. Con la información obtenida a cerca de tomografías en los agregados antes y después de ser puesto en servicio en vías urbanas, como también las características y propiedades en los agregados.

En la parte práctica se identificarán los distintos tramos de vías urbanas como también los bancos de préstamos para componer las capas granulares, elaborando muestras en los moldes de CBR en laboratorio, posteriormente realizar las tomografías de rayos-x a cada muestra a través de imágenes digitalizadas que serán analizadas por un programa del tomógrafo Weasis v.2.0.4. que permite observar y analizar el contenido de vacíos y el contacto agregado-agregado en las capas granulares, la distribución de las partículas dentro de estas a través de la imágenes binarias pixeladas y analizando resultados obtenidos. Y por último las conclusiones de los resultados obtenidos y recomendaciones de dicha investigación.

Inicialmente se realiza una breve introducción donde se expresan los conceptos más generales del tema, las razones que lo justifican por la cual se va a realizar dicha investigación, para solucionar el problema planteado a través de una investigación que se realizara un diseño metodológico donde está basada en métodos y técnicas empleadas, procedimiento para el análisis y la interpretación de la información, para obtener metas planteadas.

Se presenta toda la fundamentación teórica de la parte conceptual específica de la investigación, donde primeramente tenemos que conocer los conceptos generales de los pavimentos tanto flexible y el rígido, de igual manera los componentes de pavimentos en sus diferentes capas granulares y a su vez estudiar los agregados al interior de cada capa granular como la sub base, base.

La parte investigativa presenta un enfoque de la parte práctica donde primeramente se identifica los tramos de vías urbanas de pavimentos y bancos de préstamos para realizar la caracterización de los materiales como también la elaboración de las muestras en los moldes de CBR en laboratorio en condiciones prácticamente ideales, posteriormente tomografías computarizadas a cada muestra a través de imágenes digitalizadas a los agregados analizando el contacto agregado-agregado, contenido de vacíos que componen el paquete estructural, luego analizar y comparar los resultados obtenidos de las imágenes de cada capa granular .

Las conclusiones de esta investigación estarán basadas de manera en lo desarrollado en la investigación con resultados obtenidos como también las recomendaciones que se las realizaran de acuerdo a las fallas que se pudiera cometer durante el proceso práctico.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO DEL ANÁLISIS DE LOS AGREGADOS DE LAS CAPAS GRANULARES DEL PAVIMENTO A PARTIR DE TOMOGRAFÍAS POR RAYOS-X EN VÍAS URBANAS

2.1.PAVIMENTO

Un pavimento es una estructura asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitaran y del volumen de tráfico.

La Ingeniería de Pavimentos tiene por objetivo el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la gerencia de pavimentos, de tal modo que las funciones sean desempeñadas con el menor costo para la sociedad. En tanto que los Pavimentos Rígidos son aquellos formados por una losa de concreto Portland sobre una base, los directamente sobre la sub-rasante. Transmite directamente los esfuerzos al suelo en una forma minimizada, es auto-resistente, y la cantidad de concreto debe ser controlada.

En función a lo señalado anteriormente; se puede diferenciar que en el pavimento rígido, el concreto absorbe gran parte de los esfuerzos que las ruedas de los vehículos ejercen sobre el pavimento, mientras que en el pavimento flexible este esfuerzo es transmitido hacia las capas inferiores (Base, Sub-base y Sub-rasante)¹.

¹ Ref.: UMSS Facultad de Ciencias y Tecnología “Manual completo de diseño de Pavimentos” Capitulo 1, Pág. 3

FIGURA 2.1. Diferencia del pavimento rígido y flexible



Fuente: Pavimentosrigidos.blogspot.com.

2.1.1. PAVIMENTO FLEXIBLE

El pavimento flexible también conocido como pavimento de asfalto es una estructura formada por varias capas como lo son la sub-rasante, la sub base, la base y la carpeta asfáltica; cada una con una función determinada, las cuales en conjunto tienen los siguientes propósitos:

- a. Resistir y distribuir adecuadamente las cargas producidas por el tránsito. El pavimento flexible debe estar constituido de manera tal que las cargas, producidas por el tránsito, no provoquen deformaciones de ningún tipo en su estructura, siendo de mucha importancia el espesor que el mismo tenga.
- b. Tener la impermeabilidad necesaria. Este pavimento debe ser lo suficientemente impermeable para impedir la infiltración que puede darse por parte del agua, afectando la capacidad soporte del suelo. De esto se concluye que es de mucha importancia la existencia de un drenaje adecuado.
- c. Resistir la acción destructora de los vehículos. El pavimento debe ser resistente respecto al desgaste y desprendimiento de partículas que se obtiene como consecuencia del paso de los vehículos.
- d. Resistir los agentes atmosféricos. Como un efecto continuo de su presencia, los agentes atmosféricos provocan la meteorización y alteración de los materiales que componen el pavimento, reflejándose este problema, en la vida

económica y útil del mismo. Por lo tanto deben procurarse materiales de mayor calidad y resistentes a los agentes físicos y químicos.

- e. Poseer una superficie de rodadura adecuada, que permita fluidez y comodidad hacia el tránsito de vehículos. La superficie del pavimento, debe proporcionar un aspecto agradable, seguro y confortable, de manera que el deslizamiento de los vehículos sea óptimo. Esta superficie, que debe ser lisa, también debe ser antideslizante en caso de estar húmeda.

Ser flexible para adaptarse a ciertas fallas de la base o sub-base. La flexibilidad del pavimento es muy importante en caso de presentarse asentamiento en alguna de sus capas; pudiendo así adaptarse a las pequeñas fallas sin necesidad de reparaciones costosas².

Figura 2.2. Sección típica de un pavimento flexible.



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. SCT, 2001. "Impacto ambiental de proyectos carreteros: I pavimentos flexibles".

2.1.2. PAVIMENTO RÍGIDO

El pavimento rígido son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la sub-rasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina sub base del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además como el

² Instituto Mexicano del Cemento y Concreto. Diseño y técnicas de construcción de pavimentos de concreto. IMCYC. México 1985.

concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la sub-rasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento.

FIGURA 2.3. Capas del pavimento rígido



FUENTE: Universidad Nacional Autónoma de México "Diseño y Conservación de Pavimentos Rígidos"

2.2.COMONENTES DE PAVIMENTOS

2.2.1. CAPAS DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

2.2.1.1. SUB-BASE

Las funciones de la capa sub-base granular en el pavimento flexible son las siguientes:

- ✓ Capa de transición: la sub-base también diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la sub-rasante y por otra parte actúa, como filtro de la base impidiendo que los finos de la sub-rasante la contaminen menoscabando su calidad.
- ✓ Disminución de la deformación: algunos cambios volumétricos de la capa sub-rasante generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios externos de temperatura, pueden absorberse con la

capa sub-base, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

- ✓ Resistencia: la sub-base debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidas a un nivel adecuado de la sub-rasante.
- ✓ También otra función de la sub-base, en un pavimento flexible, es puramente económica, buscando así obtener un espesor utilizando el material más barato posible. Podría construirse dicho espesor con materiales de alta calidad como en el caso de la base, pero usualmente se hace aquella más delgada y se sustituye en parte por la sub base que es de menor calidad, trayendo como resultado un aumento en el espesor total del pavimento, pues es un hecho que cuando menor es la calidad del material utilizado, mayor será el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.
- ✓ La sub base es la de servir de transición entre la base y la sub rasante; ya que el material de la base es granular más o menos grueso y el de la sub base es más fino que el anterior. La sub base sirve también para absorber las deformaciones que provienen de la sub-rasante y que pueden ser perjudiciales para el pavimento en general.
- ✓ Así también lo son los cambios volumétricos asociados a los cambios de humedad. La sub base sirve también como drenaje para desalojar el agua que se infiltre en el pavimento y para impedir la ascensión capilar hacia la base de agua procedente de la terracería.
- ✓ Los espesores de sub-base, son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suele considerarse 12 a 15 cm como la dimensión mínima constructiva.

De las funciones mencionas anteriormente, la estructural y la económica son las que más se proyectan en la construcción de pavimentos, el resto dependen de las circunstancias y de los materiales con los que se cuente para la sub base. La

resistencia friccionante contribuirá a la resistencia en conjunto del pavimento, garantizando buen comportamiento en cuanto a deformabilidad se refiere, como resultado de una buena compactación. La capacidad de drenaje, igualmente importante, es necesaria debido a la doble función que realiza tanto con el agua que se infiltra de la superficie, como la que asciende por capilaridad³.

2.2.1.2. Características de los Materiales

Disminuir el espesor de base que requiera un diseño, reemplazando parte del material de base Una definición simple de la sub-base se podría expresar: como una capa de material seleccionado que se coloca sobre la sub-rasante o nivel de cimentación de la estructura vial. La necesidad de colocar una capa de sub-base está orientada por las siguientes reglas:

- a) por uno de inferiores características, el cual viene a formar la capa de sub-base con un menor costo.
- b) Servir de refuerzo o defensa a la sub-rasante impidiendo su deterioro, especialmente cuando esta vaya a estar sometida a la acción del tráfico por un periodo más o menos largo. Puede emplearse, además, para mejorar las condiciones de drenaje de la base y también para impedir que la base sea afectada por la plasticidad, elasticidad y cambios volumétricos de los suelos sub-rasantes.

Los materiales para sub-base del pavimento, se clasifican como sigue.

- ✓ Materiales pétreos que no requieran ningún tratamiento de disgregación, cribado o triturado.
- ✓ Materiales pétreos que para su utilización requieren tratamiento de disgregación, cribado o triturado.
- ✓ Mezcla de dos o más materiales del grupo a), del grupo b) o de materiales provenientes de ambos grupos.

³ *Es.slideshare.net/rosabeatrizvillaloboshuaman/diseo-de-pavimento-flexible-y-rgido*

El material de la sub-base, debe ser seleccionado y tener mayor capacidad soporte que el terreno de fundación compactado. Este material puede ser: arena, grava, granzón, escoria de los altos hornos, o estériles de la explotación de canteras. En algunos casos, es posible emplear para sub-base el material de la sub-rasante mezclado con granzón, cemento, etc.

El material ha de tener las características de un suelo A1 o A2, aproximadamente. Su límite líquido debe ser inferior a 35% y su índice plástico no mayor de 6. El CBR, no podrá bajar de 15%. Si la función principal de la sub-base es servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular, y la cantidad de material fino (limo y arcilla) que pase el tamiz número 200 no ha de ser mayor del 8%.

El Instituto Nacional de Vías es sus normas de construcción, fija tres granulometrías.

Estudiar normas del INVIAS.

TABLA: 2.1.Requisitos Para Materiales De Sub-Base Granular

ENSAYO	REQUISITOS
CBR, mínimo.	40 Min
Valor R de resistencia, mínimo.	55
Límite líquido.	35 Max
Índice de plasticidad, máximo.	8 % Max
Equivalente de arena, mínimo.	25 % Min

Fuente: Norma ABC, Bases y sub-bases granulares, capítulo IV

Las sub-bases deben construirse en espesores adecuados al tipo de material disponible y a los compactadores utilizados pero se recomienda no exceder capas de más de

20cms sueltos. Por lo general se exigen compactaciones del 95% del proctor modificado⁴.

Es muy importante que los bancos de materiales para sub-base, llenen las especificaciones requeridas y se encuentren libres de materia vegetal, basura o terrones de arcillas y otras materias perjudiciales. Debe tenerse presente y tomar en cuenta que un gran número de fallas en los pavimentos se debe a sub bases que no llenan las especificaciones requeridas, que han sido mal compactadas o que se han contaminado debido a la falta de un adecuado drenaje o por falta de control de la sub rasante⁵.

Estos materiales deben cumplir las siguientes propiedades:

- Granulometría

Tabla N° 2.2: Análisis Granulométrico agregado grueso

Tamiz	Porcentaje que pasa	
	<u>Arenilla</u>	<u>Material granular</u>
3"	-	100
2"	-	65 – 120
1-1/2"	100	-
1"	-	45 – 75
3/4"	-	-
3/8"	75 - 100	30 – 60
N° 4	62 - 100	25 – 50

⁴ Ing. Carlos Alberto Benavides Bastidas, Bases y sub-bases granulares, capítulo IV.

⁵ Ing. Carlos Alberto Benavides Bastidas, Bases y sub-bases granulares, capítulo IV.

N° 10	50 - 100	20 – 40
N° 40	30 – 70	10 – 25
N° 200	8 – 30	3 – 15

Fuente: copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%207.pdf

- La gradación de los materiales de sub-base, estará dentro de los límites especificados en la tabla anterior, con una variación uniforme de los tamaños gruesos a los finos
- Límites de Consistencia. La fracción del material que pasa el tamiz No. 40 debe tener un índice de plasticidad menor de 8 Max y un límite líquido menor de 35 Max.
- Desgaste. El material al ser sometido al ensayo de abrasión en la máquina de los Ángeles, debe presentar un desgaste menor del 40%.
- Equivalente de Arena. La fracción del material que pasa por el tamiz No. 4 debe presentar un equivalente de arena mayor del 25%.

Valor Relativo de Soporte, CBR. El CBR será mayor de 40% Min, para una densidad seca mínima del 95% con relación a la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado⁶.

2.2.1.3. BASE

- ✓ Resistencia: la función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la sub-base y la sub-rasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

⁶ Copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%207.pdf

- ✓ Esta también reduce el espesor de la carpeta más costosa. Muchas veces la base también debe trabajar como la sub base, respecto a la doble función de drenaje mencionada anteriormente.
- ✓ Básicamente el material que constituye a la base, en el pavimento flexible, debe ser friccionante y provisto de vacíos.
- ✓ La primera garantizará la resistencia adecuada y la permanencia de dicha resistencia con la variación de las condiciones que se puedan presentar, como podría ser el contenido de agua. Es lógico que no basta sólo con emplear material friccionante para garantizar la resistencia deseada, es necesaria también una compactación adecuada, necesaria para adquirir la compacidad y trabazón estructural requerida para una buena base. Los materiales utilizados para la base suelen someterse a procesos exigentes para su aprobación como lo es la trituración, produciendo efectos favorables para la resistencia y deformabilidad de la estructura a construir, ya que se obtienen partículas con formas convenientes para un reacomodo adecuado; además de esto, se deben llenar otras especificaciones por lo que es necesario tamizar dicho material.
- ✓ Los espesores de las bases son muy variables de acuerdo con el proyecto de que se trate, pero suele considerarse que 12 o 15 centímetros, es el espesor mínimo que conviene construir.

2.2.1.4. Características de los Materiales Utilizados

Es una capa de material seleccionado y gradado que se coloca ya sea en una sub-rasante de muy alta especificación o sobre una capa de sub-base. Los objetivos de esta capa son:

Absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y, además, repartir uniformemente estos esfuerzos a la sub-base y al terreno de fundación. Las bases pueden ser granulares, o bien estar formadas por mezclas bituminosas o mezclas estabilizadas con cemento u otro material ligante. El material pétreo que se emplee en la base, deberá llenar los siguientes requisitos:

- a) Ser resistente a los cambios de humedad y temperatura.
- b) No presentar cambios de volumen que sean perjudiciales.
- c) La fracción del material que pase el tamiz No. 40, ha de tener un límite líquido menor del 35%, y un índice de plasticidad inferior a 6 Max.
- d) La fracción que pasa el tamiz No. 200, no podrá exceder de $\frac{1}{2}$, y en ningún caso de los $\frac{2}{3}$ de la fracción que pase el tamiz No. 40.
- e) La graduación del material de la base, es menester que se halle dentro de los límites indicados.
- f) El CBR tiene que ser superior a 80%.
- g) Prueba de solidez al sulfato de sodio no mayor al 12%

Por lo general, para la capa de base se emplea piedra triturada, grava

El Instituto Nacional de Vías es sus normas de construcción, fija varias granulometrías. Estudiar normas de INVIA.

TABLA: 2.3.Requisitos Para Materiales De Base Granular

ENSAYO	TRÁNSITO REDUCIDO	TRÁNSITO REGULAR INTENSO	E
CBR, mínimo.	80	100	
Valor R de resistencia, mínimo.	78	80	
Límite líquido.	35	25	
Índice de plasticidad, máximo.	6	03	
Equivalente de arena, mínimo.	30	50	

Fuente: Norma ABC, Bases y sub-bases granulares, capítulo IV

Los materiales de grava o piedra triturada, provienen de la explotación de minas, de roca o piedras naturales. Los materiales retenidos en el tamiz No. 4, son agregados gruesos; los que pasan el tamiz No. 4, agregados finos; y los que pasan el tamiz No.

200, forman el relleno mineral. El material de relleno deberá estar libre de sustancias deletéreas o talcosas, poseen propiedades ligantes tales que permitan una buena compactación y contribuyan formar una capa de base bien ligada y densa. Los finos, juntamente con el agregado mineral, deberán tener un límite líquido menor de 35, un índice plástico menor de 6, y el porcentaje que pase el tamiz No. 200 deberá ser igual o menor al que pasa el tamiz No. 40. En el caso que sea necesario agregar material de relleno, para ajustarse a los requisitos de graduación o para obtener una cohesión satisfactoria del material, deberá mezclarse uniformemente todo el material de la base.

Materiales a base de arena - arcilla, son mezclas que, debidamente proporcionadas, tienen considerable resistencia a la desintegración, cuando han sido compactadas con la humedad óptima a su máxima densidad. Lo óptimo a requerir de estos materiales es que si son arenas, sean duras, angulosas y preferiblemente silíceas; si son arcillas, deberán ser de calidad uniforme y estar libres de terrones, materias vegetales y sustancias dañinas.

La fracción que pasa por el tamiz No. 200, será menor del 50% de la fracción que pasa el tamiz No. 40.

2.2.1.5. CAPA DE RODADURA

Es la capa que se coloca sobre la base. Su objetivo principal es proteger la estructura de pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores. Evita la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito de vehículos.

La capa de rodadura también contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas, si su espesor es apreciable (mayor de 4 centímetros).

- ✓ Superficie de rodadura: la carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.

- ✓ Resistencia: su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.
- ✓ Impermeabilidad: hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento⁷

2.2.2. CAPAS DE UN PAVIMENTO RÍGIDO O DE CONCRETO

2.2.2.1. SUB-RASANTE

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la sub-rasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la sub-rasante.

Procedimiento de Construcción. Se tendrá en cuenta lo siguiente:

Colocación y Compactación. La base se extenderá en capas cuyo espesor, así como el número de pasadas del equipo de compactación serán determinadas por la clase de material, densidad requerida y equipos disponibles, con previa aprobación del Interventor. Cada capa de base debe mantener la humedad óptima en todas las etapas de colocación.

Cada una de las capas que conforman la base, se compactará hasta la densidad especificada antes de colocar la siguiente.

⁷ *Es.slideshare.net/rosabeatrizvillaloboshuaman/diseo-de-pavimento-flexible-y-rigido*

Al finalizar la compactación de la última capa, se dará el perfilado general a la base y a las bermas. La Interventoría cuidará que los procesos cumplan las especificaciones correspondientes y ordenará los ensayos de laboratorio pertinentes.

Los materiales que incumplan los requisitos señalados en estas especificaciones, se retirarán en forma inmediata de la obra.

En el proceso de compactación deberá obtenerse una densidad mínima del 100% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado⁸.

2.2.2.2. Características de los Materiales

Es la superficie que sirve de fundación al pavimento. Está constituida por el suelo y se puede representar en corte, lleno o una combinación de los dos.

De acuerdo a todos los aspectos descritos en este capítulo los materiales de la sub-rasante, de acuerdo al diseño deberán presentar un CBR no menor de 40% en caso de no obtenerse debe acudir al mejoramiento de la sub-rasante, ya sea por adición de otro material o por medio de usos de Geotextiles, Geomallas y Geomembranas si los medios mecánicos no actúan para mejorarlo. Finalmente se puede acudir a medios químicos.

Los materiales deberán estar libres de materia orgánica, deben estar en lo posible en clasificaciones previamente seleccionadas y su compactación debe ser por lo menos el 95% de la densidad máxima proctor estándar y la última capa (entre 15 a 30 cm según el caso), debe ser por lo general mejorada con el 100% de la densidad máxima y cumplir con la humedad óptima, el índice de plasticidad no será superior a un 10% en lo posible.

La gradación de los materiales será la siguiente, excepto cuando en las especificaciones particulares se indique otra distinta.

- Granulometría

⁸ copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%207.pdf

Tabla 2.4: Análisis Granulométrico

Tamices	Límites (% que pasa)		
	<u>Gradación A</u>	<u>Gradación B</u>	<u>Gradación C</u>
1-1/2"	100	100	100
1"	75-92	79-96	83-100
3/4"	60-80	65-85	70-90
3/8"	40-63	46-69	52-75
No. 4	30-50	35-55	40-60
No. 10	20-37	24-41	28-45
No. 40	10-23	13-27	17-30
No. 200	5-12	7-12	8-12

Fuente: copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%207.pdf

- La gradación propuesta de los materiales de base encajará en los límites especificados de las alternativas anteriores.
- Valor Relativo de Soporte CBR. El material deberá presentar un CBR de laboratorio superior al 80% para una muestra remoldeada y sometida a inmersión para el 100% de compactación con relación a la densidad máxima seca del ensayo Proctor Modificado.
- Solidez. El material no presentará señales de desintegración ni pérdida en peso mayor del 12% al someterlo a cinco (5) ciclos alternados en la prueba de solides con sulfato de sodio.
- Límites de Consistencia. La fracción del material que pasa por el tamiz No. 40 debe ser NP y tener un límite líquido menor de 25%.

- Desgaste. Al ser sometido al ensayo de abrasión en la máquina de Los Ángeles presentará un desgaste menor del 40%.
- Equivalencia de Arena. La fracción del material que pasa por el tamiz No. 4 mostrará un equivalente de arena mayor de 30⁹.

Forma. La fracción del material retenido en el tamiz No. 4 presentará un índice de aplanamiento inferior a 35% y un índice de alargamiento inferior a 30% y un 50% de dicha fracción mostrará al menos, una cara fracturada.

2.2.2.3. SUB-BASE

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de sub-rasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la sub base. La sub-base debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento. Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una sub-rasante o sub-base adecuada.

- ✓ La función más importante es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de materiales fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losa. El agua se penetra a través de las juntas licua el suelo fino de la sub-rasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.
- ✓ Servir como capa de transición y suministrar un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento.

⁹ copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%207.pdf

- ✓ Facilitar los trabajos de pavimento.
- ✓ Mejorar el drenaje y reducción por tanto al mínimo la acumulación del agua bajo el pavimento.
- ✓ Ayudar a controlar los cambios volumétricos de la sub-rasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales de tales cambios volumétricos sobre el pavimento¹⁰.

La construcción de una sub-base comprende las siguientes operaciones repetidas cuantas veces sea necesario: Extensión y humedecimiento de una capa, conformación, compactación y acabado de la misma capa.

La sub-base se colocará en capas no mayores de 20 cm. de espesor, medido antes de la compactación, y mantendrá un contenido de humedad cercano al óptimo para compactarse a un mínimo del 95% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado.

Cuando se trate de sub-base sobre afirmado existente, se seguirá el siguiente procedimiento: Si el afirmado existente en la vía formare parte de la sub-base, este se escarificará en una profundidad de 10 cm. o la que se indique en las especificaciones particulares. Se conformará y compactará al 95% de la densidad máxima del Proctor Modificado. Si el espesor de la sub-base por colocar sobre el afirmado existente.

La cota de cualquier punto de la sub-base conformada y compactada no deberá variar en más o menos un centímetro (+ /-1 cm.) de la cota proyectada. El espesor verificado por medio de perforaciones en la sub-base terminada no deberá ser menor del noventa y cinco por ciento (95%) del espesor de diseño¹¹.

2.2.2.4. Características de los Materiales

Las características esenciales que debe tener el material granular son las siguientes:

- Suelos tipo grava arenosa, arenas arcillosas.

¹⁰ *Es.slideshare.net/rosabeatrizvillaloboshuaman/diseo-de-pavimento-flexible-y-rgido*

¹¹ *Copernico.esuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%207.pdf*

- Inorgánicos.
- Libres de materia vegetal, escombros y basuras.
- Libres de material congelado.
- Sin presencia de terrones ni trozos degradables.

Requisitos que debe constituir una sub-base de tipo granular:

- Granulometría de la mezcla de suelo con agregado de acuerdo a la siguiente tabla 2.5.

Tabla 2.5. Requisitos Granulométricos de Materiales para Sub bases

Suelo – agregados AASTHO M147

Tamaño de la Malla	Porcentaje que pasa en peso					
	A	B	C	D	E	F
2"	100	100
1"	...	75-95	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100
Nº 4	25-65	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Fuente: AASTHO M147

- Valor soporte: el material debe tener un CBR, AASHTO T 193, mínimo de 30, efectuado sobre muestra saturada 95% de compactación, AASHTO T 180.
- Tamaño de partículas: no debe exceder de 70 milímetros ni exceder de ½ espesor de la capa.
- En general se recomiendan materiales que contengan finos en una proporción no mayor de 15%.

- Plasticidad y cohesión: la porción que pasa el tamiz 0.425 mm, no debe de tener un índice de plasticidad AASHTO T 90, mayor de 6 ni un límite líquido, AASHTO T 89 mayor de 25.
- Impurezas: el material de sub-base debe estar exento de materiales vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que incorporadas dentro de la capa de sub-base puedan causar fallas en el pavimento.

Tabla 2.6. Resumen de características que debe cumplir una sub base tipo granular

Límite Líquido	35 % máx.
Índice de Plasticidad	8 % máx.
Desgaste de los Ángeles	40 % máx.
Contracción Lineal	4 % máx.
Equivalente de Arena	25 % min.
C.B.R.	≥ 40

Fuente: ASTM

2.2.2.5. LOSA (SUPERFICIE DE RODADURA)

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la sub rasante, dado que no usan capa de base.

- Las funciones de la losa en el pavimento rígido son las mismas de la carpeta en el flexible, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen.

Es la capa superior del pavimento y sobre ella circulan los vehículos durante la vida útil de ésta. Debe ser resistente a la abrasión generada por el tráfico y a la agresión del medio ambiente. Tiene la función de proteger la estructura, impermeabilizando la

superficie del pavimento, debe ser suave y de superficie continua para que sea cómoda la circulación de vehículos sobre ella, y debe ser rugosa para asegurar la adherencia de los vehículos¹².

2.2.3. EVALUACIÓN DE LOS AGREGADOS

2.2.3.1. FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL DE LAS PARTICULAS

La forma y la textura superficial de las partículas de un agregado influyen en las propiedades del concreto fresco más que las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o elongadas requieren más humedad para producir trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas de agregado angulares. Sin embargo, con la granulometría satisfactoria, tanto los agregados triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca). Los agregados angulares o con granulometría pobre también pueden ser más difíciles de bombear.

La cantidad de vacíos de los agregados fino y grueso compactados se puede usar como un índice de las diferencias en la forma y la textura de los agregados con la misma granulometría.

2.2.3.2. Granulometría y graduación

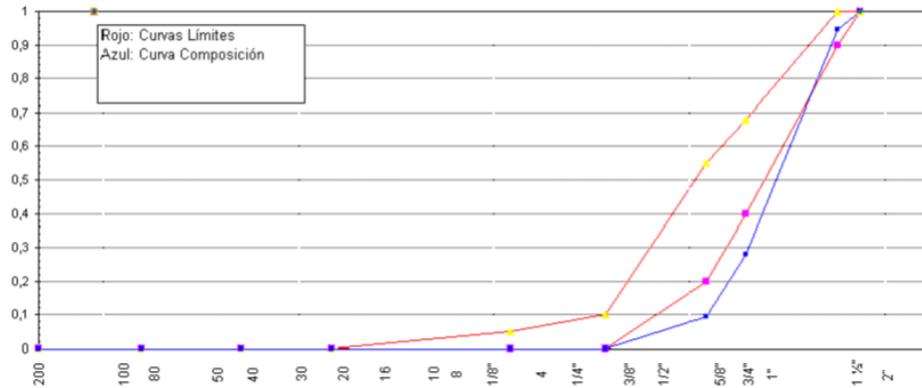
El análisis granulométrico consiste en hacer pasar las partículas del agregado a través de tamices. La serie general de tamices está elaborada en tal forma que la abertura en un tamiz está en relación $1:(2)^{1/4}$ con respecto al siguiente tamiz.

En la norma Icontec 174 se presentan las especificaciones granulométricas tanto para agregados gruesos como para agregados finos a utilizar¹³.

¹² Universidad Nacional Autónoma de México “Diseño y Conservación de Pavimentos Rígidos”

¹³ Libro: ingeniería de pavimentos, evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. 3era edición. Tomo II. Alfonso Mondejo Fonseca

Gráfico N° 1 Granulométrico



Fuente: instituto nacional de vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, S.A., 1998

Por lo regular, se grafican los datos del análisis granulométrico en una carta de graduación de agregados y ajustar a los límites específicos. Las mallas de pruebas que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con aberturas de 2 ½, 2, 1 ½, 1, ¾, ½ y ⅜ de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con 4, 10, 40, 80, 100 y 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como N°. 4, N°. 10, etc.

A la porción de material agregado que queda retenido en la malla N° 10 (esto es, con partículas mayores a 2mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que pasa por la malla N° 10 pero queda retenido en la malla N°200 (partículas mayores que 0,075 mm) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla N° 200 se llama fino¹⁴.

2.2.3.3. DENSIDAD

Las partículas del agregados están conformados por masa del agregado, vacíos que se comunican con la superficie llamados poros permeables o saturables y vacíos que no se comunican con la superficie, es decir que quedan en el interior del agregado,

¹⁴ Libro ingeniería de carreteras, agregados en la carretera, primera edición 1993. Tomo I. Paul Wright.

llamados poros impermeables o no saturables, de acuerdo con lo anterior tenemos 3 densidades a conocer

2.2.3.3.1. Densidad real: masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo sus poros permeables no saturables y los no saturables o impermeables.

2.2.3.3.2. Densidad nominal: masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo únicamente los poros permeables o saturables.

2.2.3.3.3. Densidad aparente: masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo tanto poros permeables o saturables como poros impermeables o no saturables (volumen aparente o absoluto).

Si la masa de agregado se determina con material seco tendríamos densidad aparente seca, pero si la masa del agregado se determina con material saturado y superficialmente seco (s.s.s.), tendríamos densidad aparente saturada.

De los tres tipos de densidades mencionadas, la densidad aparente es la que se emplea en el cálculo de mezclas, porque se parte que el material primero se satura, es decir, todos los poros permeables de cada partícula quedan llenos de agua y el agua adicional a este estado (agua libre) es la que reacciona con el cemento.

La diferencia entre las densidades relativas aparente y la total equivalen a los huecos permeables al agua de los agregados secos y en condiciones superficiales secas y saturadas, esto es con todos los vacíos permeables llenos de agua. La diferencia entre las dos masas es la masa del agua absorbida¹⁵.

2.2.3.4. ABSORCIÓN Y HUMEDAD

La absorción (porcentaje de agua necesaria para saturar los agregados o el hormigón expresado con respecto a la masa de los materiales secos) y la humedad deben determinarse de acuerdo con las normas Icontec 176, de manera que la cantidad de

¹⁵ Libro ingeniería de carreteras, agregados en la carretera, primera edición 1993. Tomo I. Paul Wright.

los materiales en la mezcla puede controlarse y se establezca los pesos correctos de cada uno de ellos.

2.2.3.5. RESISTENCIA

La resistencia al desgaste de un agregado se usa con frecuencia como indicador general de la calidad del agregado; esta característica es esencial cuando el agregado se va a usar en concreto sujeto a desgaste como en el caso de los pavimentos rígidos. El método de prueba más común es el ensayo de la máquina de los ángeles (norma Icontec 93 y 98)¹⁶.

Los materiales que se usan en los pavimentos de carreteras deberán ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos interno de las cargas repetitivas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de los ángeles consta de un cilindro de acero hueco, serrado en ambos extremos y montados en ejes en posición horizontal.

Para ejecutar la prueba de abrasión de los ángeles se coloca dentro del cilindro una muestra limpia del agregado que se ha de probar junto con el peso estándar de esferas de acero como carga abrasiva. El tambor se hace girar 500 veces a una velocidad 30 a 33 rpm, después de lo cual se retira la muestra de agregado y se agita en una malla del N°12 (1.70 mm).

El material retenido en la criba se lava, se saca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste la diferencia entre la masa original y masa final de la muestra expresada como un porcentaje de la masa original. El método T96 de AASHTO da un procedimiento detallado para esta prueba¹⁷.

¹⁶ Libro: ingeniería de pavimentos, evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. 3era edición. Tomo II. Alfonso Mondejo Fonseca.

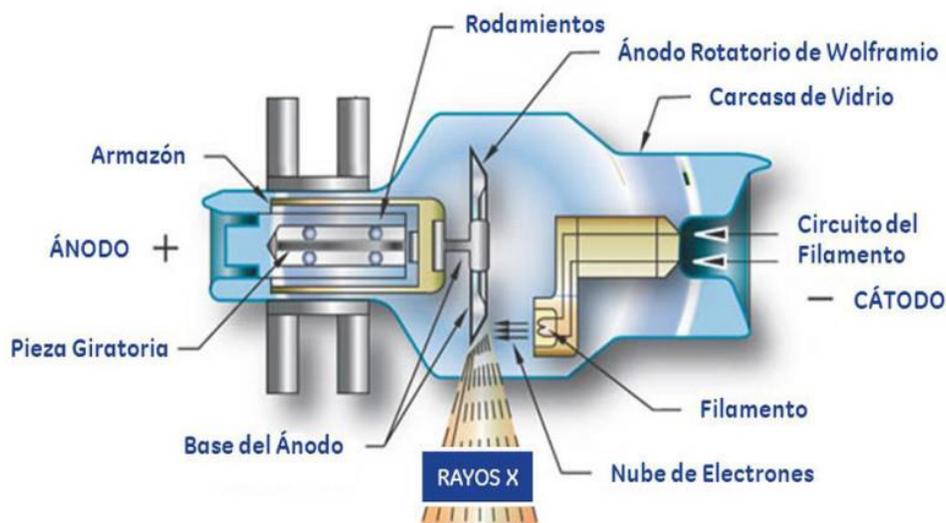
¹⁷ Libro ingeniería de carreteras, agregados en la carretera, primera edición 1993. Tomo I. Paul Wright

2.2.4. TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X PARA ANÁLISIS INTERNO DE LOS AGREGADOS EN EL PAVIMENTO.

La tomografía computarizada (TC) es una tecnología para diagnóstico con imágenes. Utiliza un equipo de rayos X especial para crear imágenes transversales.

El término “tomografía computarizada”, o TC, se refiere a un procedimiento computarizado de imágenes por rayos X en el que se proyecta un haz angosto de rayos X en un pavimento y se gira rápidamente alrededor del pavimento, produciendo señales que son procesadas por la computadora de la máquina para generar imágenes transversales o “cortes” del pavimento¹⁸.

FIGURA N° 2.4: PARTES DE UN TOMÓGRAFO



Fuente: <http://www.lasverdadesdemiguel.net/edicion-521-rayos-x-tomografia-axial-computarizada>.

2.2.4.1. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE TOMOGRAFÍA

Se trata de un tomógrafo General Electric CT/e Dual, espiral o helicoidal multicorte de última generación de imagen multiplanar (axial, sagitales, coronales) Y 3D, posee

¹⁸ [www.nibib.nih.gov_en espa%F1ol, temascientificos.Tomografias](http://www.nibib.nih.gov_en/espa%F1ol,temascientificos.Tomografias).

más detectores en forma de abanico, formando un sistema tubo-detectores formando un arco móvil y una rotación continua alrededor de la mesa del objetivo.

Determinando una resolución convencional en un equipo helicoidal podemos realizar cortes cada 0,5 mm sin contraste en la sección; con una alta resolución podemos obtener secciones desde los 0,5 mm pero con contraste; es decir que se observan partículas más a detalle, pudiendo definir las capas blandas de los vasos sanguíneos para tener una idea de la claridad de la imagen.

