

# **INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE AGITACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS SOBRE SUS PROPIEDADES**

## **CAPITULO 1.-**

### **1.1.- Introducción.**

Una mezcla asfáltica en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el rendimiento de la misma como mezcla terminada para un determinado uso. La mezcla asfáltica debe ser duradera, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, etc. Debe ser resistente a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad. Una mezcla debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno. Cada una de estas y otras propiedades deseables de las mezclas asfálticas. Estas mezclas asfálticas pueden ser confeccionadas en plantas y con los equipos apropiados para esta labor. Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento.

El Asfalto es un material de color marrón oscuro a negro, cementante, termoplástico encontrado en un estado natural o fabricado en refinerías de petróleo por procesos de destilación atmosférica o vacío. El asfalto es sólido o altamente viscoso a temperatura ambiente. Es un material extremadamente complejo que contiene una gran cadena de componentes orgánicos de alto peso molecular.

El Asfalto de Penetración, también llamado Cemento Asfáltico, es el material por excelencia para la pavimentación, en virtud de sus propiedades y características. Es un material altamente cementante, termoplástico, repelente del agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales.

Considerando que el concreto asfáltico es el más apropiado para vías de tránsito intenso, se hará especial énfasis a este tipo de mezcla. Un pavimento de concreto asfáltico debe cumplir los siguientes objetivos principales:

- a)** Suficiente estabilidad en la mezcla como para satisfacer las exigencias del servicio y las demandas del tránsito sin distorsiones o desplazamientos.
- b)** Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable, que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.
- c)** Suficiente trabajabilidad como para permitir una eficiente operación constructiva en la elaboración de la mezcla con que se procederá a la pavimentación.
- d)** Suficientes vacíos en la mezcla compactada, para proveer una reserva que impida, al producirse una pequeña compactación adicional bajo las cargas del tránsito, afloramientos de asfalto y pérdidas de estabilidad.

Las proporciones de agregados y asfalto en la mezcla, deben seleccionarse de manera que esta cumpla, tanto los requisitos de gradación dados por las especificaciones, como los de calidad de la mezcla exigidos por los procedimientos corrientes del diseño. Además, la mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. Generalmente no es posible fijar la fórmula de trabajo hasta que haya comenzado la producción, por cuanto los materiales que pasan por la planta no son idénticos a las mezclas utilizadas en el laboratorio. La manufactura de las mezclas se hace en plantas especiales a altas temperaturas y con sistemas de control muy precisos que permiten asegurar la correcta dosificación de los materiales.

Su colocación en obra se hace por medio de máquinas terminadoras, construídas para tal efecto y la compactación posterior debe ser suficiente para alcanzar las densidades y estabilidades exigidas.

Un pavimento asfáltico del tipo de mezcla en caliente, el asfalto está en forma de películas muy delgadas que se han obtenido mediante la aplicación de calor.

Por consiguiente, las propiedades del asfalto en película delgada podrían ser diferentes de aquellas del producto a granel, y además podrían alterarse con la aplicación del calor. También debe tenerse en cuenta que el asfalto es sólo uno de los componentes del pavimento. Él cumplirá apropiadamente sus funciones solamente si se emplea en la cantidad correcta, con un agregado mineral adecuado, y bajo condiciones apropiadas.

Otro punto que se debe tener mucho en cuenta es la INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE AGITACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS, ya que a la hora de mezclar los agregados seleccionados con el asfalto a temperaturas adecuadas para su correcta adherencia del asfalto con los agregados, es necesario cierta agitación de la mezcla para poder llegar a una mezcla homogénea para su uso determinado.

El proceso de agitación para la miscibilidad del asfalto con el agregado mineral, por lo general se desarrolla empleando agitadores de acción forzada a temperaturas elevadas.

Esta agitación dependerá, en planta del tipo de maquinaria con la que se realiza el mezclado para llegar a la mezcla asfáltica.

En laboratorio dependerá de la temperatura, cantidad de movimiento y fuerza que realice el laboratorista a la hora de realizar el mezclado para poder realizar los diferentes ensayos que se requiera, llegando así ser de suma importancia la influencia de la agitación a la hora del mezclado.

Esta influencia de agitación que llevará a cabo el recubrimiento del asfalto en los agregados dándonos una masa homogénea para desarrollar diferentes ensayos.

La agitación de las mezclas dependiendo de las variables tiempo, fuerza, tipo de agitación influirán sobre las propiedades de las mezclas asfálticas.

## **1.2.-Planteamiento del Problema.**

### **1.2.1.- Situación Problema.**

El problema puntual, es que el trabajo de producir mezclas asfálticas en laboratorio y en planta tiene como uno de sus agentes importantes la agitación que en nuestro medio es poco analizado y probablemente este aspecto pueda influir en algunas propiedades de la mezcla asfáltica.

Las diferentes maneras de mezclar con las variables fuerza, tiempo y tipo de movimiento nos hacen tener una incógnita, de que la mezcla asfáltica podrá tener diferentes propiedades, a la hora de realizar la mezcla dos variables ya mencionadas se presentan en el desarrollo de una mezcla teniendo diferentes maneras y diferentes fuerzas aplicadas por maquinaria en el caso de una planta y por el laboratorista en el caso de realizar diferentes ensayos con una mezcla asfáltica.

La falta de diferentes métodos para la realización de una mezcla asfáltica nos da una idea de la necesidad de tener los parámetros de agitación establecidos al realizar una mezcla para poder esta llevarla a diferentes ensayos.

Al realizar una mezcla asfáltica un objetivo inicial es conseguir una homogeneidad de la misma, para ello la agitación es un aspecto preponderante que puede influir en su obtención y lograr que la mezcla tenga una trabajabilidad deseada.

### **1.2.2.- Problema.**

¿Cuáles son los efectos, la incidencia que tiene la variable agitación en las propiedades de resistencia y fluencia en las mezclas asfálticas?

## **1.3.-Justificación.**

En la presente investigación, se pretende verificar la influencia de la agitación que se tiene al producir una mezcla asfáltica sobre sus propiedades.

Al ser la agitación un paso esencial para miscibilidad del asfalto con los agregados minerales, es que se debe tener mucho cuidado con las variables tiempo, temperatura y tipo de movimiento, a la hora de desarrollar una mezcla, es por este motivo que se busca la manera más adecuada de poder alcanzar las mejores propiedades de una mezcla asfáltica con la optimización de las variables de la agitación.

Siendo la agitación una variable importante a la hora de realizar una mezcla asfáltica, es que se debe estudiar muy celosamente esta variable, ya que en esta investigación se verificará de cómo y cuánto afecta a una mezcla asfáltica respecto a la agitación en sus componentes Tiempo, temperatura y tipo de movimiento en sus velocidades medidas en revoluciones.

Esta investigación nos podrá proporcionar una información muy veraz de la mejor manera de obtener una mezcla asfáltica, poniéndonos en conocimiento las formas de mezclado que pueden existir o se puedan concluir con dicha investigación.

Las prácticas que serán realizadas en el laboratorio de asfaltos, de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, darán una veracidad a los resultados dando así un aporte a este laboratorio y sus usuarios, ya que una mezcla asfáltica en este laboratorio es de mucha importancia.

Se pretende resolver la poca información que existe sobre la agitación a la hora de realizar una mezcla asfáltica, ya que no existe información sobre la buena realización de dicha mezcla en un laboratorio, ni un indicativo de cómo realizar esta mezcla asfáltica en concepto de tiempo, temperatura y velocidades.

La realización de diferentes mezclas, se aplicará a diferentes asfaltos de los que se cuentan en nuestros medios.

Los resultados podrán ser de mucho interés de los estudiantes para poder a futuro tener una información veraz para realizar mezclas asfálticas, como también para Ingenieros que realizan distintas mezclas, dando un apoyo importante para poder realizar dichas mezclas.

Siendo un trabajo inédito será de mucho interés, para la sociedad ingenieril ya que se pretende establecer indicadores sobre la agitación, que puedan tomar en cuenta los constructores de estructuras asfálticas.

## **1.4.-Objetivos.-**

### **1.4.1.-Objetivo General.-**

Analizar en el laboratorio la influencia del proceso de agitación de las mezclas asfálticas en las propiedades y características de las mismas, de tal manera que se puede establecer una referencia o especificación técnica para la investigación o fabricación de mezclas asfálticas.

### **1.4.2.-Objetivos Específicos.-**

- Estudiar los aspectos generales sobre las mezclas asfálticas.
- Obtener muestras de agregados y cementos asfálticos.
- Caracterizar los materiales pétreos.
- Realizar mezclas asfálticas y evaluar bajo diferentes procesos de qué manera influye la agitación en las propiedades y características de cada mezcla.
- Hacer probetas de asfaltos para analizar su comportamiento.
- Determinar la influencia de la agitación en las características de una mezcla asfáltica.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones, de acuerdo a la investigación obtenida.

## **1.5.-Hipótesis.**

Si se hace variar la agitación con indicador tiempo, temperatura y velocidad medido en rev/min, en el proceso de mezclado de las mezclas asfálticas, entonces se podrá observar que las propiedades Fluencia y Estabilidad varían según las condiciones analizadas al principio.

## **1.6.- Metodología y Medios.**

### **1.6.1.-Unidad de Estudio.-**

La unidad de estudio de la presente investigación es la mezcla asfáltica caliente.

### **1.6.2.-Población.-**

Esta investigación tiene una población de estudio comprendida en Viscosidad, Penetración, Punto de inflamación, Ensayo Ductilidad, Solubilidad, Destilación y Contenido de Agua, Estabilidad y fluencia.

### **1.6.3.- Muestra.-**

La muestra de esta investigación está comprendida de la Estabilidad y la Fluencia, que tendrán incidencia en la interpretación de los resultados.

### **1.6.4.- Métodos para Variar la Agitación.-**

- Tiempo:

Para realizar este método propuesto se hará variar el tiempo de agitación de una mezcla asfáltica, la cual será controlada con un cronómetro para tener intervalos de cinco minutos, teniendo así mezclas asfálticas con agitaciones distintas por intervalos de tiempos distintos.

- Diferente Procedimiento:

Para realizar este método se tomará en cuenta las revoluciones por minuto tomando en cuenta que no se debe tener revoluciones altas ya que harían de que la mezcla se salga de su recipiente de mezclado por la velocidad ejercida, para esto se tomará tres magnitudes de 40,50 y 60 rev/min, manteniendo las mezclas en un rango de diez grados para cuidar que la temperatura no sobrepase o disminuya en ese rango, ya que controlar la temperatura en el proceso de la agitación es muy complicado, para esto se obtendrá la cantidad de vueltas en segundos y así con un cronómetro realizar las vueltas necesarias para cumplir con las rev/min acordadas para este procedimiento.

- Por temperatura:

Este procedimiento tiene como característica la temperatura, para realizar este método se realizarán mezclas a distintas temperaturas, para que la agitación se controle hasta la llegada de las temperaturas acordadas para esta investigación, controlando con un termómetro laser se tendrá las agitaciones de una mezcla asfáltica con distintas temperaturas.

Estos tres métodos se realizarán teniendo las cantidades exactas de materiales pétreos, como del asfalto requerido para realizar una mezcla asfáltica con su porcentaje óptimo, estos dos componentes el asfalto y los agregados se calentarán independientemente, el asfalto para adquirir su fluidez óptima para mezclar y los agregados para tener una temperatura para poder mezclarse con el asfalto y alcanzar una adherencia entre estos dos componentes. Estos se mezclarán en un bol común que aguante temperaturas, con una hornalla se le dará calor a este bol más los componentes de la mezcla para que así se empiece con la agitación de la mezcla que con la ayuda de cucharones se agite hasta encontrar la temperatura, las revoluciones y el tiempo para realizar dicha investigación.

## **1.7.-Tratamiento Estadístico de datos.**

Después de recolectar los datos, lo primero a hacer es analizarlos. Esto por lo regular implica calcular la media o promedio, la desviación estándar y el error estándar.

### **1.7.1.-Media o Promedio.**

En matemáticas y estadística, la media aritmética (también llamada promedio o simplemente media) de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Es en esencia el punto de equilibrio de un conjunto de finito de números. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral siendo uno de los principales estadísticos muestrales.

Expresada de forma más intuitiva, podemos decir que la media (aritmética) es la cantidad total de la variable distribuída a partes iguales entre cada observación.

$$u = \frac{\sum X}{N}$$

### **1.7.2.-Desviacion Típica o Estándar.**

La desviación típica o desviación estándar (denotada con el símbolo  $\sigma$  o  $s$ , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos) es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

### **1.7.3.-Error Estándar.**

El error estándar de la media (llamado en inglés "standard error of the mean" (SEM)) cuantifica las oscilaciones de la media muestral (media obtenida en los datos) alrededor de la media poblacional (verdadero valor de la media). El EEM o SEM se estima generalmente dividiendo la desviación estándar de la población entre la raíz cuadrada del tamaño de la muestra (asumiendo independencia estadística de los valores en la muestra):

$$E. \text{ Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

El Error estándar es el término utilizado para referirse a una estimación de la desviación estándar, derivado de una muestra especial utilizada para calcular la estimación en las estadísticas. En la más común, error estándar es un proceso de estimación de la desviación estándar de la distribución de muestreo asociada con el método de estimación.

Cada estadística tiene un error estándar asociado. Una medida de la precisión de la estadística puede deducir que el error estándar de 0 representa que la estadística tiene ningún error aleatorio y el más grande representa menos preciso de las estadísticas.

### **1.8.-Variables.**

Variables Independientes

Variables Dependientes

T° temperatura

t tiempo                   => agitación => Fluencia, Resistencia

v velocidad

#### **1.8.1.-Variables Dependientes.**

Esta investigación tiene dos variables dependientes que son la fluencia y la estabilidad.

#### **1.8.2.-Variables Independientes.**

La variable independiente es la agitación, que comprende la temperatura, velocidad de mezclado medido en rev/min, tiempo de mezclado y la agitación de una mezcla asfáltica que se desarrollará en esta investigación.

### **1.9.-Alcance.-**

El trabajo a desarrollarse es de mucha importancia ya que pone en práctica los conceptos teóricos adquiridos, durante la etapa de estudiante, pretendiendo llegar a los objetivos previstos a través de un proceso de investigación lograda por medio de

laboratorio, la misma que será puesta a evaluación para la emisión de un juicio sobre *la influencia de la agitación en las mezclas asfálticas*.

La investigación que será desarrollada para el cumplimiento de los objetivos previstos, contará con distintos ensayos en laboratorio y abarcará los aspectos siguientes:

- Muestreo y caracterización de los materiales que conforman la mezcla asfáltica, como: áridos y cemento asfáltico.
- Análisis sobre variaciones del tiempo, procedimiento y temperatura, para la constatación de la influencia posible o parcial que tienen éstos aspectos en una mezcla asfáltica.
- Dosificación de los materiales que componen la mezcla asfáltica, para la determinación porcentual de la cantidad adecuada para la obtención de una correcta mezcla asfáltica.
- Realización de probetas de las mezclas realizadas a través de muestras específicas, para la determinación de la influencia de la agitación en una mezcla asfáltica, logrando su evaluación y comportamiento.

Esta investigación está enfocada en el análisis del desarrollo de una mezcla asfáltica, la cual se compara con mezclas desarrolladas con variantes de la agitación por el investigador, pudiendo así determinar la influencia de la agitación en una mezcla asfáltica.