Este equipo tiene un barrido de 360° debido a que los detectores están ubicados en la parte de arriba.

Utilizado en el campo médico, tomógrafo de cuarta generación, el cual nos proporciona dos tipos de resolución de imagen que nos permite realizar múltiples cortes al objeto y dependiendo el uso de la imagen realizar mediante la consola de datos una observación a detalles de las partículas que conforman el objeto analizado.

2.2.4.2. PARTES DEL TOMÓGRAFO

El equipo a utilizar posee una fuente y detectores distribuidos en arco que son rotatorios y la mesa del objeto que se mantiene inmóvil verticalmente y según el análisis a realizar la mesa realiza movimientos horizontales.

2.2.4.3. TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTARIZADA

La Tomografía Axial Computarizada es una de las técnicas de diagnóstico por imágenes más utilizadas en la actualidad, debido principalmente a su habilidad de generar gran cantidad de información volumétrica en un reducido período de tiempo, la alta resolución de las imágenes generadas y la capacidad de crear vóxeles isotrópicos, lo que permite la obtención de reconstrucciones tridimensionales y multiplanares.

Un equipo de TAC o tomógrafo está compuesto por un anillo en el que se introduce el paciente, un emisor y un receptor de rayos X tras las paredes del anillo, y un ordenador que analiza los datos obtenidos por el detector. Para emitir los rayos X se

utiliza un pequeño acelerador de partículas: se aceleran electrones y se hacen impactar contra un objetivo de metal.

Todos estos datos son pasados a una computadora, que no hace más que revertir el proceso físico para reconstruir la sección completa. El resultado es una imagen bidimensional de esa sección del objeto. Luego se mueve el anillo una pequeña distancia a lo largo del eje y se repite todo el proceso para obtener otro corte del cuerpo un poco más abajo.

Los equipos de tomografía se usan en el diagnóstico de muchas dolencias, entre ellas:

- La TAC de la cabeza se utiliza, para identificar hemorragias cerebrales y tumores.
- En los pulmones, se emplean para identificar enfisemas, fibrosis y tumores.
- En el abdomen, sirve para identificar cálculos renales, apendicitis, pancreatitis, etc.
- En los miembros se utiliza para obtener imágenes detalladas de fracturas complejas, sobre todo en articulaciones.

Figura 2.5. Tomógrafo general electric CT/e Dual



Fuente: Hospital San Juan De Dios, Tarija

2.2.4.4. RECONSTRUCCIÓN MULTIPLANAR

El análisis de los cortes transversales generados por los estudios de tomografía en ocasiones es insuficiente para lograr la obtención de un correcto y eficiente diagnóstico o documentar algunos casos clínicos. Debido principalmente a que no permite la visualización de todos los detalles anatómicos al obtenerse una única vista de la región a analizar. Para satisfacer esta limitante, en la actualidad, algunos visores de imágenes médicas, a partir de estudios de TAC crean imágenes bidimensionales no-axiales, utilizando algoritmos matemáticos muy veloces. Este proceso es conocido como Reconstrucción o Reformato Multiplanar.

Inicialmente se obtienen las imágenes de los cortes transversales y luego, apilando visualmente los cortes, se pueden reconstruir imágenes en plano, sagital o coronal,

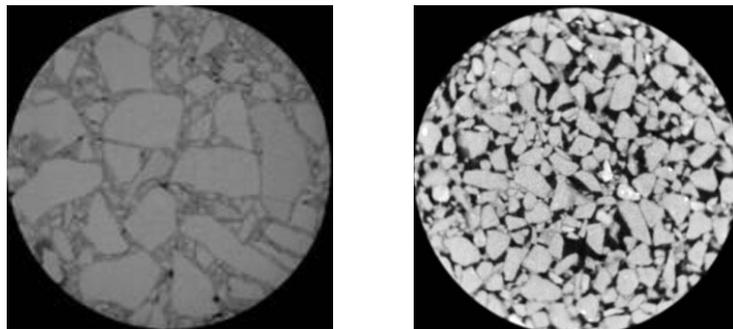
bien en dirección perpendicular u oblicua, con respecto al eje del paciente. Esta técnica es particularmente útil para evaluar las estructuras óseas, ya que algunas fracturas y alineación de las articulaciones pueden no ser evidentes en cortes axiales.

La reconstrucción multiplanar permite adicionalmente seleccionar una posición anatómica en un plano y ver su correspondencia en los demás planos, dando una excelente percepción tridimensional de la estructura analizada.

2.2.4.5. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE RAYOS-X PARA CARACTERIZAR CAPAS GRANULARES

Los sistemas de rayos-X empleados en el análisis de las capas granulares son similares a los utilizados en el ámbito médico. Sin embargo, a diferencia de estos, en el área de ingeniería de pavimentos la intensidad de los rayos-X y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución. Después de adquirir una sección la posición del objeto en el sentido vertical se modifica con base en una distancia fija predeterminada y los pasos anteriores se repiten nuevamente.

FIGURA N° 5: IMÁGENES DIGITALIZADAS



Fuente: Ejemplos de secciones de pavimento: (a) de gradación densa, (b) de gradación abierta

2.2.4.6. Caracterización de la estructura de vacíos y del flujo de agua en el pavimento mediante el análisis de imágenes de rayos-X

El parámetro que comúnmente se ha empleado para caracterizar los vacíos en las capas del pavimento es el contenido total de vacíos, el cual constituye uno de los principales parámetros de control dentro de los procesos de diseño y construcción de las mismas. Sin embargo, el contenido total de vacíos no permite cuantificar el tamaño, distribución o conectividad de los vacíos individuales que existen en el interior de la mezcla. Dicha cuantificación ha cobrado importancia en la medida en que investigaciones recientes, desarrolladas aplicando técnicas de rayos-X, han demostrado que las capas del pavimento están compuestas por los mismos materiales, en las mismas proporciones y con el mismo contenido total de vacíos, presentan diferentes desempeños y susceptibilidades al daño por humedad.

El proceso de selección del color correspondiente al valor límite es iterativo. Después de asignar al grupo de imágenes un cierto valor límite en escala de grises, se efectúa el cálculo del contenido total de vacíos utilizando las imágenes binarias resultantes.

2.2.4.7. ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS

Se procederá a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestido. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación).

Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del pavimento y el agregado, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de material absorbido por el agregado, efectuando sobre la muestra de mezcla sin compactar¹⁹.

¹⁹ Catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo1.pdf

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS DE LOS AGREGADOS DE LAS CAPAS GRANULARES DEL PAVIMENTO A PARTIR DE TOMOGRAFÍAS POR RAYOS-X EN VÍAS URBANAS

3.1. ENFOQUE GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

La base de este proceso de investigación se fundamentara en el análisis de los agregados al interior de cada una de la capas granulares de los pavimentos que forman parte del estudio, para poder analizar a cada una de las tomografías (rayos-x) en las capas granulares del pavimento.

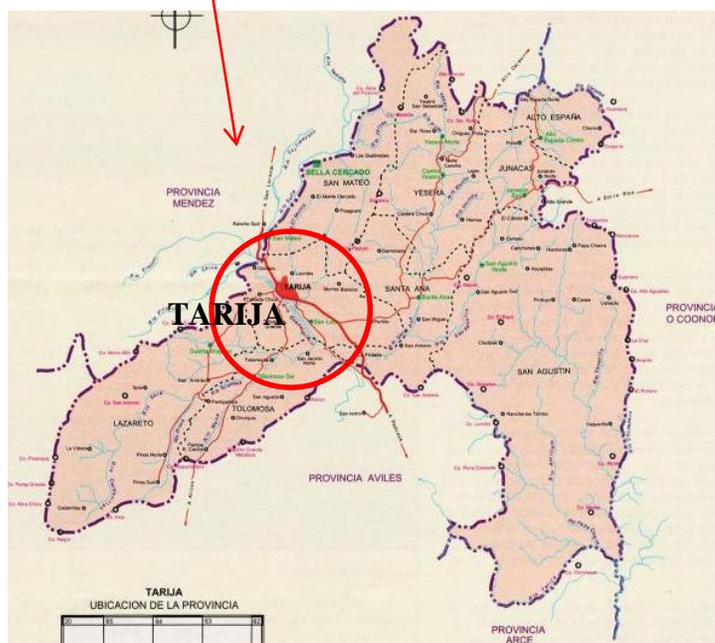
El suelo utilizado es material granular, pertenece a las capas sub base y base para pavimentos rígidos y flexibles, el cual será analizado a partir de su caracterización, elaboración de los moldes de CBR (California Bearing Ratio) para cada una de las capas del pavimento en estudio, posteriormente sacar tomografías (rayos – x) a cada uno de los moldes de CBR, analizando cada una de las imágenes.

Por lo tanto la finalidad que se pretende con este trabajo es analizar el comportamiento y distribución de los agregados, porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado al interior del pavimento, permitiendo así definir, visualizar y comparar entre un pavimento y otro.

3.2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se trabajara con los materiales granulares utilizados en las siguientes áreas de estudio que son: la avenida costanera del sur, la avenida costanera la banda, vías de acceso a la nueva terminal, ubicadas en la ciudad de Tarija provincia cercado, ubicada a los 21° 32' 07" de latitud sud, 64° 43' 46" de longitud oeste y una altitud de 1870 m.s.n.m.

Imagen 3.1 Localización área de estudio



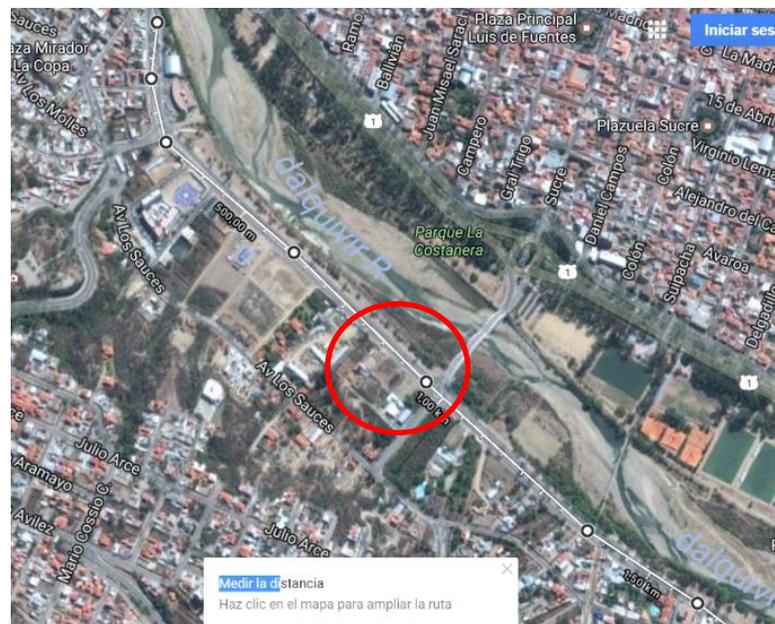
Fuente: www.Educa.com.bo

Imagen 3.2 Localización satelital del área de estudio Av. Costanera del sur



Fuente: Google earth

Imagen 3.3 Localización satelital del área de estudio Av. Costanera la banda



Fuente: Google earth

Imagen 3.4 Localización satelital del área de estudio Vías de acceso a la nueva terminal de buses



Fuente: Google earth

3.3. IDENTIFICACIÓN DE PAVIMENTOS DE TRAMOS DE VÍAS URBANAS

Los tramos que se utilizaron para el estudio son: la avenida costanera del sur, la avenida costanera la banda, ya que todas estas avenidas son de pavimento flexible y vías de acceso a la nueva terminal son de pavimento rígido. Estos pavimentos actualmente se encuentran en uso de las avenidas de la ciudad de Tarija.

3.3.1. SELECCIÓN DEL MATERIAL

Del área de estudio que es la ciudad de Tarija se toma como muestra 3 tramos, su estudio de clasificación se obtiene de cada una de las empresas ejecutoras de los tramos seleccionados y se presenta en el (ANEXO I.)

En base a esta información y con las especificaciones se definen los suelos que fueron utilizados en cada proyecto de pavimento, al mismo tiempo seleccionarlos para ser utilizados en el trabajo de proyecto de investigación, porque lo que se hace es una réplica de lo que está en plataforma llevarlo a laboratorio, y así obtener las mismas capas granulares en el laboratorio. Para el tramo de la Av. Costanera del sur los

materiales que se usaron fueron del río Guadalquivir y chancadora don Tomas, y la Av. Costanera la banda el material se saca de río Guadalquivir y el ligante de la quebrada Sagredo, y las vías de acceso a la nueva terminal el material fue utilizado del río la ventolera y el ligante de torrecillas.

Una vez identificados los tipos de suelos existentes en el lugar se realiza la toma de muestra a una profundidad de 0,5 m, altura que es requerida según norma para la obtención de muestras para una capa sub base y una capa base.

Imagen 3.5: selección del material granular y ligante



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Metodología para determinar el tamaño de la muestra

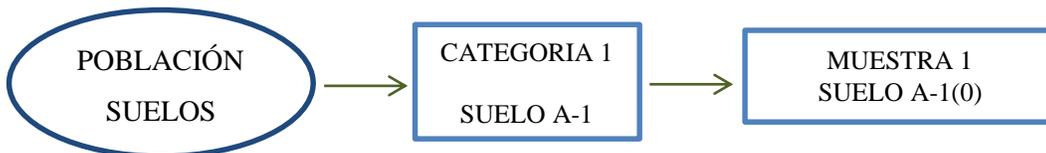
El método seleccionado para determinar la cantidad de muestras que fueron analizadas en este proyecto es el siguiente:

Muestreo probabilístico de tipo aleatorio alterado, este método consiste en extraer muestras de tipo aleatorios. Este método se extrae la muestra y esta pierde las propiedades al llevar al laboratorio, al menos que esta se la pueda conservar en bolsas de plástico las muestras, es por esta razón que se toma el muestreo aleatorio alterado.

El riesgo de este tipo de muestreo está en los casos en las que se dan periodicidades en la población ya que al elegir a los miembros de la muestra con una periodicidad constante podemos introducir una homogeneidad que no se dan en la población.

De acuerdo a este método lo que se hace es considerar una categoría de cada suelo granular que se trabaja con materiales granulares utilizados en los tramos del área de proyecto. De cada categoría de suelo fijada se selecciona una sola muestra, basado en el concepto de fijación simple, para cada proyecto en estudio.

Mediante el siguiente esquema se explica el concepto desarrollado anteriormente:



3.3.3. Ubicación de tramos en estudio

El número de muestras que se obtienen son tres, se elige esta cantidad porque los suelos que predominan de acuerdo al sondeo proporcionado es un A-1(0) (suelos granulares), por lo tanto se ubican las tres calles o tramos que tengas estas características, y son las siguientes:

Muestra 1: Avenida costanera del sur.

Muestra 2: Avenida costanera la Banda.

Muestra 3: Vías de accesos a la nueva terminal.

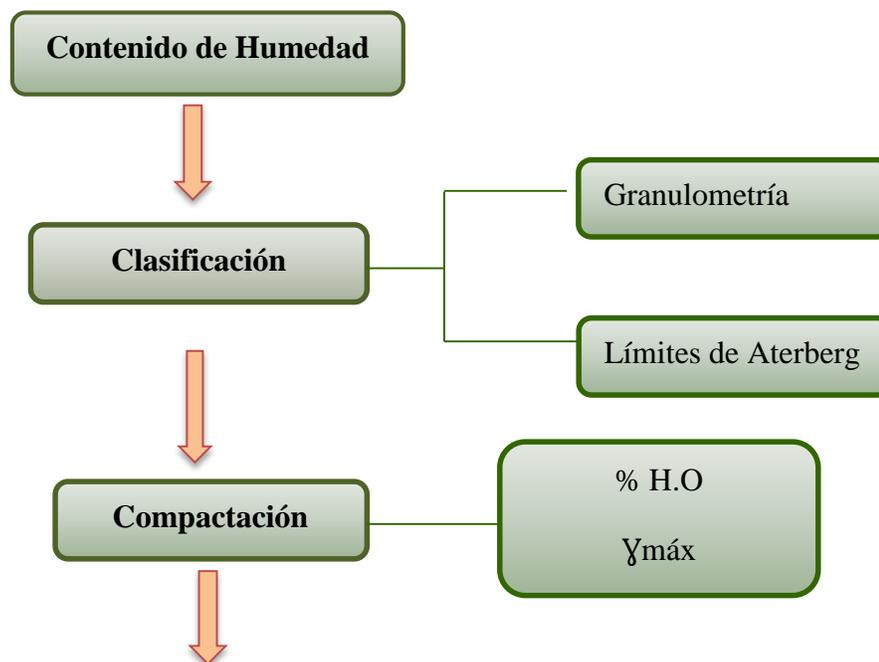
Nota. Las muestras de suelo fueron obtenidos de acuerdo a la información proporcionada de cada proyecto en estudio, de los bancos de préstamos que se utilizó en dichos proyectos para así poder obtener la misma calidad de muestra, en laboratorio ya sea para la capa sub base y la capa base.

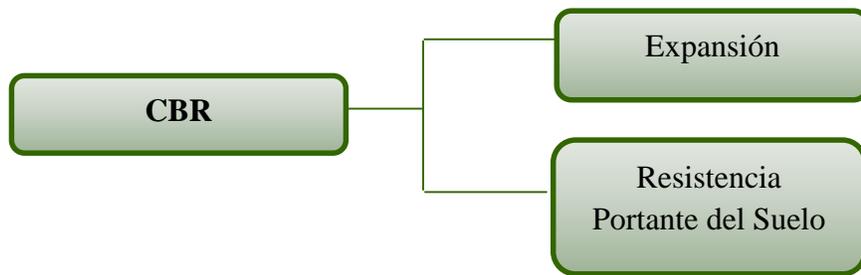
Se procedió a elaborar la muestra para no causar daños en el pavimento ya existente en los proyectos de estudio.

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los estudios de caracterización son de vital importancia para conocer al material a tratar, así también es importante conocer las propiedades del material que se adicionarán, por lo tanto se recurre a pruebas de laboratorio para conocer las características del suelo granular y el del ligante, materiales que componen este estudio, para así tener un criterio más amplio del comportamiento de la capa sub base y de capa base.

Por lo tanto para la caracterización de los materiales (suelos granulares) son necesarios los siguientes tipos de caracterización: física, mecánica ambos tipos comprende ensayos específicos que se detalla a continuación.





3.4.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN LOS SUELOS GRANULARES

Se refiere a los ensayos físico-mecánicos para la caracterización del suelo granular para la capa sub base y base.

La caracterización se realiza a las cinco muestras seleccionadas del área de proyecto que son identificadas de la siguiente manera:

Muestra 1: Avenida costanera del sur.

Muestra 2: Avenida costanera la Banda.

Muestra 3: Vías de acceso a la nueva terminal.

Cuadro 3.1 Ensayos de Caracterización a los Suelos granulares

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Física	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
	Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90

Mecánica	Ensayo de compactación método (Proctor modificado)	ASTM D422 AASHTO T180
	Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.1. Contenido de Humedad de la muestra (ASTM D2216)

Consiste en obtener una muestra húmeda representativa del material utilizado, colocarlo en un recipiente al horno, pesar el recipiente vacío y luego el recipiente más la muestra húmeda obteniendo así un peso del material más el recipiente, luego llevarla al horno a temperatura $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9^\circ\text{F}$) en la mayoría de los casos, el secado de una muestra durante la noche (16 horas), es suficiente, sacar del horno y pesar nuevamente el material, obteniendo un peso seco del material más el recipiente.

CUADRO 3.2. Procedimiento de Ensayo Contenido de Humedad



Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS:

El contenido de agua se calcula mediante la siguiente formula:

$$w(\%) = \frac{Pa}{P_{ss}} * 100$$

Donde:

W(%)= contenido de humedad en porcentaje.

P1= peso de la tara y de la muestra húmeda (g)

P2= peso de la tara y de la muestra seca (g)

Pa= (P1-P2) = peso del agua presente en el suelo (g)

Pss= (P2-Pc) = peso del suelo después de secar al horno (g)

RESULTADOS:

Tabla 3.1. Resultados del Contenido de Humedad

<i>Muestra Nº</i>	<i>PAVIMENTO</i>	<i>Porcentaje de humedad W (%)</i>	
		<i>Sub base</i>	<i>Base</i>
1	Av. Costanera del sur	2,44	2,48
2	Av. Costanera la banda	2,65	2,95
3	Vías de acc. Nueva terminal	1,9	

Fuente: Elaboración Propia

Para poder ver los demás cálculos de porcentaje de humedad de las capas granulares (Ver planilla en ANEXO II).

3.4.1.2. Análisis Granulométrico por Tamizado (ASTM D422 - AASTHO T-88).

MATERIAL UTILIZADO

- Balanza
- Juego de Tamices
- Horno

- Herramientas y accesorios.- brochas, recipientes y platos.

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
63.5	2 ½''
50.8	2''
38.1	1 ½''
25.4	1''
19.1	¾''
12.7	½''
9.5	3/8''
6.3	1/4''

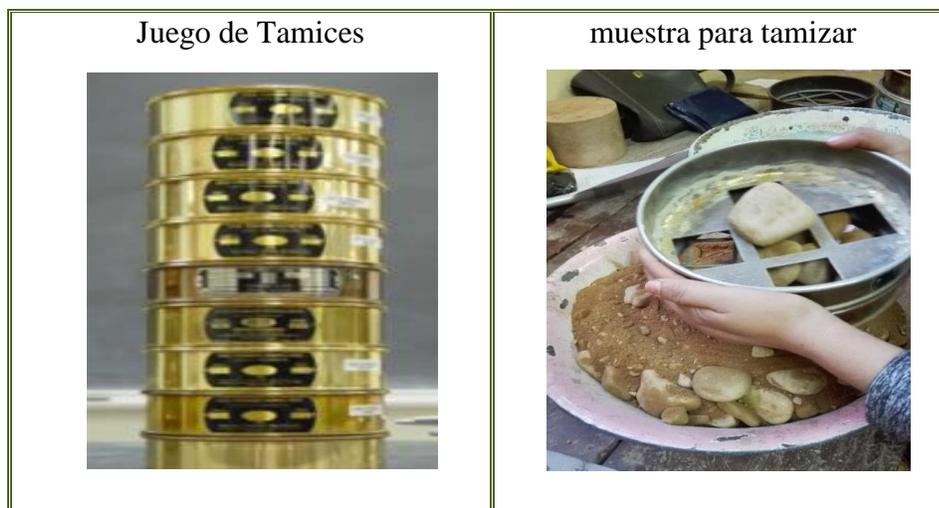
Fuente: Elaboración Propia

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
4.75	(N° 4)
2	(N° 10)
0.425	(N° 40)
0.075	(N° 200)

Fuente: Elaboración Propia

- Se toma una muestra representativa de suelo una vez mezclado el material de banco con el material del río de acuerdo a las especificaciones que se tiene.
- Luego se hace el tamizado, que el material pase por cada una de las aberturas de los tamices reteniendo material y luego pesar el material retenido en cada tamiz.

Cuadro 3.3. Procedimiento de ensayo análisis granulométrico



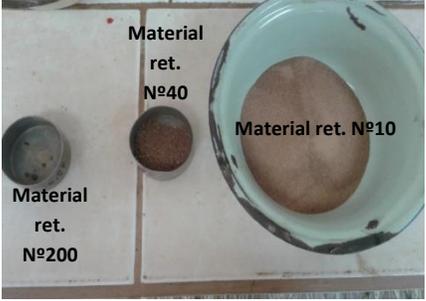


Fuente: Elaboración Propia

METODO DEL LAVADO

- a) Se toma una muestra representativa de suelo que pasa el tamiz # 4 en una cantidad de 500 g.
- b) A continuación se deja el material reposar en agua durante 24 horas hasta que esta sature completamente, haciendo que el suelo tenga características de barro o lodo.
- c) Hacer pasar el material por el tamiz N° 200, lavar cuidadosamente con agua potable el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.
- d) Posteriormente el material retenido en la malla N° 200, disponer dentro de un recipiente para realizar un secado del suelo hasta una masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- e) Una vez secado el material se procede a retamizar por las mallas, N°10, N°40 y N° 200, registrando los pesos de suelo retenido en cada tamiz

Cuadro 3.4. Procedimiento de ensayo método de lavado

<p>Cantidad de muestra pesada que ha pasado el tamiz N° 4</p> 	<p>Muestra en saturación</p> 
<p>Lavado de la muestra tamiz N° 200</p> 	<p>Muestra ret. en el tamiz N° 200</p> 
<p>Tamizado del material seco</p> 	<p>Cantidad de material retenida en cada malla</p> 

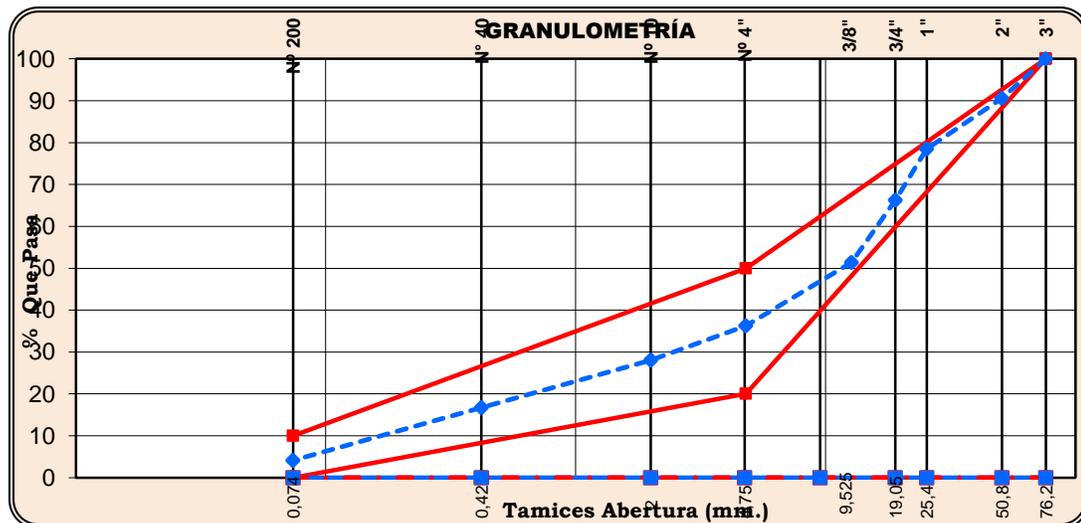
Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS:

Tabla 3.2 Resultados de Granulometría de la capa sub base

MUESTRA N°	<i>Av. Costanera del sur</i>	<i>Av. Costanera la banda</i>	<i>Vías de acc. Nueva terminal</i>
	1	2	3
Tamiz N°	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
3"	100,0	100,0	100,0
2"	90,6	91,8	91,0
1"	78,5	69,7	78,3
3/4"	66,3	63,4	69,9
3/8"	51,4	53,1	56,5
4	36,2	33,5	43,8
10	28,0	24,4	34,9
40	16,7	15,5	26,4
200	4,1	2,7	9,1

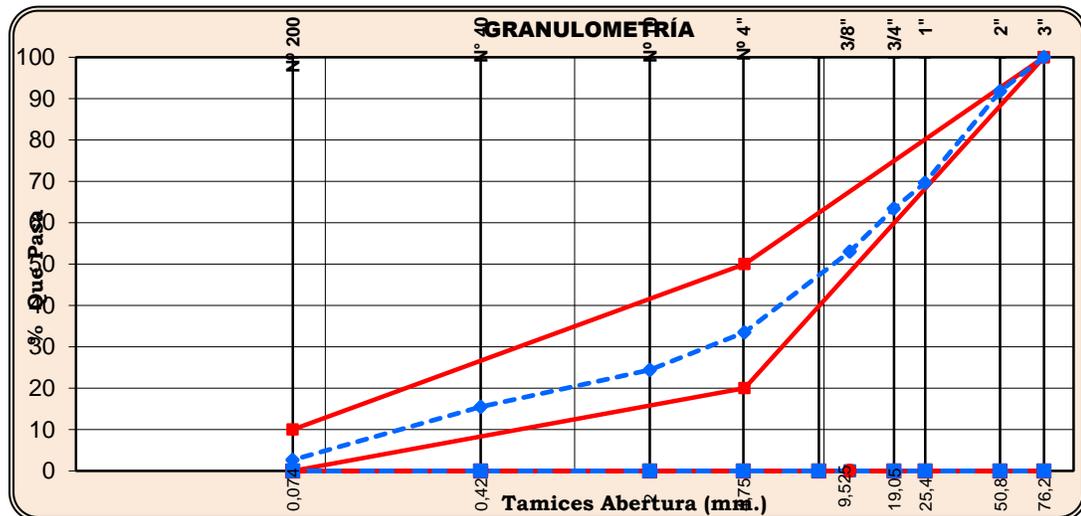
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.1 Granulometría de la Muestra N°1, (Av. Costanera del sur, capa sub base)

Fuente: Elaboración Propia

Para ver los demás cálculos de granulometría de capa sub base de la avenida costanera del sur ver en **(planilla en ANEXO II)**.

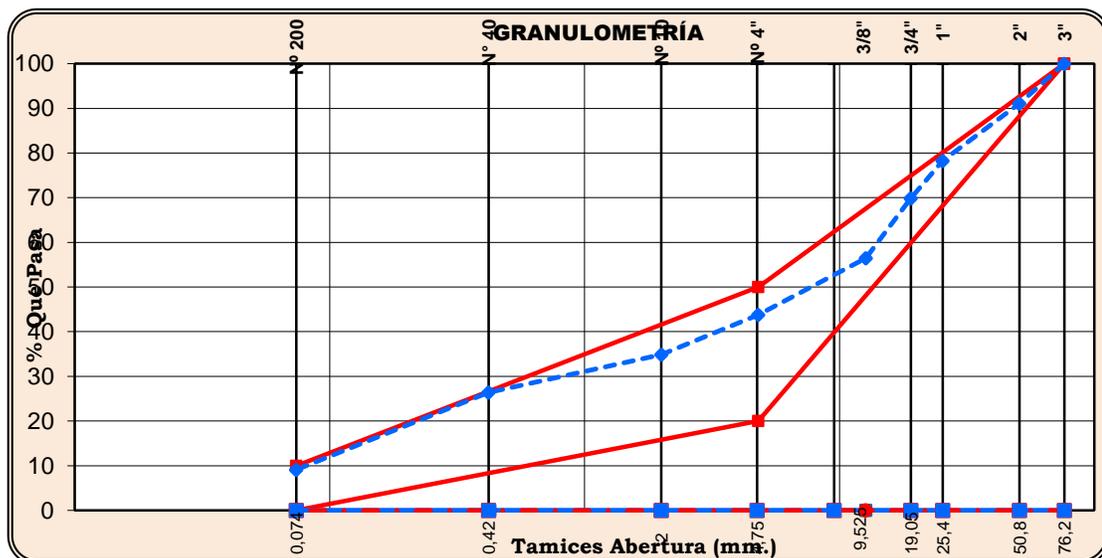
Gráfica 3.2 Granulometría de la Muestra N°2 (Av. Costanera la banda, capa sub base)



Fuente: Elaboración Propia

Para ver los demás cálculos de granulometría de la capa sub base de la avenida costanera la banda ver en **(planilla en ANEXO II)**.

Gráfica 3.3 Granulometría de la Muestra N°3 (Vías de acceso a la nueva terminal, capa sub base)



Fuente: Elaboración Propia

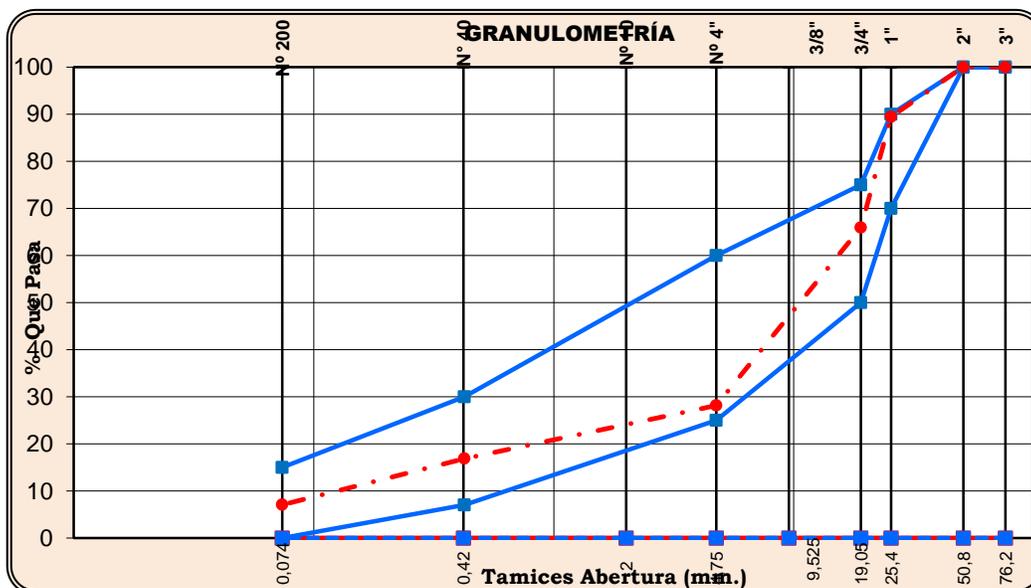
Para ver los demás cálculos de granulometría de la capa sub base de las vías de acceso de la nueva terminal ver en **(planilla en ANEXO II)**.

Tabla 3.3 Resultados de Granulometría de la capa base

MUESTRA N°	Av. Costanera del Sur	Av. Costanera la banda
	1	2
Tamiz N°	% Que pasa	% Que pasa
3"	100,0	100,0
2"	100,0	100,0
1"	89,4	97,5
3/4"	65,9	92,8
3/8"	34,0	68,4
4	28,2	54,9
10	23,2	43,6
40	16,9	29,5
200	7,1	8,3

Fuente: Elaboración Propia

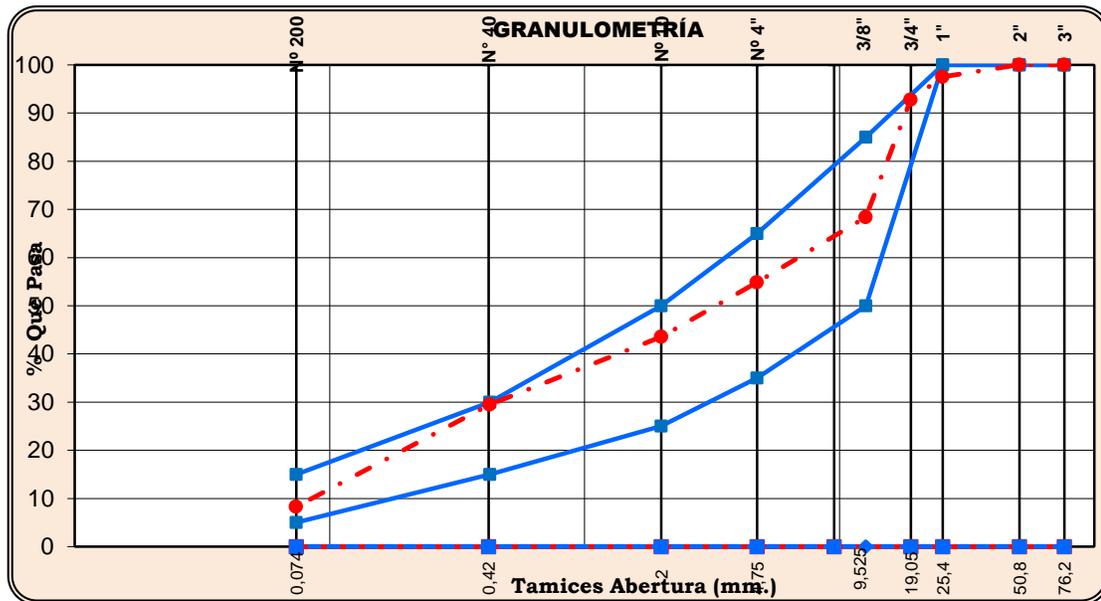
Gráfica 3.4 Granulometría de la Muestra N°1 (Av. Costanera del sur, capa base)



Fuente: Elaboración Propia

Para ver los demás cálculos de granulometría de la capa base de la avenida costanera del sur ver en (planilla en ANEXO II).

Gráfica 3.5 Granulometría de la Muestra N°2 (Av. Costanera la banda, capa base)



Fuente: Elaboración Propia

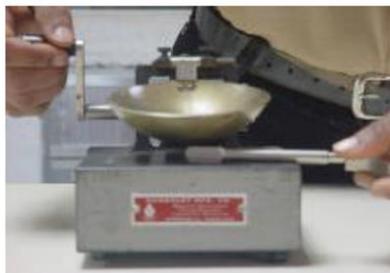
Para ver los demás cálculos de granulometría de la capa base de la avenida costanera la banda ver en (planilla en ANEXO II).

3.4.1.3. Determinación del Límite Líquido (ASTM D4318 AASHTO T89)

- Ajuste y Control del Aparato De Límite Líquido Casagrande

Girar la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adornado al ranurador), verificar que la distancia entre el punto de percusión y la base sea exactamente de 10 mm. Caso contrario se debe aflojar los tornillos de fijación y mover el de ajuste hasta obtener la altura de caída requerida.

Imagen 3.6: Calibración de Aparato Casagrande



Fuente: Elaboración Propia

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Cuadro 3.5. Procedimiento de ensayo limite líquido

<p>Material pasante por el tamiz N° 40</p> 	<p>Muestra antes de echarle agua</p> 
<p>Preparación de la muestra con agua</p> 	<p>Equipo de casa grande</p> 
<p>Colocado de la muestra en el casa grande</p> 	<p>Conteo de golpes</p> 



Fuente: Elaboración Propia

3.4.1.4. Determinación del Limite Plástico (ASTM D4318 AASHTO T89)

- a) Para determinar el límite plástico se debe extraer una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensayo de 200g de material bajo tamiz 0,425mm (N° 40).
- b) Agregar agua a la muestra en un plato y mezclar uniformemente hasta obtener una masa pastosa, la cual se pueda amasar hasta que no se pegue en la mano, con la mano encima de un vidrio proceder a realizar rollitos de aproximadamente 3 mm diámetro, al llegar a este diámetro aproximado el rollito debe empezar a fisurarse, entonces se debe cortar en la parte fisurada en trozos, y no puede ser re amasado ni reconstituido.

Cuadro 3.6. Procedimiento de ensayo limite plástico

<p>Muestra plástica</p> 	<p>Muestra plástica</p> 
<p>Pesado de muestra húmeda</p> 	<p>Elaboración de los rollitos</p> 

Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS:

$$IP = LL - LP$$

Dónde:

IP= Índice de Plasticidad (%)

LL= Limite Liquido (%)

LP= Limite Plástico (%)

RESULTADOS:

NOTA: Debido a que el material que se estaba trabajando es material granular no contiene finos, sino más bien está compuesto de arenas la cual no se puede elaborar

los rollitos y es por esta razón que no tiene límite plástico y por ende índice de plasticidad es cero.

Tabla 3.4 Resultados Correspondientes a la Plasticidad de suelos granulares

Muestra N°	Limite Líquido (%)	Limite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
1	13,8	N.P.	0
2	11,2	N.P.	0
3	14,5	N.P.	0
<i>Capa base</i>			
1	14,8	N.P.	0
2	14,1	N.P.	0

Fuente: Elaboración Propia

Para poder ver los cálculos de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad de las capas bases y sub bases de los tramos en estudio ver **(planilla en ANEXO II)**.

3.4.1.5. Clasificación del Suelo

En función a la granulometría por ambos métodos, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se determina la clasificación del suelo en base a dos normativas que son:

- Sistema de Clasificación AASTHO
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Tabla 3.5 Clasificación de los Suelos según AASTHO y SUCS

	N° MUESTRA	CLASIFICACION		DESCRIPCION
		ASSTHO	SUCS	
Capa sub base	1	A – 1a (0)	GP	Grava mal graduada con arena
	2	A – 1a (0)	GP	Grava mal graduada con arena
	3	A – 1a (0)	GW GM	Grava bien graduada con limo con arena
Capa base	1	A – 1a (0)	GP GM	Grava mal graduada con limo con arena

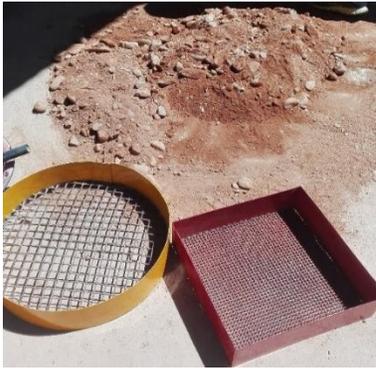
	2	A – 1a (0)	SP SM	Arena mal graduada con limo con grava
--	---	------------	-------	---------------------------------------

Fuente: Elaboración Propia

Para poder ver clasificación de los úselos granulares de las capas bases y sub bases de los tramos en estudio ver **(planilla en ANEXO II)**.

3.4.1.6. Ensayo de Compactación Método Modificado (Método “C” ASTM D422 AASHTO T180)

Cuadro 3.7. Procedimiento de ensayo de compactación

<p>Preparación de la muestra</p> 	<p>Cortado de la muestra en el tamiz Nº ¾</p> 
<p>Separación de mat. Grueso del fino</p> 	<p>Mezclado del material</p> 



Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS:

$$\gamma_h = \frac{m}{v}$$

Donde:

γ_h = Densidad húmeda del suelo compactada (Kg/m³)

m= peso de suelo húmedo (Kg)

v= Volumen del molde (m³)

Densidad Seca

La densidad seca del suelo compactado para cada determinación, de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando a 10 Kg/m³.

$$\gamma_{max} = \frac{10 * \gamma_h}{w + 100}$$

Dónde:

γ_{max} = Densidad seca del suelo compactado (kg/m³)

γ_h = Densidad húmeda del suelo compactada (kg/m³)

W=Humedad del suelo compactado (%)

RESULTADOS:

Tabla 3.6 Resultados de Compactación del Suelo Granular

	MUESTRA N°	PROCTOR T-180 MODIFICADO	
		Densidad máxima del suelo granular (kg/m ³)	Humedad Óptima (%)
Capa sub base	1	2248	6
	2	2293	5,1
	3	2257	5,6
Capa base	1	2246	5,5
	2	2209	6,7

Fuente: Elaboración Propia

Para poder ver los ensayos de proctor T-180 de las capas bases y sub bases de los tramos en estudio ver **(planilla en ANEXO II)**.

3.4.1.7. Determinación de la Relación de Soporte del Suelo en Laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- Con el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima compactada de acuerdo al ensayo de Proctor, se compacta 3 moldes o probetas en un rango de 95% de la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente.
- Se mezcla homogéneamente con agua cada una de las tres muestras de suelo por ensayar. Agregando la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima determinada en “Relación humedad-densidad”. Una vez logrado el mezclado homogéneo del suelo, se extrae una muestra de suelo

para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado del CBR.

- c) Para cada molde se coloca el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro grueso sobre el espaciador.
- d) Compactar cada una de las porciones de suelo húmedo en el molde, en un número de capas igual al de las probetas usadas en el ensayo de humedad - densidad. Cada probeta se debe compactar con distinta energía de 12, 25 y 56 golpes.

Cuadro 3.8. Procedimiento de ensayo de CBR



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.9. Compactación con diferentes energías



Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se compacto las muestras en los tres moldes de CBR, se procede a la inmersión al agua durante tres días y lecturas cada día.

Cuadro 3.10: Procedimiento de Inmersión

 <p>Vástago</p> <p>Nivelación con Extensómetro</p>	 <p>Inmersión de la muestra + Moldes</p>
 <p>Drenaje de probetas</p>	 <p>Peso de muestra saturada + molde</p>

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.11: Procedimiento de Rotura de CBR.

Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS:

Tabla 3.7 Resultados de CBR de los Suelos Granulares

	MUESTRA N°	Humedad Óptima (%)	C.B.R. (%)	Expansión (%)
Capa sub base	1	6	98,9	0,02
	2	5,1	84,6	0
	3	5,6	78,4	0,02
Capa base	1	5,5	99,0	0,05
	2	6,7	91,2	0,04

Fuente: Elaboración Propia

Para poder ver los demás cálculos de CBR. Ver en **(planilla en ANEXO II)**

3.4.1.8. Ensayo de Desgaste del Agregado grueso por medio de la máquina de los Ángeles (ASTM C131 AASHTO T96)

Cuadro 3.12. Pesos del agregado grueso y N° de esferas para el Desgaste de los Ángeles.

GRADACIÓN		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N° DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

Fuente: NORMA ASTM, C131.

Cuadro 3.13. Procedimiento de ensayo desgaste de los agregados



Material para ser tamizado en el N°12



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS:

$$\% \text{ desgaste} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{final}} \times 100$$

Tabla 3.8 Resultados de desgaste de los Suelos Granulares

	MUESTRA N°	Material	Peso inicial gr	Peso final en gr	% de desgaste	Especific. ASTM
Capa sub base	1	A	5000	3414	31,72	35% máx.
	2	A	5000	3855	22,9	35% máx.
	3	A	5000	3719	25,62	35% máx.
Capa base	1	A	5000	3851	22,98	35% máx.
	2	A	5000	3742	25,16	35% máx.

Fuente: Elaboración Propia

Para poder ver el cálculo de ensayos de desgaste de los ángeles de las capas bases y sub bases ver en la **(planilla en ANEXO II)**.

3.4.1.9.RESUMEN DE RESULTADOS

RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS GRANULARES

Esta tabla nos muestra los resultados de la caracterización de las capas granulares como granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, clasificación del suelo, proctos T-180, CBR.

Tabla 3.9 Resumen de la caracterización de los suelos granulares

<i>MUESTRA N°</i>	<i>Av. Costanera del sur</i>	<i>Av. Costanera la banda</i>	<i>Vías de acc. Nueva terminal</i>	<i>Av. Costanera del sur</i>	<i>Av. Costanera la banda</i>
	<i>Capa Sub base</i>			<i>Capa base</i>	
	1	2	3	1	2
Tamiz N°	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
3"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2"	90,6	91,8	91,0	100,0	100,0
1"	78,5	69,7	78,3	89,4	97,5
3/4"	66,3	63,4	69,9	65,9	92,8
3/8"	51,4	53,1	56,5	34,0	68,4
4	36,2	33,5	43,8	28,2	54,9
10	28,0	24,4	34,9	23,2	43,6
40	16,7	15,5	26,4	16,9	29,5
200	4,1	2,7	9,1	7,1	8,3
CONT. HUM. W (%)	2,44	2,65	1,9	2,48	2,95

Los cálculos ver en la (planilla en ANEXO II).

	Nº MUESTRA	Limite Líquido (%)	Limite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	CLASIFICACION		DESCRIPCION	PROCTOR T-180 MODIFICADO		C.B.R. (%)	Expansión (%)
		LL	LP	IP	ASSTHO	SUCS		Densidad máxima del suelo granular (kg/m3)	Humedad Óptima (%)		
Capa sub base	1	13,8	N.P.	0	A – 1a (0)	GP	Grava mal graduada con arena	2248	6	98,9	0,02
	2	11,2	N.P.	0	A – 1a (0)	GP	Grava mal graduada con arena	2293	5,1	100,2	0
	3	14,5	N.P.	0	A – 1a (0)	GW GM	Grava bien graduada con limo con arena	2257	5,6	90,1	0,02
Capa base	1	14,8	N.P.	0	A – 1a (0)	GP GM	Grava mal graduada con limo con arena	2246	5,5	106,6	0,05
	2	14,1	N.P.	0	A – 1a (0)	SP SM	Arena mal graduada con limo con grava	2209	6,7	91,2	0,04

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, proctor y CBR ver en (planilla en ANEXO II)

3.4.2. AGUA A UTILIZAR.

El agua requerida para todos los ensayos debe ser limpia, libre de impurezas, de sales aceites o cualquier residuo químico.

3.5. ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS EN LOS MOLDES DE CBR

Para la elaboración de las muestras en los moldes de CBR se procedió a utilizar el mismo material con el que fue utilizado en las capas granulares de cada tramo, como también el mismo material de la caracterización, con el cual se compacto la muestra en el molde de CBR, cortando en 5 capas a 56 golpes para su máxima compactación, y una vez compactado se procedió a desmoldar la muestra con un extractor de laboratorio con mucho cuidado evitando fisuras, se realizan 5 muestras por cada capa de pavimento.

Se hace el mismo procedimiento como se realizó las muestras en el CBR de la clasificación hasta antes de introducir al agua, sino más bien proceder a desmoldar las muestras.

El siguiente cuadro en base a imágenes muestra el procedimiento del ensayo para elaborar las muestras en los molde de CBR.

Cuadro 3.14: Procedimiento de realización de muestras en los moldes de CBR.





Fuente: Elaboración propia

3.6. INVESTIGACIÓN DE TOMOGRAFÍAS POR RAYOS-X A LAS CAPAS GRANULARES DEL PAVIMENTO.

Una vez ya obtenidas las muestras de las capas granulares de cada uno de los pavimentos seleccionados, estos se los llevara al equipo de tomografía General Electric CTE Dual para obtener las imágenes digitalizadas por rayos-x.

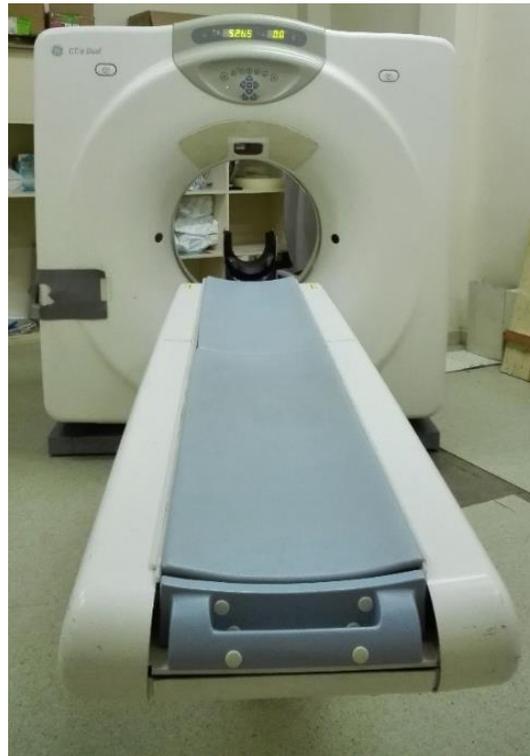
El tomógrafo por defecto nos proporciona imágenes en programa Weasis v2.0.4 formato (Efilm Lite) para el análisis de vacíos y contacto agregado-agregado.

Imagen 3.7: muestras para llevar al tomógrafo.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.8: Tomógrafo electric CT/e Dual



Fuente: elaboración propia

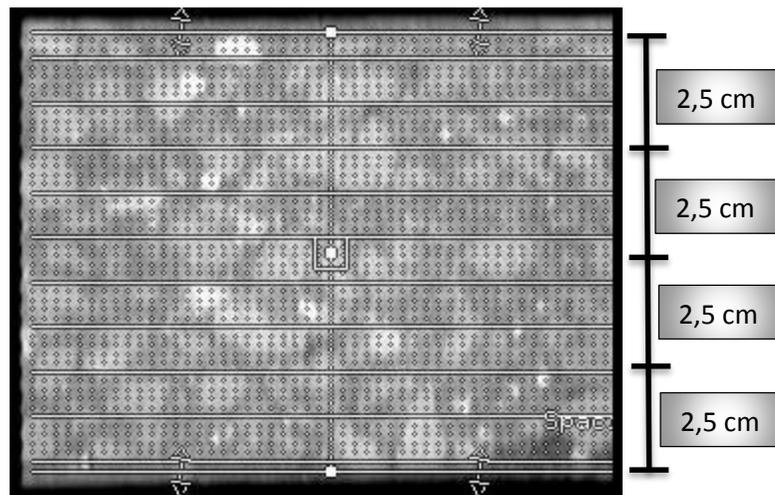
3.6.1. IMÁGENES DIGITALIZADAS AL INTERIOR DE CADA UNA DE LAS CAPAS GRANULARES DE LOS PAVIMENTOS.

El análisis por tomografía está basado en la aplicación de rayos – x a las muestras compactadas, a partir de la cual se extraerán imágenes multiplanares (axiales, sagitales, coronales).

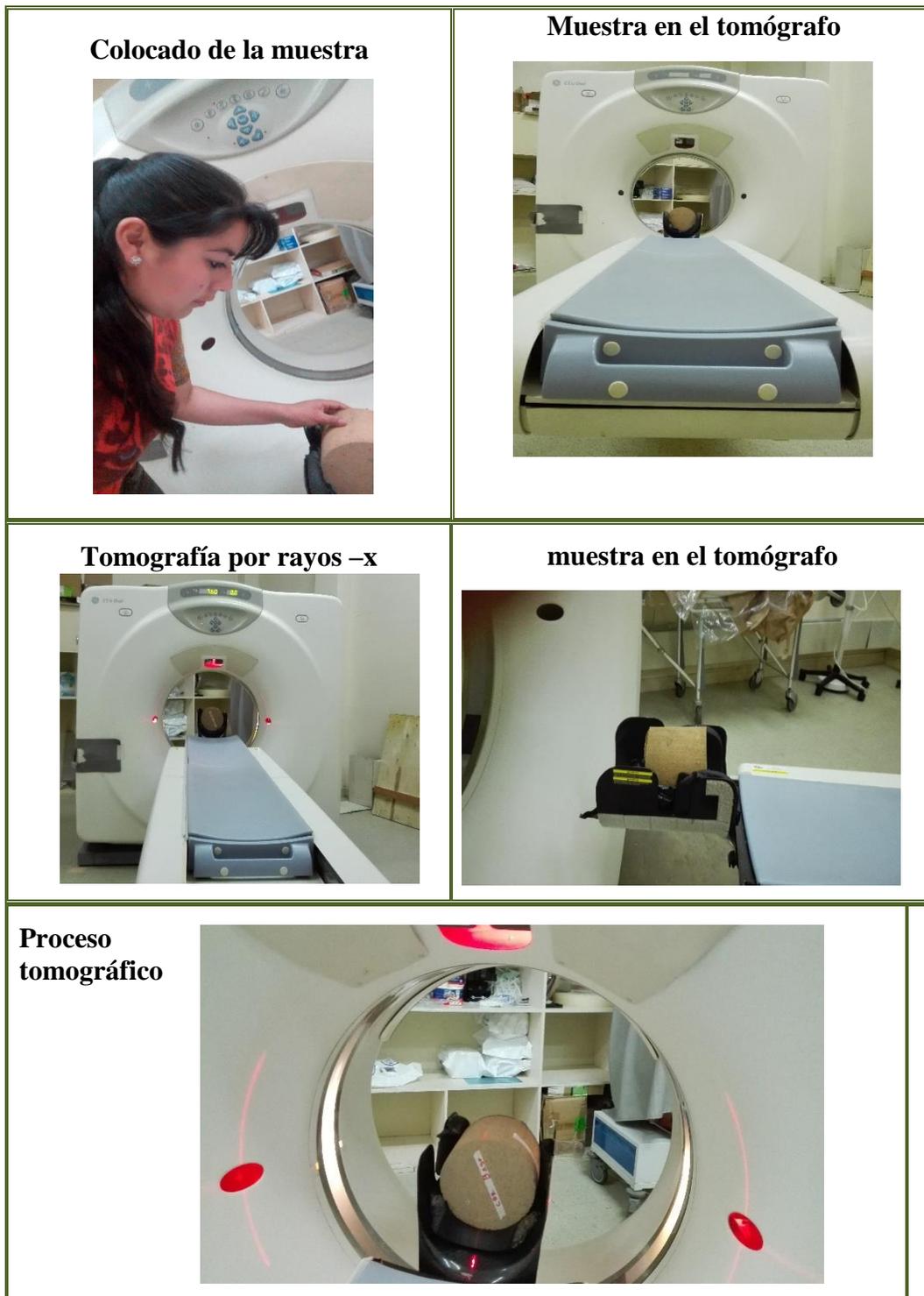
Entendiéndose como imagen multiplanar a la capacidad de realizar obtener imágenes en varios planos.

Por tratarse de muestras realizadas en los moldes de CBR con agregados cuyo tamaño máximo de agregado es de $\frac{3}{4}$ " (19.05 mm) se toma la decisión de adquirir:

- ❖ Las muestras compactadas en laboratorio de 11 cm de altura y 6" (152,4 mm) de diámetro interno, se realizara la extracción de 4 imágenes con un corte transversal de cada 2,5 cm por cada muestra analizada para realizar una validación de datos.
- ❖ Este procedimiento se realiza para las muestras tanto de capa sub base como también de capa base de los pavimentos seleccionados para el estudio.



Fuente: Elaboración propia

Cuadro: 3.15. Proceso tomógrafo

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas las imágenes tomográficas, a través del programa Weasis v2.0.4 desde la computadora y analizar las imágenes para determinar las características de los agregados a partir del análisis de imágenes digitalizadas multiplanares.

Este programa nos muestra imágenes a blanco y negro pero también se puede cambiar a escala de grises para poder observar a detalle las imágenes, también cuenta con una barra de herramientas donde nos ayuda a analizar con mayor facilidad como se observa en las siguientes imágenes.

Los tramos que presentas capa sub base son la Av. Costanera del sur, Av. Costanera la banda y las vías de acceso de entrada y salida de la nueva terminal.

Imagen 3.9. Estructura interna de la muestra de capa sub base a partir del programa Weasis v.2.0.4 (tomografía)



Fuente: Elaboración propia

En esta imagen tomográfica de capa sub base como se observa, el corte que se realiza es transversalmente el cual se sacó cuatro imágenes por muestra, se puede observar los agregados de color más claro y también el contenido de vacíos de color más oscuro o negro, y a través de una barra de herramientas podemos obtener imágenes a escala de grises, y de esta manera es como se analiza imagen por imagen de cada muestra haciendo el mismo procedimiento. **(VER EN ANEXO III).**

A. AVENIDA COSTANERA DEL SUR

- **Pavimento flexible: (capa sub base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur.

Imagen 3.10: Corte transversal de la muestra, capa sub base cada 2,5 cm

(Muestra N°1)

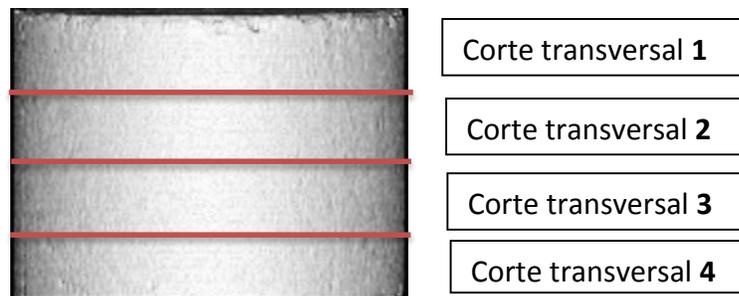


Figura 1. Corte transversal 1

Figura 2. Corte transversal 2

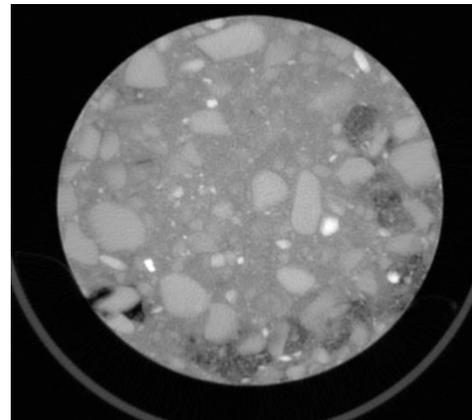
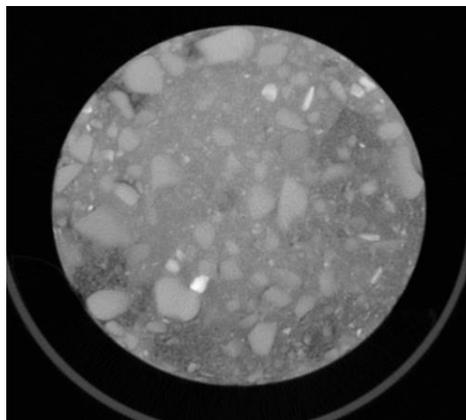
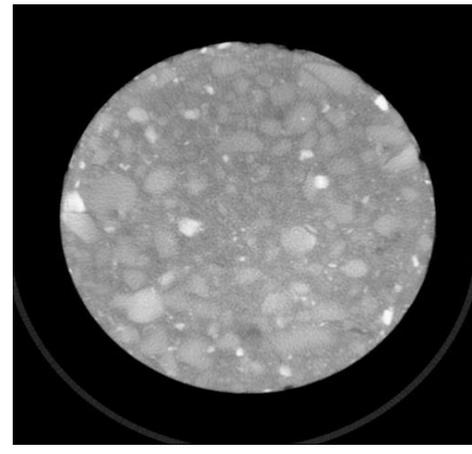
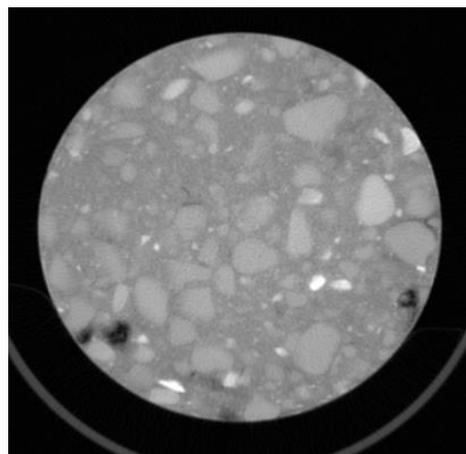


Figura 3. Corte transversal 3

Figura 4. Corte transversal 4



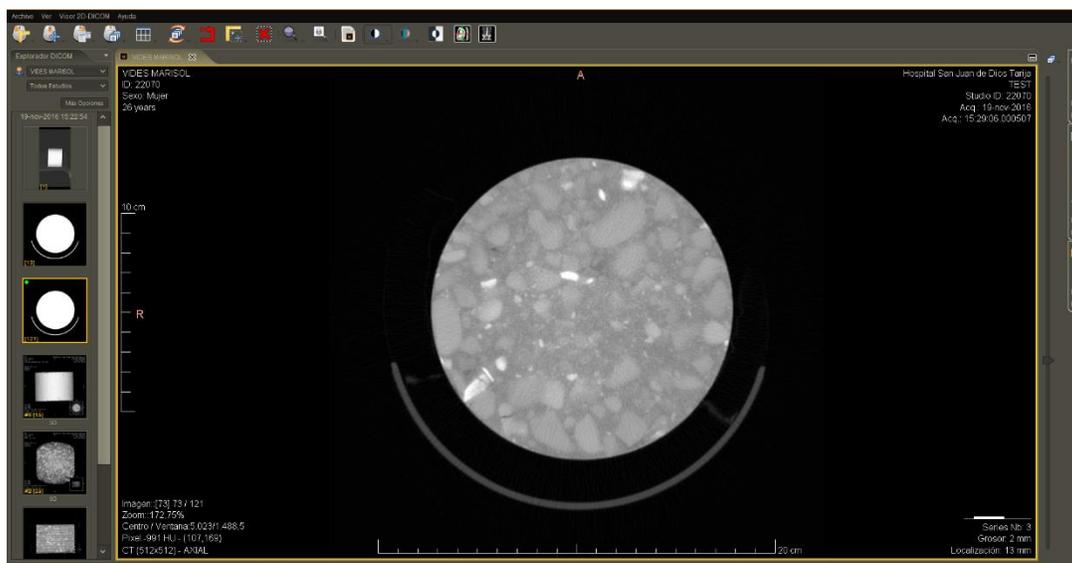
Fuente: Elaboración propia

Para una capa granular de base se hace lo mismo que en una capa sub base como se muestra la imagen, ya que es el mismo programa, el mismo tomógrafo, para esta capa también se obtendrán cuatro imágenes de cada muestra ya que los tramos que tienen base son la Av. Costanera del sur y la Av. Costanera la banda.

En esta capa también se analizará el contacto agregado-agregado y el porcentaje de vacíos existente en cada muestra realizada en el laboratorio en condiciones ideales.

Como se puede observar la tomografía nos muestra al interior del pavimento en blanco y negro pero a través de una herramienta también se puede poner a escala de grises para poder apreciar la imagen de diferente manera o más clara.

Imagen 3.11. Estructura interna de la muestra de capa base a partir del programa Weasis v2.0.4 (tomografía)



Fuente: elaboración propia

Después de obtener todas las imágenes de cada una de las muestras, éstas serán analizadas una a una en el programa Weasis v2.0.4. Para poder ver las imágenes ver en el **(VER ANEXO III)**.

- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur

Imagen 3.12: Corte transversal de la muestra de la capa base, cada 2,5 cm

(muestra N°1)

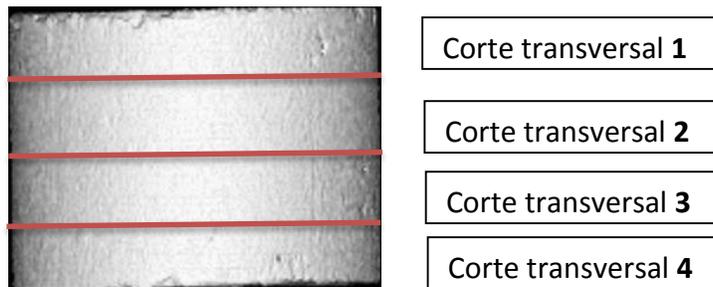


Figura 1. Corte transversal 1

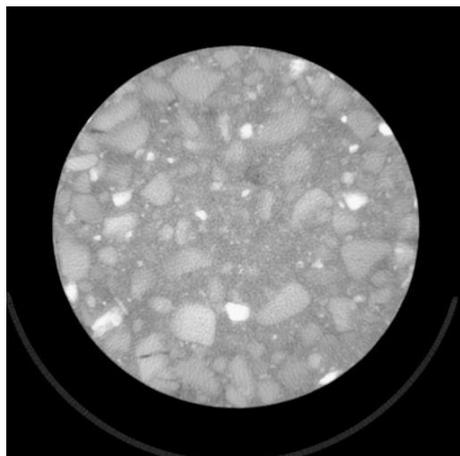


Figura 2. Corte transversal 2

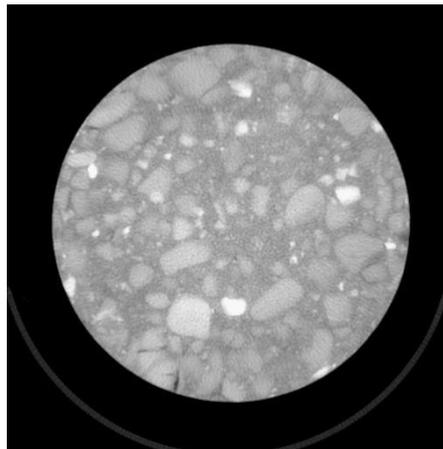


Figura 3. Corte transversal 3

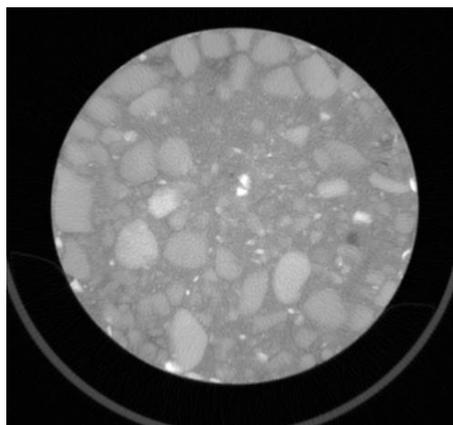
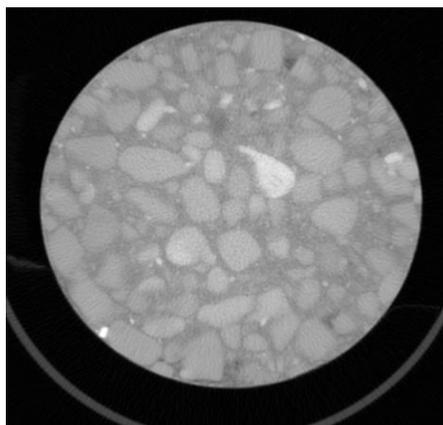


Figura 4. Corte transversal 4



Fuente: Elaboración propia

Para ver las imágenes de cada muestra ver en el (ANEXO III).

3.6.2. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DIGITALIZADAS DE LOS AGREGADOS.

3.6.2.1. ANÁLISIS DE CONTACTO AGREGADO – AGREGADO

Para el análisis al interior de la imágenes primeramente lo que sacamos son la áreas de cada una de las imágenes ya que tiene que ser la misma de cada muestra, pero pudiendo variar de una muestra a otra, en el programa Weasis v2.0.4.

En base a la dimensión de la muestra analizada, el programa nos permite determinar que para el área real de la muestra es de 18075,4 mm² se determina un total de 144256,98 pixeles.

$$18075,4 \text{ mm}^2 / 0,1253 \text{ mm}^2 = 144256,98 \text{ pixeles.}$$

Por lo que el área de un pixel es de 0,1253 mm² y en un contenido de 7,9808 pixeles/mm².

$$144256,98 \text{ pixeles} / 18075,4 \text{ mm}^2 = 7,9808 \text{ pixeles/mm}^2$$

Para sacar el área de la imagen a analizar se procede a seleccionar con una herramienta de circulo de tres puntos del programa Weasis v2.0.4.

Imagen 3.13: Medición del valor de área



Fuente: Elaboración propia

A. AVENIDA COSTANERA DEL SUR

- **Pavimento flexible: (capa sub base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur.

Imagen 3.14: área de las imágenes de la muestra, Av. Costanera del sur, capa sub base (Muestra N°1)

Figura 1. Corte transversal 1

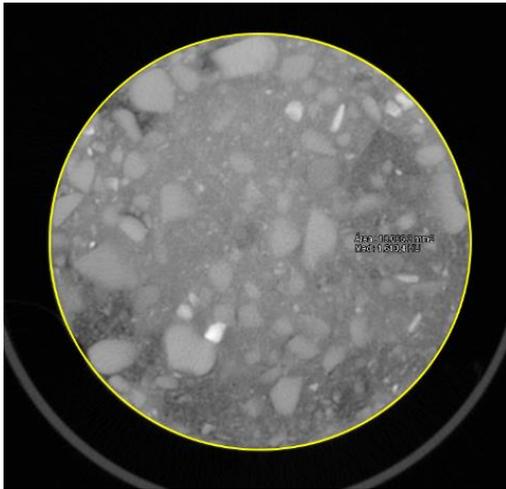


Figura 2. Corte transversal 2

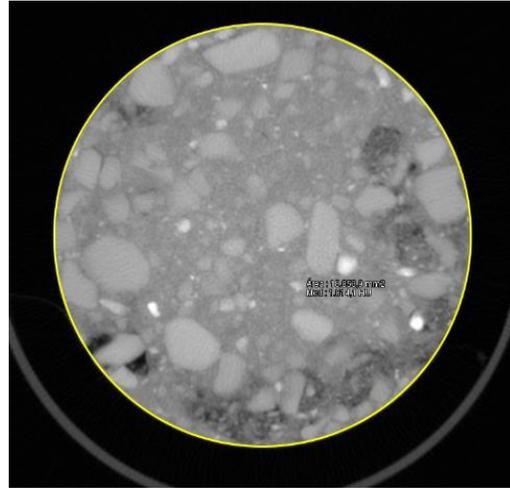


Figura 3. Corte transversal 3

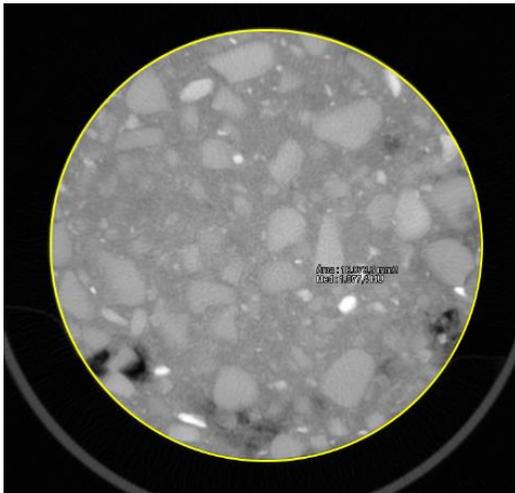
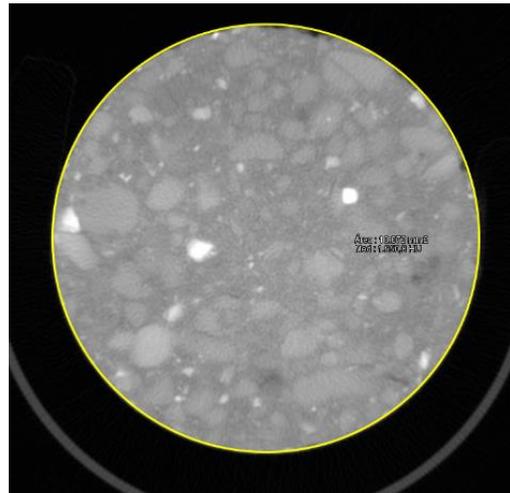


Figura 4. Corte transversal 4



Fuente: Elaboración propia

El are que se saca de las imágenes debe ser la misma en las cuatro imágenes de una muestra, pero esta puede variar un poco de una muestra a otra esto debido a que el programa es muy frágil y sensible como ya mencionamos anteriormente que este programa funciona como AUTO CAD.

- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur.

Imagen 3.15: área de las imágenes de la muestra, Av. Costanera del sur,
Capa base (Muestra N°1)

Figura 1. Corte transversal 1

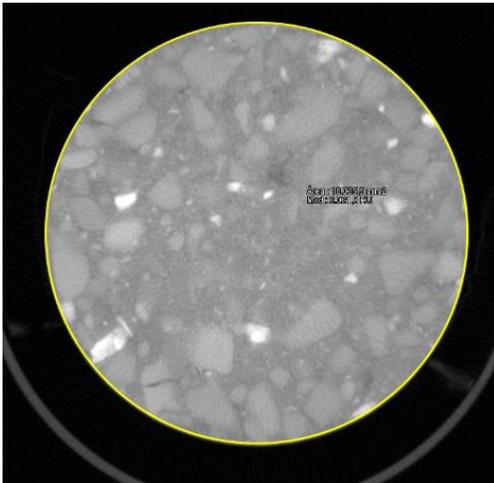


Figura 2. Corte transversal 2

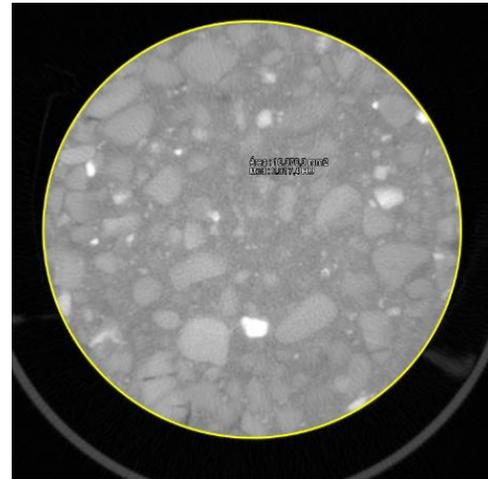


Figura 3. Corte transversal 3

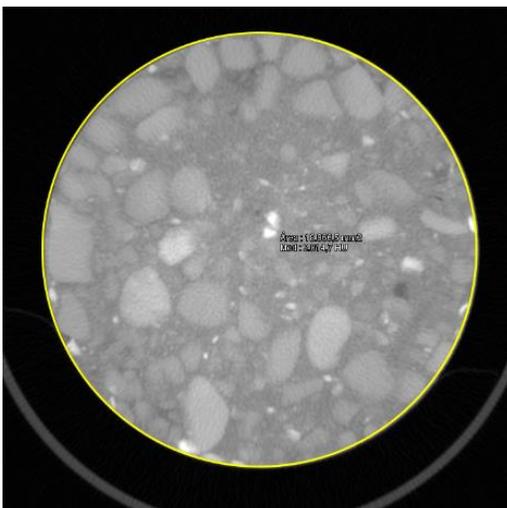
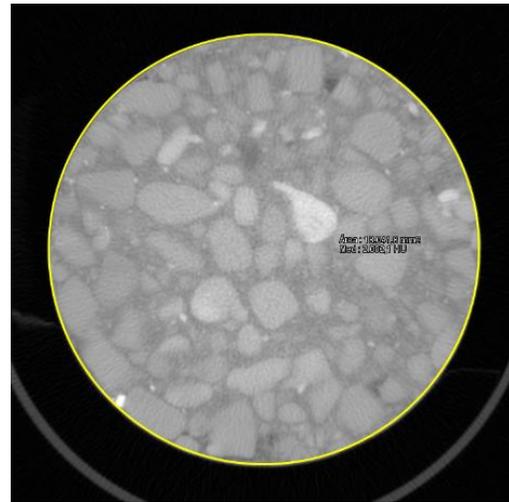


Figura 4. Corte transversal 4



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis contacto agregado – agregado de cada muestra se obtiene 4 imágenes de corte transversal cada 2,5 cm, las cuales hay que obtener el área en mm², número de píxeles, número de puntos agregado - agregado. Se hace el mismo procedimiento tanto para pavimento flexible como para pavimento rígido, y de capa base y sub base de los mismos.

Se cuantifico el número de contactos entre agregados a partir de imágenes multiplanares, en escala de grises tomando en cuenta las partículas mayores a 4,75 mm (agregado-grueso); esta cuantificación nos permite determinar un indicador de las condiciones en las que se encuentran la estructura formada por los agregados.

Este análisis se realiza a partir de las imágenes transversales de las tomografías por rayos-x obtenidas de las muestras cilíndricas de 152,4 mm (6") de diámetro interno y aproximadamente de altura interna del molde sin tomar en cuenta el collarín ni la base es de 11 cm, y 177,8 mm (7") de altura de cada molde para obtener la muestra.

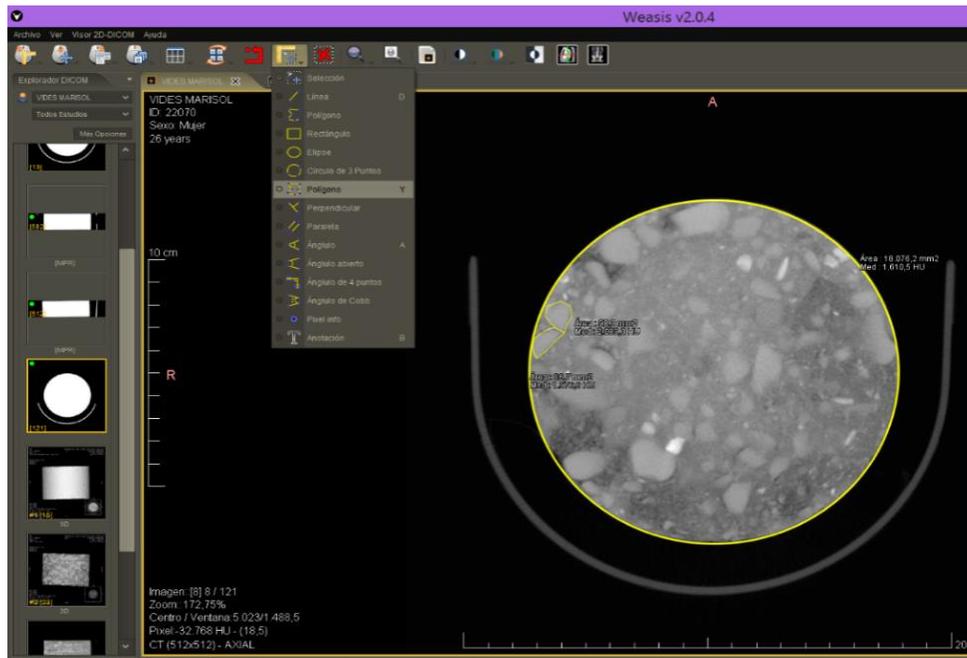
El análisis de esta variable es por conteo visual de los puntos de contacto agregado – agregado presente en cada imagen multiplanar.

Para el ensayo se procede a dar una pigmentación ya sea de color gris o de color rojo como mejor se la puedan visualizar las partículas que componen el agregado grueso, identificado al material cuyas partículas son retenidas en la malla N° 4 (4,75 mm), por lo que es necesario poder visualizar los agregados gruesos en las imágenes para ello se realiza la pigmentación a cada imagen, que no es más que aplicar una capa filtro a la imagen con el programa Weasis v2.0.4. Permitiendo la visualización de los agregados-gruesos, lo que facilita el conteo de puntos de contacto agregado – agregado los cuales se encuentran en escala de grises.

Una vez aplicado la pigmentación se procede al conteo de puntos de contacto en el esqueleto formado por los agregados gruesos.

El procedimiento se realiza lo mismo tanto la capa sub base como también para la capa base en ambos pavimentos.

Imagen. 3.16. Cálculo del número de píxeles con el programa



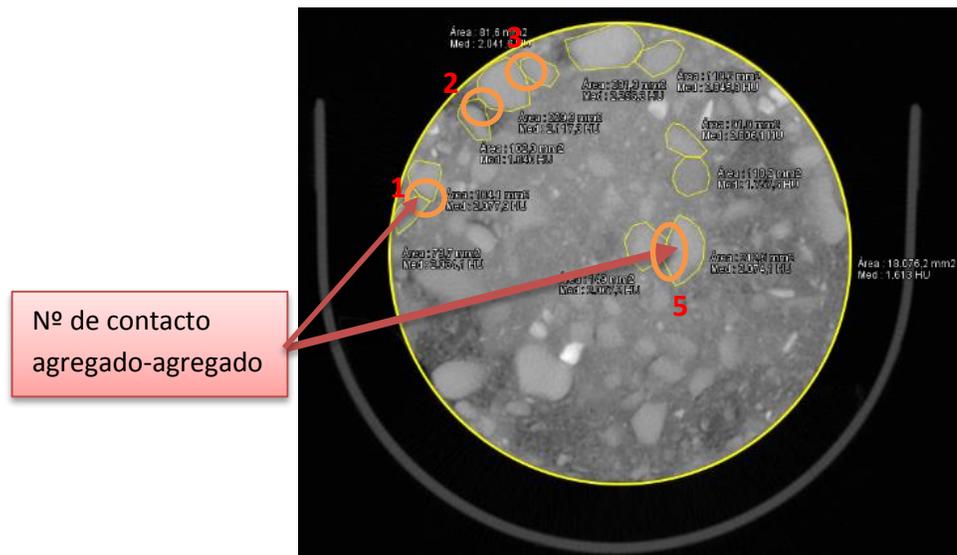
Fuente: Elaboración propia

El programa funciona como programa de AUTO CAD, el cual presenta una barra de herramientas y con eso se puede seleccionar la imagen para obtener el área, y posteriormente con el área obtenida lo que hacemos es dividir esa área de la muestra entre el área de un píxel que es igual a 0,1253 mm², se realiza el mismo procedimiento para todos los moldes de cada capa granular en estudio.

$$18221,5 \text{ mm}^2 / 0,1253 \text{ mm}^2 = 145422,98 \text{ píxeles.}$$

Una vez ya obtenida el área de cada imagen de la muestra, como también el número de píxeles lo que se hace es proceder al conteo de los agregados que están en contacto entre ellos como lo muestra la imagen, para poder conocer el número de contactos entre agregado – agregado de las imágenes existentes en una muestra.

Imagen. 3.17. Marcación del número de contacto entre agregados

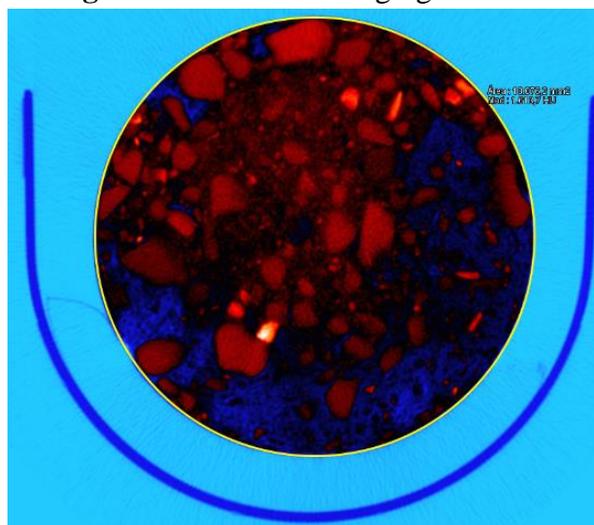


Fuente: Elaboración propia

En esta figura se observa el contacto entre agregados a través del programa Weasis v2.0.4.

Cambiando la pigmentación se puede observar de mejor manera al interior de la imagen siguiente. Y así poder analizar cómo está constituida internamente la misma a través de la escala de grises.

Imagen 3.18: Muestra de agregados en otro color



Fuente: Elaboración propia

A. AVENIDA COSTANERA DEL SUR

- **Pavimento flexible: (capa sub base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur.

Imagen. 3.19. Marcación del número de contacto entre agregados, Av. Costanera del sur, capa sub base (Muestra N°1)

Figura 1. Corte transversal 1

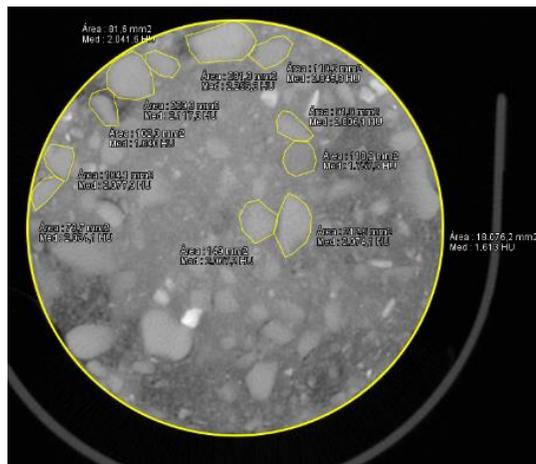


Figura 2. Corte transversal 2

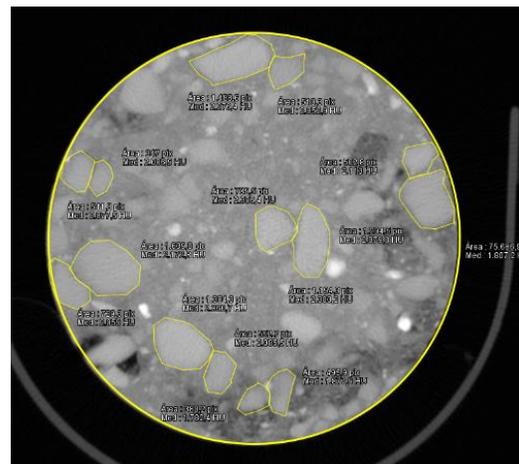


Figura 3. Corte transversal 3

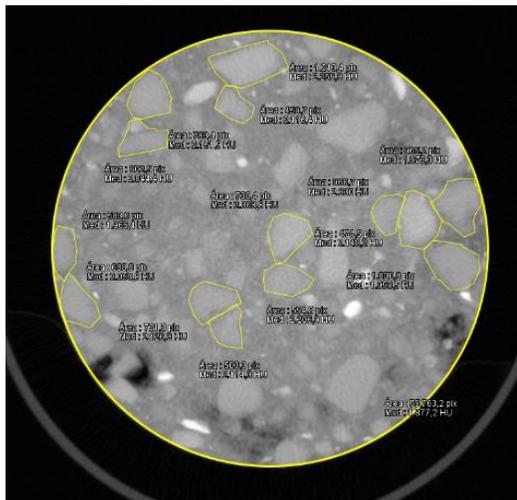
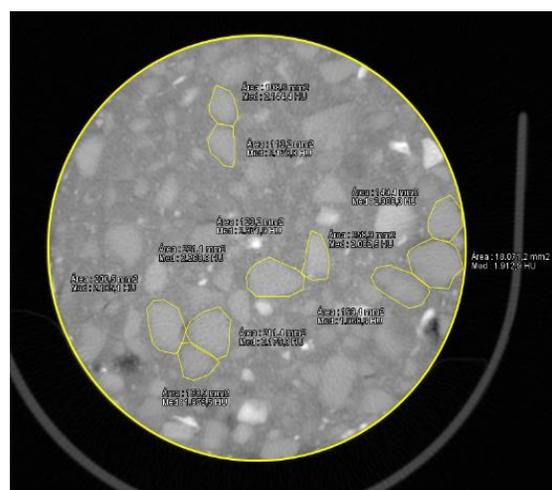


Figura 4. Corte transversal 4



Fuente: Elaboración propia

Es de esta manera como se procede al conteo del contacto agregado entre agregado de forma manual y visual, se hace el mismo procedimiento con las otras imágenes de los otros moldes tanto de capa sub base como también de capa base.

A. AVENIDA COSTANERA DEL SUR

- **Pavimento flexible: (capa sub base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur.
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.10. Número de puntos de contacto agregado-agregado (Muestra N° 1)

N° DE CORTE TRANSVERSAL	N° DE PÍXELES	AREA (mm ²)	N° DE PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO - AGREGADO
1	145422,98	18221,5	6
2	145422,98	18221,5	7
3	145422,98	18221,5	8
4	145422,98	18221,5	7
Valor medio de puntos de contacto			7

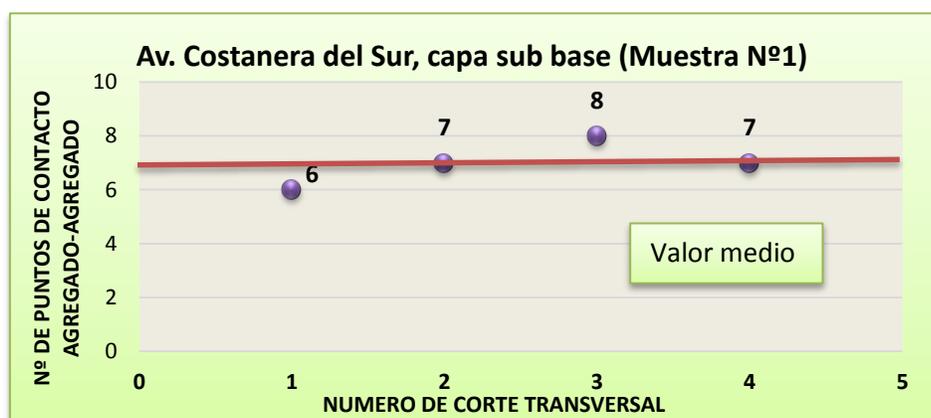
Fuente: Elaboración propia

En esta tabla lo que nos muestra es el número de píxeles seleccionados de los agregados que están en contacto entre sí, como también se mide el área de la imagen que es casi la misma con el área real con una pequeña variación debido a la sensibilidad del programa y el conteo de cada agregado que está en contacto con otro, que tiene cada imagen.

En esta grafica se muestra los valores de contacto agregado-agregado de cada imagen de la tomografía de una muestra, como también se marca el valor medio calculado en la planilla anterior. Se realiza el mismo procedimiento para las demás muestras.

Lo que se observa en esta grafica es que cada imagen tiene un diferente valor de contacto agregado – agregado para ello se procede a sacar el valor medio que es 7, valor que será de toda la muestra.

GRÁFICA 3.6. Valor Medio Contacto Agregado, Av. Costanera del sur, capa sub base (Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

Una vez que se obtuvo el contacto de agregado-agregado de cada una de las muestras, lo que se muestra en la siguiente tabla es el resumen de los resultados es el valor medio de contacto agregado – agregado de las cinco muestras de la avenida costanera del sur de la capa sub base, se hace el mismo procedimiento para cada capa granular de pavimento y para los demás tramos.

TABLA 3.11. Resultados de las cinco muestras de contacto agregado (Avenida costanera del sur), capa sub base

Nº DE MUESTRA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	145422,985	18221,5	7
2	143131,684	17934,4	8
3	143266,56	17951,3	9
4	145142,857	18186,4	9,75
5	143902,634	18031	9

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICA.3.7.Resultados de las cinco muestras de contacto agregado-agregado, Av. Costanera del sur, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

En esta grafica muestra el resumen de la tabla anterior de resultados medios de contacto agregado – agregado de cada capa granular de las cinco muestras realizadas, se hace el mismo procedimiento para los demás tramos con sus respectivas muestras.

Se puede observar que en esta grafica de resultados promedios de contacto agregado – agregado de las 5 muestras de la capa sub base de la avenida costanera del sur, tienen distintos valores en cada muestra, el valor mínimo es 7 en la muestra número 1 y el valor máximo 9,75 en la muestra número 4, esto significa que existe una pequeña variación de resultados ya que es la misma muestra pero esto pudiendo ser debido a que no existe un buen mezclado al momento de realizar la compactación de la muestra en el molde de CBR, la energía de compactación, o la granulometría. (**VER ANEXO IV**).

- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur.
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Imagen. 3.20. Marcación del número de contacto entre agregados, Av. Costanera del sur, capa base (Muestra N°1)

Figura 1. Corte transversal 1

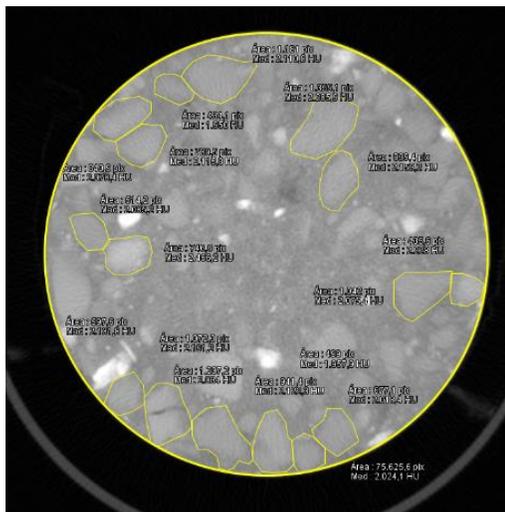


Figura 2. Corte transversal 2

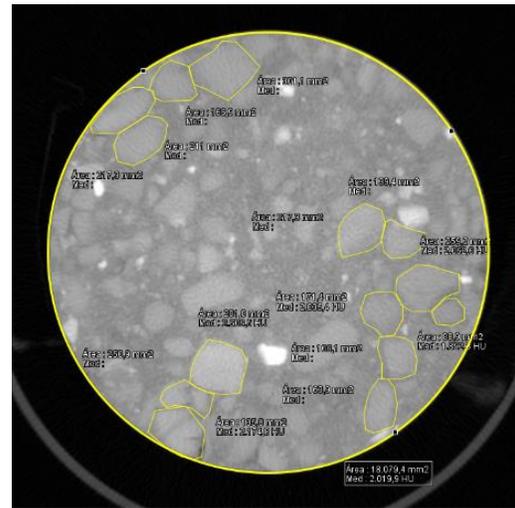


Figura 3. Corte transversal 3

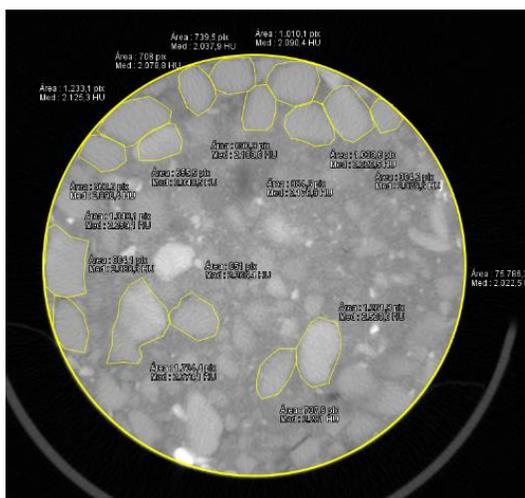
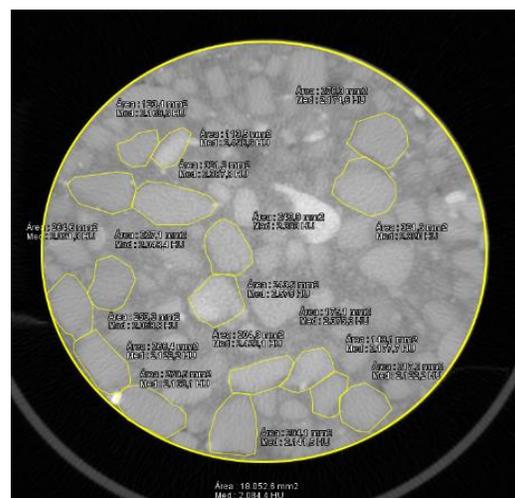


Figura 4. Corte transversal 4



Fuente: Elaboración propia

De la misma manera como se explicó anteriormente para la capa sub base, de estas imágenes se obtiene el área y con eso el número de pixeles para posteriormente poder realizar un conteo del contacto agregado – agregado de las imágenes de esta muestra de capa base de la avenida costanera del sur.

- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur.
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

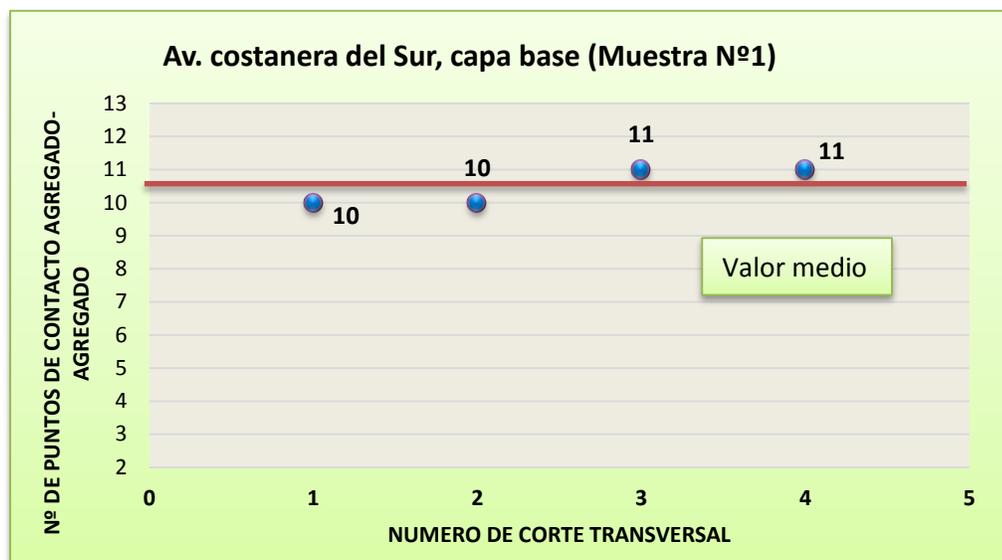
Tabla 3.12. Número de puntos de contacto agregado-agregado (Muestra N°1)

N° DE CORTE TRANSVERSAL	N° DE PIXELES	AREA (mm²)	N° DE PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO - AGREGADO
1	144101,36	18055,9	10
2	144101,36	18055,9	10
3	144101,36	18055,9	11
4	144101,36	18055,9	11
Valor medio de puntos de contacto			10,5

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se anota los valores que sacamos de las imágenes de una muestra de capa base y el procedimiento a seguir es el mismo que el que explicamos en la capa sub base, también se calcula el valor medio del contacto agregado – agregado de una muestra.

GRAFICA 3.8. Valor Medio Contacto Agregado, Av. Costanera del sur, capa base
(Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica representa los valores de la tabla anterior, mostrándonos gráficamente el valor de contacto agregado – agregado de cada muestra analizado.

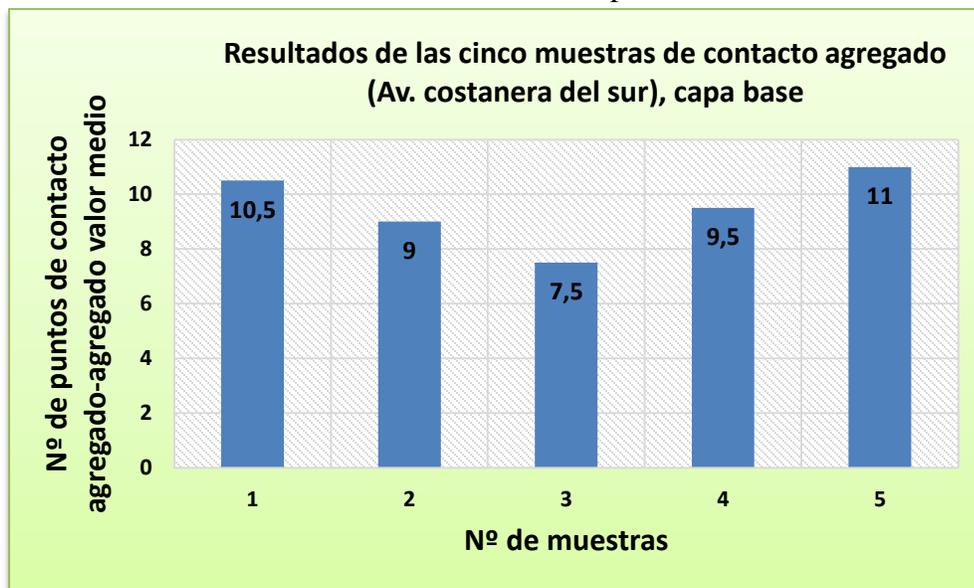
TABLA 3.13. Resultados de las cinco muestras de contacto agregado (Avenida costanera del sur), capa base

Nº DE MUESTRA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	144101,36	18055,9	10,5
2	144535,51	18110,3	9
3	144195,53	18067,7	7,5
4	144581,01	18116	9,5
5	144003,19	18043,6	11

Fuente: Elaboración propia

La tabla nos muestra el promedio de contacto agregado – agregado de cada muestra de la capa base, y posteriormente estos valores graficado como se observa en la siguiente gráfica.

GRÁFICA.3.9. Resultados de las cinco muestras de contacto agregado-agregado, Av. Costanera del sur, capa base



Fuente: Elaboración propia

En esta grafica se puede observar que también varía los resultados de contacto agregado – agregado, teniendo un valor mínimo de 7,5 en la muestra número tres y un máximo de 11 en la muestra número cinco, y aunque para estas muestras se utilizó el mismo material, existen muchos factores que pudieron hacer esta variación pequeña pero que está dentro de lo normal según norma, tratándose de una capa granular base.

El mismo procedimiento se realiza en las demás capas granulares de los pavimento seleccionados. (VER ANEXO IV)

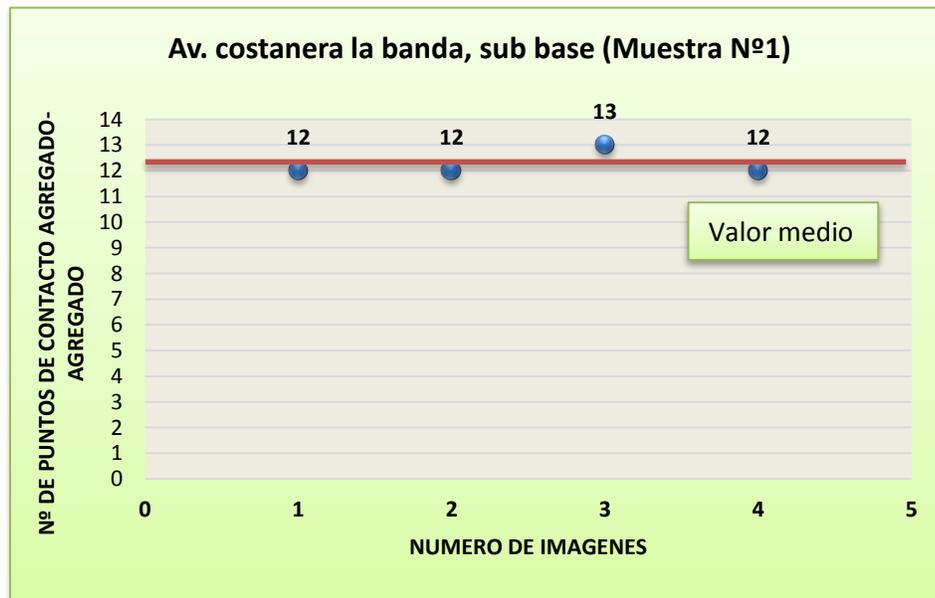
B. AVENIDA COSTANERA LA BANDA

- **Pavimento flexible:** (capa sub base)
- **Material:** de la Avenida costanera la banda.
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.14. Número de puntos de contacto agregado-agregado (Muestra N°1)

Nº DE CORTE TRANSVERSAL	Nº DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	Nº DE PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO - AGREGADO
1	144932,16	18160	12
2	144932,16	18160	12
3	144932,16	18160	13
4	144932,16	18160	12
Valor medio de puntos de contacto			12,25

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA 3.10. Valor Medio Contacto Agregado, Av. Costanera la banda, capa sub base (Muestra N°1)

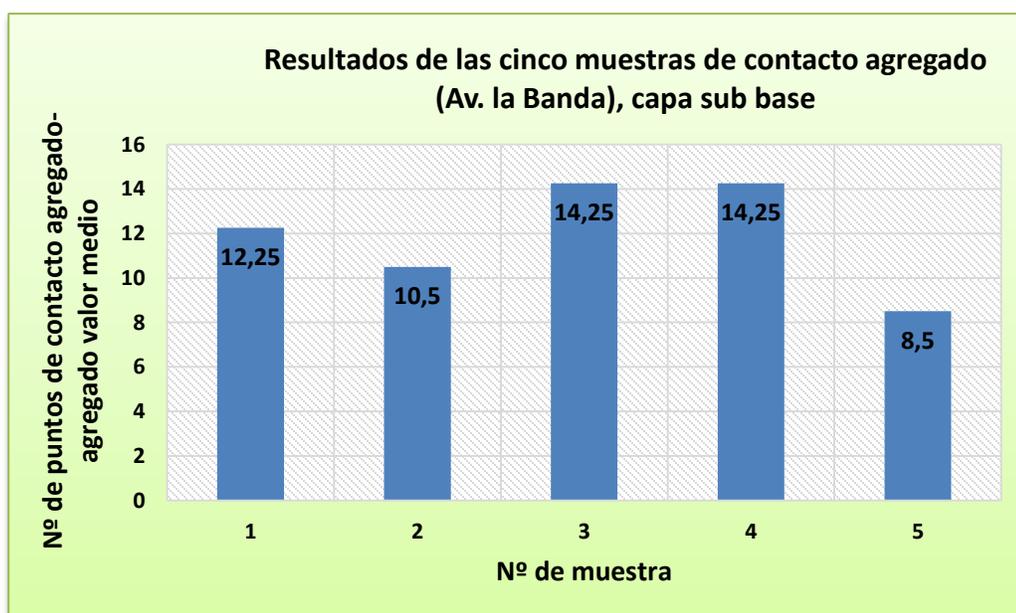
Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.15.Resultados de las cinco muestras de contacto agregado (Avenida costanera la banda), sub base

Nº DE MUESTRA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	144932,16	18160	12,25
2	143851,56	18024,6	10,5
3	144973,66	18165,2	14,25
4	144706,30	18131,7	14,25
5	144754,19	18137,7	8,5

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICA.3.11. Resultados de las cinco muestras de contacto agregado-agregado, Av. Costanera la banda, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