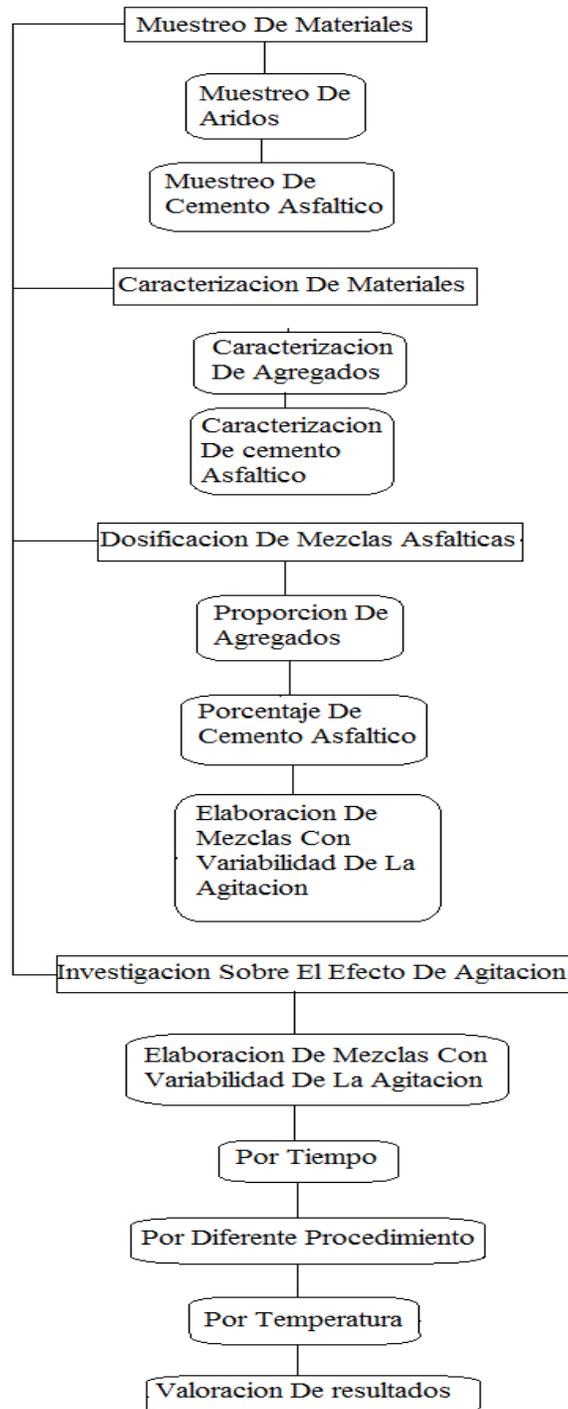
Para lo cual se desarrollará mezclas influenciadas por la agitación en tres campos puntuales tiempo procedimiento y temperatura, pudiendo así llegar a poder concluir si estos afectan a una mezcla asfáltica.

A través del proceso de investigación realizada, teniendo el límite del alcance establecido en los párrafos precedentes, lograremos con los resultados obtenidos la comparación de la producción en planta, para posteriormente dar a conocer los resultados a las diferentes plantas asfálticas del medio, para su aplicación práctica en base al trabajo de investigación realizado.



## 1.10.-Metodología.-

### INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE AGITACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS SOBRE SUS PROPIEDADES



## **CAPITULO 2.-**

### **ASPECTOS GENERALES SOBRE MEZCLAS ASFALTICAS.**

#### **2.1.-Definición.**

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define el asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente, por betunes. El betún según ASTM, es una sustancia ligante (solida, semisólida viscosa) oscura o negra natural o artificial, compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas y asfálticas.

El asfalto es un constituyente del petróleo. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto, y a veces pueden ser casi enteramente asfalto. Existen algunos petróleos crudos, sin embargo que no contienen asfalto. En base a la proporción de asfalto, los petróleos se clasifican por lo común en:

- Petróleos crudos de base asfáltica.
- Petróleos crudos de base parafina (contiene parafina pero no asfalto)
- Petróleos crudos de base mixta (contienen parafina y asfalto)

El petróleo crudo, extraído de los pozos, es separado en sus constituyentes o fracciones en una refinería. Principalmente esta separación es llevada a cabo por destilación. Después de la separación, los constituyentes son refinados más cuidadosamente o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos. De esta manera es como el asfalto, parafina, gasolina, aceites lubricantes y otros productos útiles de alta calidad son el resultado de una refinería de petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado.

Debido a que la base del asfalto es la base o el constituyente pesado del petróleo crudo, no se evapora o hierve cuando es destilado. En consecuencia, el asfalto es obtenido

como residuo o producto residual, y es valioso para una gran variedad de usos arquitectónicos o ingenieriles.

Prácticamente todo el asfalto comercializado en el medio, con la finalidad de ser usado en la pavimentación de carreteras es producido en refinerías de petróleo modernas y se denomina asfalto de petróleo.

El asfalto es también un material bituminoso porque contiene betún, el cual es un hidrocarburo soluble en disoluto de carbono ( $CS_2$ ). El alquitrán obtenido de la destilación de un carbón graso, también contiene betún. Consecuentemente, tanto el petróleo asfáltico son referidos en forma conjunta como materiales bituminosos. Sin embargo, el asfalto de petróleo no debe ser confundido con el alquitrán, ya que sus propiedades difieren en forma considerable. El asfalto de petróleo está compuesto casi enteramente por betún, mientras que en el alquitrán el contenido de betún es relativamente bajo. En vista de estas diferencias es necesario que los productos del alquitrán y los asfaltos de petróleo sean considerados y tratados como elementos completamente separados.

El asfalto de petróleo para uso en pavimentos es comúnmente llamado *asfalto de pavimentación o cemento asfáltico* para distinguirlo del cemento asfáltico hecho para otros usos, como ser para propósitos industriales o para techados.

El asfalto para pavimentación a temperatura atmosférica normal (ambiente) es un material negro, pegajoso, semi-sólido y altamente viscoso. Está compuesto primordialmente de moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contiene otros átomos, como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. Debido a que el asfalto de pavimentación es pegajoso, se adhiere a las partículas del agregado y puede ser usado para cementarlas o ligarlas dentro del concreto asfáltico. El asfalto para pavimentación es impermeable y no lo afecta la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Es llamado un material termoplástico porque se ablanda cuando es calentado y se endurece cuando se enfría. Esta combinación única de características y propiedades es una razón fundamental para que el asfalto sea un material de pavimentación importante.

Los pavimentos asfálticos son a veces, no con toda propiedad, llamados flexibles, quizás como consecuencia de que el asfalto es un material viscoso y termoplástico.

El asfalto de petróleo es el principal asfalto de pavimentación usado actualmente aunque aún se emplea en algunos países el asfalto natural o nativo. El asfalto natural o nativo, tal como se encuentra en Trinidad y muchos otros lugares del mundo es, hablando en forma general, el residuo de antiguos depósitos de petróleo que han perdido sus constituyentes volátiles a través de los procesos biológicos, lo cual puede aceptarse como destilación natural. El alcance del asfalto nativo o natural es, sin embargo, relativamente pequeño. El asfalto natural es durable y ha sido usado a lo largo de la historia, los sumerios estaban familiarizados con el asfalto y sus propiedades cementantes e impermeabilizantes antes del año 3800 antes de Cristo. Los babilonios (2500-538AC) usaron el asfalto para construir presas, embalses y caminos. El asfalto de petróleo moderno tiene las mismas características de durabilidad, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños. El asfalto natural no es uniforme y contiene cantidades variables de materias extrañas.

## **2.2.-Propiedades del Asfalto.**

Existen tres tipos de propiedades muy importantes del asfalto:

### **1. Consistencia:**

Para caracterizar a los asfaltos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas, esta propiedad es llamada también fluidez, porque el asfalto es un material termoplástico que se licúa gradualmente al calentarlo. Consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o plasticidad que tiene el asfalto a cualquier temperatura dada. Para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro, es necesario fijar una temperatura de referencia.

Si el cemento asfáltico se expone al aire en películas delgadas, y se somete a un calentamiento prolongado, como por ejemplo durante el mezclado con el agregado, el asfalto tiende a endurecerse, a aumentar de consistencia. El aumento de esta característica es limitado, por lo tanto, un control no adecuado de la temperatura y del mezclado puede provocar mayor daño al cemento asfáltico por endurecimiento que por muchos años de servicio en el camino terminado.

Comúnmente, para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento, se usan ensayos de viscosidad o ensayos de penetración.

## **2. Pureza:**

El cemento asfáltico se compone, casi enteramente, de betunes, los cuales, por definición son solubles en bisulfuro de carbono. Los asfaltos refinados son, generalmente, más de 99.5 % solubles en bisulfuro de carbono y por lo tanto casi betunes puros. Las impurezas, si las hay, son inertes.

Normalmente, el cemento asfáltico, cuando deja la refinería, está libre de agua o humedad, pero puede haber humedad en los tanques de transporte. Si hay agua inadvertida, puede causar espumas al asfalto cuando se calienta por encima de los 100°C.

## **3. Seguridad**

La espuma puede constituir un riesgo para la seguridad, por lo tanto algunas normas requieren que el asfalto no forme espuma hasta temperaturas de 175°C.

Si se somete el cemento asfáltico a temperaturas suficientemente elevadas, despiden vapores que arden en presencia de una chispa o una llama. La temperatura a la que esto ocurre es más elevada que la temperatura que normalmente es usada en las operaciones de pavimentación. Sin embargo, para fines de transporte y almacenamiento, se suele diluir el asfalto a temperaturas

en las que adquiere la suficiente fluidez para bombearlo, este proceso puede generar vapores volátiles altamente riesgosos, por este motivo es necesario tener la certeza de que existe un adecuado margen de seguridad. Por este motivo se hace indispensable conocer el punto de inflamación del asfalto.

### **2.3.-Técnicas de Producción de un Asfalto.**

El petróleo crudo está compuesto por distintos productos, incluyendo el asfalto. La refinación permite separar estos productos y recuperar el asfalto. Durante el proceso de refinación, el petróleo crudo es conducido a un calentador tubular donde se eleva rápidamente su temperatura para la destilación inicial. Luego entra a una torre de destilación donde se vaporizan los componentes o fracciones más livianas (más volátiles), y se separa para su posterior refinamiento en nafta, gasolina, kerosene, y otros productos derivados del petróleo.

El residuo de este proceso de destilación es la fracción pesada del petróleo crudo, comúnmente llamado crudo reducido. Puede ser usado como fuel oil residual, o procesado en distintos productos, entre ellos el asfalto. Para separar la fracción asfalto del crudo reducido se puede utilizar un proceso de extracción mediante solventes. Luego, se refina la mayor parte de esta fracción para obtener el cemento asfáltico. Según el proceso de refinación usado se obtiene cementos asfálticos de muy alta o de baja consistencia. Estos productos se mezclan después, en cantidades adecuadas para obtener cementos asfálticos de la consistencia deseada. Los asfaltos soplados se producen insuflando aire a altas temperaturas al asfalto de consistencia adecuada.

#### **2.3.1.-Cementos Asfálticos.**

Son preparados especialmente por presentar cualidades y consistencias propias para su uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material ideal para aplicaciones en trabajos de pavimentación por sus propiedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en

general. Se clasifican de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración (PEN).

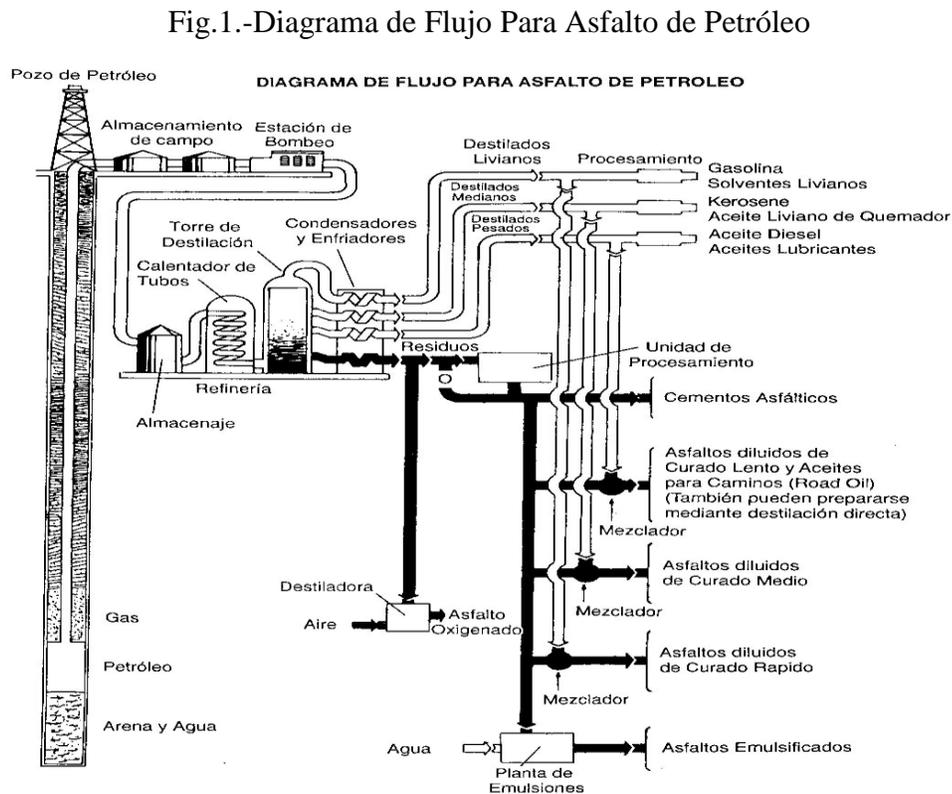
Los asfaltos se producen por la refinación del petróleo en unidades de destilación primaria y de vacío. El producto obtenido del fondo de la destilación primaria (crudo reducido) es destilado a 26 mm Hg. de presión de vacío y alta temperatura (del orden de 700° F). El producto obtenido por los fondos de la torre de vacío se llama “Residual Asfáltico” o Cemento Asfáltico de Petróleo (CAP), semisólido a temperatura ambiente. Dicho CAP es obtenido a diferentes viscosidades las que miden su consistencia.

Los asfaltos obtenidos son denominados con la siguiente nomenclatura:

CAP PEN: 60/70 (Penetración 60 a 70)

CAP PEN: 85/100 (Penetración 85 a 100)

En la Figura 1, se observa el proceso por el cual tiene que pasar el petróleo para poder obtener el cemento asfáltico.



Fuente: Introducción al asfalto, Manual seriado No. 5, 8ª. Edición, Instituto del Asfalto, Lexington, Ky., 1993

## **2.4.-Clasificación de los Asfaltos.**

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes, ellos son: viscosidad, viscosidad después del envejecimiento y penetración. Cada sistema abarca diferentes grados, cada uno con diferentes grados de consistencia.

### **Viscosidad:**

Este es el sistema más usado en los Estados Unidos. La Tabla 1.- muestra el sistema en forma de tablas. En el sistema de viscosidad el poise es la unidad normal de medida para viscosidad absoluta. Refiriéndose a la Tabla 1, se observa que cuanto más alto es el número de poises más viscoso es el asfalto. El AC-2.5 (Cemento asfáltico con una viscosidad de 250 poises a 60 ° C ó 140 ° F) es conocido como un asfalto “blando”. El AC-40 (Cemento asfáltico con una viscosidad de 4000 poises a 60 ° C ó 140 ° F) es conocido como un asfalto “duro”.

### **Viscosidad después del envejecimiento:**

La idea es identificar cuáles son las características de viscosidad después de que se ha colocado el asfalto en el pavimento. Para poder simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante el mezclado, el asfalto debe ser ensayado en el laboratorio utilizando un ensayo patrón de envejecimiento. El residuo asfáltico que queda después del envejecimiento es clasificado, posteriormente, de acuerdo a su viscosidad. Una vez más la unidad normal de medida es el poise.

La Tabla 2 identifica los posibles grados bajo este sistema.

En la Tabla 2 la abreviación “AR” corresponde a “residuo envejecido”. Obsérvese que el AR-10 (viscosidad de 1000 poises) se conoce como un asfalto “blando”, mientras que el AR-160 (viscosidad de 16 000 poises) se conoce como un asfalto “duro”

Tabla 1.- Requisitos para Cemento Asfáltico Clasificado por  
Viscosidad a 60° c

(Clasificación basada en asfalto original)

PRUEBA	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC- 2.5	AC- 5	AC - 10	AC - 20	AC - 30	AC - 40
Viscosidad, 60° poises	250-50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad 135° Cs-mínima	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25° C 100 g..5 segundos – mínimo	220	140	80	60	50	40
Punto inflamador, cleveland. °C(°F)-mínimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad en tricloroetileno, por cierto-mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre el residuo del ensayo TFO:						
Perdida por calentamiento, porcentaje-maximo (opcional) <sup>3</sup>		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60° C, poises – máximos	1000	2000	4000	8000	12000	16000
Ductilidad, 25° C, 5 cm por minuto, cm mínimo	100 <sup>1</sup>	100	75	50	40	25
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) <sup>2</sup> con :						
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados					
Solvente de nafta-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					
Solvente de heptano-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en caliente del Asphalt Institute. Serie de Manuales N° 22 (MS-22).

<sup>1</sup> Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15.6° C tiene un valor mínimo de 100.

<sup>2</sup> El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente usado cuando se va a usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberá de especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

<sup>3</sup> El uso de requisito de pérdida por calentamiento es opcional.

Tabla 2.- Requisitos para Cemento Asfáltico Clasificado por Viscosidad a 60° c  
(Clasificación basada en el residuo del ensayo de RTFO)

PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DE ENSAYO DE LA NORMA AASHTO T 240 <sup>1</sup>	GRADO DE VISCOSIDAD				
	AR - 10	AR - 20	AR - 40	AR - 80	AR - 160
Viscosidad, 60° poises	1000±250	2000±500	4000±1000	8.000±2000	16000±4000
Viscosidad 135° Cs-mínima	140	200	275	400	550
Penetración, 25° C 100 g.,5 segundos – mínimo	65	40	25	20	20
Porciento de Pen original, 25° C – mínimo	-	40	45	50	52
Ductilidad 25° C, 5 cm por minuto, cm-mínimo	100 <sup>2</sup>	100 <sup>2</sup>	75	50	52
<b>PRUEBAS SOBRE EL ASFALTO ORIGINAL</b>					
Punto inflamador, cleveland, °C(°F)-mínimo	205(400)	219(425)	227(440)	232(450)	238(460)
Solubilidad de triclorotileno, por ciento mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en caliente del Asphalt Institute. Serie de Manuales N° 22 (MS-22).

<sup>1</sup> AASHTO 179 (TFO) puede ser usado, pero AASHTO T 240 deberá ser el método de referencia.

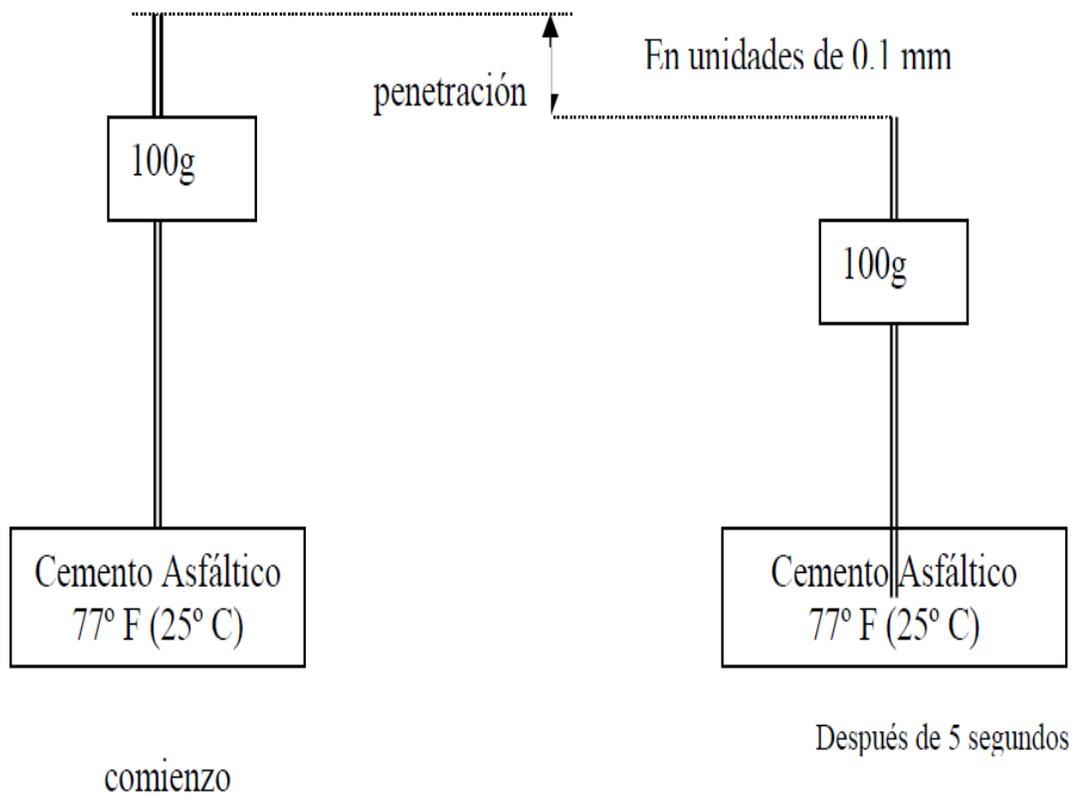
<sup>2</sup> Si la ductilidad es menor que 100 el material será aceptado si la ductilidad a 15.60 C tiene un valor / mínimo de 100.

### **Penetración:**

El tercer método usado para clasificar asfaltos es el de penetración. La figura 2 muestra cómo se efectúa el ensayo de penetración. Una aguja normal se deja penetrar dentro de la muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que la aguja penetra en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetro (0.1 mm). Un grado 200-300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas, de 200 a 300 décimas milímetro. Esto es indicación de un asfalto “blando”. Un grado 40-50, por otro lado, es indicación de un asfalto “duro” en el cual la aguja fue capaz de penetrar solamente de 40

a 50 décimas de milímetro. La Tabla 3 muestra los distintos grados incluidos bajo este sistema

Fig.2.- Diagrama de la Prueba de Penetración



Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica

Tabla 3.-Sistema de Clasificación por Penetración

Requisitos para una Especificación para Cemento Asfáltico AASHTO M20

GRADO DE PENETRACIÓN										
	40 –50		60 –70		85 – 100		120 – 150		200 – 300	
	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max
Penetración, 25° C 100 g.,5 segundos	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto inflamador, cleveland, °C	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad 25° C, 5 cm por minuto	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad de triclorotileno, por ciento	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
TFO 3.2 mm, 63° C, 5 horas										
Perdida por calentamiento, Por ciento	-	0.8	-	0.8	-	1.0	-	1.3	-	1.5
Penetración del residuo, Por ciento del original	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad del residuo a 25° C. 5 cm por min., cm	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-
Prueba del mancha (cuando y como se especifica) (ver nota) :	Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados									
Solvente normal del nafta										
Solvente de nafta – xileno. % xileno										
Solvente de heptano – xileno. % xileno										

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en caliente del Asphalt Institute. Serie de Manuales N° 22 (MS-22).

Nota: El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente usado cuando se va a usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberá de especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

## 2.5.-Diseño de Mezclas Asfálticas.

### 2.5.1.-Introducción.

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall y el Método Hveem. En el presente estudio sólo trataremos el método Marshall.

Ambos métodos de diseño son ampliamente usados en el diseño de mezclas asfálticas de pavimentación. La selección y uso de cualquiera de estos métodos de diseño de mezclas es, principalmente, asuntos de gustos en ingeniería, debido a que cada método contiene características y ventajas singulares. Cualquier método puede ser usado con resultados satisfactorios.

## **2.5.2.- Características de la Mezcla Asfáltica.**

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

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

### **2.5.2.1.- Densidad.**

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

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

### **2.5.2.2.- Vacíos de Aire (o simplemente vacíos).**

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir

alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento.

### **2.5.2.3.- Vacíos en el Agregado Mineral.**

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

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

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el

punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca.

Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

#### **2.5.2.4.- Contenido de Asfalto.**

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

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

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

En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

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

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

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

#### **2.5.2.5.- Granulometría.**

Aunque la influencia del tamaño máximo del agregado no sea tan notable como el contenido de asfalto, la curva granulométrica puede influir a través de dos factores: el tamaño máximo del agregado y el tipo de curva, que puede ser continua o discontinua. Estos dos factores tienen influencia en el porcentaje de vacíos y, por ende, sobre la resistencia a la fatiga y la deformación permanente.

El porcentaje de vacíos del agregado mineral varía en función de la curva granulométrica. Para una curva más cercana a la línea de potencia 0,45 (curva de máxima densidad, llamada de Fuller), el porcentaje de vacíos es más bajo y la compacidad más fuerte.

### **2.5.2.6.- Forma y Textura del Agregado.**

Son factores que también afectan la compactación. Los agregados angulosos, con superficies rugosas, son frecuentemente más difíciles de compactar, lo que lleva a un menor volumen de vacíos para una misma energía de compactación, y en consecuencia un módulo de rigidez más bajo.

Para una misma energía de compactación y misma granulometría, las mezclas asfálticas constituídas por agregados redondeados y lisos presentan mayor porcentaje de vacíos y son fáciles de compactar; mientras que las mezclas con agregados triturados resultan con mayor porcentaje de vacíos.

Para una misma compactación, parece no haber diferencias significativas en la duración de la vida a la fatiga entre mezclas con agregados redondeados y lisos, y mezclas con agregados triturados.

Para una misma energía de compactación, las mezclas asfálticas con agregados redondeados y lisos presentan un incremento en la compactación y en la duración de la vida a la fatiga, a diferencia de las mezclas con agregados triturados.

### **2.5.2.7.- Contenido de Finos.**

La incorporación de finos en las curvas granulométricas reduce el porcentaje de vacíos, con lo que el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica aumenta.

## **2.6.- Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezclas.**

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

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

### **2.6.1.-Estabilidad**

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla. Los requisitos de estabilidad sólo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. ***Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.***

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

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

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

***La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico).*** La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. ***Adicionalmente, y hasta***

*cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.* Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento.

Tabla 4.-Causas y Efectos de Inestabilidad en el Pavimento

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

Fuente: Principios de Construcción de pavimentos de Mezcla asfáltica e caliente del Asphalt Institute MS-22.

### **2.6.2.- Durabilidad.**

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

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

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

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

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

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

Tabla 5.- Causas y Efectos de una Poca Durabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de pavimentos de Mezcla asfáltica e caliente del Asphalt Institute MS-22.

### 2.6.3.- Impermeabilidad.

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

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

Tabla 6.- Causas y Efectos de una Poca Durabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de pavimentos de Mezcla asfáltica e caliente del Asphalt Institute MS-22.

#### 2.6.4- Trabajabilidad.

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

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

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

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

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

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

Tabla 7.- Causas y Efectos de Problemas en la  
Trabajabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de pavimentos de Mezcla asfáltica e caliente del Asphalt Institute MS-22.

### **2.6.5.- Flexibilidad**

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

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

### **2.6.6.- Resistencia a la Fatiga.**

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

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

Tabla 8.- Causas y Efectos de una Mala Resistencia a la

## Fatiga

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

Fuente: Principios de Construcción de pavimentos de Mezcla asfáltica e caliente del Asphalt Institute MS-22.

### 2.6.7.- Resistencia al Deslizamiento.

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esté mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados debe resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla 9.- Causas y Efectos de Poca Resistencia al Deslizamiento

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

Fuente: Principios de Construcción de pavimentos de Mezcla asfáltica e caliente del Asphalt Institute MS-22.

### **2.6.8.- Resistencia al Fracturamiento por baja Temperatura.**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Depende principalmente de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.

### **2.6.9.- Resistencia al Daño por Humedad o Impermeabilidad.**

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.

### **2.7.- Deterioros en Mezclas Asfálticas.**

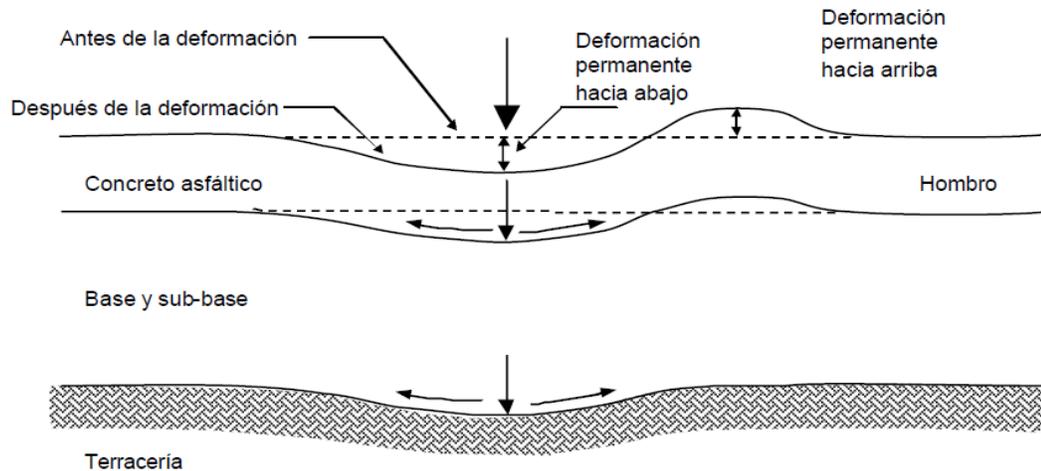
Cuando una mezcla asfáltica se incorpora a un pavimento como carpeta, está sujeta a múltiples acciones que afecta en su vida útil. Estas acciones se relacionan principalmente con el paso de los vehículos y el medio ambiente; y contribuyen en diferente medida al daño de la mezcla. Los principales deterioros en la mezcla asfáltica son: las deformaciones permanentes, el agrietamiento por fatiga, y el agrietamiento por baja temperatura. A continuación se describen dichos deterioros.

#### **2.7.1.- Deformación Permanente.**

Basándose en los resultados de pruebas de caminos e investigaciones del fenómeno de la deformación permanente realizadas por la AASHTO (American Association of State and Highway Officials) en Estados Unidos, algunos investigadores han concordado en

que ésta se puede definir como un canal longitudinal, o depresión, que se forma en las huellas debido a la compresión, movimiento lateral, o ambos, en una o más de las capas que forman el pavimento, como resultado de la aplicación de las cargas del tránsito.

Fig.3.- Mecanismo Típico de Deformación Permanente en la Trayectoria de la Rueda Externa



Fuente: Caracterización Geométrica de Mezclas Asfálticas, Publicación Técnica N° 267, Sanfandila, Qro, 2005.

La deformación permanente es una manifestación de dos diferentes mecanismos: (a) densificación (cambio de volumen), y (b) deformación cortante (flujo plástico sin cambio de volumen).

En el proceso de densificación el material es empujado hacia abajo; mientras que la deformación cortante provoca que el material fluya lateralmente y hacia arriba, como se muestra en la Figura 3.

La profundidad total de la rodera es la diferencia en elevación entre la cresta y la hondonada de la superficie. Como se muestra en dicha figura, los esfuerzos de tensión sobre la superficie y el lado exterior del área cargada pueden ocasionar grietas longitudinales en el concreto asfáltico. (Duribain y Jiménez, 1983).