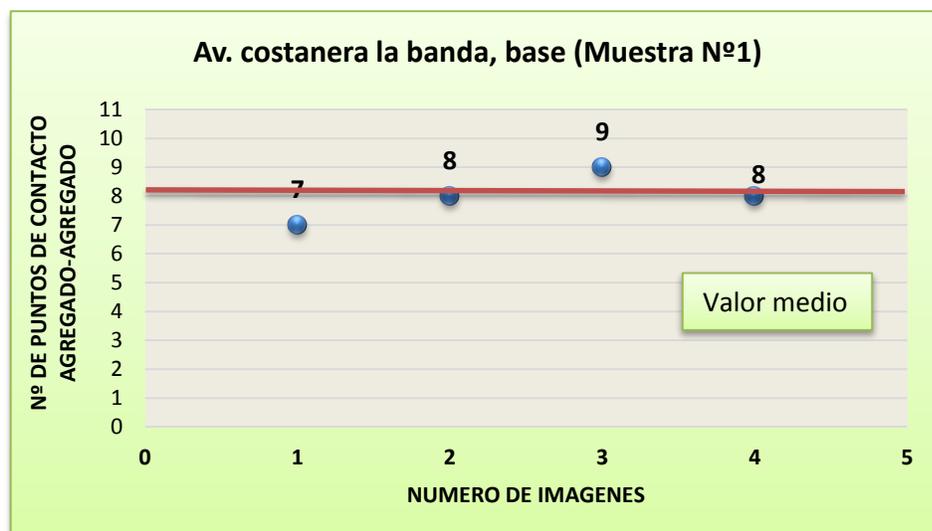
- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera la banda.
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.16. Número de puntos de contacto agregado-agregado (Muestra N°1)

Nº DE CORTE TRANSVERSAL	Nº DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	Nº DE PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO - AGREGADO
1	145009,58	18169,7	7
2	145009,58	18169,7	8
3	145009,58	18169,7	9
4	145009,58	18169,7	8
Valor medio de puntos de contacto			8

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA 3.12. Valor Medio Contacto Agregado, Av. Costanera la banda, Capa base (Muestra N°1)



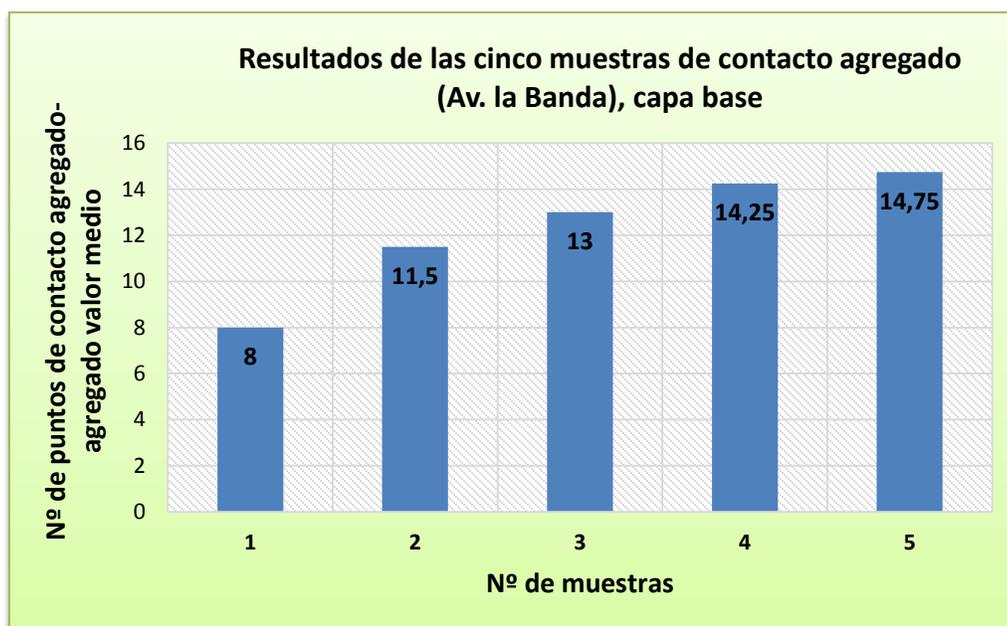
Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.17.Resultados de las cinco muestras de contacto agregado (Avenida costanera la banda) capa base

Nº DE MUESTRA	Nº DE PIXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	145009,58	18169,7	8
2	144576,22	18115,4	11,5
3	144699,12	18130,8	13
4	144723,86	18133,9	14,25
5	144794,09	18142,7	14,75

Fuente: Elaboración propia

Gráfica.3.13. Resultados de las cinco muestras de contacto agregado-agregado, Av. Costanera la banda, capa base



Fuente: Elaboración propia

C. VÍAS DE ACCESO A LA NUEVA TERMINAL DE BUSES

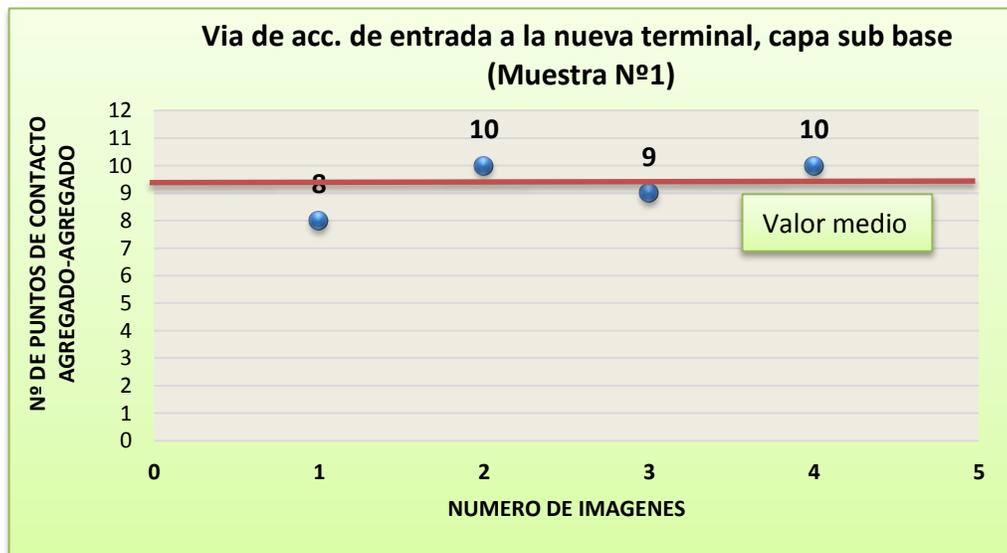
- **Pavimento Rígido: (capa sub base)**
- **Material:** de la vía de acceso de entrada a la nueva terminal
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.18. Número de puntos de contacto agregado-agregado (Muestra N°1)

N° DE CORTE TRANSVERSAL	N° DE PÍXELES	AREA (mm ²)	N° DE PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO - AGREGADO
1	144968,87	18164,6	8
2	144968,87	18164,6	10
3	144968,87	18164,6	9
4	144968,87	18164,6	10
Valor medio de puntos de contacto			9,25

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICA 3.14. Valor Medio Contacto Agregado, vías de acceso de entrada a la nueva terminal, capa sub base (Muestra N°1)



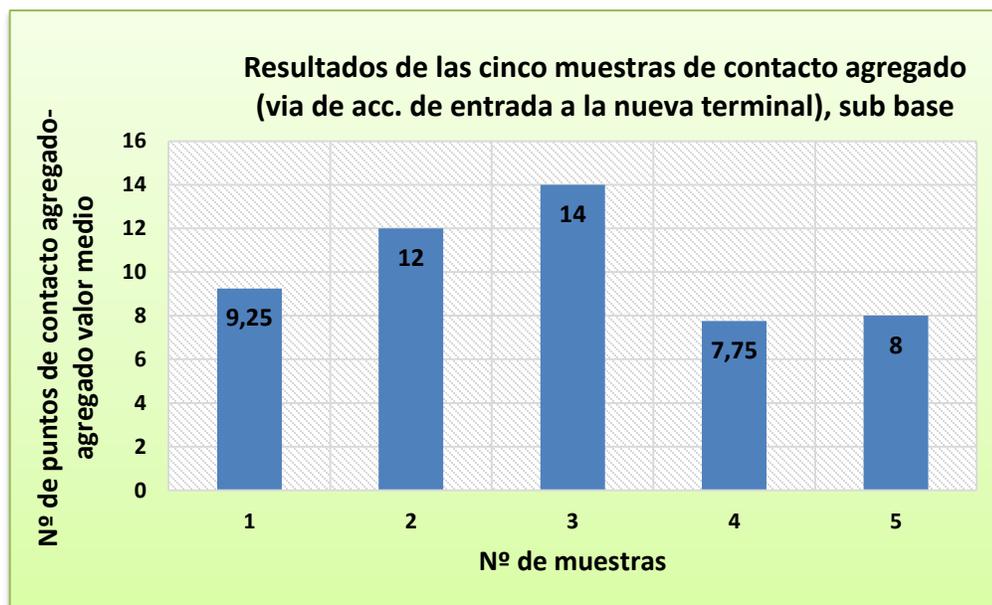
Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.19.Resultados de las cinco muestras de contacto agregado (Vía de acceso de entrada a la nueva terminal), sub base

Nº DE MUESTRA	Nº DE PIXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	144968,87	18164,6	9,25
2	144476,46	18102,9	12
3	144537,91	18110,6	14
4	144723,86	18166	7,75
5	144426,18	18096,6	8

Fuente: Elaboración propia

Gráfica.3.15. Resultados de las cinco muestras de contacto agregado-agregado, vía de acceso de entrada a la nueva terminal, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

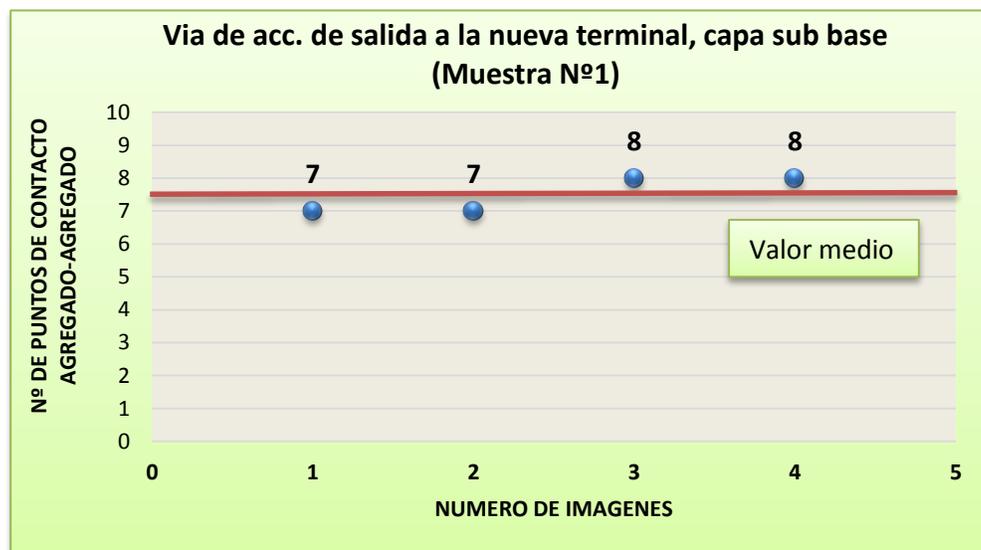
- **Pavimento Rígido: (capa sub base)**
- **Material:** de la vía de acceso de salida a la nueva terminal
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.20. Número de puntos de contacto agregado-agregado (Muestra N°1)

Nº DE CORTE TRANSVERSAL	Nº DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	Nº DE PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO - AGREGADO
1	144678,37	18128,2	7
2	144678,37	18128,2	7
3	144678,37	18128,2	8
4	144678,37	18128,2	8
Valor medio de puntos de contacto			7,5

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA 3.16. Valor Medio Contacto Agregado, vías de acceso de salida a la nueva terminal, capa sub base (Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.21.Resultados de las cinco muestras de contacto agregado (Vía de acceso de salida a la nueva terminal), sub base

Nº DE MUESTRA	Nº DE PIXELES	ÁREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	144678,37	18128,2	7,5
2	144607,34	18119,3	12,5
3	144642,46	18123,7	13,25
4	144680,77	18128,5	12,25
5	144802,87	18143,8	10,25

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICA.3.17. Resultados de las cinco muestras de contacto agregado-agregado, vía de acceso de salida a la nueva terminal, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

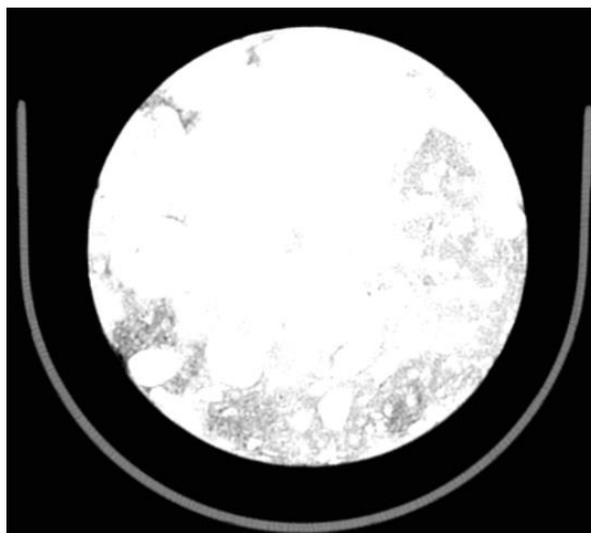
3.6.2.2. ANÁLISIS DE CONTENIDO DE VACÍOS

Para el análisis de vacíos se procede a observar imagen por imagen, midiendo el área de cada imagen en mm² como también en pixeles y está a su vez a la transformación de una imagen monocromática (imagen a escala de grises) a una imagen binaria (imagen en blanco y negro).

El programa debido a que el aire es el elemento más liviano dentro de todos los agregados que compone la mezcla procede a darle un color negro al pixel que es ocupado por aire, y al resto de los agregados más densos tendrán un color blanco para así poder diferenciar los vacíos en las imágenes de cada muestra.

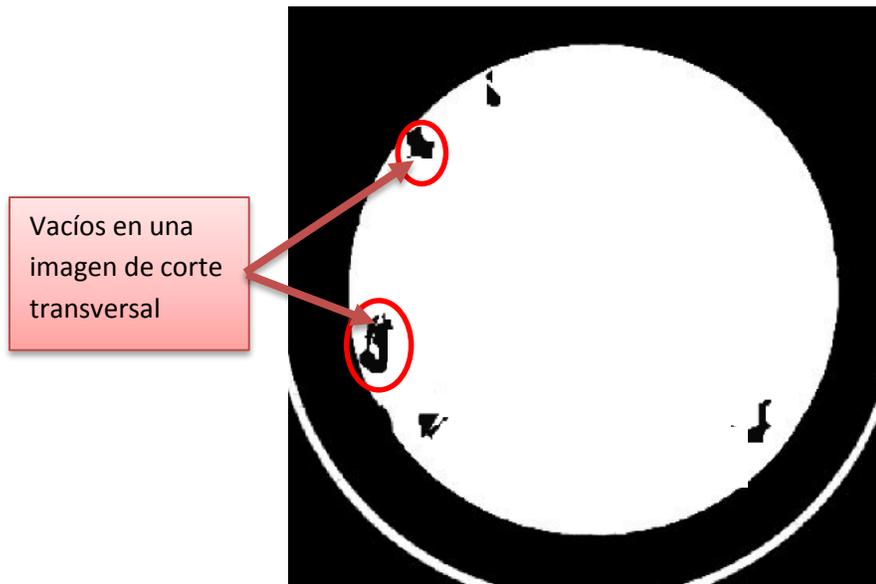
Como ya lo mencionamos anteriormente en cada muestra realizado en el laboratorio con especificaciones de cada proyecto y utilizando el mismo material de los tramos en estudio, se obtiene 4 imágenes de corte transversal cada 2,5 cm, las cuales hay que obtener el área en mm², número de pixeles, en capa base y sub base de pavimento flexible y pavimento rígido.

Imagen 3.21: Apreciación de la Imagen a blanco y negro



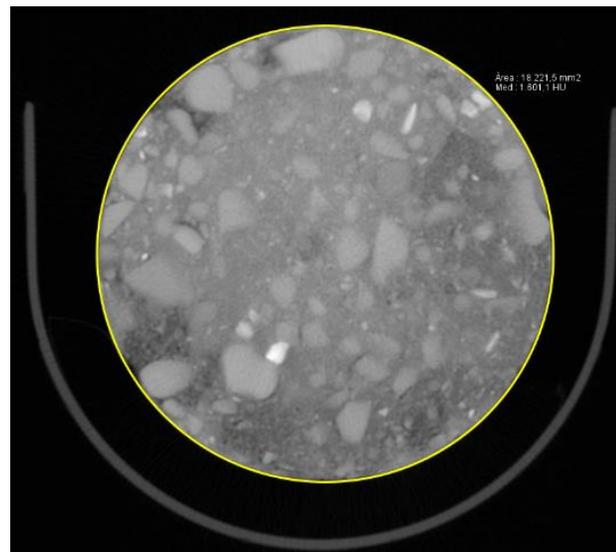
Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.22: Espacios de color negro (Vacíos)



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.23: Medición del valor de área



Fuente: Elaboración propia

En esta figura. Muestra el número de píxeles llenos que están marcados, el cual serán sumados manualmente para que su suma sea el número de píxeles llenos en esa imagen de ese corte transversal, se hace el mismo procedimiento para todas las imágenes de cada muestra.

En estas imágenes nos muestra el área y también los pixeles seleccionados que sumados todos estos son pixeles llenos, ya que todo este espacio es ocupado por los agregados dentro de la capa granular, se realiza el mismo procedimiento para las demás muestras de las distintas capas granulares.

A. AVENIDA COSTANERA DEL SUR

- **Pavimento flexible: (capa sub base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.22. Porcentaje de vacíos, Av. Costanera del sur, capa sub base (Muestra N°1)

N° DE CORTE TRANSVERSAL	N° DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	N° DE PÍXELES LLENOS	N° DE PÍXELES VACIOS	% DE VACIOS
1	145422,9848	18221,5	139133,0848	6289,9	4,33
2	145422,9848	18221,5	139214,7848	6208,2	4,27
3	145422,9848	18221,5	139024,2848	6398,7	4,40
4	145422,9848	18221,5	139169,4848	6253,5	4,30
	<i>% Medio de vacíos</i>		139135,4098	6287,58	4,32

Fuente: Elaboración propia

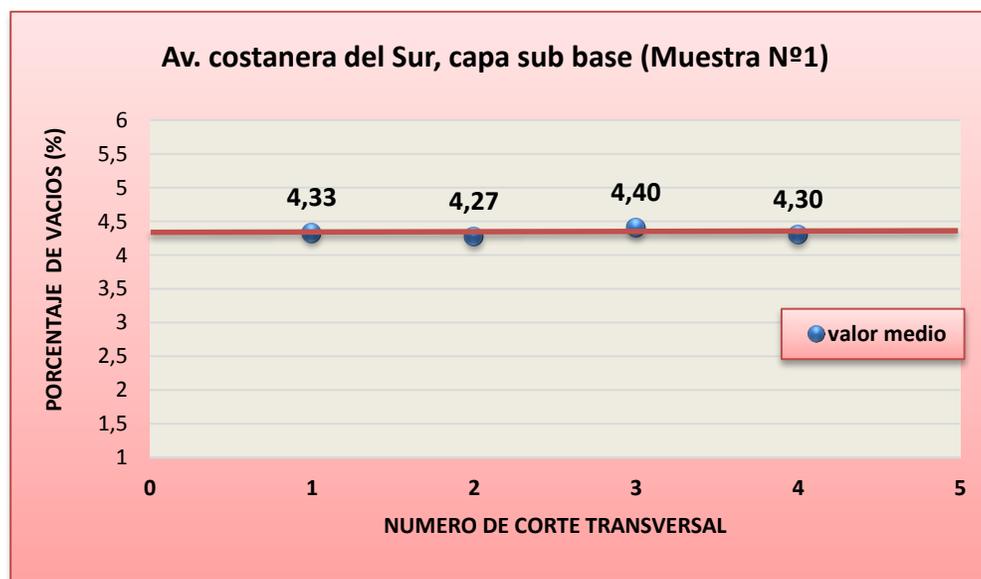
En esta tabla nos muestra el análisis a una imagen midiendo el número de pixeles llenos de dicha imagen, como también su área de la misma, para poder sacar el número de pixeles vacíos y posteriormente calcular el porcentaje de vacíos.

El porcentaje de vacíos varía de 3-5 % según la norma ABC.

$$\% VACIOS = \frac{N^{\circ} \text{ de pixeles vacios}}{N \text{ de pixeles totales}} * 100$$

La grafica 3.18.se observa el valor medio de contenido de vacíos de las cuatro imágenes de una muestra, para poder analizar de mejor manera la cantidad de vacíos que presenta una muestra.

Grafica.3.18. valor medio de contenido de vacíos, Av. Costanera del sur, capa sub base (Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.23.nos muestra los resultados del porcentaje de vacíos, donde se observa el resumen de los resultados medios de las cinco muestras analizadas en la capa sub base del pavimento de la avenida costanera del sur.

Tabla 3.23. Resultados porcentaje de vacíos de las cinco muestras (Avenida costanera del sur), capa sub base

N° DE MUESTRA	N° DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	N° DE PÍXELES LLENOS	N° DE PÍXELES VACIOS	%MEDIO DE VACÍOS
1	145422,9848	18221,5	139135,410	6287,58	4,324
2	143131,684	17934,4	136727,53	6404,15	4,474
3	143266,5603	17951,3	136757,71	6508,85	4,543
4	145142,8571	18186,4	138327,08	6815,78	4,696
5	143902,6337	18031	137443,63	6459,00	4,488

Fuente: Elaboración propia

Grafica.3.19. Resultados de las cinco muestras de contenido de vacíos, Av. Costanera del sur, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

En esta grafica nos muestra los resultados de la tabla anterior del porcentaje de vacíos de las cinco muestras de cada capa granular analizados con las tomografías, y donde este tiene que variar entre (3 – 5) % según norma de la ABC, el mismo procedimiento se realiza para las demás capas de cada muestra.

En la gráfica se puede observar valores diferentes pero con una pequeña variación esto debido a que la muestra fue realizado en el laboratorio en condiciones ideales, tenemos un valor mínimo de 4,32 % de vacíos en la muestra número 1, y un valor máximo de 4,69 % en la muestra número cinco, todos estos datos están dentro de norma. Ver los cálculos en el (ANEXO IV).

- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur

Imagen3.25: A blanco y negro midiendo en número de pixeles, Av. Costanera del sur, capa base (Muestra N°1)

Figura 1. Corte transversal 1

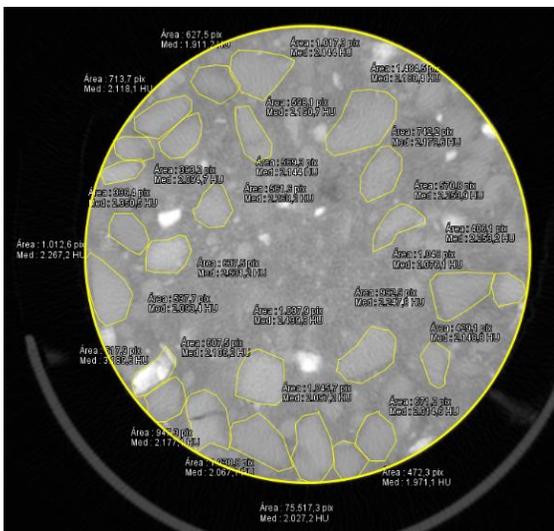


Figura 2. Corte transversal 2

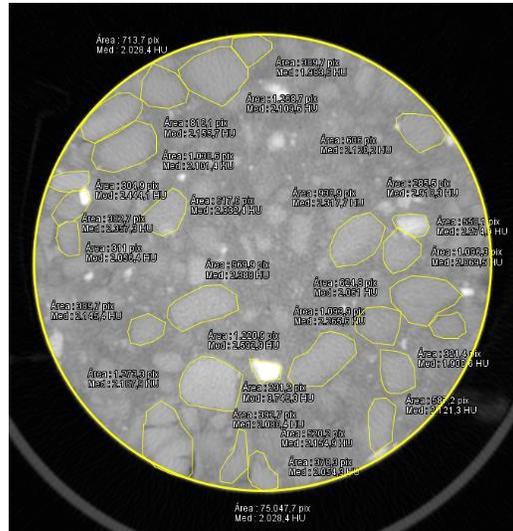


Figura 3. Corte transversal 3

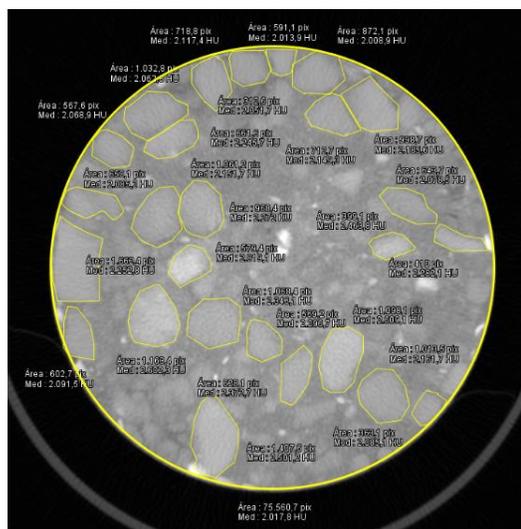
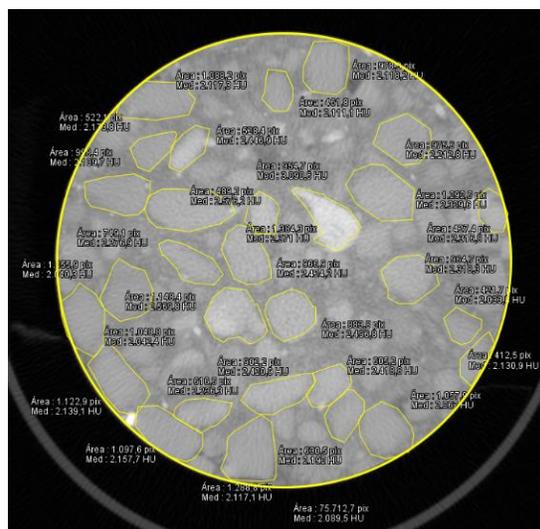


Figura 4. Corte transversal 4



Fuente: Elaboración propia

- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera del sur
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

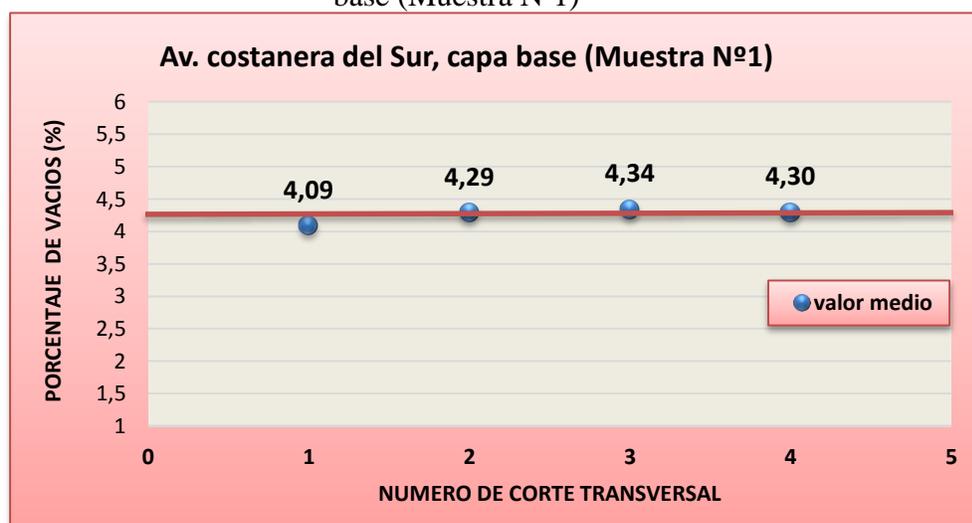
Tabla 3.24. Porcentaje de vacíos, Av. Costanera del sur, capa base (Muestra N°1)

N° DE CORTE TRANSVERSAL	N° DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	N° DE PÍXELES LLENOS	N° DE PÍXELES VACIOS	% DE VACÍOS
1	144101,3567	18055,9	138206,0567	5895,3	4,0911
2	144101,3567	18055,9	137920,6567	6180,7	4,2891
3	144101,3567	18055,9	137845,2567	6256,1	4,3415
4	144101,3567	18055,9	137903,9567	6197,4	4,3007
	<i>% Medio de vacíos</i>		137968,9817	6132,375	4,2556

Fuente: Elaboración propia

Como ya lo explicamos anteriormente el procedimiento es exactamente igual que el de la capa sub base, utilizando las imágenes de la tomografía de cada muestra para poder sacar estos datos de la tabla, como el número de pixeles, área, y número de pixeles llenos y vacíos de la imagen.

GRAFICA.3.20. valor medio de contenido de vacíos, Av. Costanera del sur, capa base (Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

Se hace una representación gráfica de la tabla anterior, graficando el porcentaje de vacíos de cada imagen de la muestra a analizar y obteniendo el valor medio de porcentaje de vacíos de este molde. (**VER ANEXO IV**).

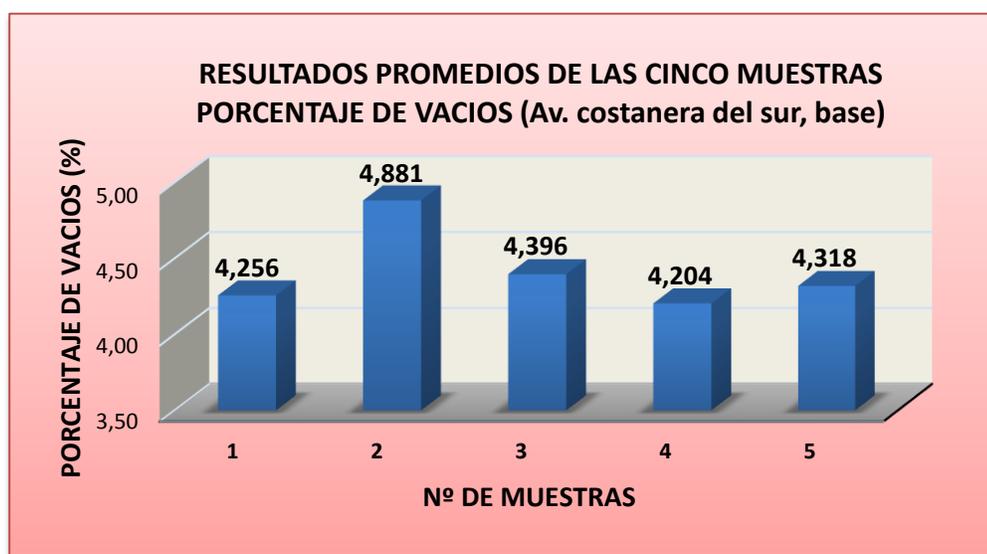
Tabla 3.25. Resultados porcentaje de vacíos de las cinco muestras de (Avenida costanera del sur), capa base

Nº DE MUESTRA	Nº DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	Nº DE PÍXELES LLENOS	Nº DE PÍXELES VACÍOS	%MEDIO DE VACÍOS
1	144101,3567	18055,9	137968,98	6132,38	4,256
2	144535,5148	18110,3	137480,96	7054,55	4,881
3	144195,5307	18067,7	137857,06	6338,48	4,396
4	144581,0056	18116	138503,51	6077,50	4,204
5	144003,1923	18043,6	137784,82	6218,38	4,318

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla nos muestra los resultados medios de porcentaje de vacíos de las cinco muestras de la avenida costanera del sur, de la capa base, para poder graficarlos.

Grafica.3.21. Resultados de las cinco muestra de porcentaje de vacíos, Av. Costanera del sur, capa base



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica nos muestra los resultados medios como ya lo mencionamos anteriormente, donde se observa un valor mínimo de 4,20 % en la muestra número cuatro y un valor máximo de 4,88 % en la muestra número dos, esto indica que estos valores están dentro del rango indicado por norma. Se realiza el mismo procedimiento para todas las demás muestras. **(VER ANEXO IV).**

B. AVENIDA COSTANERA LA BANDA

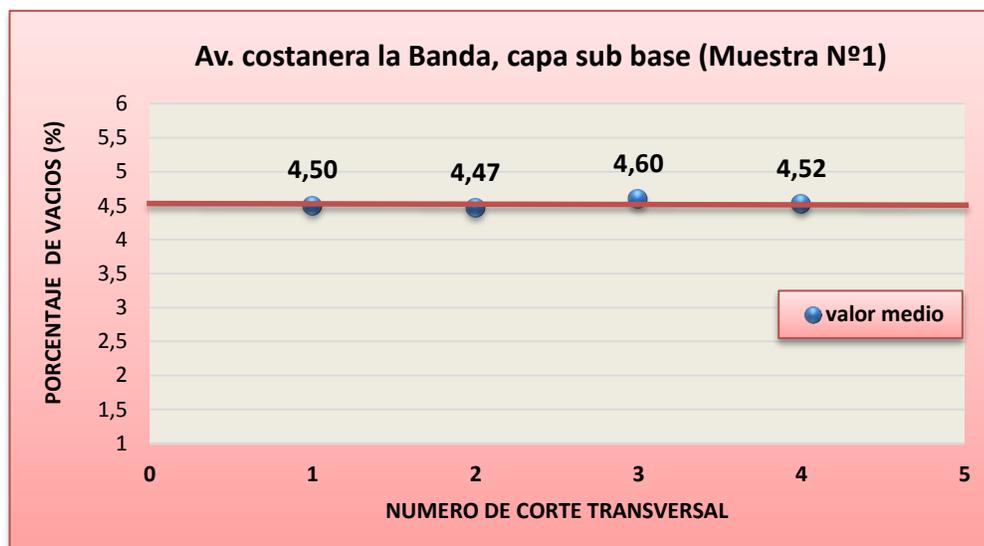
- **Pavimento flexible: (capa sub base)**
- **Material:** de la Avenida costanera la banda
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.26. Porcentaje de vacíos, Av. Costanera la banda, capa sub base
(Muestra N°1)

Nº DE CORTE TRANSVERSAL	Nº DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	Nº DE PÍXELES LLENOS	Nº DE PÍXELES VACIOS	% DE VACÍOS
1	144932,1628	18160	138405,0628	6527,1	4,5036
2	144932,1628	18160	138458,3628	6473,8	4,4668
3	144932,1628	18160	138268,6628	6663,5	4,5977
4	144932,1628	18160	138374,9628	6557,2	4,5243
% Medio de vacíos			138376,7628	6555,40	4,5231

Fuente: Elaboración propia

Grafica.3.22. Valor medio de contenido de vacíos, Av. Costanera la banda, capa sub base (Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27. Resultados de las cinco muestras de porcentaje de vacíos (Avenida costanera la banda), capa sub base

N° DE MUESTRA	N° DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	N° DE PÍXELES LLENOS	N° DE PÍXELES VACÍOS	%MEDIO DE VACÍOS
1	144932,1628	18160	138376,76	6555,40	4,523
2	143851,5563	18024,6	137238,56	6613,00	4,597
3	144973,6632	18165,2	138384,01	6589,65	4,545
4	144706,3049	18131,7	138317,98	6388,33	4,415
5	144754,1899	18137,7	138306,41	6447,78	4,454

Fuente: Elaboración propia

Grafica.3.23. Resultados de las cinco muestras de porcentaje de vacíos, Av. Costanera la banda, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

Para ver los cálculos de contenido de vacíos (**VER ANEXO IV**).