- **Tipos de deformación permanente**

a) **Deformación plástica.** Es una depresión cercana al centro de la carga aplicada, con ligeros montículos o protuberancias ubicados a los lados de la depresión. Este tipo de deformación longitudinal, generalmente se debe a un contenido insuficiente de vacíos de aire (menos del 4%) en la carpeta. Bajo estas condiciones, una sobre compactación provoca que el asfalto rellene los vacíos de aire entre los agregados, lo que impide que estos se enlacen entre sí.

b) **Deformación por consolidación.** Como la anterior, es una depresión cercana a la aplicación de la carga, pero sin acompañamiento de protuberancias a los lados de la depresión. Este tipo de deformación longitudinal se debe al exceso de vacíos de aire (mayores al 8%) en la carpeta, después de la compactación. Esta condición provoca que la carpeta se consolide a lo largo de las huellas que dejan las ruedas de los vehículos, especialmente durante el primer verano.

c) **Deformación mecánica.** Es resultado de un hundimiento en la base, subbase o terracerías, acompañada por un disturbio en el patrón de agrietamiento. Este tipo de falla puede ocurrir cuando la estructura de un pavimento no fue diseñada de manera apropiada para la dimensión de las cargas que soportará (FHWA, 1997).

- **Causas de la deformación permanente en mezclas asfálticas**

Según el manual de pavimentos para mezclas en caliente del Departamento de Transporte y la Administración de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 1997), las causas principales de deformación permanente o longitudinal de los pavimentos asfálticos, son las siguientes:

- a) Baja cantidad de vacíos de aire (menos del 4%)
- b) Exceso de vacíos de aire (más del 8%)
- c) Cemento asfáltico de baja viscosidad, principalmente por:
  - Errores en el diseño de la mezcla, debido a que las propiedades del asfalto a 25°C y 60°C no son iguales a las propiedades del asfalto en servicio
  - El asfalto no es envejecido, como en el proceso de producción, en Planta o Resistencia insuficiente en la carpeta debido a que se permitieron en el lugar

grandes cargas de tránsito, antes de que el asfalto se hubiera enfriado lo suficiente para adherirse al agregado de manera adecuada.

d) Mayor consolidación de la base, subbase o terracería.

e) El tipo y duración de la carga afecta la resistencia a la deformación longitudinal. Las mezclas bituminosas son más resistentes a las cargas de corta duración, como sucede en condiciones de tránsito a alta velocidad, y menos resistentes a cargas de larga duración. Esta es la razón por la que la deformación longitudinal es más frecuente en intersecciones y tramos ascendentes, que en los carriles de mayor velocidad.

### **2.7.2.- Agrietamiento por fatiga.**

El agrietamiento por fatiga es llamado coloquialmente “piel de cocodrilo” debido a que el patrón de espaciamiento entre las grietas es muy similar a la forma exterior de la piel del cocodrilo (Figura 4.-). El agrietamiento por fatiga es resultado de la aplicación de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión de la mezcla.

Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de agrietamiento por fatiga. Este tipo de falla, generalmente ocurre cuando el pavimento ha sido esforzado hasta el límite, por la repetición de aplicaciones de carga. El agrietamiento por fatiga es comúnmente asociado con las cargas, las cuales son mucho más pesadas para la estructura del pavimento, o a que el número de repeticiones de carga fue mayor a las consideradas en el diseño. El problema se hace más grave cuando existe un drenaje inadecuado en el pavimento, lo cual contribuye a que las capas inferiores lleguen a saturarse y pierdan resistencia. En estos casos la capa con la mezcla asfáltica experimenta deformaciones grandes, cuando las capas subyacentes son debilitadas por exceso de humedad, produciendo la falla prematura por fatiga. El agrietamiento por fatiga puede ser también causado por el paso repetido de camiones sobrecargados y/o espesores de pavimento inadecuados, debido a un control de calidad deficiente durante la construcción.

El agrietamiento por fatiga puede conducir al desarrollo de baches cuando las piezas individuales de mezcla asfáltica se separan físicamente del material adyacente, y se desprenden de la superficie del pavimento por acción del tránsito.

Los baches generalmente ocurren cuando el agrietamiento por fatiga se encuentra en etapas muy avanzadas, o cuando se han empleado espesores de carpeta asfáltica, relativamente delgados.

En común, se considera que el agrietamiento por fatiga es más un problema estructural, que uno de materiales. Ya que es provocado por un número de factores que tienen que ocurrir simultáneamente: cargas pesadas repetidas, drenaje pobre de la subrasante, un diseño o construcción deficiente de las capas del pavimento, o que el número de cargas para el que se diseñó fue excedido.

Fig.4.- Pavimento Asfáltico que Presenta Agrietamiento por Fatiga



### **2.7.3.- Fracturamiento por Baja Temperatura**

El fracturamiento por baja temperatura se atribuye a la deformación por tensión inducida en la mezcla asfáltica, a medida que la temperatura desciende hasta un nivel crítico. El agrietamiento por baja temperatura es un deterioro, debido más a condiciones adversas del medio ambiente que a las aplicaciones de carga. Se caracteriza por fisuras transversales intermitentes (perpendiculares a la dirección del flujo de tránsito) que se producen en un espaciamiento notablemente uniforme (Figura 5.-).

Las fisuras por baja temperatura se forman por contracciones en la carpeta asfáltica, lo cual normalmente ocurre en lugares con clima frío. Cuando la carpeta se contrae, se

originan deformaciones de tensión en su interior. En algún lugar, a lo largo del pavimento, los esfuerzos exceden la resistencia a la tensión, y la carpeta asfáltica se fisura. De esta manera, las fisuras por baja temperatura ocurren principalmente por efecto acumulativo de varios ciclos climáticos fríos.

En este tipo de deterioro, el ligante asfáltico juega un rol significativo, por ejemplo, los duros son más propensos a la fisuración por baja temperatura que los blandos.

También los ligantes asfálticos excesivamente oxidados, ya sea por ser muy propensos a la oxidación o por encontrarse en una mezcla asfáltica con muy alto porcentaje de vacíos, o por ambas causas, son más susceptibles al fisura miento por baja temperatura.

Fig.5.-Pavimento Asfáltico que Presenta Fracturamiento por Baja Temperatura



## **2.8.- Comportamiento de la Mezcla Asfáltica**

Como se mencionó, la mezcla asfáltica está compuesta por agregados pétreos y asfalto; por tanto, el comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado tanto por las propiedades individuales del agregado mineral y del asfalto, como por la interrelación de ambos componentes dentro del sistema.

### **2.8.1.- Comportamiento del Cemento Asfáltico**

Con respecto al comportamiento de la mezcla asfáltica, las características más importantes del cemento asfáltico son: la susceptibilidad a la temperatura, la viscoelasticidad, y el envejecimiento.

De las tres anteriores, la que sobresale es la susceptibilidad a la temperatura, ya que sus propiedades mensurables dependen de ésta. Asimismo, el tiempo de aplicación de la carga también es importante, puesto que para una misma carga y un mismo asfalto, los diferentes tiempos de aplicación de la carga implicarán diferentes propiedades. Por ello, los ensayos sobre los cementos asfálticos y mezclas asfálticas deben especificar la temperatura y la velocidad de carga. Sin una temperatura de ensayo y velocidad de carga especificada, el resultado del ensayo no puede ser interpretado como es debido. Conforme a la Figura 16.-, la cantidad de asfalto que fluye podría ser la misma para una hora a 60 °C o 10 horas a 25 °C. En otras palabras, los efectos del tiempo y la temperatura están relacionados; el comportamiento a temperaturas altas en periodos de corto tiempo, es equivalente al que ocurre a temperaturas bajas y duraciones largas.

Fig.6.-Comportamiento del Flujo del Cemento Asfáltico



Fuente: Caracterización Geométrica de Mezclas Asfálticas, Publicación Técnica N° 267, Sanfandila, Qro, 2005.

A altas temperaturas (>100 °C), o bajo carga sostenida (por ejemplo, movimientos lentos, o estacionamiento de camiones), el cemento asfáltico actúa como un líquido

viscoso, es decir, tiene un comportamiento plástico. La viscosidad es la característica física del material usada para describir la resistencia de un líquido a fluir, y también se emplea para expresar la diferencia entre las fuerzas resistentes y la velocidad relativa con que fluye una capa con respecto a otra en el cemento asfáltico caliente.

A bajas temperaturas ( $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) o bajo cargas aplicadas rápidamente (por ejemplo, movimiento rápido de camiones), el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico; cuando es cargado se deforma y cuando es descargado regresa a su forma original.

Aunque el cemento asfáltico es un sólido elástico a bajas temperaturas, éste puede llegar a ser muy frágil y agrietarse cuando es cargado excesivamente. Por esta razón, el agrietamiento a bajas temperaturas, algunas veces ocurre durante el invierno.

En el pavimento en servicio, la temperatura que se presenta normalmente es intermedia respecto a los extremos mencionados previamente. En este rango de temperaturas, el asfalto presenta ambas características, las de un fluido viscoso y las de un sólido elástico. Debido a esta amplitud de comportamiento, el asfalto es un excelente material adhesivo en la pavimentación.

Después de que se enfría, el asfalto actúa como un pegamento que mantiene al agregado junto en una matriz sólida. En esta etapa, el comportamiento se conoce como viscoelástico; tiene ambas características, dependiendo de la temperatura y la velocidad de la carga.

Otra característica importante del asfalto es su composición química, pues debido a que está compuesto por moléculas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente produciéndose la oxidación, y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto. Al reaccionar con el oxígeno, la estructura del asfalto se vuelve más dura y frágil, y da origen al término endurecimiento por oxidación, o endurecimiento por envejecimiento.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para el mezclado y la compactación. Esta propiedad

explica el por qué la oxidación es más crítica en cementos asfálticos utilizados en pavimentos que se construyen en lugares con climas cálidos y desérticos.

Otra forma de endurecimiento es la volatilización y el endurecimiento físico.

La volatilización ocurre durante el mezclado y la construcción, cuando los componentes volátiles del asfalto tienden a evaporarse. El endurecimiento físico se presenta cuando el cemento asfáltico se expone a bajas temperaturas por periodos largos.

Cuando la temperatura se estabiliza a un valor bajo constante, el cemento asfáltico continúa contrayéndose y endureciéndose.

El endurecimiento físico es más notable a temperaturas menores a 0 °C.

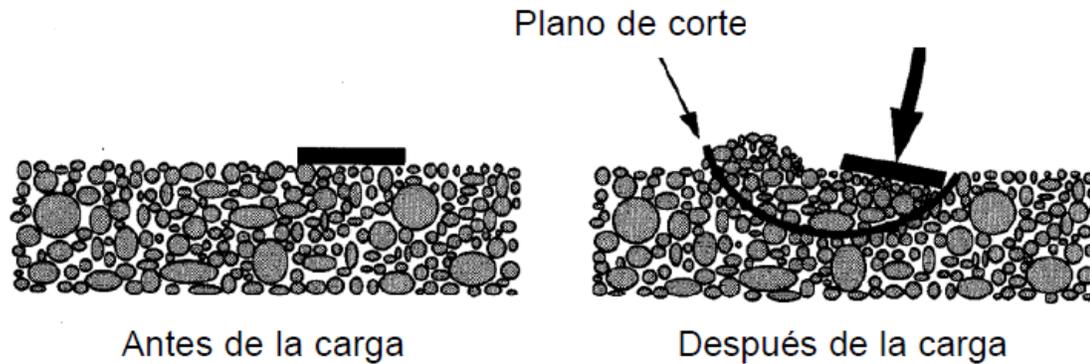
### **2.8.2.- Comportamiento del Agregado Mineral**

Los agregados minerales para elaborar la mezcla asfáltica pueden ser naturales, triturados o sintéticos. Los naturales se extraen de depósitos fluviales o glaciares, y utilizados sin ningún procesamiento para elaborar la mezcla asfáltica. Los agregados triturados se explotan en canteras, y reducidos a los tamaños deseados mediante trituración mecánica; mientras que el agregado sintético es un subproducto industrial, como la escoria de altos hornos. Independientemente de la fuente; en los métodos de procesamiento o mineralogía, se espera que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir aplicaciones de carga repetidas.

Los agregados de textura rugosa, equidimensionales, producen mayor resistencia que los redondeados y de textura lisa. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna que una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una masa más compacta de material. Las partículas redondeadas, en vez de trabarse tienden a deslizarse unas sobre otras.

Cuando una masa de agregados es cargada, pueden generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas se deslicen o cizallen unas respecto de las otras (Figura 13.-) lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. Es en este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado es de especial importancia en la mezcla asfáltica.

Fig.7.- Comportamiento del Agregado Sometido a Carga de Corte



Fuente: Principios de Construcción de pavimentos de Mezcla asfáltica e caliente del Asphalt Institute MS-22.

La resistencia al corte de los distintos agregados puede explicarse mediante la teoría de Mohr-Coulomb, la cual establece que la resistencia al corte de una mezcla de agregados depende de qué tan unidas estén las partículas del agregado (cohesión); la tensión normal a que están sometidos los agregados; y la fricción interna. La ecuación de Mohr-Coulomb para expresar la resistencia al corte de un material es:

$$t = c + s \operatorname{tg} f$$

Donde:

$t$  = resistencia al corte de la mezcla de agregados

$c$  = cohesión del agregado

$s$  = tensión normal a la cual está sujeta el agregado

$f$  = ángulo de fricción interna

Por otro lado, al someter una masa de agregado a tensiones de corte, las partículas deben fracturarse o arrastrarse unas sobre otras si se produce un desplazamiento. Este fenómeno se llama dilatancia, pues resulta en una expansión o incremento de volumen de la masa de agregados. Los materiales resistentes, con una mayor densificación y alto ángulo de fricción interna, tienden a dilatarse más que los materiales más débiles.

## **2.9.-Ensayos para Caracterizar el Cemento Asfáltico.**

### **2.9.1.-Ensayo de Viscosidad**

Las especificaciones de los cementos asfálticos clasificados según su viscosidad, se basan por lo común en los rangos de viscosidad a 60°C. También se especifica generalmente una viscosidad mínima a 135°C.

El propósito es dar valores límites de consistencia a estas dos temperaturas. Se eligió la temperatura de 60°C porque se aproxima a la máxima temperatura superficial de las calzadas en servicio pavimentadas con mezclas asfálticas, y la de los 135°C, porque se aproxima a la temperatura de mezclado y distribución de mezclas asfálticas en caliente para pavimentación.

Para el ensayo de viscosidad a 60°C se emplea un viscosímetro de tubo capilar. Los dos tipos más comunes en uso son: el viscosímetro de vacío del Asphalt Institute y el viscosímetro de Cannon - Manning. Se calibran con aceites normalizados. Para cada viscosímetro se obtiene un “factor de calibración”. Generalmente los viscosímetros vienen calibrados por el fabricante quien suministra estos factores.

El viscosímetro se monta en un baño de agua a temperatura constante, controlado termostáticamente. Se vierte asfalto precalentado en el tubo más grande hasta que alcanza el nivel de la línea de llenado. El viscosímetro se mantiene en el baño por cierto tiempo hasta que el sistema alcance la temperatura de equilibrio de 60°C.

Se aplica un vacío parcial en el tubo pequeño para inducir el flujo, porque el cemento asfáltico a esta temperatura es muy viscoso para fluir fácilmente a través de los tubos capilares del viscosímetro.

Luego que el baño, viscosímetro y el asfalto se han estabilizado en 60°C se aplica vacío y se mide con un cronómetro el tiempo, en segundos, que tarda el cemento asfáltico en fluir entre dos marcas. Multiplicando este tiempo por el factor de calibración del viscosímetro se obtiene el valor de la viscosidad en poises, la unidad patrón para medir viscosidad absoluta.

El viscosímetro de vacío del Asphalt Institute tiene muchas marcas para medir el tiempo. Seleccionando el par apropiado, se puede usar para asfaltos con una amplia variación de consistencias.

Los cementos asfálticos para pavimentación son lo suficientemente fluidos a 135°C para fluir a lo largo de los tubos capilares bajo fuerzas de gravitacionales únicamente. Por lo tanto, se usa un tipo diferente de viscosímetro, ya que no se requiere el vacío. El método utilizado por su disponibilidad en el medio es el de Saybolt Furol, AASHTO (T 72) - ASTM (D 88).

Este método se refiere a procedimientos empíricos para determinar la viscosidad de Saybolt universal o Saybolt Furol de productos del petróleo a temperaturas especificadas.