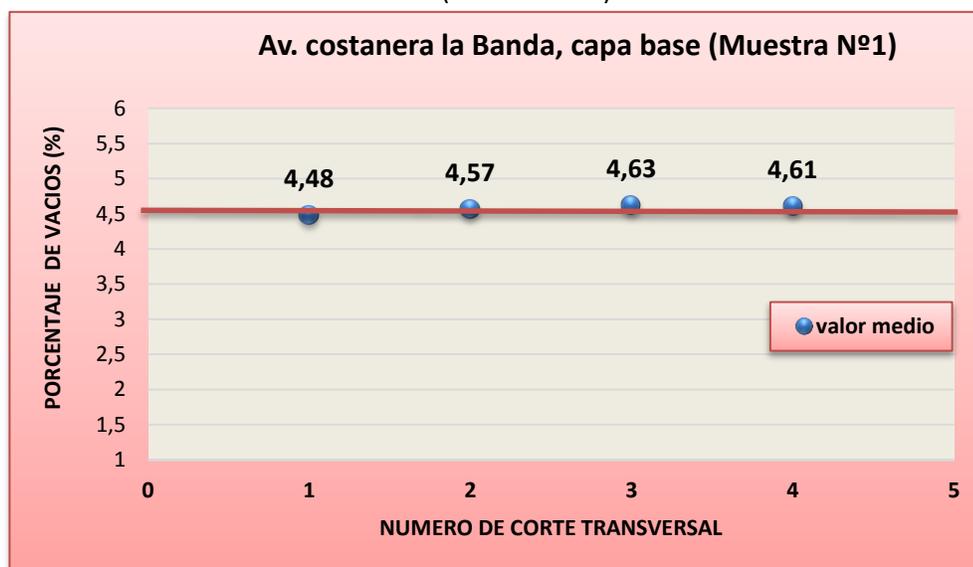
- **Pavimento flexible: (capa base)**
- **Material:** de la Avenida costanera la banda
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.28. Porcentaje de vacíos, Av. Costanera la banda, capa base (Muestra N°1)

Nº DE CORTE TRANSVERSAL	Nº DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	Nº DE PÍXELES LLENOS	Nº DE PÍXELES VACIOS	% DE VACÍOS
1	145009,577	18169,7	138508,077	6501,5	4,4835
2	145009,577	18169,7	138380,877	6628,7	4,5712
3	145009,577	18169,7	138294,277	6715,3	4,6309
4	145009,577	18169,7	138319,977	6689,6	4,6132
% Medio de vacíos			138375,802	6633,78	4,5747

Fuente: Elaboración propia

Grafica.3.24. Valor medio de porcentaje de vacíos, Av. Costanera la banda, capa base (Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

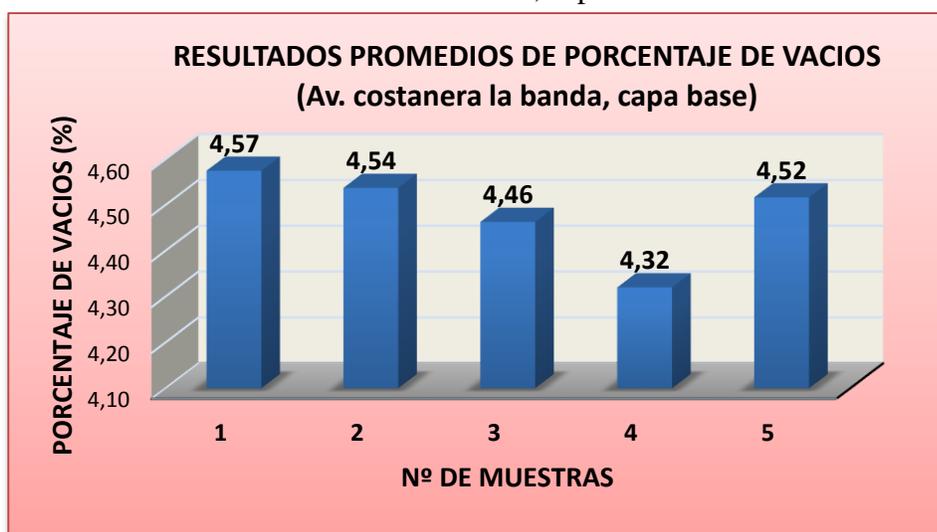
Tabla 3.29. Resultados de las cinco muestras de porcentaje de vacíos (Avenida costanera la banda), base

N° DE MUESTRA	N° DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	N° DE PÍXELES LLENOS	N° DE PÍXELES VACIOS	%MEDIO DE VACÍOS
1	145009,577	18169,7	138375,80	6633,78	4,575
2	144576,2171	18115,4	138016,52	6559,70	4,537
3	144699,1221	18130,8	138241,50	6457,63	4,463
4	144723,8627	18133,9	138472,16	6251,70	4,320
5	144794,0942	18142,7	138254,67	6539,43	4,516

Fuente: Elaboración propia

Grafica.3.25. Resultados de las cinco muestras de contenido de vacíos, Av.

Costanera la banda, capa base

*Fuente: Elaboración propia*

Para ver los cálculos de contenido de vacíos (**VER ANEXO IV**).

C. VÍAS DE ACCESO DE LA NUEVA TERMINAL DE BUSES

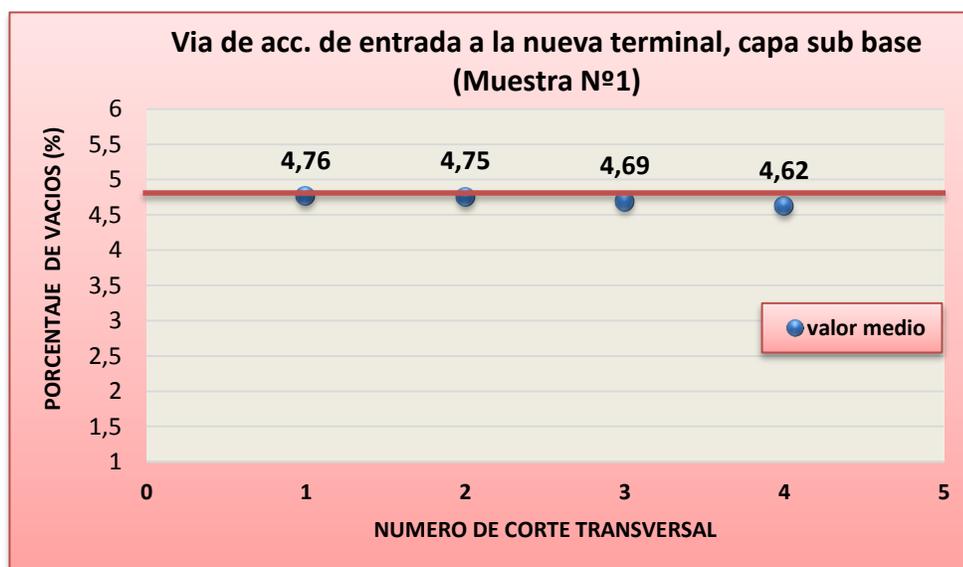
- **Pavimento Rígido:** (capa sub base)
- **Material:** de la Vía de acceso de entrada a la nueva terminal
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

TABLA 3.30. Porcentaje de vacíos, vía de acceso de entrada a la nueva terminal, capa sub base (Muestra N°1)

Nº DE CORTE TRANSVERSAL	Nº DE PÍXELES	ÁREA (mm ²)	Nº DE PÍXELES LLENOS	Nº DE PÍXELES VACIOS	% DE VACÍOS
1	144968,8747	18164,6	138061,3747	6907,5	4,7648
2	144968,8747	18164,6	138077,2747	6891,6	4,7538
3	144968,8747	18164,6	138171,4747	6797,4	4,6889
4	144968,8747	18164,6	138269,0747	6699,8	4,6215
% Medio de vacíos			138144,7997	6824,08	4,7073

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA.3.26. Valor medio de porcentaje de vacíos, vía de acceso de entrada a la nueva terminal, capa sub base (Muestra N°1)



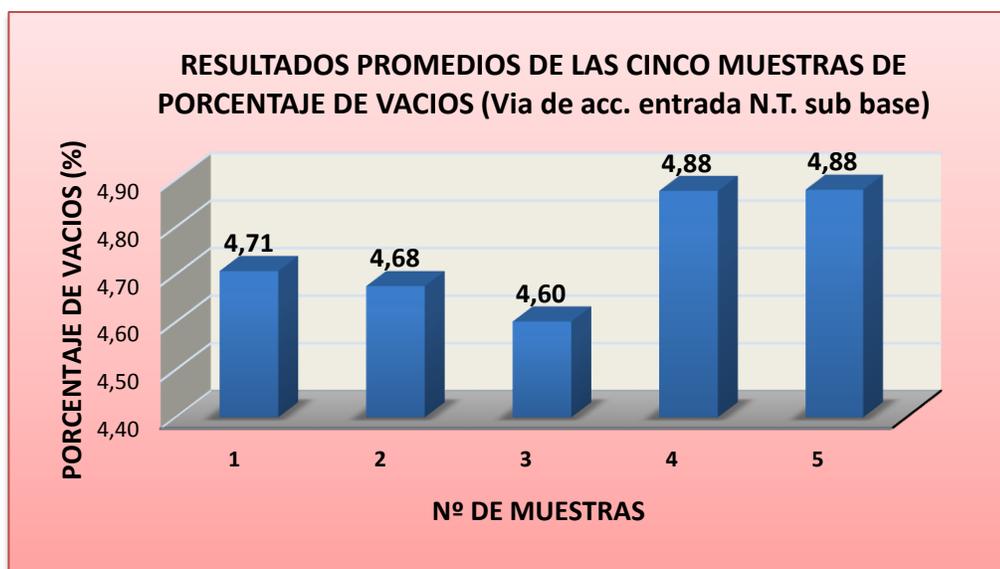
Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.31. Resultados de las cinco muestras de porcentaje de vacíos, (Vía de acceso de entrada a la nueva terminal), capa sub base

N° DE MUESTRA	N° DE PÍXELES	AREA (mm ²)	N° DE PÍXELES LLENOS	N° DE PÍXELES VACIOS	%MEDIO DE VACÍOS
1	144968,875	18164,6	138144,80	6824,08	4,707
2	144476,457	18102,9	137721,48	6754,98	4,675
3	144537,909	18110,6	137887,36	6650,55	4,601
4	144980,048	18166	137910,70	7069,35	4,876
5	144426,177	18096,6	137380,43	7045,75	4,878

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA.3.27. Resultados de las cinco muestra de contenido de vacíos, Vía de acceso de entrada a la nueva terminal, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

Para ver los cálculos de contenido de vacíos (**VER ANEXO IV**).

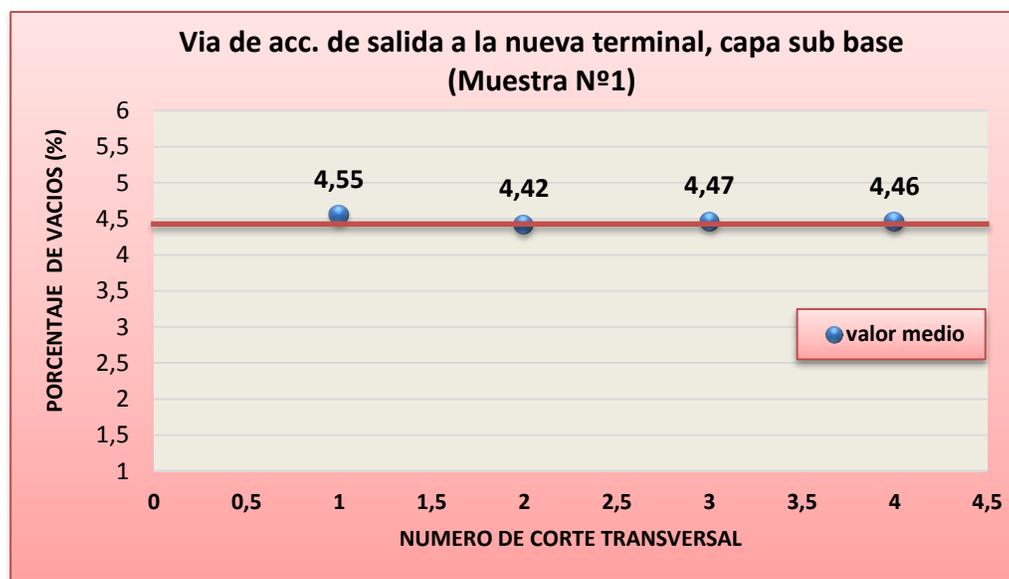
- **Pavimento Rígido:** (capa sub base)
- **Material:** de la Vía de acceso de salida a la nueva terminal
- **Área de pixel:** 0,1253 mm²
- **Área del molde:** 18241,469 mm²

Tabla 3.32. Porcentaje de vacíos, vía de acceso de salida a la nueva terminal, capa sub base (Muestra N°1)

Nº DE CORTE TRANSVERSAL	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº DE PÍXELES LLENOS	Nº DE PÍXELES VACIOS	% DE VACÍOS
1	144678,3719	18128,2	138092,1719	6586,2	4,5523
2	144678,3719	18128,2	138285,6719	6392,7	4,4186
3	144678,3719	18128,2	138214,8719	6463,5	4,4675
4	144678,3719	18128,2	138230,9719	6447,4	4,4564
% Medio de vacíos			138205,9219	6472,45	4,4737

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA.3.28. valor medio de porcentaje de vacíos, vía de acceso de salida a la nueva terminal, capa sub base (Muestra N°1)



Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.33. Resultados de las cinco muestras de porcentaje de vacíos, Vía de acceso de salida a la nueva terminal, sub base

N° DE MUESTRA	N° DE PÍXELES	AREA (mm ²)	N° DE PÍXELES LLENOS	N° DE PÍXELES VACIOS	%MEDIO DE VACÍOS
1	144678,3719	18128,2	138205,922	6472,450	4,474
2	144607,3424	18119,3	137963,842	6643,500	4,594
3	144642,4581	18123,7	138215,433	6427,025	4,443
4	144680,7662	18128,5	137938,316	6742,450	4,660
5	144802,8731	18143,8	138062,923	6739,950	4,655

Fuente: Elaboración propia

GRAFICA.3.29. Resultados de las cinco muestras de porcentaje de vacíos, Vía de acceso de salida a la nueva terminal, capa sub base



Fuente: Elaboración propia

Para ver los cálculos de contenido de vacíos (**VER ANEXO IV**).

3.6.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA INVESTIGACIÓN

Después de una serie de ensayos, pruebas se puede observar que esta técnica de las tomografías por rayos-x, nos ayuda a ver con claridad al interior de las capas granulares y lo que sucede dentro de ellas, para poder corregir errores futuros.

Se puede observar que el contacto agregado-agregado significa la unión de dos o más agregados que se están chocando entre sí, existiendo varios puntos de contactos en cada imagen, y también la misma es de forma variada de una muestra a otra en las capas granulares, esto pudiendo ser debido a diferentes factores como es la granulometría, el mezclado del material, la energía de compactación.

También se puede observar cómo y en qué estado se encuentran los agregados después de ser compactado y a su vez su distribución de ellos en las capas granulares.

Tabla 3.34. Resultados de las capas sub base análisis contacto agregado – agregado

		Nº de Muestra	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
Capa Sub base	Av. Costanera del sur	1	145422,985	18221,5	7
		2	143131,684	17934,4	8
		3	143266,56	17951,3	9
		4	145142,857	18186,4	9,75
		5	143902,634	18031	9
	Av. Costanera la banda	1	144932,163	18160	12,25
		2	143851,556	18024,6	10,5
		3	144973,663	18165,2	14,25
		4	144706,305	18131,7	14,25
		5	144754,19	18137,7	8,5
	Vía de acc. De entrada a la nueva terminal	1	144968,875	18164,6	9,25
		2	144476,457	18102,9	12
		3	144537,909	18110,6	14
		4	144980,048	18166	7,75
		5	144426,177	18096,6	8
	Vía de acc. De salida a la nueva terminal	1	144678,372	18128,2	7,5
		2	144607,342	18119,3	12,5
		3	144642,458	18123,7	13,25
		4	144680,766	18128,5	12,25
		5	144802,873	18143,8	10,25

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla 3.34. se muestra el resumen de los resultados del analisis de contacto agregado – agregado de cada muestra de la capa sub base de los tramos avenida

costanera del sur, avenida costanera la banda, vias de acceso a la nueva terminal, de las cinco muestras por cada tramo.

De la avenida costanera del sur de la capa sub base de pavimento flexible, tiene un valor minimo de contacto agregado-agregado de 7 y un valor maximo de 9,75, valor que es promedio de cada muestra, significan que aunque se uso la misma mezcla de material en las cinco muestras existira diferencias en los resultados, esto debido a la granulometria, al mezclado de la muestra, la fuerza de compacion en el momento de realizar la muestra en el molde de CBR en el laboratorio.

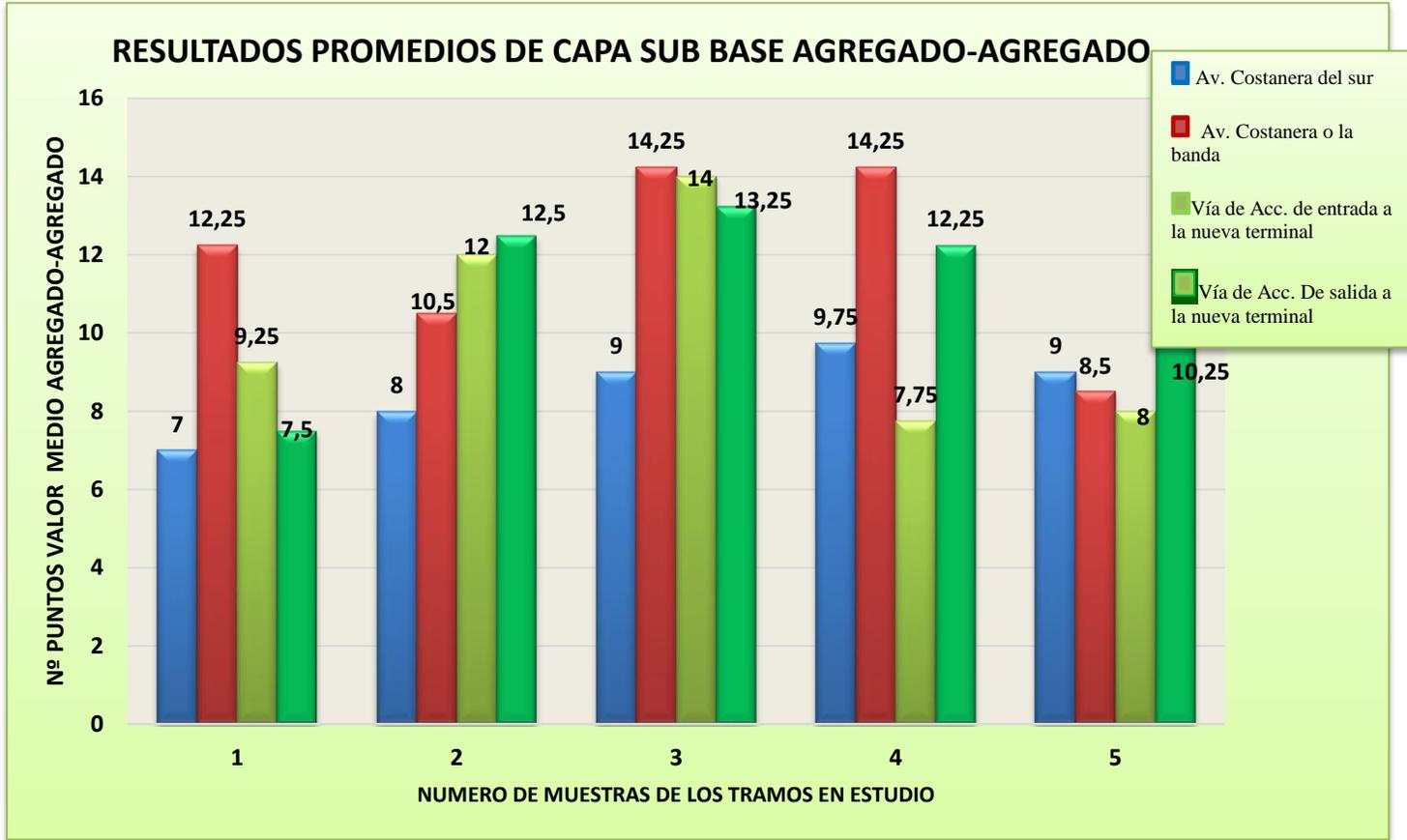
Estos resultados van de manera ascendente, esto significa que cada muestra no es igual a otra, aunque se aya utilizado el mismo material para la capa sub base pero nos muestra que en una carretera aunque se use la misma granulometria para un tramo, el material siempre tendra una variacion ya sea minima en cada espacio que ocupa el mismo tramo.

En la avenida costanera la banda de la capa sub base de pavimento flexible, de la misma manera tenemos la muestra numero cinco con un valor promedio de 8,5 como minimo de las demas muestras de esta capa, como tambien el maximo es de 14,25.

De las vias de acceso a la nueva terminal ya sea de entrada o de salida de pavimento rigido, el valor minimo promedio es 7,5 de contacto agregado - agregado y el maximo promedio es de 13,25, se puede notar que existe una pequeña diferencia ya que se utilizo el mismo material tanto para la via de entrada como para la de salida de la nueva terminal. Estos resultados muestran un material con granulometria continua bien graduada produce una capa de pavimento con menor contenido de vacios, mayor densidad, esto es posible gracias a que se aumenta el contacto entre particulas.

Este analisis nos puede ayudar a conocer el comportamiento de los agregados al interior de las capas granulares, a traves de imágenes de manera visual, para poder resolver problemas que se presenten en un futuro como ser fisuramientos, hundimientos y estos poder corregirlos a traves del cambio de material como granulometrias, compactacion.

Grafica.3.30: Variacion del contacto agregado – agregado de las capas sub base de los tres tramos en estudio



Fuente: Elaboración propia

La gráfica de resultados de la tabla anterior de la capa sub base, se puede observar de acuerdo a los colores la variación de cada muestra y también de cada tramo en estudio tanto del pavimento flexible y el pavimento rígido, también se puede observar que existe una pequeña variación en la granulometría en cada muestra de un mismo tramo aunque que se usó el mismo material granular para las muestras, con las especificaciones de cada tramo. Esto nos indica que en un tramo de capa granular existe variación de sus agregados en el interior en todo su tramo, ya que no se comporta homogéneamente, esto debido a la magnitud de la muestra, al manipuleo, pudiéndose separar los agregados gruesos de las finos por la compactación y posteriormente sufrir cambios en las capas granulares de una carretera como hundimientos fisuras.

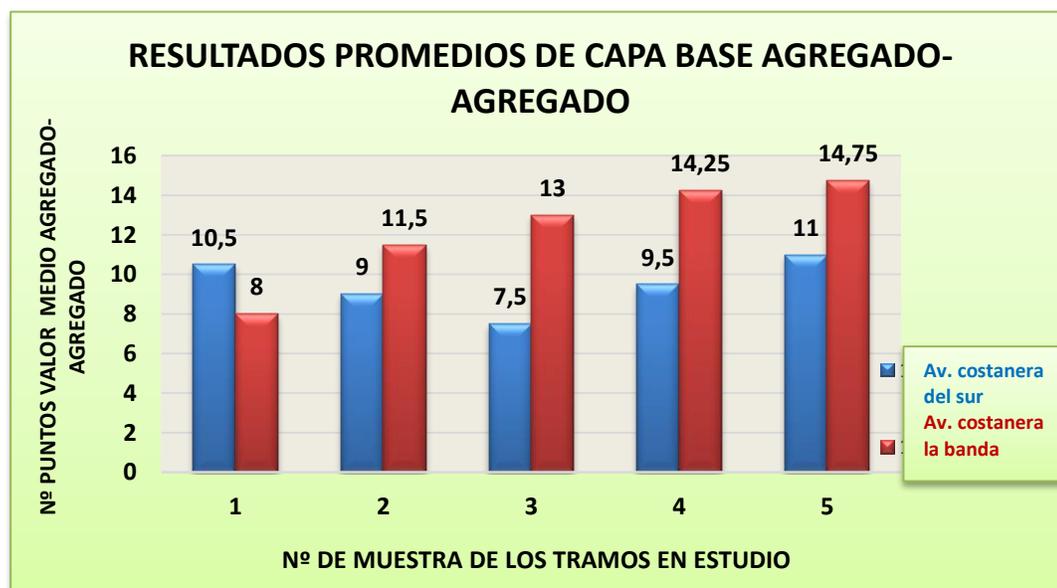
Tabla 3.35. Resultados de las capas base análisis contacto agregado – agregado

		Nº de Muestra	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
Capa base	Av. Costanera del sur	1	144101,357	18055,9	10,5
		2	144535,515	18110,3	9
		3	144195,531	18067,7	7,5
		4	144581,006	18116	9,5
		5	144003,192	18043,6	11
	Av. Costanera la banda	1	145009,577	18169,7	8
		2	144576,217	18115,4	11,5
		3	144699,122	18130,8	13
		4	144723,863	18133,9	14,25
		5	144794,094	18142,7	14,75

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla 3.35 muestra los resultados medios de las muestras de cada capa base de los pavimentos avenida costanera del sur, avenida costanera la banda, ambos pavimentos flexibles, se observa que el tramo de la avenida costanera del sur presenta valores similares ya que se usó el mismo material granular para esta capa, esto nos indica que el material está uniformemente distribuido en todas sus muestras y con la misma energía compactado, asegurándonos una capa granular con un material granulométricamente bien distribuida, lo mismo sucede en la avenida costanera la banda, teniendo el valor mínimo de contacto agregado-agregado de 8 en la muestra número uno y su valor máximo 14,75 de la muestra número cinco, se puede observar que estos resultados de contacto agregado-agregado van de manera ascendente ya que nos indica que el material al momento de mezclar y elaborar las muestras se usó material con menor contenido de agregados gruesos, quedando al final material más grueso y provocando más contactos entre agregados, esto perjudica a una capa granular ya que presentara mayor contenido de vacíos en las muestras que presentan menor contenido de agregados y viceversa, provocando hundimientos.

GRAFICA.3.31: Variación del contacto agregado – agregado de la capa base de los tramos en estudio



Fuente: Elaboración propia

Es la representación gráfica de resultados medios de la tabla anterior de dos tramos, se puede observar que en cada tramo hay cinco muestras como ya mencionamos anteriormente, nos muestra gráfica a través del color mostrado.

Se observa que en la avenida la banda el contacto agregado – agregado va de manera ascendente, esto debido a muchos factores, granulometría, a que no se tuvo el cuidado adecuado al momento del mezclado del material para colocar la muestra para ser compactado, a la energía de compactación, teniendo como resultado una granulometría uniforme, es decir aquel cuyas partículas tienen un solo tipo de tamaño, son menos susceptibles ante los efectos de la compactación, por tanto sus propiedades mecánicas no experimentan grandes cambios a pesar de que se intenta densificar el material mediante procedimientos de compactación.

Y la capa base de la avenida costanera del sur, sus resultados van variando en cada imagen pero es mínima la variación por los mismos motivos ya mencionados anteriormente.

Los suelos granulares poseen una estructura simple de partículas que desarrollan un acomodo y trabazón entre sí, que depende de su granulometría y la compactación aplicada. Por tanto el comportamiento de estos materiales al ser sometidos a una energía de compactación es producir otra estructura simple con mayor densidad.

Dado que estos materiales son muy estables ante la adición o pérdida de agua, no sufren cambios de volumen (hinchamiento o retracción) que afecten su densidad y resistencia. De modo que mientras más se compacten estos materiales usualmente se producen estructuras menos compresibles y más resistentes.

La granulometría de los agregados influye de manera directa en muchas de las características y el comportamiento de una capa granular de pavimento. Un material con granulometría bien graduada produce una capa de pavimento con un menor contenido de vacíos, mayor densidad y capacidad soporte que uno con granulometría uniforme. Esto es posible gracias a que se aumenta el contacto entre partículas, se reducen los espacios vacíos y se incrementa la resistencia al corte.

TABLA 3.36. Resultados de análisis contenido de vacíos de las capas sub base de los tramos en estudio

		Nº DE MUESTRA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº DE PÍXELES LLENOS	Nº DE PÍXELES VACIOS	%VACIOS VALORES MEDIOS
Capa Sub base	Av. Costanera del sur	1	145422,98	18221,5	139135,410	6287,58	4,32
		2	143131,68	17934,4	136727,53	6404,15	4,47
		3	143266,56	17951,3	136757,71	6508,85	4,54
		4	145142,86	18186,4	138327,08	6815,78	4,70
		5	143902,63	18031	137443,63	6459,00	4,49
	Av. Costanera la banda	1	144932,16	18160	138376,76	6555,40	4,52
		2	143851,56	18024,6	137238,56	6613,00	4,60
		3	144973,66	18165,2	138384,01	6589,65	4,55
		4	144706,30	18131,7	138317,98	6388,33	4,41
		5	144754,19	18137,7	138306,41	6447,78	4,45
	Vía de acc. De entrada a la nueva terminal	1	144968,87	18164,6	138144,80	6824,08	4,71
		2	144476,46	18102,9	137721,48	6754,98	4,68
		3	144537,91	18110,6	137887,36	6650,55	4,60
		4	144980,05	18166	137910,70	7069,35	4,88
		5	144426,18	18096,6	137380,43	7045,75	4,88
	Vía de acc. De salida a la nueva terminal	1	144678,37	18128,2	138205,922	6472,450	4,47
		2	144607,34	18119,3	137963,842	6643,500	4,59
		3	144642,46	18123,7	138215,433	6427,025	4,44
		4	144680,77	18128,5	137938,316	6742,450	4,66
		5	144802,87	18143,8	138062,923	6739,950	4,65

Fuente: Elaboración propia

Se observa que a través de las tomografías computarizadas por rayos – x, si es posible también obtener el porcentaje de vacíos en las capas granulares, analizando los resultados se observa que el porcentaje de vacíos está dentro del rango (3 – 5) % según norma ABC.

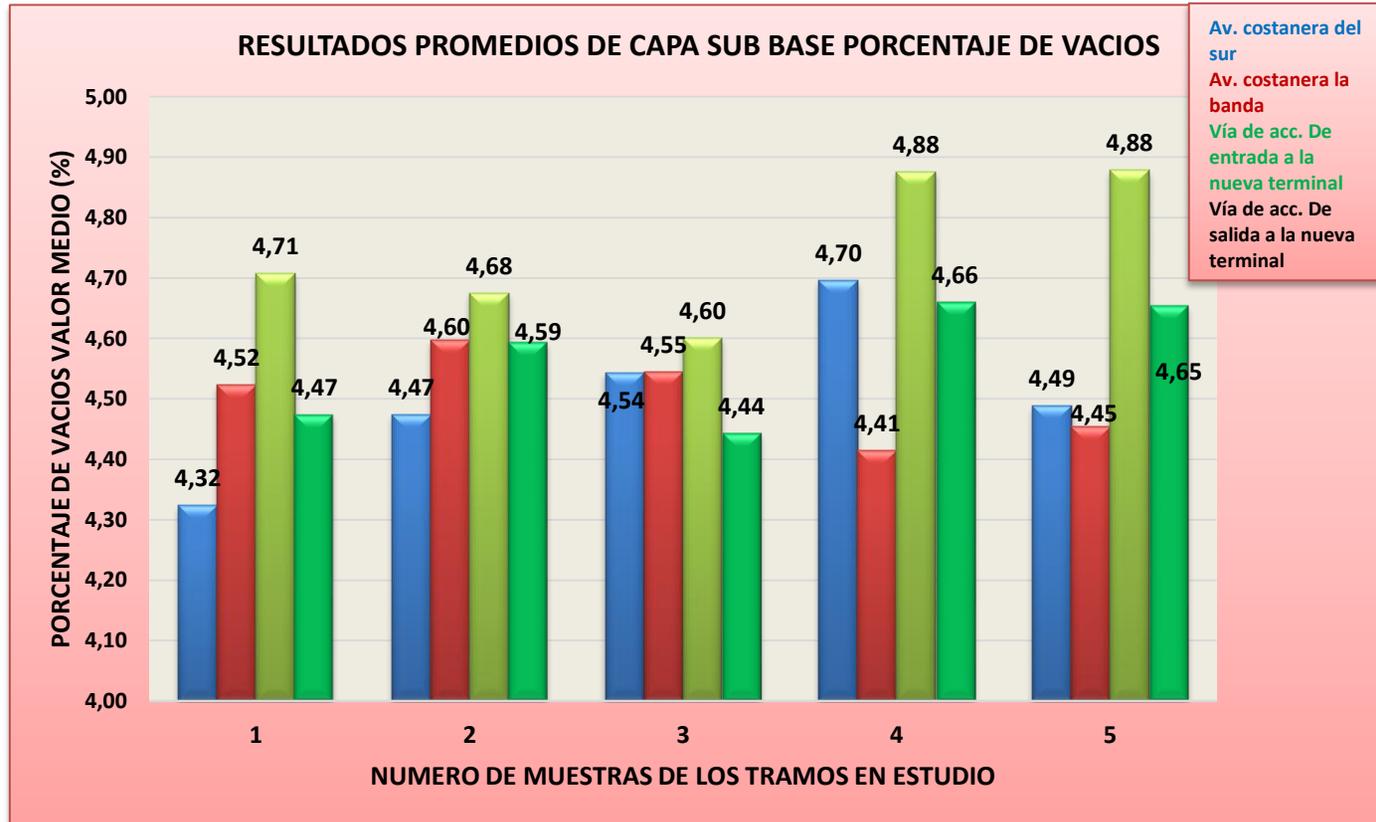
Se ve que el contenido de vacíos a través de la escala de grises, el programa nos marca de color blanco los materiales más densos como son las piedras y las manchas de color negro son los espacios de contenidos de aire atrapado.

Aunque sea una muestra en condiciones casi ideales también existe vacíos en la aunque estos sean mínima.

Esta tabla nos muestra el porcentaje de vacíos de las muestras de capas granulares sub bases de los tramos de la avenida costanera del sur de pavimento flexible, con un valor mínimo de 4,32% de vacíos y un máximo de 4,70% de vacíos valores que están dentro de la norma ya que se elaboró en condiciones casi ideales y utilizando el mismo material que fueron conformadas las capas granulares de cada tramo, esto nos indica la capa granular es más densa, con una granulometría uniformemente distribuida y no esta propensa a sufrir cambios como deformaciones en la misma. Y también la avenida costanera la banda de pavimento flexible, con un porcentaje de vacíos mínimo de 4,41 % y el máximo de 4,60 %, de igual manera tiene una pequeña variación pero está dentro de la norma exigida.

Para el tramo de las vías de acceso a la nueva terminal de entrada y de salida son de pavimento rígido por lo tanto solo tiene capa sub base, con un valor mínimo de porcentaje de vacíos de 4,44% y 4,88% como máximo dentro de la norma, pero estos valores se aproximan al 5% esto llegaría a significar. Si el porcentaje de vacíos excede el 5% esto indica que la muestra es porosa y propensa a sufrir hundimientos, por lo tanto mala para la carretera, y se deberá realizar una elección mejor de agregados y compactación.

GRAFICA.3.32.: Variacion del porcentaje de vacios de la capa sub base de los tres tramos en estudio



Fuente: Elaboración propia

La grafica nos muestra la variación del contenido de vacíos en cada muestra de las capas granulares analizadas, se observa que esta varía una de la otra pero todos están dentro del rango establecido por norma y también es una pequeña variación por qué la muestra se realizó en condiciones ideales.

La grafica está compuesta por cinco muestras y de tres tramos y el último es de vía de acceso de salida a la nueva terminal, está realizada con el mismo material que la vía de entrada, se la procedió a graficar para ver la variación.