La viscosidad Saybolt Furol es el tiempo en segundos, corregido durante el cual fluyen 60 ml de muestra a través de un orificio Furol calibrado bajo condiciones específicas. El valor de la viscosidad se informa en segundos Saybolt Furol (SSF) a una temperatura especificada.

La palabra Furol es una contracción de las palabras “Fuel and Road Oils” (aceites y combustibles para carreteras)

La viscosidad Saybolt Furol es aproximadamente 1/10 de la viscosidad Saybolt Universal, y es recomendada para la caracterización de productos del petróleo.

### **2.9.2.-Ensayo de Penetración.**

Consiste en calentar un recipiente con cemento asfáltico a una temperatura de referencia, 25°C, en un baño de agua a temperatura controlada. Se apoya una aguja normalizada de 100 gramos de peso sobre la superficie del cemento asfáltico durante 5 segundos. La medida de la penetración es la longitud que penetró la aguja en el cemento asfáltico en unidades de 0.1 mm.

Ocasionalmente, el ensayo de penetración se realiza a distinta temperatura en cuyo caso puede variarse la carga de la aguja, el tiempo de penetración o ambos

### **2.9.3.- Ensayo de Punto de Inflamación.**

Cuando se calienta el asfalto, libera vapores que son combustibles. El punto de inflamación, es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto, sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre. Esta temperatura, está sin embargo, muy por debajo de la temperatura en la que el material entra en estado de combustión permanente. Se la denomina punto de combustión y es muy raro que se use en especificaciones para asfalto.

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de “vaso abierto Cleveland” (COC) que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados. El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes vapores volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

### **2.9.4.- Ensayo de Ductilidad.**

Algunos ingenieros consideran que la ductilidad es una característica importante de los cementos asfálticos. Sin embargo, generalmente se considera más significativa la presencia o ausencia de la misma, que su grado real. Algunos cementos asfálticos que tienen un grado muy alto de ductilidad son también más susceptibles a la temperatura. Es decir, que la variación de la consistencia puede ser mayor debido al cambio de temperatura.

La ductilidad de un cemento asfáltico se mide con un ensayo tipo “extensión” para el que se moldea una probeta de cemento asfáltico en condiciones medias normalizadas. Se la lleva a temperatura de ensayo de la norma, generalmente a 25°C y se separa una

parte de la probeta de la otra a cierta velocidad, normalmente 5 cm por minuto, hasta que se rompa el hilo de asfalto que une ambos extremos de la muestra. La ductilidad del asfalto es la distancia (en centímetros) a la cual se rompe dicho hilo.

### **2.9.5.-Ensayo de Solubilidad.**

El ensayo de solubilidad es una medida de la pureza del cemento asfáltico. La parte del mismo soluble en bisulfuro de carbono representa los constituyentes activos de cementación. Sólo la materia inerte, como sales, carbón libre, o contaminantes inorgánicos, no son solubles.

En este ensayo se usa generalmente tricloroetileno, que es el menos peligroso que el bisulfuro de carbono y otros solventes. La mayoría de los cementos asfálticos son igualmente solubles en cualquiera de los dos.

El proceso para determinar la solubilidad es muy simple. Se disuelven aproximadamente 2 gr de asfalto en 100 ml de solvente y se filtra la solución a través de una plancha de asbesto colocada en un crisol de porcelana. Se pesa el material retenido por el filtro y se lo expresa como porcentaje de la muestra original, obteniéndose el porcentaje soluble en bisulfuro de carbono.

### **2.9.6.- Ensayo de Destilación y Contenido de Agua.**

El ensayo de destilación se usa para determinar la proporción de agua presente en el cemento asfáltico, algunos cementos asfálticos pueden contener aceites. La destilación del cemento asfáltico entrega información acerca de su calidad.

El procedimiento es muy similar al de los ensayos de emulsiones asfálticas y de asfaltos cortados. Una muestra de 200 gr de asfalto se destila a 260°C durante 15 minutos con el objeto de obtener un residuo homogéneo.

Para un cemento asfáltico la tolerancia al agua es casi nula, esta tiene que estar por debajo del 0.2% y es el resultado de la división del peso del agua entre el peso del asfalto “seco”.

## **2.10.-Proceso de Producción de Mezclas.**

### **2.10.1.-En Laboratorio.**

El proceso de producción de mezclas en laboratorio es un proceso que no se encuentra normalizado ya que depende mucho del criterio del técnico, debido a que es un proceso en donde sólo se cumple con las características de temperatura para cumplir con la temperatura a diseño.

La producción de las mezclas desarrolladas en esta investigación se realizó de acuerdo a la explicación que nos da la teoría de Manuales Técnicos para el diseño de Carreteras en Bolivia, de la Administradora Boliviana de carretera ABC basado en el ensayo AASHTO T 245-97.

Primeramente se pesa en bandejas la cantidad necesaria de cada fracción para producir una muestra que dé como resultado una probeta compactada de una altura aproximada de 65 mm; normalmente se requiere 1200 g. Colocar las bandejas en el horno y llevarlas a una temperatura de 30 °C sobre dicha temperatura de mezclado especificada para cementos asfálticos, y de 15 °C sobre dicha temperatura para asfaltos cortados. Sacar las muestras del horno una vez alcancen dichas temperaturas y colocarla en el bol de mezclado y revuelva completamente. Cabe recalcar que este bol no es especial, solamente el material de este bol tiene que ser apto para temperaturas altas. Formar un cráter en el árido y pesar la cantidad necesaria de cemento asfáltico o asfalto cortado e incorpórela al bol. En ese instante las temperaturas del árido y del asfalto deben estar dentro de los límites establecidos. El asfalto no debe mantenerse a la temperatura de mezclado por más de 1 h antes de usarlo. Mezclar el árido y asfalto tan rápido como sea posible hasta que la mezcla quede totalmente cubierta y uniforme. La mezcla estará lista cuando por observación se note que el agregado haya sido totalmente cubierto por el asfalto, ya no se notará ningún color característico del agregado solamente se notará que el agregado tiene un color negro por la particularidad del asfalto que es la adhesión por efecto del calor hacia los agregados de una mezcla.

Una vez que esta mezcla cumple con la temperatura de mezclado y la homogeneidad de los componentes asfalto y agregados, la mezcla se saca para que esta baje de

temperatura para su compactado en los moldes, los moldes que están estandarizados que se detallarán más adelante. Cumpliendo con la temperatura de mesclado esta mezcla se la lleva a los moldes que también tienen una temperatura igual a la mezcla de compactado para que mediante el martillo de compactación se pueda realizar dicha prueba.

Después que se ha realizado la compactación se espera a que estos moldes pierdan su temperatura para poder desmontar la muestra y poder realizar los ensayos correspondientes.

## **2.10.2.-En Planta.**

### **2.10.2.1.- Introducción.**

Una planta de asfalto es un conjunto de equipos mecánicos electrónicos en donde los agregados son combinados, calentados, secados y mezclados con asfalto para producir una mezcla asfáltica en caliente que debe cumplir con ciertas especificaciones. Una planta de asfalto puede ser pequeña o puede ser grande. Puede ser fija (situada en un lugar permanente) o puede ser portátil (transportada de una obra a otra). En términos generales cada planta puede ser clasificada como planta de dosificación, o como planta mezcladora de tambor.

### **2.10.2.2.- Propósito y Disposición de los Equipos.**

El propósito es el mismo sin importar el tipo de planta. El propósito es de producir una mezcla en caliente que posea las proporciones deseadas de asfalto y agregado, y que cumpla con todas las especificaciones. Ambos tipos de planta (plantas de dosificación y plantas mezcladoras de tambor) están diseñadas para lograr este propósito. La diferencia entre los dos tipos de planta es que las plantas de dosificación secan y calientan el agregado y después, en un mezclador separado, lo combinan con el asfalto en dosis individuales; mientras que las plantas mezcladoras de tambor secan el agregado y lo combinan con el asfalto en un proceso continuo y en la misma sección del equipo.

### 2.10.2.3.- Proceso de Producción de Mezcla Asfáltica en Caliente en una Planta de Dosificación.

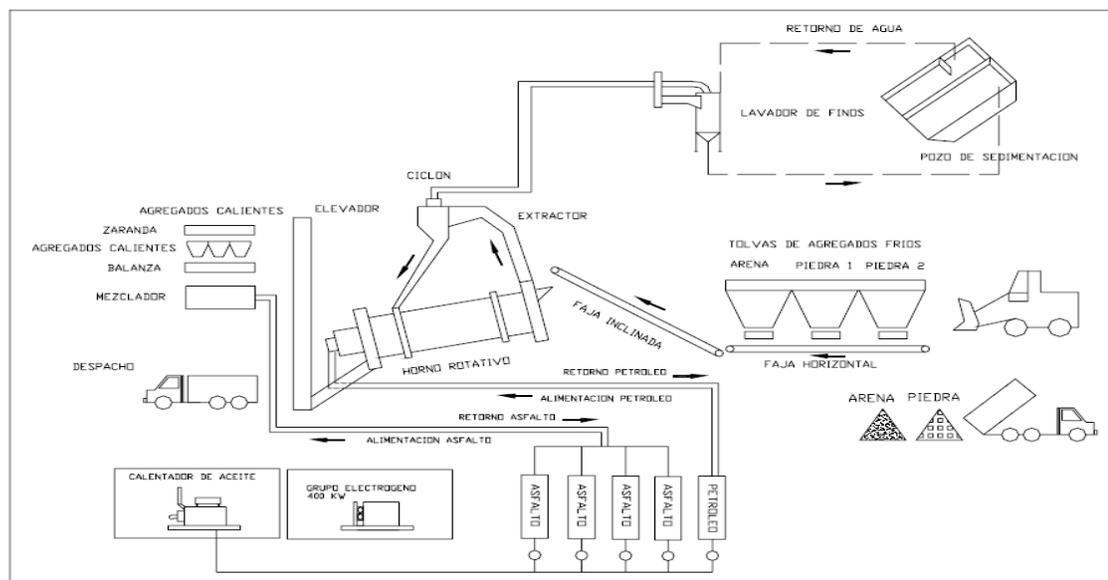
En el gráfico 3.1 se muestra el diagrama de flujo de producción de mezcla en Caliente en una planta de dosificación. A continuación se detalla todo este proceso:

- Se apila la piedra grande, la piedra chica y la arena.

#### 2.10.2.3.1- Tolvas.

- El cargador frontal carga estos materiales y los llena en las tolvas respectivas.

Fig.8.- Diagrama de Flujo Planta de Dosificación de Mezcla Asfáltica en Caliente



- Una vez llenas las tolvas se procede por vibración de las tolvas a descargar el material hacia la faja horizontal, estas tolvas tienen unas compuertas en la parte inferior que permiten abrir o cerrar el paso de los materiales hacia la faja horizontal

#### 2.10.2.3.2.- Horno Rotativo de Contraflujo.

- De la faja horizontal continúan a la faja inclinada hasta llegar al horno rotativo de contraflujo, el cual tiene una llama la cual es alimentada con petróleo, siendo

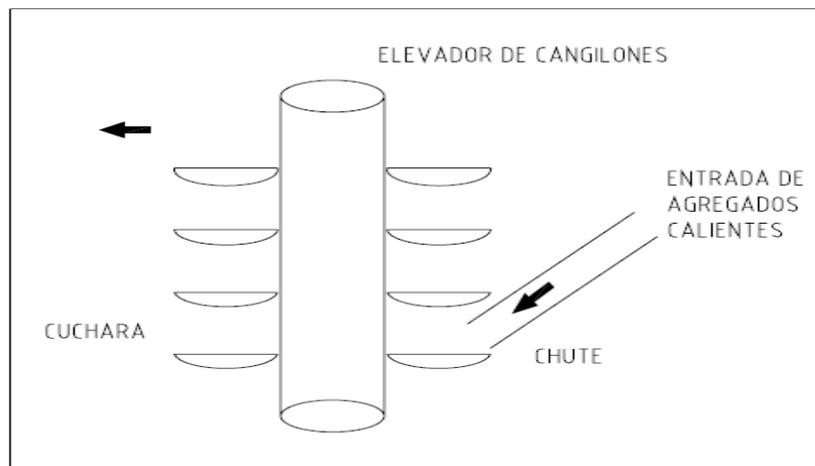
la temperatura en la llama aproximadamente 800 °C. Aquí los agregados son calentados en forma gradual hasta alcanzar los 150 °C.

- Se le llama de contraflujo porque en una dirección entran los agregados y en la otra dirección salen los gases, estos gases hay que expulsarlos del horno porque si no el horno se satura y no habrá oxígeno que nos permita generar la llama.
- Estos gases son expulsados usando un Extractor, después continuaremos con la explicación de la extracción de gases.

### 2.10.2.3.3- Elevador de Cangilones.

- Una vez que los agregados son calentados hasta una temperatura de 150 °C pasan al elevador de Cangilones que no es otra cosa que un sistema de poleas que levantan las cucharas cargados con el agregado.

Fig.9.- Elevador de Cangilones

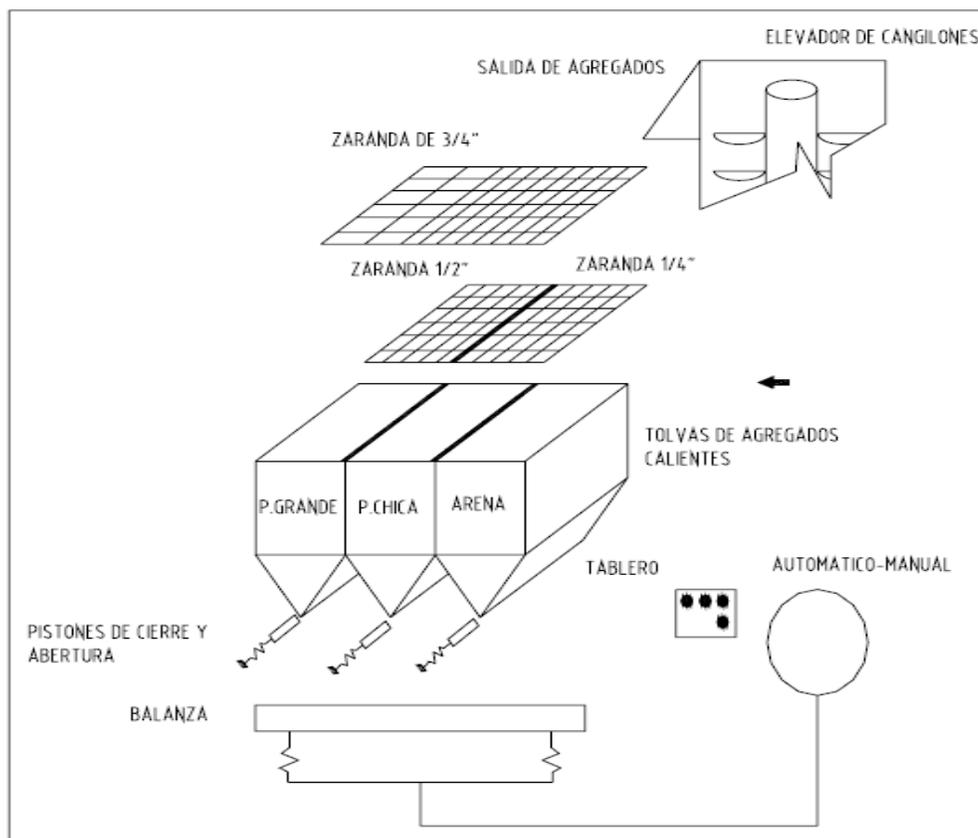


### 2.10.2.3.4.- Zarandas y Balanza.

- Los agregados calientes pasan del elevador a las zarandas metálicas de  $\frac{3}{4}$ " ,  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{1}{4}$ " las cuales son activadas de modo que se desplazan horizontalmente y vibran, pasando así los agregados a llenar las tolvas correspondientes.

- El pesaje se realiza manualmente, el operario primero llena la arena, luego la piedra chica y después la piedra grande, este pesaje es acumulativo, se van acumulando los pesos que indican “la bachada” (es decir, un lote).
- En plantas donde la operación de pesaje es manual existe una fuente de error, ya que al realizar manualmente esta operación, se está propenso a errores que dependen de la capacidad del operario y de cuan cansado se encuentre.

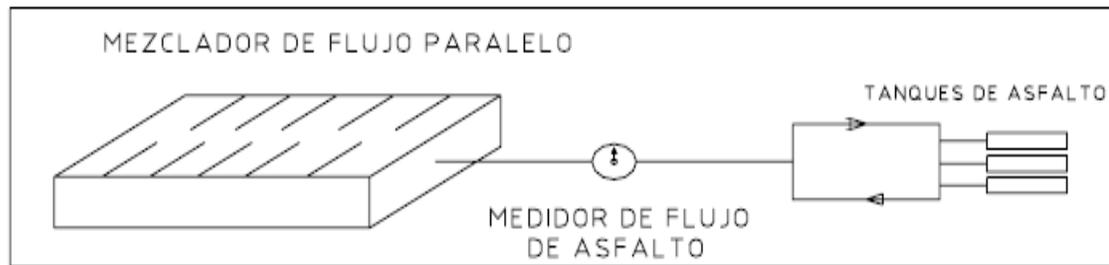
Fig.10.- Mecanismo de las Zarandas y Balanza



#### 2.10.2.3.5.- Mezclador de Flujo Paralelo.

- Una vez que ya se tiene todo pesado, el operario presiona el botón de descarga y los agregados pasan al mezclador de flujo paralelo, donde primero se mezclan los agregados y después se adiciona el asfalto caliente.

Fig.11.- Mezclador de Flujo Paralelo



- El medidor de flujo de asfalto si es automático, aquí si podemos medir exactamente la cantidad de asfalto que entra a la mezcla.
- Previamente el asfalto ha sido calentado a una temperatura de 150 °C., en el calentador de aceite o “Hy Way”, así que a esta temperatura es mezclado.
- El tiempo de mezclado es de 45 segundos a 1 minuto aproximadamente.
- Cuando se tiene la mezcla asfáltica se abren las compuertas del mezclador y esta cae al camión volquete a una temperatura de 150 °C., quedando lista para ser transportada a obra.

#### 2.10.2.3.6.- Grupo Electrónico.

El grupo electrógeno proporciona energía a todos los equipos mecánicos eléctricos.

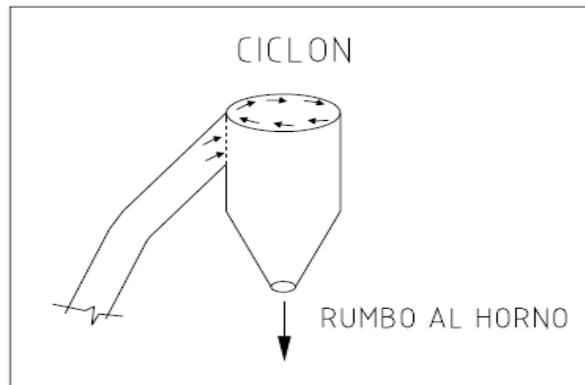
#### 2.10.2.3.7. Proceso de Extracción de Gases.

Paralelamente a la producción de la mezcla, es necesario que los gases generados y el polvo en el horno rotativo, se traten.

##### □ EXTRACTOR DE GASES

- Los gases entran tangencialmente al ciclón y debido a la fuerza centrífuga de este, se pegan a las paredes. Las partículas más pesadas caen y regresan al horno, rumbo al elevador de cangilones.

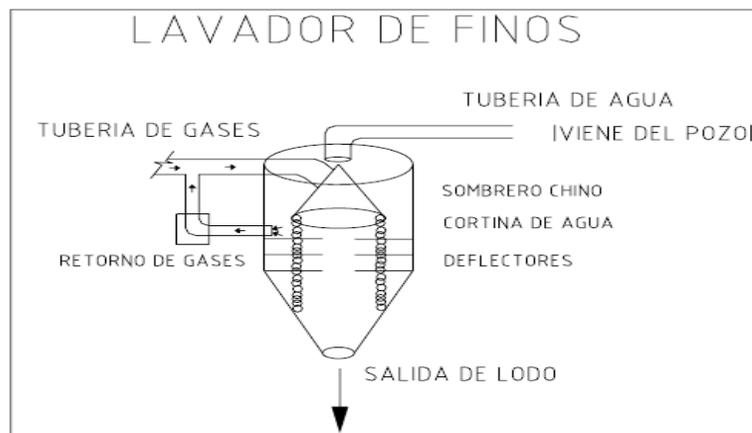
Fig.12.- Ciclón: Extractor de Gases y Polvo



#### □ LAVADOR DE FINOS

- Las partículas más finas (las cuales no han sido capturadas por el ciclón) son llevadas a través de una tubería hasta el lavador de finos, donde son rodeadas por una cortina de agua que cae sobre un sombrero chino, las cuales son expulsadas en forma de lodo (agua más partículas finas) hacia el pozo de sedimentación.
- Los gases que se escapan son tomados y conducidos nuevamente por la tubería para repetir el proceso de lavado.

Fig.13.- Lavador de Finos



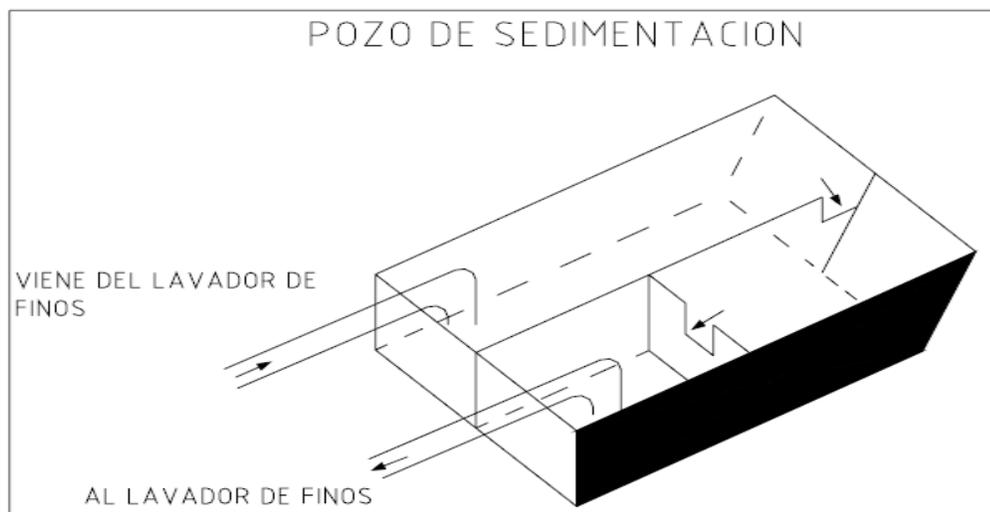
#### □ POZO DE SEDIMENTACIÓN

- Viene el lodo del lavador y llena la poza. Este lodo se decanta, el agua sube de nivel y pasa por la compuerta a la otra división hasta que la llena, una vez que se decanta este lodo se abre la compuerta de modo que pasa agua ya mas

limpia a la tercera división adonde será tomada por una tubería para ser reutilizada en el lavador de finos.

- Una vez que la poza se llena de lodo un cargador frontal retira todo el lodo, limpiando la poza, la forma inclinada es para que la cuchara del cargador entre con más facilidad en la poza.

Fig.14.-Pozo de Sedimentación



## 2.11.- Relaciones Volumétricas y Gravimétricas en Mezclas Asfálticas.

Es ampliamente reconocido que el comportamiento de la mezcla asfáltica es influenciado significativamente por las proporciones relativas de asfalto, agregado y aire.

Las proporciones volumétricas, o estrictamente hablando, los parámetros volumétricos de la mezcla son los vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral (VMA), y los vacíos llenos con asfalto (VFA).

El presente capítulo describe el análisis volumétrico de la mezcla asfáltica, el cual asume un papel importante en muchos procedimientos de diseño de mezclas.

Dicho análisis aplica tanto a mezclas elaboradas en laboratorio, como a probetas extraídas en campo.

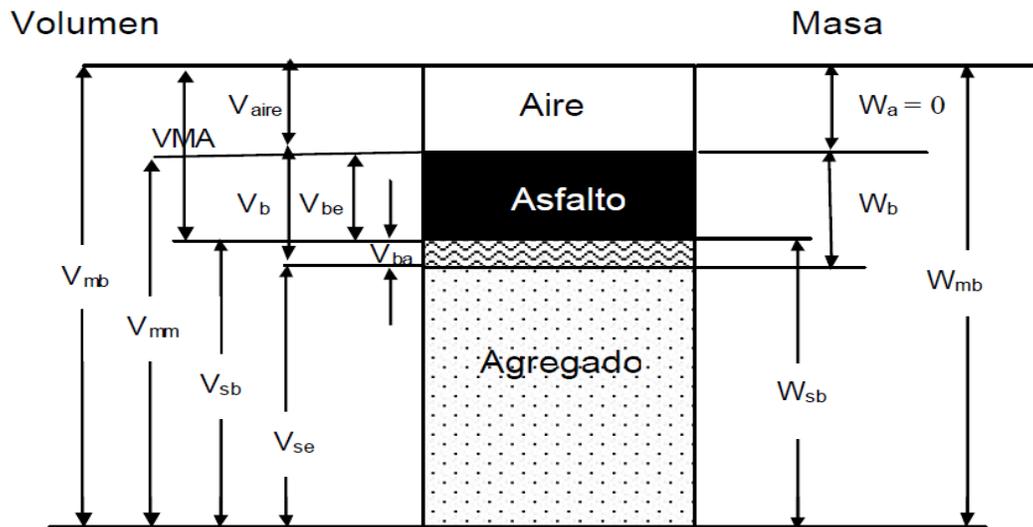
### **2.11.1.- Diagrama de Fases.**

En una mezcla asfáltica se tienen tres fases; la sólida, que está formada por el agregado mineral; la líquida, que es el asfalto; y la fase gaseosa, que comprende al aire. Debido a que el agregado mineral, que forma parte de la mezcla asfáltica es poroso, una parte del asfalto es absorbido por los poros del agregado, por tanto, una porción del agregado y del asfalto comparten espacio; a esta porción se le llama asfalto absorbido.

La consideración de la absorción de asfalto permite subdividir la fase de volumen del asfalto en volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido; y la fase de volumen del agregado, en volumen de agregado total y volumen de agregado efectivo. Con base en lo anterior y con relación a la Figura 10 se tiene que la suma de los volúmenes individuales ( $V_b + V_s$ ) es mayor que su volumen combinado ( $V_{be+s}$ ).

La Figura 15 muestra en forma esquemática el diagrama de fases utilizado para describir las propiedades de masa y volumen de una mezcla asfáltica compactada.

Fig.- 15. Diagrama Esquemático de Fases de una Mezcla Asfáltica Compactada  
Fuente: (Asphalt Institute SP-2, 1996)



Donde:

$V_{mb}$  = volumen total de la mezcla compactada

$V_{mm}$  = volumen de la mezcla sin vacíos

$VMA$  = volumen de vacíos en el agregado mineral

$V_{sb}$  = volumen total del agregado

$V_{se}$  = volumen efectivo de agregado

$V_{be}$  = volumen efectivo de asfalto

$V_{ba}$  = volumen de asfalto absorbido

$V_{aire}$  = volumen de aire

$W_{mb}$  = masa total de la mezcla compactada

$W_a$  = masa del aire

$W_b$  = masa del asfalto

$W_{sb}$  = masa total del agregado

Las fases de asfalto efectivo y de aire de la mezcla, se consideran como volumen de vacíos en el agregado mineral; y la fase de aire como el volumen de aire en la mezcla. Cuando los vacíos contienen únicamente asfalto ( $V_a=0$ ), se dice que los vacíos están llenos, y se estima que la mezcla ha alcanzado su densidad máxima teórica; cuando

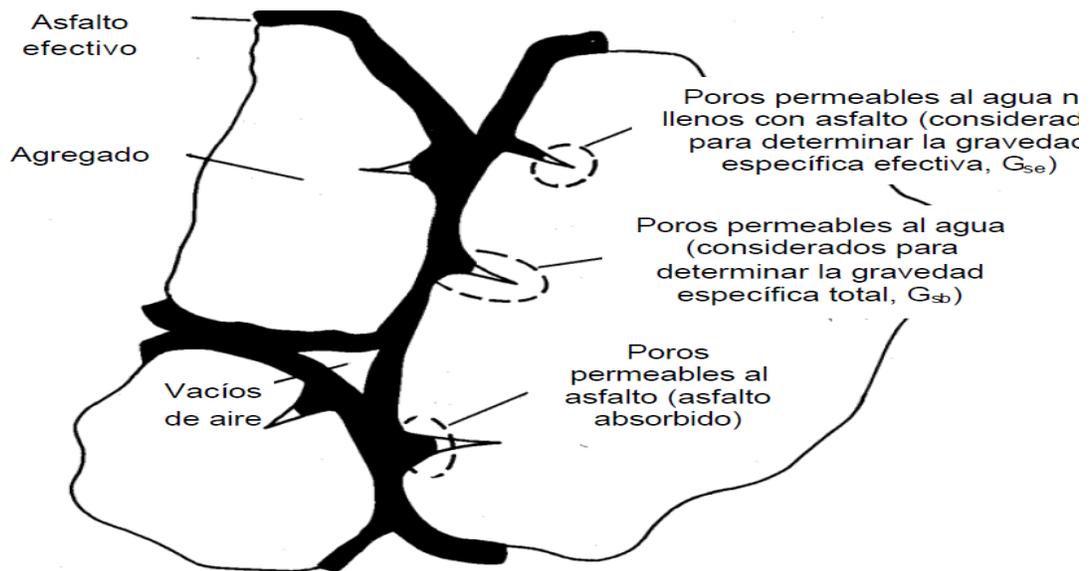
existe tanto aire como asfalto, se considera que parte de los vacíos están llenos con asfalto, y que la mezcla ha alcanzado un determinado grado de saturación.

La mezcla asfáltica compactada debe analizarse con base en el volumen, por tanto, es importante definir y entender cada uno de los volúmenes del diagrama de fases. A continuación se presentan las definiciones, y en la Figura 11.- se ilustran dichos volúmenes para una mejor comprensión.

- Volumen de asfalto efectivo,  $V_{be}$ . Es el volumen de asfalto que cubre las partículas de agregado; es decir, es el asfalto que no es absorbido por los poros del agregado.
- Volumen de asfalto absorbido,  $V_{ba}$ . Es el volumen de asfalto que es absorbido por los poros externos del agregado.
- Volumen total del agregado,  $V_{sb}$ . Es el volumen total del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua.
- Volumen efectivo del agregado,  $V_{se}$ . Es el volumen del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua no llenos con asfalto.
- Volumen aparente del agregado,  $V_{sa}$ . Es el volumen del sólido del agregado, es decir, no incluye el volumen de los poros permeables al agua.

Fig.- 16.-Ilustración del Volumen de Aire, Volumen de Asfalto Efectivo y Volumen de Asfalto Absorbido en una Mezcla Asfáltica Compactada

Fuente:(Asphalt Institute MS-2, 1996)



### 2.11.2.- Relaciones de Masas y Volúmenes.

En Mecánica de Suelos se relaciona la masa de las distintas fases de un suelo con sus volúmenes correspondientes por medio del concepto de masa específica; es decir, por la relación entre la masa de la sustancia y su volumen. (Juárez-Badillo y Rico Rodríguez, 1995).