TABLA 3.37. Resultados de análisis contenido de vacíos de las capas base de los tramos en estudio

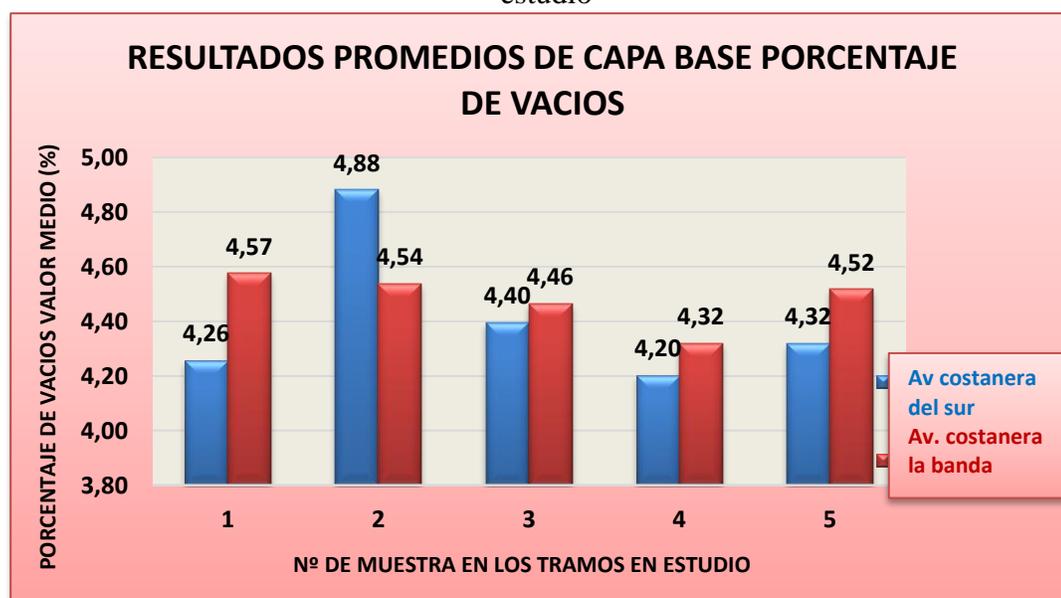
		Nº DE MUESTRA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº DE PÍXELES LLENOS	Nº DE PÍXELES VACIOS	%VACÍOS VALORES MEDIOS
Capa base	Av. Costanera del sur	1	144101,36	18055,9	137968,98	6132,38	4,26
		2	144535,51	18110,3	137480,96	7054,55	4,88
		3	144195,53	18067,7	137857,06	6338,48	4,40
		4	144581,01	18116	138503,51	6077,50	4,20
		5	144003,19	18043,6	137784,82	6218,38	4,32
	Av. Costanera la banda	1	145009,58	18169,7	138375,80	6633,78	4,57
		2	144576,22	18115,4	138016,52	6559,70	4,54
		3	144699,12	18130,8	138241,50	6457,63	4,46
		4	144723,86	18133,9	138472,16	6251,70	4,32
		5	144794,09	18142,7	138254,67	6539,43	4,52

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla nos muestra los resultados promedios de la capa base de pavimentos flexibles de los tramos siguientes: la avenida costanera del sur con porcentaje de vacíos mínimo de 4,20% y el máximo de 4,88 %, de la misma manera está dentro de

la norma, pero estos resultados nos muestran una variación de contenido de vacíos de una muestra a otra debido a la granulometría, compactación de cada muestra. Y la avenida costanera la banda tiene resultados similares, mostrando uniformidad en el porcentaje de vacíos, esto significa que el material cuenta con una granulometría bien graduada con un menor contenido de vacíos, mayor densidad y capacidad soporte, esto debido a que se aumenta el contacto entre partículas.

GRAFICA.3.33.: variacion del porcentaje de vacios de la capa base de los tramos en estudio



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica representa los resultados de la tabla anterior de las cinco muestras de cada tramo como se puede observar, para la avenida costanera del sur presenta resultados variados de porcentaje de vacíos llegando casi a lo máximo como la norma lo exige, esto indica que la muestra es más porosa y propensa a sufrir hundimientos, si en caso se excede el 5%, un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes a través de la capa granular, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro.

La avenida costanera la banda, presenta resultados de manera descendente esto quiere decir que su material de la capa granular es poco porosa ya que es necesario

que todas las capas granulares contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el material durante esta compactación adicional.

Si el porcentaje de vacíos no alcanza el valor mínimo del 3%, esto quiere decir que las capas granulares podrían sufrir ahuellamientos o exudar, esto debido a que las cargas del tránsito deforman la estructura del pavimento. Uno de los factores para que varíe el contenido de vacíos es la granulometría, es la energía de compactación, especificaciones de cada proyecto para utilizar el material con el que fueron construidas cada capa de los tramos en estudio.

Para mayor entendimiento e interpretación del programa se elaboró un manual guía de utilización del tomógrafo en el estudio de capas granulares de pavimentos, de esta manera se está implementando esta nueva técnica de estudio de las tomografías para poder usarlas en la ingeniería como una alternativa de solución al cálculo y control de porcentaje de vacíos y distribución de agregados en su interior y así poder prevenir posteriores daños en las capas granulares.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en las capas granulares y viceversa.

Relacionando el contacto agregado – agregado y el porcentaje de vacíos se determina que a mayor contacto entre agregados, menor es el valor de porcentaje de vacíos.

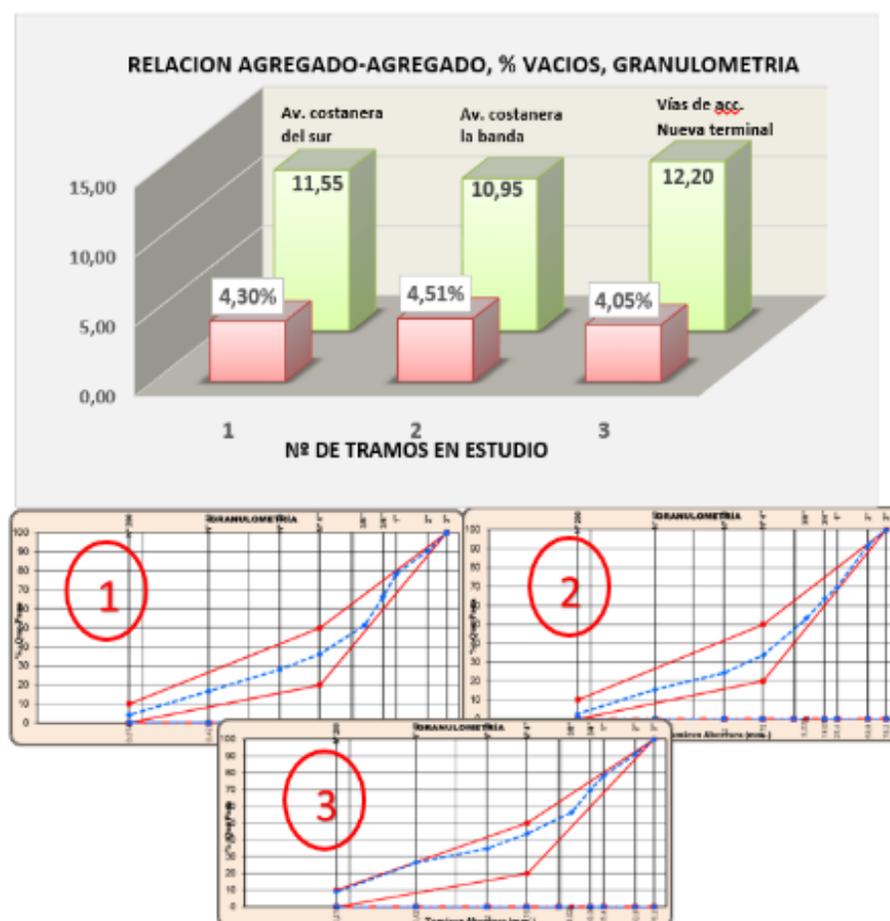
TABLA 3.38. Relación entre contacto agregado-agregado, porcentaje de vacíos y granulometría de las capas bases de los tramos en estudio

Tramo	Resumen contacto agreg.-agreg.	Resumen porcentaje de vacíos (%)	Granulometría
1: Av. Costanera del sur	11,55	4,30	granulometría con cantidad medianamente con finos
2: A. costanera la banda	10,95	4,51	granulometría con menor presencia de finos
3: vías de acc. Nueva terminal	12,20	4,05	granulometría con mayor cantidad de fino

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la tabla 3.38. la relación entre el contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos con la granulometría de las capas sub bases de los tramos en estudio. Donde la avenida costanera la banda presenta una granulometría con menor presencia de finos y un contacto de agregado-agregado de 10.95, y con un porcentaje de vacíos mayor de 4,51%, y lo contrario sucede en las vías de acceso a la nueva terminal.

GRAFICA 3.34. Relación entre contacto agregado-agregado, porcentaje de vacíos y granulometría de las capas sub bases de los tramos en estudio



Fuente: Elaboración propia

En esta grafica 3.34. Se puede apreciar de mejor manera la diferencia entre un tramo y otro, observando los resultados de capas sub bases con respecto a la granulometría que presentan las mismas.

Un material con granulometría bien graduada produce una capa de pavimento con un menor contenido de vacíos, mayor densidad y capacidad soporte que uno con granulometría uniforme. Esto es posible gracias a que se aumente el contacto entre partículas, se reducen los espacios vacíos y se incrementa la resistencia al corte.

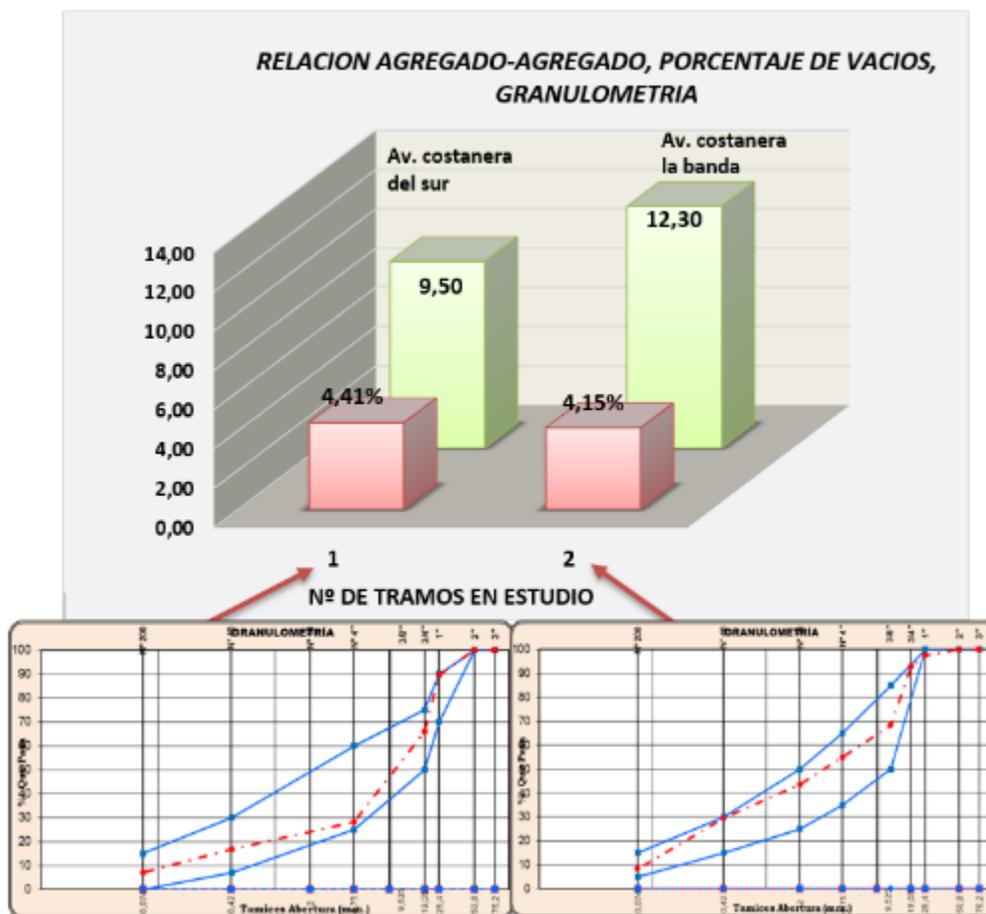
TABLA 3.39. Relación entre contacto agregado-agregado, porcentaje de vacíos y granulometría de las capas bases de los tramos en estudio

Tramo	CAPA BASE	Resumen contacto agreg.-agreg.	Resumen porcentaje de vacíos	Granulometría
1: Av. Costanera del sur		9,50	4,41	granulometría más gruesa
2: Av. Costanera la banda		12,30	4,15	Granulometría con poco fino

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la relación entre agregado-agregado y porcentaje de vacíos, está estrechamente relacionadas con la granulometría de cada material utilizado en los proyectos en estudio. Como se puede observar en la avenida costanera del sur tiene una granulometría más gruesa, y por lo tanto se evidencia mayor porcentaje de vacío de 4,41% y menor contacto agregado-agregado de 9,50 de uniones de partículas. Y en la avenida costanera la banda sucede lo contrario, con un contacto de agregado-agregado de 12,30 con un menor porcentaje de vacíos de 4,15 %, esto quiere decir que el material presenta una granulometría con poca presencia de finos, logrando así mayor contacto entre las partículas.

GRAFICA 3.35. Relación entre contacto agregado-agregado, porcentaje de vacíos y granulometría de las capas bases de los tramos en estudio



Fuente: Elaboración propia

Se evidenciar que la granulometría es de suma importancia en las capas granulares y en cualquier proyecto, como lo podemos ver en la gráfica 3.35. ya que influye en el acomodo de los agregados, y con el porcentaje de vacíos. Se puede observar en la avenida costanera la banda tiene una granulometría bien graduada produce un menor contenido de vacíos de 4,15%, el contacto agregado-agregado de 12,30, mayor densidad y capacidad soporte.

3.6.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Análisis estadístico para el tramo N°1

Ubicación: Avenida costanera del sur

Capa: sub base (pavimento flexible)

	N° PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO		PORCENTAJE DE VACIOS VALORES MEDIOS
	7		4,32
	8		4,47
	9		4,54
	9,75		4,70
	9		4,49
Media	8,55	Media	4,505
Mediana	9	Mediana	4,488
D. estándar	1,067	D. estándar	0,134
Varianza	1,138	Varianza	0,018
Coefficiente de variación	0,125	Coefficiente de variación	0,030

Fuente: Elaboración propia

Capa: base (pavimento flexible)

	N° PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO		PORCENTAJE DE VACIOS VALORES MEDIOS
	10,5		4,26
	9		4,88
	7,5		4,40
	9,5		4,20
	11		4,32
Media	9,5	Media	4,411
Mediana	9,5	Mediana	4,318
D. estándar	1,369	D. estándar	0,272

Varianza	1,875
Coefficiente de variación	0,144

Varianza	0,059
Coefficiente de variación	0,062

Fuente: Elaboración propia

Análisis estadístico para el tramo N°2

Ubicación: Avenida costanera la banda

Capa: sub base (pavimento flexible)

	N° PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
	12,25
	10,5
	14,25
	14,25
	8,5
Media	11,95
Mediana	12,25
D. estándar	2,484
Varianza	6,169
Coefficiente de variación	0,208

	PORCENTAJE DE VACIOS VALORES MEDIOS
	4,52
	4,60
	4,55
	4,41
	4,45
Media	4,507
Mediana	4,523
D. estándar	0,073
Varianza	0,005
Coefficiente de variación	0,016

Fuente: Elaboración propia

Capa: base (pavimento flexible)

	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO		PORCENTAJE DE VACIOS VALORES MEDIOS
	8		4,57
	11,5		4,54
	13		4,46
	14,25		4,32
	14,75		4,52
Media	12,3	Media	4,482
Mediana	13	Mediana	4,516
D. estándar	2,712	D. estándar	0,099
Varianza	7,356	Varianza	0,010
Coefficiente de variación	0,221	Coefficiente de variación	0,022

Fuente: Elaboración propia

Análisis estadístico para el tramo N°3

Ubicación: Vía de acceso de entrada a la nueva terminal

Capa: sub base (pavimento rígido)

	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO		PORCENTAJE DE VACIOS VALORES MEDIOS
	9,25		4,71
	12		4,68
	14		4,60
	7,75		4,88
	8		4,88
Media	10,2	Media	4,748
Mediana	9,25	Mediana	4,707
D. estándar	2,712	D. estándar	0,124

Varianza	7,356
Coefficiente de variación	0,266

Varianza	0,015
Coefficiente de variación	0,026

Fuente: Elaboración propia

Ubicación: Vía de acceso de salida a la nueva terminal

Capa: sub base (pavimento rígido)

	N° PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
	7,5
	12,5
	13,25
	12,25
	10,25
Media	11,15
Mediana	12,25
D. estándar	2,322
Varianza	5,394
Coefficiente de variación	0,208

	PORCENTAJE DE VACIOS VALORES MEDIOS
	4,47
	4,59
	4,44
	4,66
	4,65
Media	4,565
Mediana	4,594
D. estándar	0,101
Varianza	0,010
Coefficiente de variación	0,022

Fuente: Elaboración propia

3.7. MANUAL GUÍA DE UTILIZACIÓN DEL TOMOGRAFO EN EL ESTUDIO DE CAPAS GRANULARES DE PAVIMENTOS

3.7.1. OBJETIVO

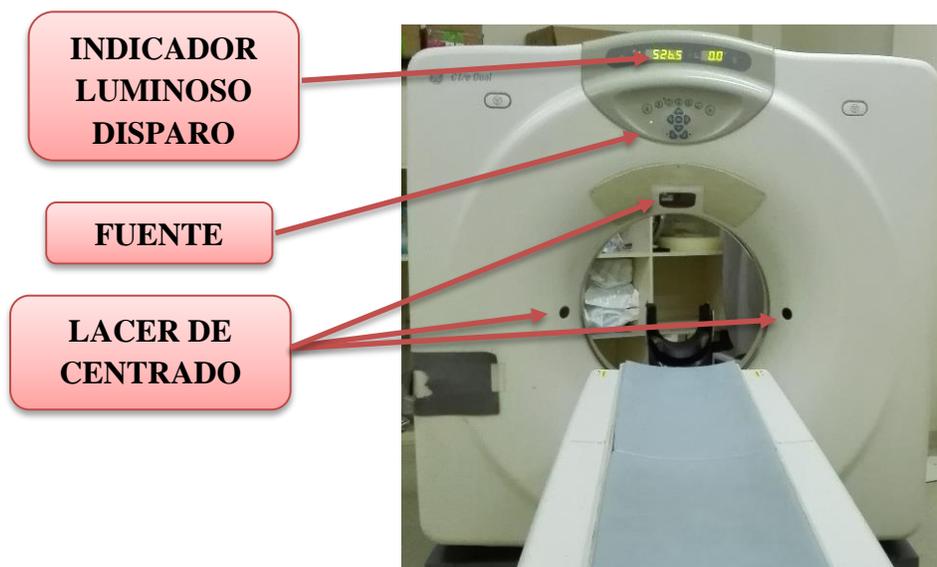
El objetivo del programa Weasis v2.0.4 es poder conocer el contacto agregado-agregado y el porcentaje de vacíos a través de las tomografías por rayos x, analizando cada una de las imágenes de cada muestra.

3.7.2. TIPO DE MUESTRA ANTES DE LLEVAR AL TOMOGRAFO

Las muestras que se llevaran al tomógrafo serán muestras realizadas en moldes de CBR de material granular, de 11 cm de altura y 6 pulgadas de diámetro (152,4 mm). Compactadas en cinco capas cada una con 56 golpes.

3.7.3. TIPO DE TOMOGRAFO

El tomógrafo que se utilizo es un tomógrafo General Electric CT/e Dual, de imagen multiplanar de tipo (Axial, Sagital, Coronal), de 4ta generación, multiforme con contraste, cortes desde los 0,5 mm, barrido de imágenes 360° arco de distribución.



- Tubo de 2.0 MHU.
- 1.5 seg. Velocidad scan.

- Detector hilight.
- Denta Scan, 3D (opcional).
- 1, 2, 3, 5, 10 mm. Slice tickness.

3.7.4. CUIDADOS QUE SE DEBE TENER AL MOMENTO DE REALIZAR LA TOMOGRAFÍA

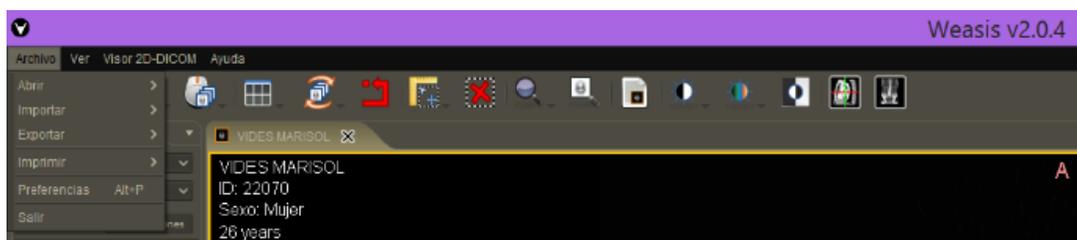
- La muestra no debe sufrir ningún cambio en su volumen o fisuración.
- Colocar la muestra en el tomógrafo cuidadosamente.
- La muestra deberá quedarse completamente inmóvil.
- Después de colocar la muestra retirarse para no entorpecer el proceso tomográfico.
- Después de haberse realizado la tomografía se deberá tener mucho cuidado en el momento del manejo del programa Weasis v2.0.4. ya que este es sensible ante su manipuleo.

3.7.5. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

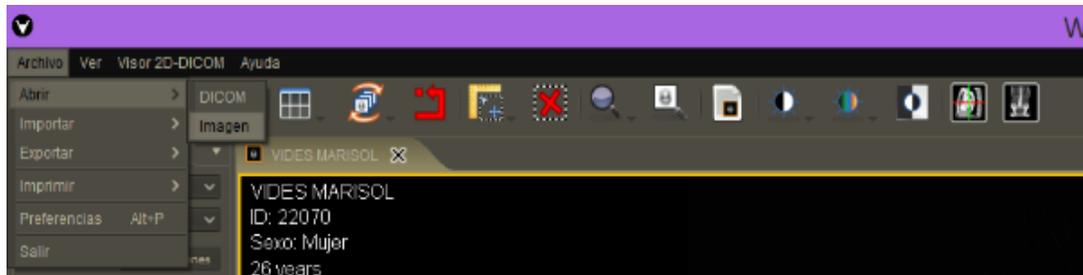
El programa Weasis v2.0.4 realiza la captación de imágenes transversales las cuales interpreta a través de su densidad y escala de grises, es decir al agregado por tener mayor densidad le da un color gris más claro y un color más oscuro o negro a los vacíos existentes en cada imagen.

3.7.6. COMANDOS DEL PROGRAMA WEASIS V2.0.4.

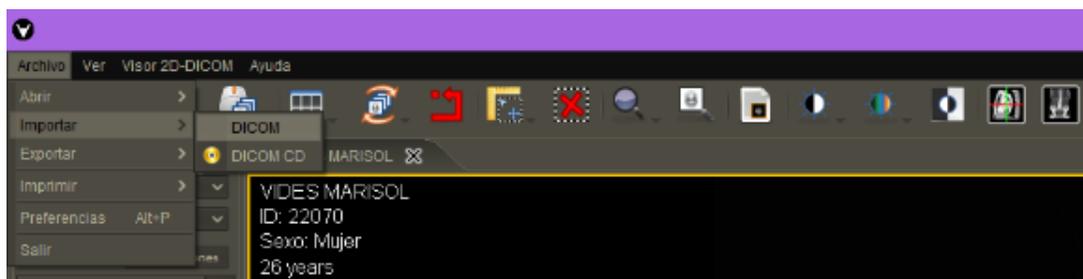
El Menú “ARCHIVO” contiene: abrir, importar, exportar, imprimir, preferencias, salir, dentro de estos contiene lo siguiente:



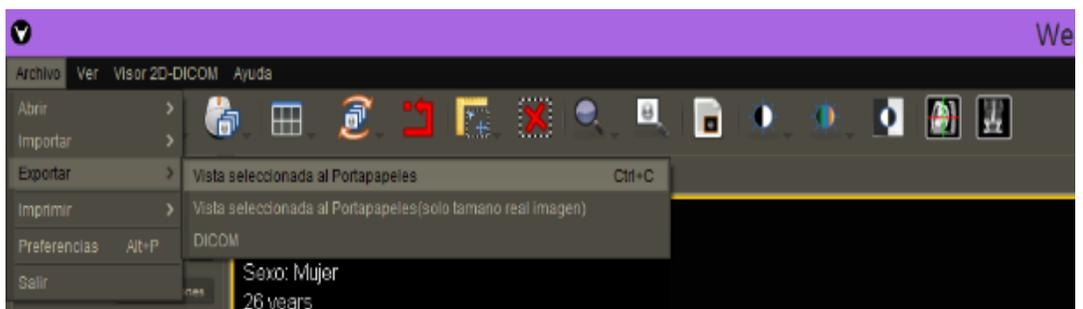
El Menú “ABRIR” contiene DISCOM, Imagen, sirve para ingresar a las imágenes de la tomografía.



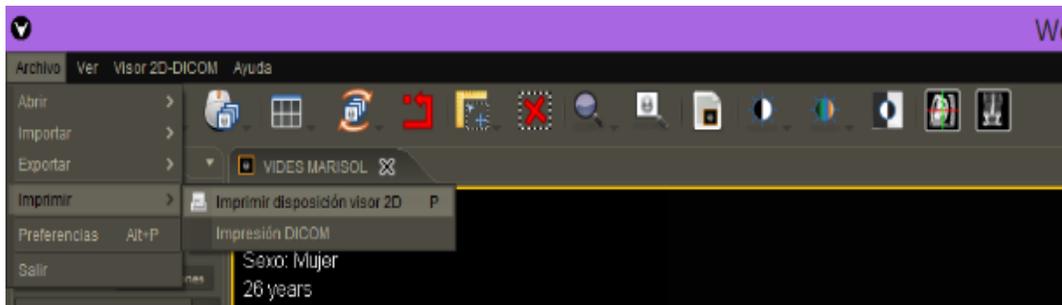
El Menú “IMPORTAR” contiene DISCOM, DISCOM CD, extrae la imagen de la tomografía.



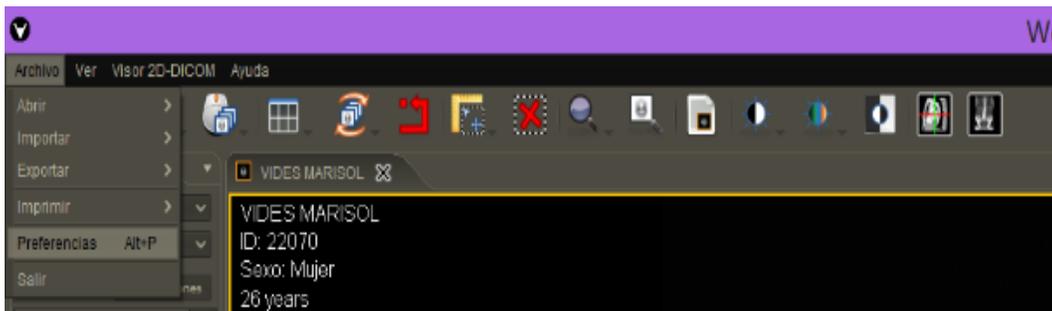
El Menú “EXPORTAR” contiene vista seleccionada al portapapeles, vista seleccionada ala portapapeles (solo tamaño real imagen), DISCOM., se puede exportar las imágenes a otro software.



El Menú “IMPRIMIR” contiene Imprimir disposición visor 2D, imprime las imágenes tomográficas.

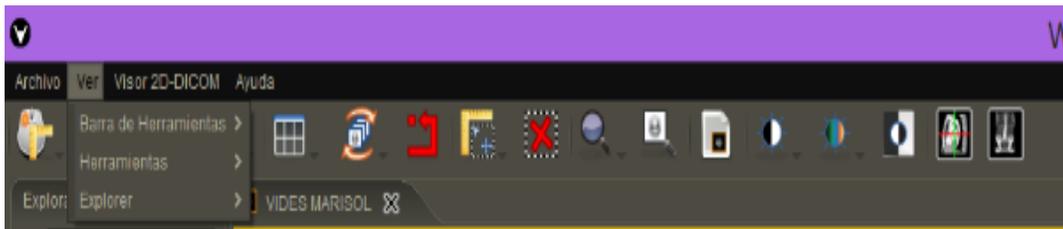


El Menú “PREFERENCIAS Y SALIR”

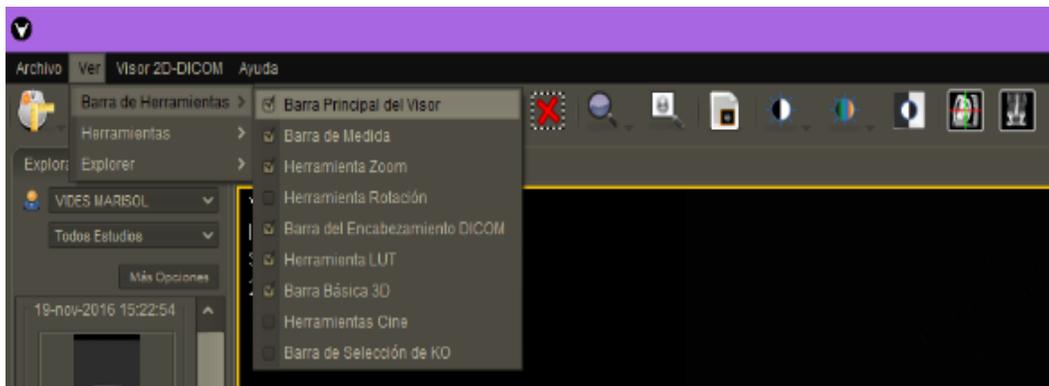


El Menú “VER” contiene barra de herramientas, herramientas, Explorer.

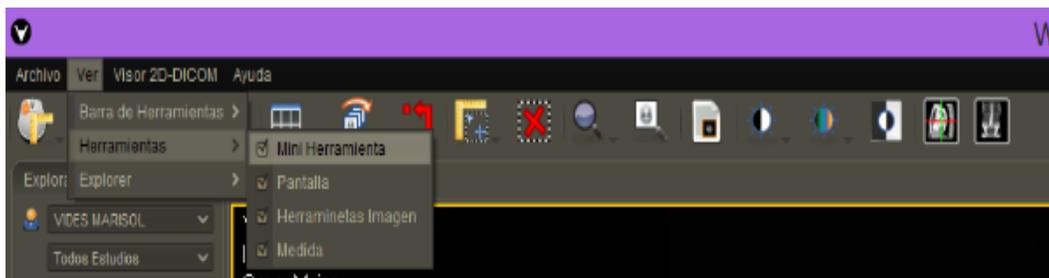
Este menú selecciona las barras de herramientas a utilizar en el Weasis V2.0.4.



El Menú “BARRA DE HERRAMIENTAS” contiene Barra principal del visor, barra de medida, barra de rotación, barra de encabezamiento DISCOM, herramientas LUP, barra básica 3D, herramientas cine, barra de selección de KO.



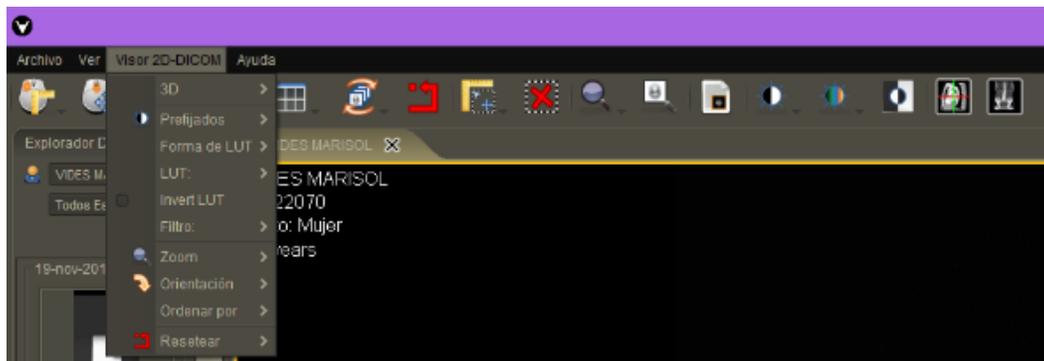
El Menú “HERRAMIENTAS” contiene mini herramientas, pantalla, herramientas imagen, son las serán utilizadas en la selección de pixeles.



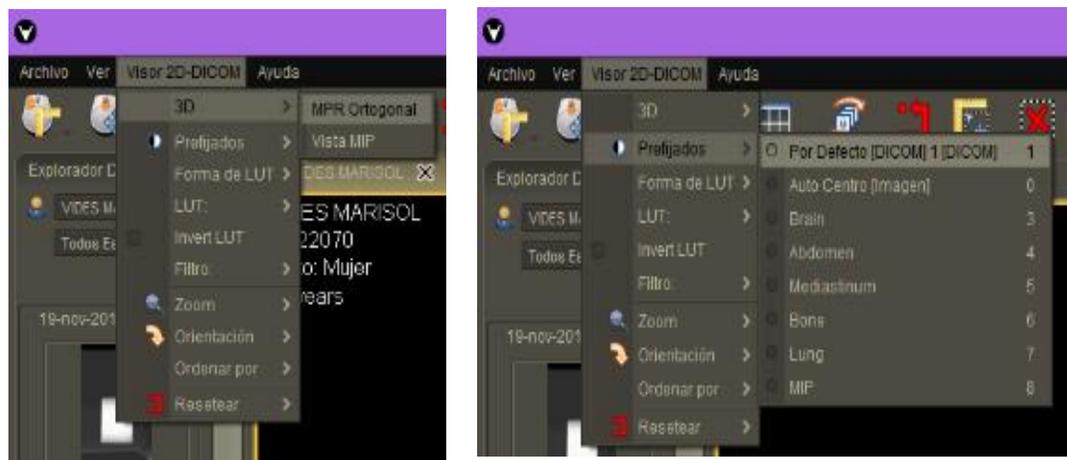
El Menú “EXPLORER” contiene explorador DISCOM, permite mostrar toda la pantalla.



El Menú “VISOR 2D-DICOM” contiene 3D, prefijados, forma de LUT, LUT, invertir lut, filtro, zoom, orientación, ordenar por, resetear, con este menú se puede cambiar a escala de grises, cambiar tamaños de imagen.

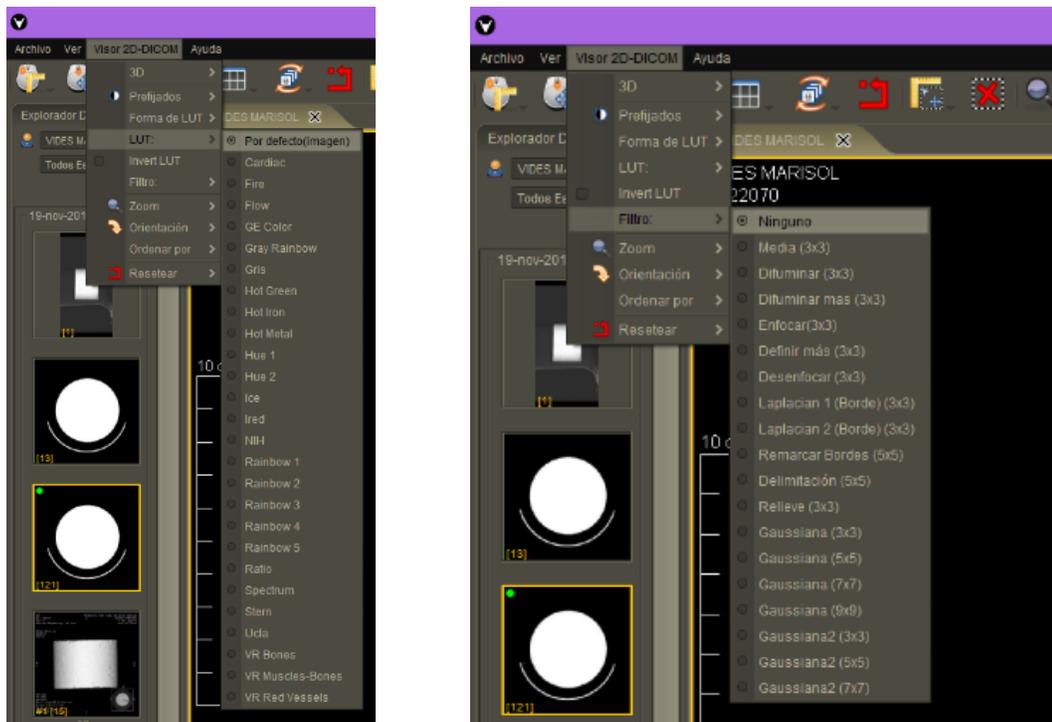


El Menú “3D” contiene MPR ortogonal, vista MIP y el MENU “PREFIJOS” contiene por defecto (DISCOM), auto centro (imagen), brain, abdomen, mediastinum, bone, lung, MIP, todos estos prefijos sirven para cambiar de contraste a la imagen.