Por otro lado, la masa específica del suelo se relaciona con la masa específica del agua destilada a una temperatura especificada, por medio del concepto de masa específica relativa o densidad relativa.

En mezclas asfálticas, la masa específica relativa se llama gravedad específica, o sea, la relación entre la masa de un volumen dado de una sustancia y la masa de igual volumen de agua; ambos, a la misma temperatura. Esta es la única propiedad del material a partir de la cual se puede determinar el volumen, conociendo la masa del material.

A partir de la gravedad específica se determina la masa específica del material, como sigue:

$$G_m = \frac{\gamma_m}{\delta_s} \quad (12.1)$$

A su vez, la masa específica del material es:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

$$G_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_w} = \frac{W_m}{V_m \cdot \gamma_w} \quad (12.2)$$

$G_m$  = gravedad específica del material

$\gamma_m$  = masa específica del material, g/cm<sup>3</sup>

$\gamma_w$  = masa específica del agua, que es igual a 1 g/cm<sup>3</sup>

$W_m$  = masa del material

$V_m$  = volumen del material

La Ecuación 12.2 se utiliza en mezclas asfálticas para calcular los parámetros volumétricos, así como en el cálculo de las gravedades específicas del agregado.

Debido a que en la mezcla asfáltica se considera la absorción de asfalto, se determinan tres tipos de gravedades específicas del agregado, dependiendo de los poros que se estima forman parte del volumen del agregado.

Estas gravedades son la gravedad específica total, la gravedad específica aparente, y la gravedad específica efectiva.

### 2.11.2.1.- Gravedad Específica Total del Agregado, $G_{sb}$ .

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado

(Considera sólo el volumen de los poros permeables al agua) y la masa de igual volumen de agua; ambos a la misma temperatura (Figura 16.-).

Sin embargo, la mezcla consiste en fracciones de agregado grueso, agregado fino, y polvo; todos tienen gravedades específicas diferentes, por lo que es necesario determinar la gravedad específica para la combinación de agregado seleccionado mediante la siguiente ecuación:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (12.3)$$

Donde:

$G_{sb}$  = gravedad específica total de la combinación de agregado seleccionado.

$P_1, P_2, P_N$  = porcentajes individuales por masa de agregado.

$G_1, G_2, G_N$  = gravedad específica total individual del agregado.

La gravedad específica total del polvo resulta difícil de determinar; sin embargo, el error es usualmente insignificante cuando en su lugar se emplea la gravedad específica aparente del polvo.

Es importante señalar que la gravedad específica total del agregado debe medirse en laboratorio con la mayor precisión posible, pues ésta es usada para convertir las masas medidas a volúmenes; y cualquier error pequeño en el  $G_{sb}$  se reflejará en un error significativo en el cálculo de volúmenes, lo cual podría no ser descubierto.

#### **2.11.2.2.-Gravedad Específica Aparente del Agregado, $G_{sa}$ .**

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado (Considera sólo el volumen del sólido del agregado) y la masa de igual volumen de agua destilada, ambos a la misma temperatura.

Al igual que con la gravedad específica total, la gravedad específica aparente para la combinación de agregado seleccionado se calcula mediante la Ecuación 12.3.

#### **2.11.2.3.-Gravedad Específica Efectiva del Agregado, $G_{se}$ .**

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado (Considera sólo el volumen de los poros permeables al agua no llenos con asfalto).y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.

Esta gravedad depende del volumen de asfalto absorbido, por lo que se determina a partir de la gravedad específica máxima teórica de la mezcla (en esta prueba se tiene un período de curado de la mezcla suelta, que permite la absorción de asfalto).

La gravedad específica efectiva, se calcula con la siguiente ecuación:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (12.4.-)$$

Donde:

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva de la combinación de agregado seleccionado.

$P_{mm}$  = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100.

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima (ASTM D 2041 ó ASHTO T 209) de la Mezcla suelta (sin vacíos de aire).

$P_b$  = contenido de asfalto, porcentaje con respecto al total de la mezcla

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

El valor para la gravedad específica efectiva de un agregado debe ubicarse entre su gravedad específica total y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva está fuera de estos límites, se debe asumir que el valor es incorrecto, y se debe volver a determinar la gravedad específica máxima teórica para encontrar la causa del error (Asphalt Institute SP-2, 1996).

Otras gravedades específicas necesarias de determinar son las siguientes:

#### **2.11.2.4.-Gravedad específica del asfalto, $G_b$ .**

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de asfalto y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura (FHWA, 1995).

#### **2.11.2.5.-Gravedad específica máxima teórica de la mezcla, $G_{mm}$ .**

Es la relación entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura (FHWA,1995).

También se llama gravedad específica RICE, en reconocimiento al investigador James Rice, quien desarrolló el método de prueba.

### **2.11.2.6.-Gravedad específica total de la mezcla asfáltica compactada, $G_{mb}$ .**

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de mezcla asfáltica compactada y la masa de igual volumen de agua destilada, ambos a la misma temperatura.

### **2.12.-Parámetros Volumétricos.**

Los tres parámetros que han sido ampliamente usados y que forman parte de los requisitos de diseño de mezclas, son los vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenos con asfalto (VFA); y los vacíos de aire ( $V_a$ ).

Vacíos de aire,  $V_a$ . Es el volumen de los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado, cubiertas por asfalto en una mezcla asfáltica compactada.

Vacíos en el agregado mineral, VMA. Es el volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas de agregado en una mezcla asfáltica compactada.

Vacíos llenos con asfalto, VFA. Es la porción del volumen de espacio vacío intergranular (VMA) que es ocupado por el asfalto efectivo (Asphalt Institute SP-2,1996).

Con referencia a la Figura 10.- las siguientes relaciones pueden ser derivadas:

- Vacíos de aire. Es la relación entre el volumen de aire y el volumen total de la Mezcla, esta relación es análoga a los vacíos de aire en Mecánica de Suelos.

Se expresa como porcentaje:

$$V_a = \frac{V_{aire}}{V_{mb}} \times 100 \quad (12.5)$$

- Vacíos en el agregado mineral. Es la relación entre el volumen de asfalto efectivo más el volumen de aire y el volumen total de la mezcla compactada; esta relación es análoga al concepto de porosidad en Mecánica de Suelos.

Se expresa como porcentaje:

$$VMA = \frac{V_{be} + V_{aire}}{V_{mb}} \times 100 \quad (12.6)$$

- Vacíos llenos con asfalto. Es la relación entre el volumen de asfalto efectivo y el volumen de vacíos en el agregado mineral de una mezcla compactada; esta relación es análoga al concepto de grado de saturación en Mecánica de Suelos. Se expresa como porcentaje:

$$VFA = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_{aire}} = \frac{V_{be}}{VMA} = \frac{VMA - V_a}{VMA} \times 100 \quad (12.7)$$

- Contenido de asfalto. Es la relación entre la masa de asfalto y la masa total de la mezcla compactada; esta relación es análoga al contenido de agua en Mecánica de Suelos.

Se expresa como porcentaje:

$$CA = \frac{W_b}{W_{mb}} \times 100 \quad (12.8)$$

El contenido de asfalto puede expresarse como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica, o como un porcentaje de la masa del agregado.

- Contenido de asfalto efectivo. Es la relación entre la masa de asfalto efectivo y la masa total de la mezcla compactada.

Se expresa como porcentaje:

$$CA_e = \frac{W_{be}}{W_{mb}} \times 100 \quad (12.9)$$

- Contenido de asfalto absorbido. Es la relación entre la masa de asfalto Absorbido y la masa total del agregado de la mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje:

$$CA_a = \frac{W_{ba}}{W_{sb}} \times 100 \quad (12.10)$$

### **2.13.-Diseño Marshall de Mezclas Asfálticas.**

El concepto del método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex Ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi.

El ensayo Marshall, en su forma actual, surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple.

El cuerpo de Ingenieros decidió adoptar el Método Marshall, desarrollarlo y adaptarlo para diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido en parte a que el método utilizaba equipo portátil. A través de una extensa investigación de pruebas de tránsito y de sus estudios de correlación, en el laboratorio, el cuerpo de ingenieros mejoró y agregó ciertos detalles al procedimiento del ensayo Marshall, y posteriormente desarrolló criterios de diseño de mezclas.

#### **2.13.1.-Propósito.**

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto que tendrá una mezcla asfáltica. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método Marshall, como se presenta en esta sección, sólo se aplica a mezclas asfálticas de pavimentación que usan cemento asfáltico con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25.0 (1 pulgada) o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas de pavimentación.

### **2.13.2.-Descripción.**

A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T245 (o ASTM D 1559).

- **Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

Como es conocido, diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características, que tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades que se necesita en una determinada mezcla asfáltica, y posteriormente seleccionar el tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

- **Selección de las muestras de material**

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple, los datos de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la “receta” para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

- **Preparación del agregado**

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va ser usado debe ser ya conocida con el propósito de establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar claramente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico y efectuar un análisis granulométrico. Con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfalto, se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de trabajo que se adecúe al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (Grava de 3/4, Grava de 3/8 y Arena Natural).

Como indica el nombre del método, se tantea con diferentes porcentajes de agregado, hasta que se encuentre una combinación que se adecúe de mejor manera posible a la faja de trabajo.

Sabiendo que se tiene que elaborar briquetas con un peso de 1200g; se determina el contenido de asfalto en peso equivalente a un porcentaje del peso total de la briqueta.

Conociendo el peso del agregado que tiene que ocupar cada briqueta por la diferencia en peso entre el total de la briqueta y el peso del asfalto, se separa una dosificación en pesos retenidos, que aporta cada tamiz.

Se prepara un número determinado de muestras de agregado, por contenido de asfalto, para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall, y se separa cada uno en bolsas o platos correctamente identificados.

Es importante mencionar que para la elaboración del método tradicional de mezcla asfáltica en caliente, el agregado tiene que estar seco; para tal fin, antes de efectuar el pesado se deja el material en horno a 110°C durante 24 horas.

- **Preparación de las muestras (briquetas) de ensayo.**

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentos son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, como se mencionó anteriormente. Para esta investigación solo se realizara con un contenido óptimo de asfalto para que se pueda analizar los resultados con las variables especificadas anteriormente. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados de análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Se deja enfriar la mezcla hasta que llegue a una temperatura adecuada para su compactación.
- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la comparación, donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, y 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes, realmente, recibe un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación, las briquetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

### **2.13.3.-Procedimiento del Ensayo Marshall.**

Existen tres procedimientos en el método de ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las briquetas.

#### **2.13.3.1.-Determinación del Peso Específico Total.**

El peso específico total de cada probeta es determinado tan pronto las briquetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de la densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento en la norma AASHTO T 166.

#### **2.13.3.2.-Ensayo de Estabilidad y Fluencia.**

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la consistencia a la deformación de la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60° (140°F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- La probeta es removida del baño, secada y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un aparato que aplica carga constante sobre la briqueta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia)
- La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
- La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

#### **2.13.4.-Valor de Estabilidad Marshall.**

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una briqueta cede o falla totalmente. La figura 17.- muestra una mordaza en la que están acoplados dos medidores, uno del desplazamiento o fluencia, y otro de la carga aplicada sobre la briqueta (estabilidad).

Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, el cabezal superior se acerca al cabezal inferior lentamente, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador. Luego se suspende la aplicación de la carga una vez que la briqueta falla después de haber registrado la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de la Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto es mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material, es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de la durabilidad.

Fig.17.- Mordaza con Medidores de Estabilidad



Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material, es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de la durabilidad.

### **2.13.5.-Valor de fluencia Marshall.**

La fluencia Marshall medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La figura 18.- muestra un medidor típico de fluencia para medir la deformación que ocurre durante el ensayo Marshall. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores altos de estabilidad Marshall son considerados demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo cargas del tránsito.

Fig.- 18.-Medidor de Fluencia



### **2.13.6.-Análisis de Densidad y Vacíos.**

Una vez se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de briquetas de prueba. El propósito del análisis es determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

### **2.13.7.-Análisis de Vacíos.**

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada briqueta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y del agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbida por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y agua.

### **2.13.8.-Análisis de Peso Unitario.**

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por  $1000 \text{ kg/m}^3$  ( $64 \text{ lb/pie}^3$ ).

### **2.13.9.-Análisis de VAM.**

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada. Incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VAM es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada.

### **2.13.10.-Análisis de VLLA.**

Los vacíos llenos de asfalto, VLLA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenos de asfalto. El VAM abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VLLA se calcula al restar los vacíos de aire del VAM, luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.

## **CAPITULO 3.-**

### **MUESTREO, CARACTERIZACION Y ENSAYOS DE LOS MATERIALES**

#### **3.1.-Muestreo de Materiales.**

##### **3.1.1.-Muestreo de Aridos.**

Para esta investigación, se sacó una muestra de áridos de la planta de asfaltos del SEDECA, ubicada en la región de San Jose de Charaja, donde se encuentra también la chancadora de esta importante institución.

Este material que nos proporciona esta planta es un agregado chancado, del cual se extrajo ciento veinte kilos, que se dividieron en tres características 3/4, 3/8 y fino (Filler) para poder revisar la granulometría y poder tamizar para poder tener separado por tamices los agregados, para poder realizar los ensayos a los agregados para dicha investigación.

##### **3.1.2.-Muestreo de Cemento Asfaltico.**

Los procedimientos requeridos de acuerdo a la norma ASTM D 140 AASHTO T40-78, para obtener muestras de asfaltos líquidos, semisólidos o sólidos, utilizados normalmente en obras de pavimentación; se puede realizar en el lugar de producción del material, en la terminal de abastecimiento o en el lugar de acopio o entrega del producto.

El método de muestreo es tan importante como el ensayo, por lo que se deben adoptar las precauciones necesarias para obtener muestras que representen la verdadera naturaleza y condición de los materiales. Las muestras se deben tomar por los métodos que se describen más adelante, que permitan cumplir los siguientes propósitos:

- Representatividad de la muestra.
- Indicación de la variación máxima de las características principales del material.

Debido a los numerosos tipos y grados de materiales bituminosos que se despachan y almacenan alternativamente en los mismos envases o similares, siempre existe la posibilidad que esos envases se encuentren contaminados con residuos, precipitados y/o solventes limpiadores.

En muchas ocasiones las muestras no representan estrictamente el material o se contaminan después de obtenidas; es de responsabilidad tanto del que produce, como del transportista, del usuario como de la metodología de muestreo, tomar las debidas precauciones.

### **3.1.2.1.- Muestreo.**

El muestreo y despacho de asfalto al laboratorio debe realizarse, en lo posible, en el momento de la descarga, inmediatamente después de recepcionado en la planta, en el lugar de almacenamiento o en el sitio de obra. Para esta investigación se extrajo el cemento asfalto de la Planta de Charaja perteneciente al SEDECA, aprovechando que esta planta se encuentra en funcionamiento es que están permanentemente con asfaltos a temperaturas en donde se puede extraer con facilidad las muestras para cualquier uso.

### **3.1.2.2.- Despachos por Muestrear.**

De cada entrega de material asfáltico a obra se debe tomar el número de muestras requeridas. En el caso de entregas de reducido tamaño las muestras deben ser representativas de una cantidad máxima de 40m<sup>3</sup> de material.

En esta investigación se extrajo una cantidad aproximada de quince litros de cemento asfalto.

### **3.1.2.3.-Extracción de la Muestra.**

Se efectuó el muestreo por:

Por sangría a través de una llave o válvula de muestreo inserta en la línea de transferencia, durante la descarga del tercio central de la carga.

### **3.1.2.4.- Protección y Preservación de las Muestras.**

a) Los envases para muestras deben ser nuevos. No los lave, no enjuague ni seque con telas engrasadas. No use envases que presenten evidencias de fundente de soldadura o que no estén limpios y secos. La tapa debe cerrar herméticamente.

b) Inmediatamente después de llenar los recipientes, cierre herméticamente. No debe sumergir en solvente el envase lleno con la muestra, ni secarlo con un paño saturado en él; si es necesario limpiarlo, use un paño limpio y seco.

c) Rotule los envases mediante marcas indelebles colocadas sobre el recipiente mismo y no sobre la tapa, o mediante etiquetas firmemente adheridas al envase.