El Menú “LUT” contiene los efectos y colores que se pueden dar a la imagen para poder observarla mejor.

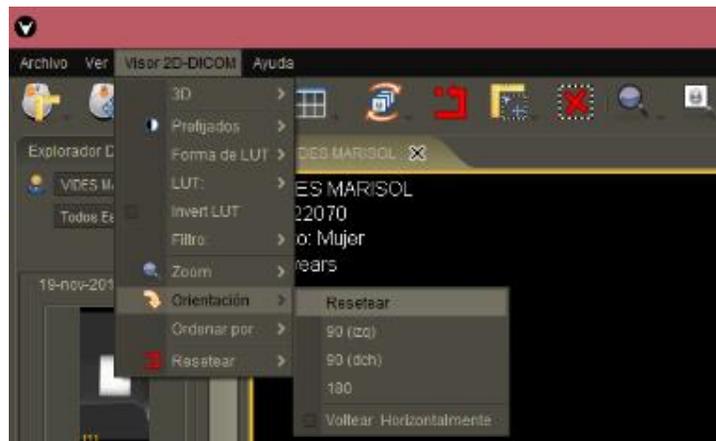
El Menú “FILTRO” contiene los tipos de textura que se puede dar a la imagen.



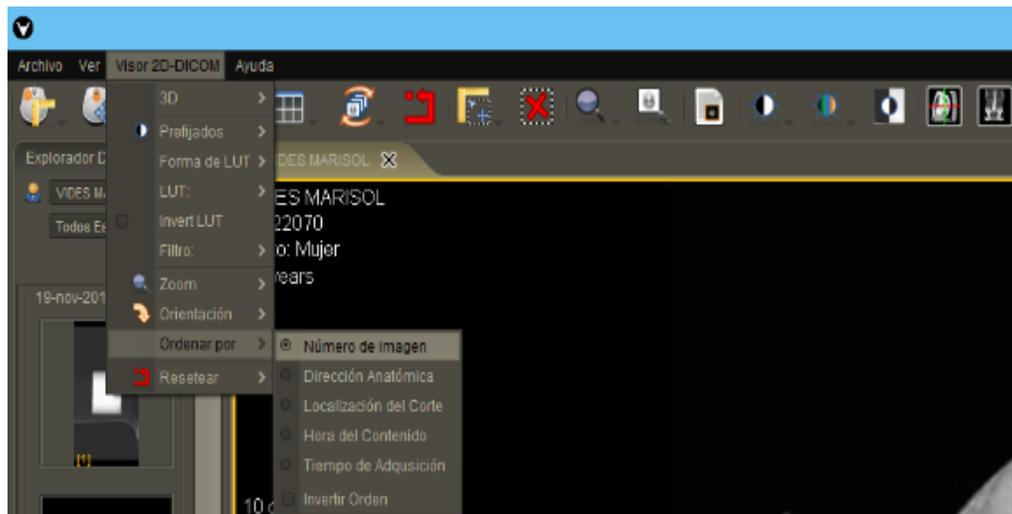
El Menú “ZOOM” contiene tamaño real del pixel, ajustar al tamaño óptimo, este menú nos da las opciones para agrandar o reducir la imagen.



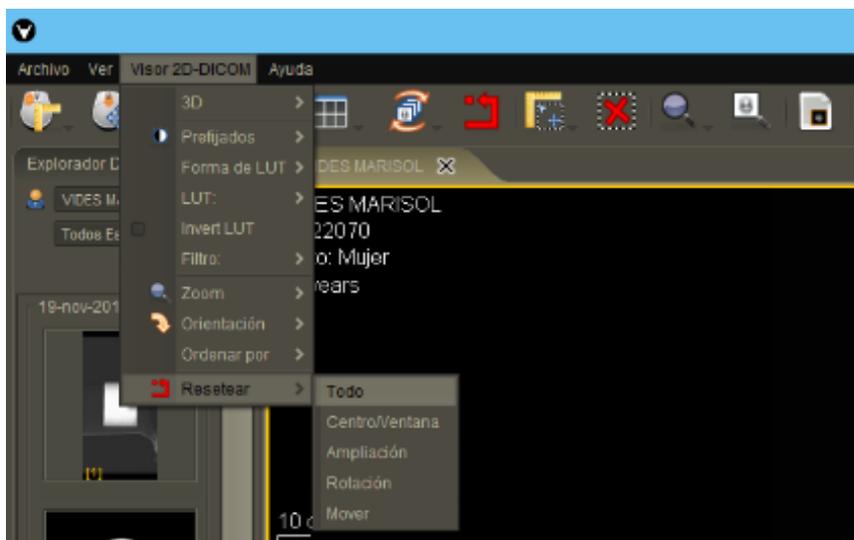
El Menú “ORIENTACIÓN” contiene resetear, 90 (Izquierda), 90 (derecha), 180, se refiere a la orientación de la imagen, voltear de un lado a otro



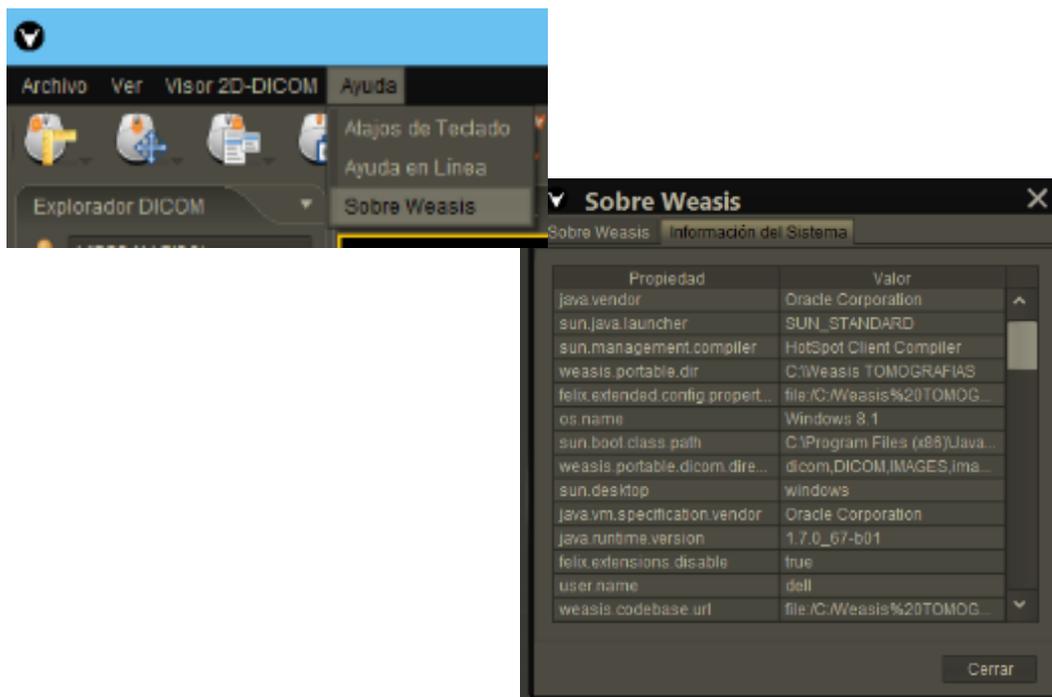
El Menú “ORDENAR POR” contiene número de imagen, dirección anatómica, localización del corte, hora del contenido, tiempo de adquisición, invertir orden, en este menú nos muestra datos que se mostraran en la tomografía como ser el tipo de corte q se izó y en qué hora se realizó para ser imprimida



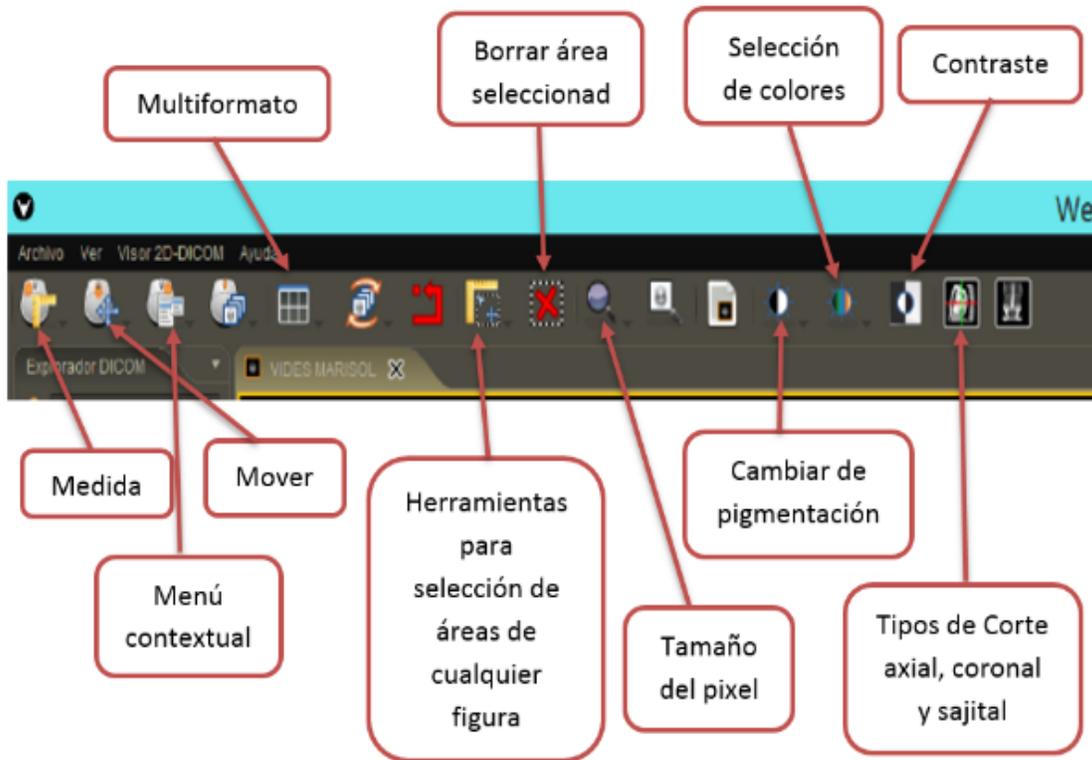
El Menú “RESETEAR” contiene todo, centro/ventana, ampliación, rotación, mover.



El Menú “AYUDA” contiene atajos del teclado, ayuda en línea, sobre weasis, contiene información acerca del programa.

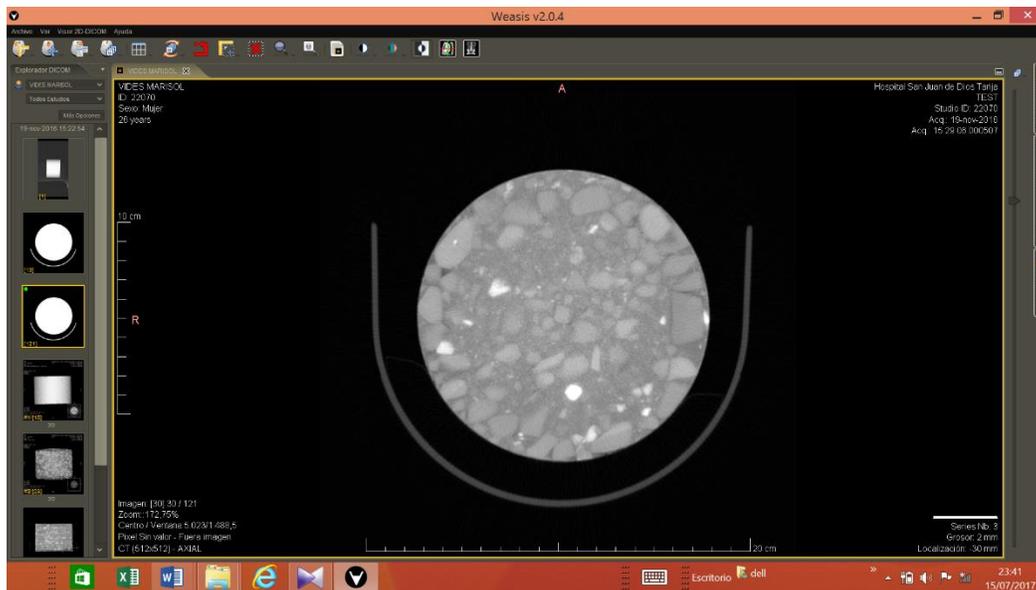


BARRA DE HERRAMIENTAS

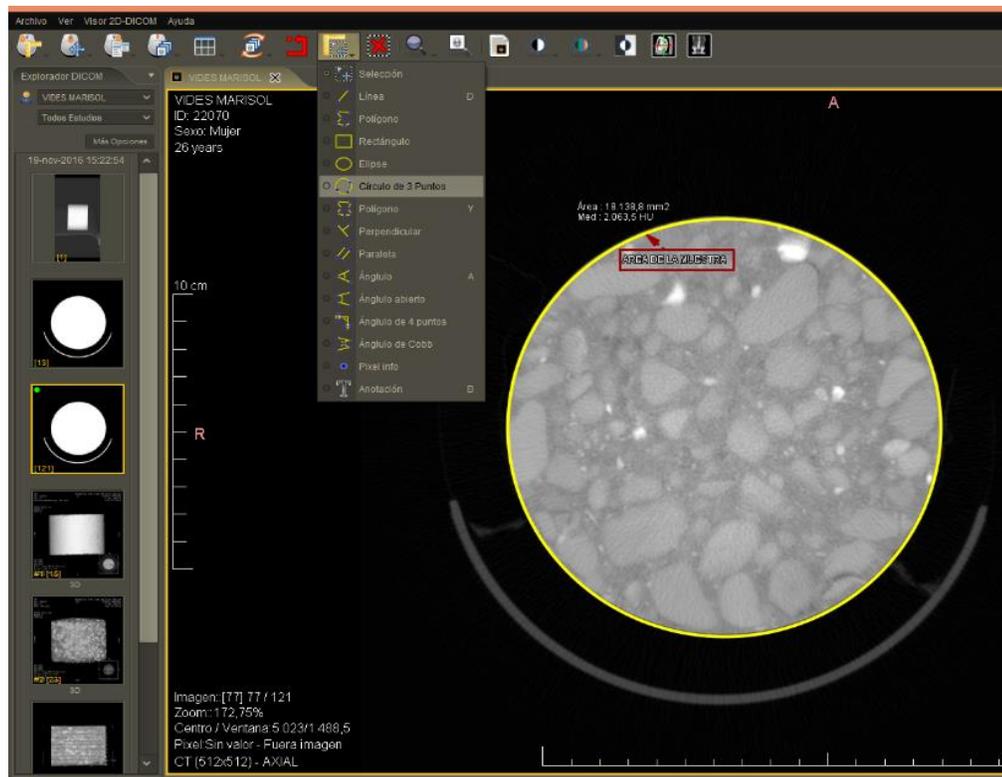


3.7.7. PROCEDIMIENTO

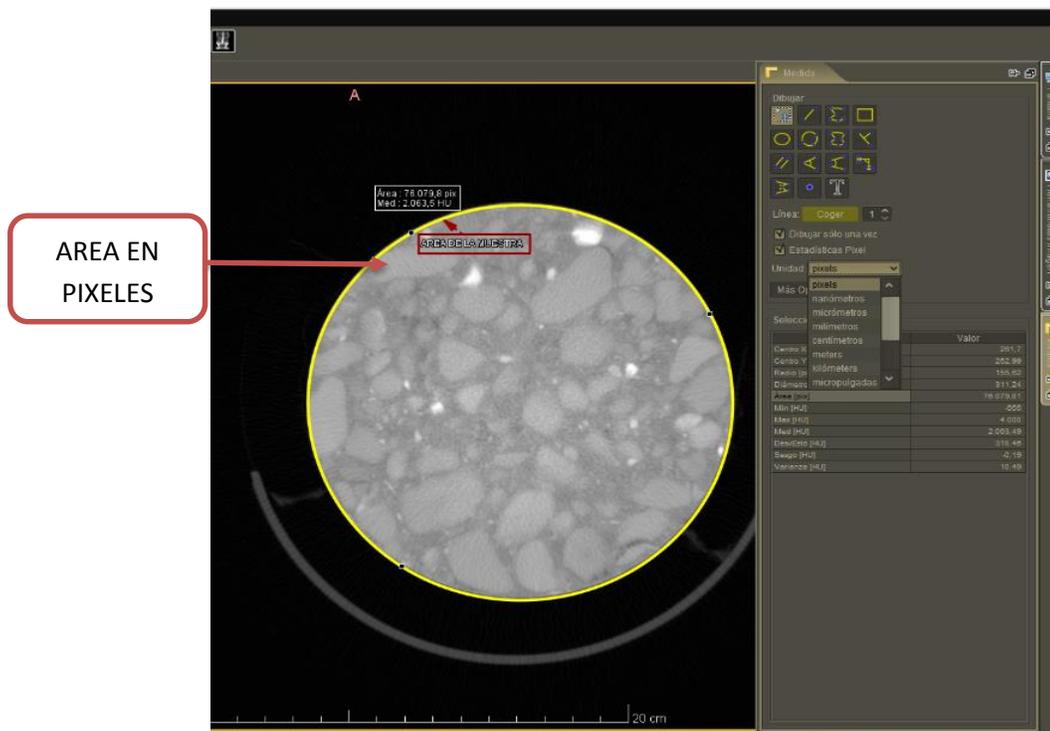
1. Una vez que se elaboró las muestras en los moldes de CBR, de las capas granulares se las lleva al tomógrafo.
2. Se realiza el proceso tomográfico a las muestras de las capas granulares.
3. Obtención de las imágenes de cada muestra en el programa Weasis v2.0.4.
4. Se obtuvo 4 imágenes de cada muestra, cada imagen con 2,5 cm de corte transversal.



5. Medir el área de cada imagen de la muestra, este programa se parece a un programa de AutoCAD, se va la herramienta de medir y se selecciona la opción círculo de tres puntos y automáticamente el programa nos muestra el área en mm² de la imagen.



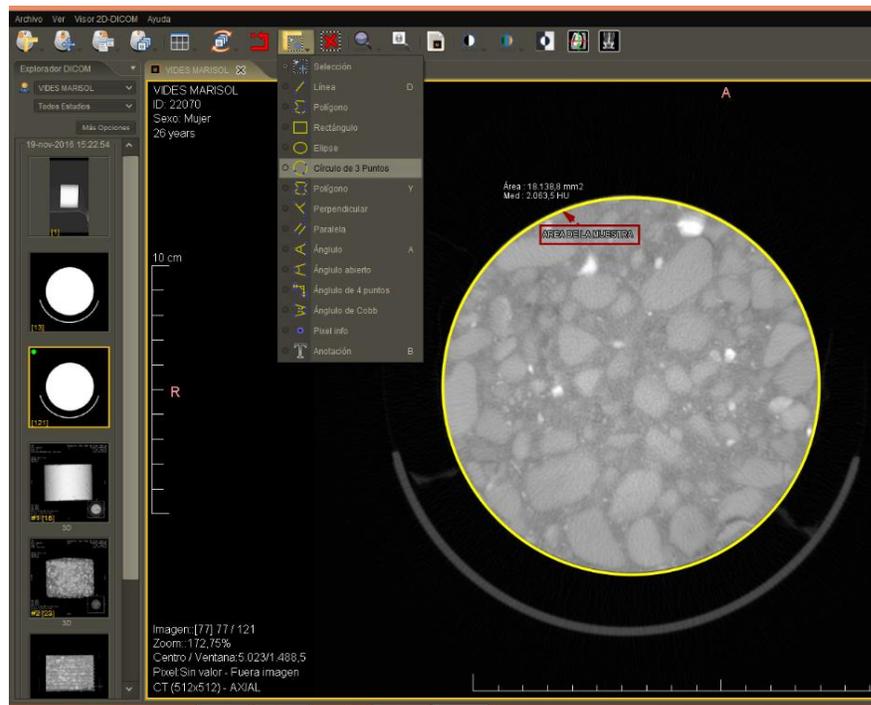
6. Si deseamos obtener el número de píxeles totales de la imagen se entra a la barra de medida que se encuentra a la derecha, buscamos la opción unidades y cambiamos de mm² a píxeles, el programa Weasis v.2.0.4. nos da el número de píxeles totales.



- Se procede a realiza el conteo de contacto agregado-agregado de forma manual en cada una de las imágenes. Tomando en cuenta todos los agregados que están en contacto ya sea entre dos agregados o más, como se muestra en la imagen.

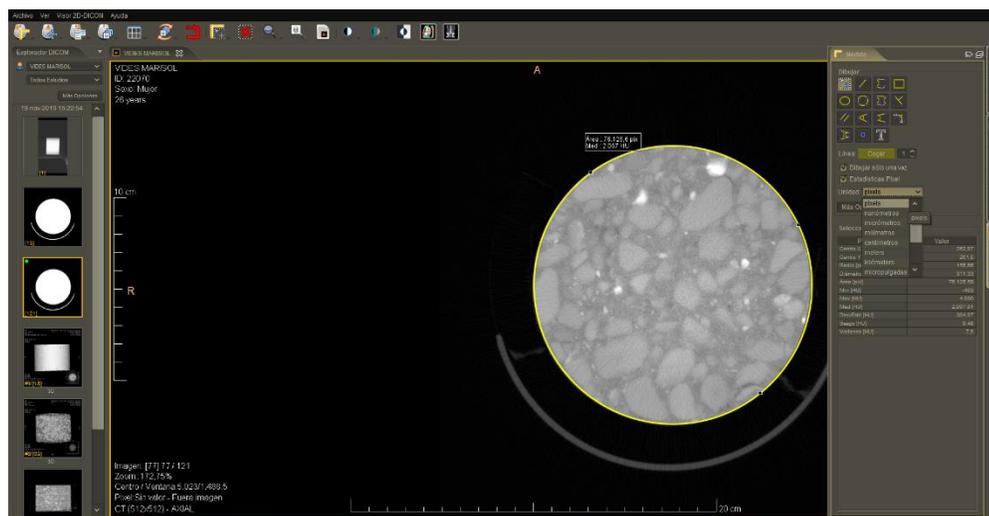


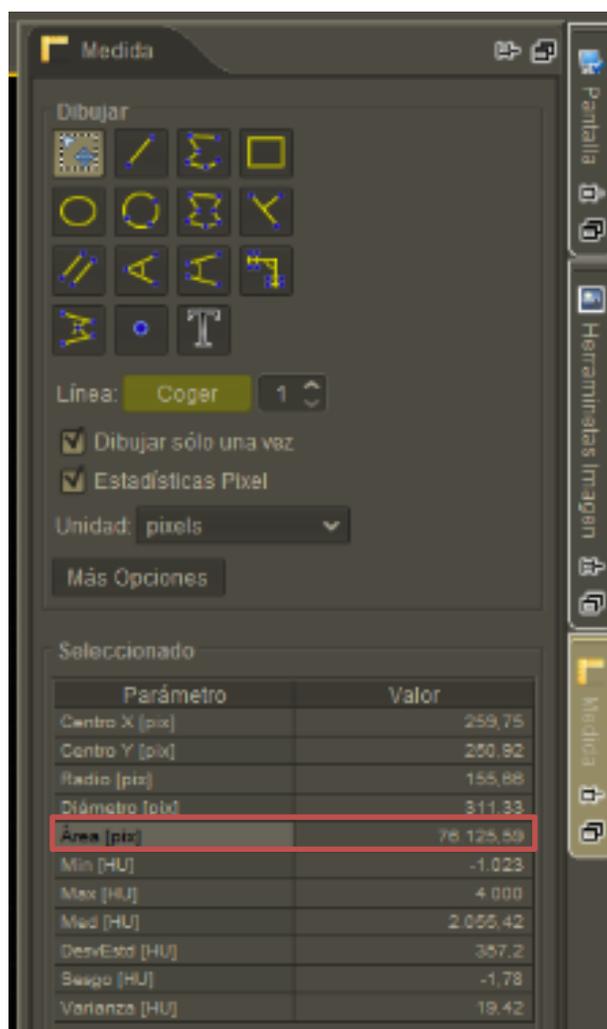
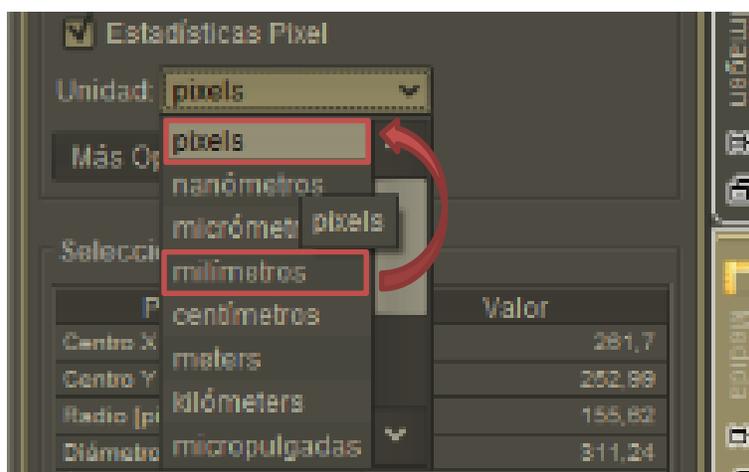
- De esta manera se obtiene el contacto agregado-agregado de cada imagen en cada muestra, promediándolas obteniendo un valor para cada muestra.
- Para el cálculo de porcentaje de vacíos primeramente se saca el are del programa weasis v2.0.40. utilizamos el área que calculaos anteriormente de cada muestra, ya que será la misma área en cada imagen de cada muestra.



10. Calculo del número de pixeles totales se obtiene cambiando en el programa Weasis v2.0.4. el área ya medida en mm2, cambiamos la unidad en pixeles y el programa nos da el área en pixeles totales.

De otra manera también se puede obtener el número de pixeles totales es, dividiendo el área total en mm2 entre el área de un pixel que es 0,1253 pixeles y nos da como resultado el número de pixeles totales





11. Cálculo del número de píxeles llenos del programa Weasis v2.0.4. se obtiene midiendo cada uno de los agregados que se pueden observar en la imagen de cada muestra.

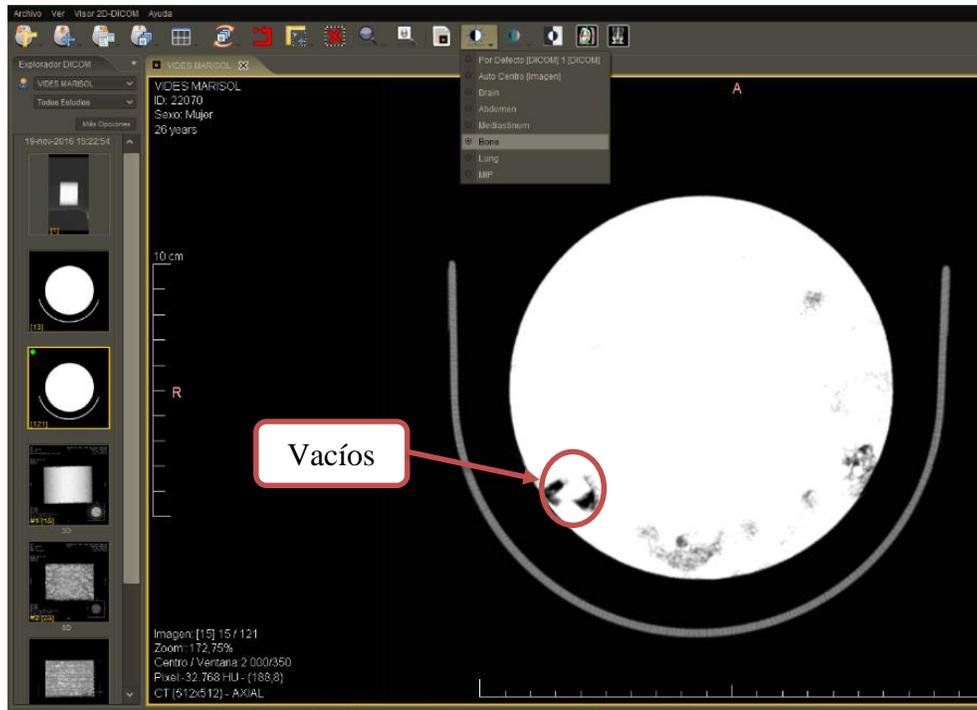


12. Posteriormente el programa Weasis v2.0.4. suma toda el área marcada, esto quiere decir el número de píxeles llenos de la imagen. También se puede realizar lo mismo de otra manera sumando manualmente todas las áreas marcadas en el programa y llegamos al mismo resultado.



13. Y el número de píxeles vacíos lo calculamos del número de píxeles totales menos el número de píxeles llenos tendremos como resultado el número de píxeles vacíos.

14. Cambiando a escala de grises se pueden observar de mejor manera el porcentaje de vacíos, ya que lo de color negro muestra los vacíos.



15. Por último para obtener el porcentaje de vacíos de cada muestra se realiza mediante la fórmula, dividiendo el número de píxeles vacíos entre el número de píxeles totales todo esto por cien, este resultado nos da en porcentaje (%).

$$\% \text{ VACIOS} = \frac{N^{\circ} \text{ de píxeles vacíos}}{N \text{ de píxeles totales}} * 100$$

16. Este resultado nos tiene que dar valores entre (3 – 5) % según norma ABC.

17. Se hace el mismo procedimiento para cada imagen de las muestras promediando estos valores para obtener un solo resultado por muestra.

CAPITULO IV

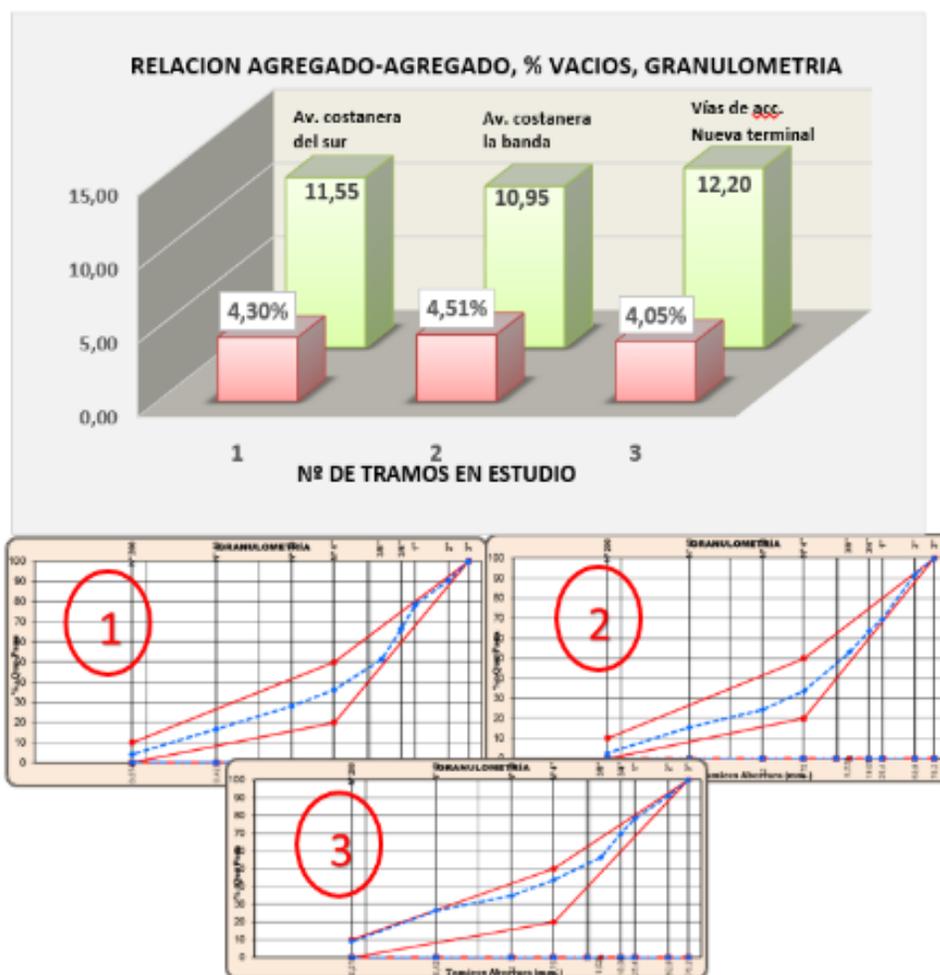
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.CONCLUSIONES

- Se completó de manera positiva el objetivo general demostrando que a través de la técnica de las tomografías se puede observar y visualizar al interior de cada estructura de las capas granulares para poder ver la distribución interna de los agregados como muestran las imágenes, en unas está mejor distribuidos los agregados por lo tanto menor vacíos y en otras presenta mayor porcentaje de vacíos debido al acomodo de las partículas.
- Se ha podido observar en las gráficas de contacto agregado-agregado la variación de resultados entre capas, tanto para la base y sub base, esto debido a las especificaciones de cada proyecto, obteniendo resultados de 7 como mínimo esto quiere decir que la mayor parte del material está constituido con una granulometría más fino con gravas y arenas, y valores de 14,25 como máximo presentando una granulometría de bien graduada con un menor contenido de vacíos.
- Los resultados de porcentaje de vacíos de los tramo en estudio, presentan un valor mínimo de 4,32 % significa que el suelo está bien compactado reduciendo el aire atrapado en la capa granular y un máximo de 4,88 %, ya que las muestras fueron realizados con el mismo material y especificaciones requeridas de cada proyecto, estos resultados nos indica que las capas se encuentran en un buen estado en cuanto se refiere a contenido de vacíos en su interior, por lo tanto es menos probable que estas capas granulares sufre hundimientos o deterioros en su vida útil a temprana edad.
- Se verifica que los valores de porcentaje de vacíos en las capas granulares efectivamente se encuentran entre (3 y 5) % como la norma ABC así lo exige, también cabe recalcar que estas muestras fueron realizados en condiciones prácticamente ideales.

- Si el porcentaje de vacíos no alcanza el valor mínimo del 3 %, esto quiere decir que las capas granulares podrían sufrir ahuellamientos o exudación, esto debido a que las cargas del tránsito deforman la estructura del pavimento.
- En el caso que el porcentaje de vacíos excede el 5% esto indica que la muestra es porosa y propensa a sufrir hundimientos, por lo tanto mala para la carretera, y se deberá realizar una elección mejor de agregados y compactación.
- Se puede observar que la relación entre el contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos con la granulometría de las capas granulares de los tramos en estudio están relacionadas entre sí. Donde la avenida costanera la banda presenta una granulometría con menor presencia de finos y un contacto de agregado-agregado de 10.95, y con un porcentaje de vacíos mayor de 4,51%, y lo contrario sucede en las vías de acceso a la nueva terminal, estos valores nos indican que a mayor contacto de agregado menor el porcentaje de vacíos.

Grafica 4.1. Relación entre contacto agregado-agregado, porcentaje de vacíos y granulometría de las capas sub bases de los tramos en estudio.



Fuente: Elaboración propia

- Der la misma manera para la capa base la relación entre agregado-agregado y porcentaje de vacíos, está estrechamente relacionadas con la granulometría de cada material utilizado en los proyectos en estudio. Como se puede observar en la avenida costanera del sur tiene una granulometría con poca presencia de finos, evidenciando mayor porcentaje de vacío de 4,41% y menor contacto agregado-agregado de 9,5, todo lo contrario con la avenida costanera de la banda que presenta un contacto de agregado de 12,30 y un porcentaje de vacíos menor de 4,15%.

- Para mayor entendimiento del programa Weasis v. 2.0.4 se procedió a realizar un manual guía de utilización del tomógrafo en el estudio de las capas granulares.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un control de un proyecto desde su inicio para analizar la variación en su interior con respecto al tiempo en el uso de la vía.
- Se recomienda que la muestra no sufra ningún cambio o ruptura antes de que se realice el proceso tomográfico.
- Se recomienda tener mucho cuidado al momento de manejar el programa v2.0.4. ya que es demasiado sensible para su manipuleo.
- Se recomienda aplicar esta nueva técnica de las tomografías por rayos-x, ya que no existe otro método para poder visualizar en el interior de las capas granulares.
- Se recomienda la aplicación de esta metodología por el grado de confianza de los datos obtenidos, haciendo uso del avance tecnológico.