## **3.2.-Caracterización de Materiales.**

### **3.2.1.-Caracterización de Agregados.**

Para la caracterización de agregados se realizó en el laboratorio del SEDECA Servicio Departamental de Caminos, utilizando agregados de la región de San José de Charaja donde el SEDECA cuenta con una planta de chancado de materiales. A continuación se presenta el resumen granulométrico.

Se tomó una muestra representativa de cada muestra del material, para realizar el tamizado según la norma AASHTO –T27, para la caracterización granulométrica de los agregados a utilizar en las mezclas asfálticas.

A continuación se presenta los resultados de análisis granulométrico.

### **Ensayo de Granulometría.**

#### **GRAVA 3/4"**

Tabla 10.- Granulometría 3/4"

N°	Origen	Granulometría												
		3"	2"	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	Nº4	Nº8	Nº10	Nº16	Nº40	Nº80	Nº200
1	Material Chancado San Jose de Charaja	100	100	100	92,7	34,6	6,5	0,7	0,5	0,4	0,34	0,3	0,2	0,1
2	Material Chancado San Jose de Charaja	100	100	100	83,43	31,14	5,85	0,63	0,45	0,36	0,31	0,27	0,18	0,09

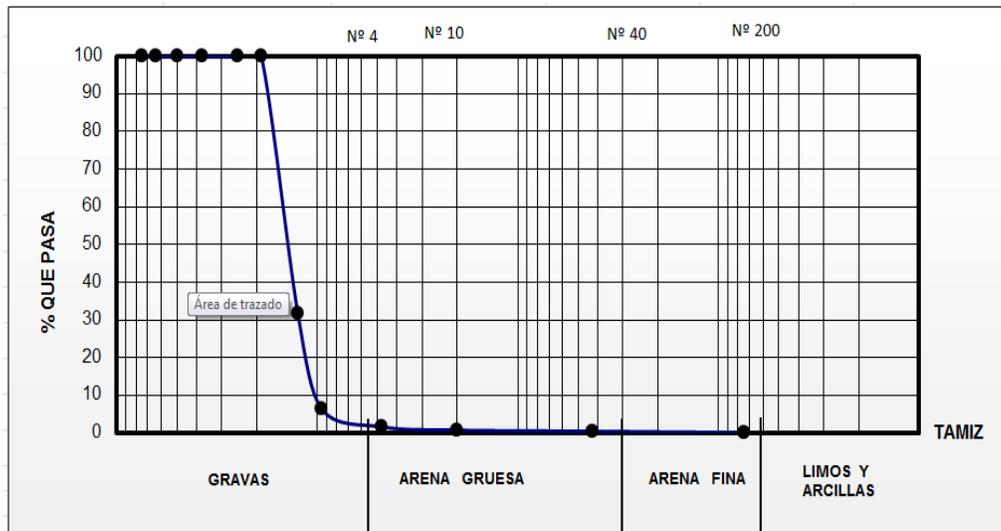
Tabla 11.- Resumen 3/4 "

RESUMEN DE DATOS														
Número de Datos	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Promedio	100,0	100,0	100,0	88,1	32,9	6,2	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	
Dato Máximo	100,0	100,0	100,0	92,7	34,6	6,5	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	
Dato Mínimo	100,0	100,0	100,0	83,4	31,1	5,9	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	
Desviación Estándar	0,0	0,0	0,0	6,6	2,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Tabla 12.- Granulometría

Peso Total (gr.)			136	A.S.T.M.	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,5	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	92,70	92,70	68,16	31,84
3/8"	9,50	34,60	127,30	93,60	6,40
Nº4	4,75	6,50	133,80	98,38	1,62
Nº10	2,00	1,20	135,00	99,26	0,74
Nº40	0,425	0,38	135,38	99,54	0,46
Nº200	0,075	0,50	135,88	99,91	0,09
	BASE	0,10			

Fig.19.- Curva Granulométrica 3/4



GRAVA 3/8''

Tabla 13.- Granulometría 3/8''

Nº	Origen	Granulometría												
		3"	2"	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	Nº4	Nº8	Nº10	Nº16	Nº40	Nº80	Nº200
1	Material Chancado San Jose de Charaja	100	100	100	100	100	93,6	16,3	12,3	11,4	8,5	7	3,2	1,6
2	Material Chancado San Jose de Charaja	100	100	100	100	95,00	88,92	15,49	11,07	10,26	7,65	6,30	2,88	1,44

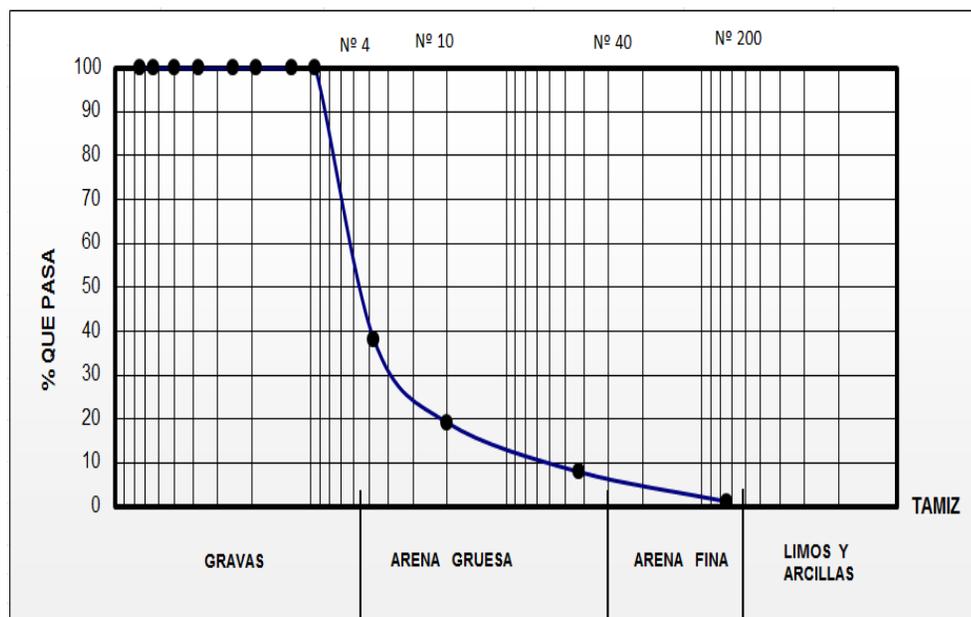
Tabla 14.- Resumen 3/8''

RESUMEN DE DATOS														
Número de Datos	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Promedio	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	91,3	15,9	11,7	10,8	8,1	6,7	3,0	1,5	
Dato Máximo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	93,6	16,3	12,3	11,4	8,5	7,0	3,2	1,6	
Dato Mínimo	100,0	100,0	100,0	100,0	95,0	88,9	15,5	11,1	10,3	7,7	6,3	2,9	1,4	
Desviación Estándar	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	3,3	0,6	0,9	0,8	0,6	0,5	0,2	0,1	

Tabla 15.- Curva Granulométrica

Peso Total (gr.)			151,4	A.S.T.M.	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,5	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	93,80	93,80	61,96	38,04
Nº10	2,00	28,60	122,40	80,85	19,15
Nº40	0,425	16,94	139,34	92,03	7,97
Nº200	0,075	10,20	149,54	98,77	1,23
BASE		1,60			

Fig.- 20.- Curva Granulométrica 3/8



## MATERIAL FINO - Arena Natural

Tabla 16.- Granulometría Arena Natural

Nº	Origen	Granulometría												
		3"	2"	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	Nº4	Nº8	Nº10	Nº16	Nº40	Nº80	Nº200
1	San Jose de Charaja	100	100	100	100	100	100	98,7	88,2	81,1	55,8	45,7	25,1	12,7
2	San Jose de Charaja	100	100	100	100	100	97,5	96,2	86,0	79,1	54,4	44,6	23,8	12,1

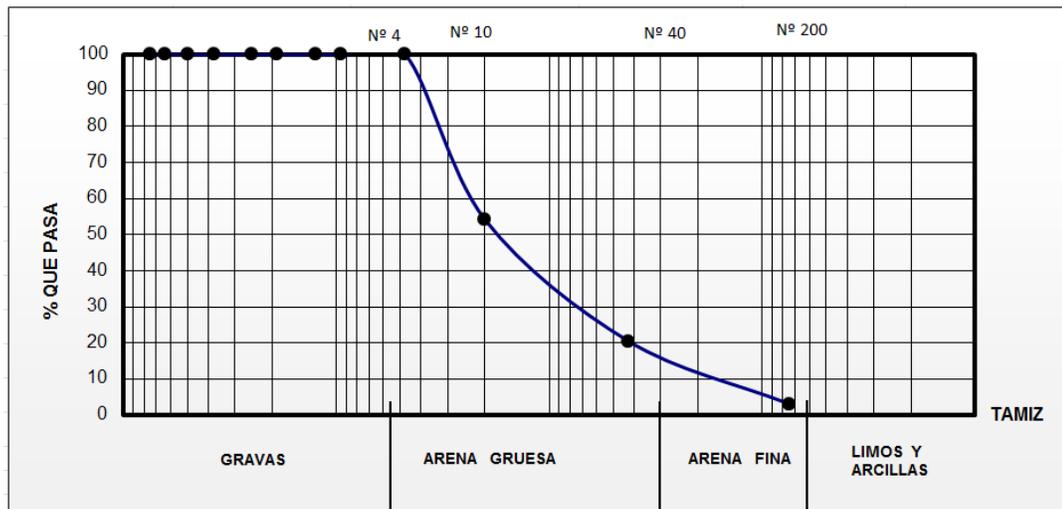
Tabla 17.- Resumen Arena Natural

RESUMEN DE DATOS														
Número de Datos	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Promedio	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,8	97,5	87,1	80,1	55,1	45,1	24,5	12,4	12,4
Dato Máximo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,7	88,2	81,1	55,8	45,7	25,1	12,7	12,7
Dato Mínimo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	96,2	86,0	79,1	54,4	44,6	23,8	12,1	12,1
Desviación Estándar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	1,7	1,6	1,4	1,0	0,8	0,9	0,4	0,4

Tabla 18.- Granulometría

Peso Total (gr.)			407,3	A.S.T.M.	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,5	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº10	2,00	186,90	186,90	45,89	54,11
Nº40	0,425	136,90	323,80	79,50	20,50
Nº200	0,075	70,80	394,60	96,88	3,12
	BASE	12,70			

Fig.- 21.- Curva Granulométrica Arena Natural



## Arena Chancada

Tabla 19.- Granulometría Arena Chancada

Nº	Origen	Granulometría												
		3"	2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº10	Nº16	Nº40	Nº80	Nº200
1	San Jose de Charaja	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	San Jose de Charaja	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	95,0	95,0

Tabla 20.- Resumen Arena Chancada

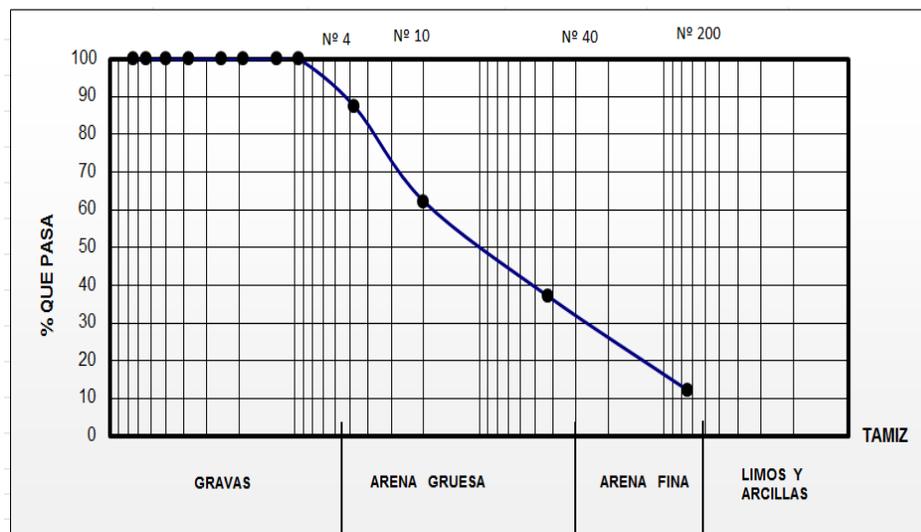
RESUMEN DE DATOS													
Número de Datos	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Promedio	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,8	98,8	98,8	98,8	98,8	98,8	97,5	97,5
Dato Máximo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Dato Mínimo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	95,0	95,0
Desviación Estándar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	3,5	3,5

Tabla 21.- Granulometría

Peso Total (gr.)			775	A.S.T.M.	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,5	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00

3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
Nº4	4,75	97,50	97,50	12,58	<b>87,42</b>
Nº10	2,00	195,00	292,50	37,74	<b>62,26</b>
Nº40	0,425	195,00	487,50	62,90	<b>37,10</b>
Nº200	0,075	192,50	680,00	87,74	<b>12,26</b>
BASE		95,00			

Fig.- 22.- Curva Granulométrica Arena Chancada



### 3.2.1.1.-Peso Específico y Absorción.

#### 3.2.1.1.1.-Determinación del Peso Específico y Absorción del Agregado Fino.

AASHTO T – 84

Tabla 22.- Peso Específico y Absorción del Agregado Fino

Descripción	Unidad	Arena Chancada	PROMEDIO	
Peso Frasco Seco Vacío (u)	grs.	156,9		
Peso Frasco+Muestra(f)	grs.	295,9		
Peso Muestra Saturada de Superficie Seca(x=f-u)	grs.	234,5		
Peso Muestra Seca (a)	grs.	223,5		
Peso Agua (t)	grs.	327,8		
Peso Muestra + Agua (b)	grs.	466,8		
Peso Espec. del Agreg. Seco ( $a/((x+t)-b)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,340	2,340	
P. E. A. Saturado Sup. Seco( $x/((x+t)-b)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,455	2,455	<b>2,550</b>
Peso Especifico Aparente ( $a/(a+t)-b)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,645	2,645	
% de Absorción ( $(x-a)/a$ )*100	%	<b>4,922</b>	4,922	<b>4,922</b>

Ensayo realizado por el departamento de laboratorio del SEDECA.

### 3.2.1.1.2.-Determinación del Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.

(AASHTO T-85)

Tabla 23.- Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso

<b>VOLUMEN DESPLAZADO Y GRAVEDAD ESPECIFICA DEL AGREGADO GRUESO</b>				
<b>Descripcion</b>	<b>Unidad</b>	<b>Grava 3/4"</b>	<b>PROMEDIO</b>	
Peso Muestra Saturada de Superf. Seca (e)	grs.	5299		
Peso Material Seco (f)	grs.	5246		
Peso Muestra + Cesto suspendido en Agua	grs.	3283		
Peso del Cesto suspendido en Agua	grs.	0		
Peso Muestra suspendida Agua (g)	grs.	3283		
Peso Específico del Agregado Seco (f / (e-g))	grs./cm3	2,602	2,593	
P.E.A. Saturado de Superficie Seca (e/(e-g))	grs./cm3	2,628	2,623	<b>2,648</b>
Peso Específico Aparente (f/ (f-g))	grs./cm3	2,672	2,674	
% de Absorción ((e-f)/f)*100	%	<b>1,010</b>	<b>1,165</b>	<b>1,165</b>

Ensayo realizado por el departamento de laboratorio del SEDECA.

### 3.2.1.2.- Desgaste de los Angeles Grava.

El ensayo de Desgaste de Los Angeles determina el desgaste de los agregados para determinar su aplicabilidad en mezclas asfálticas, cuando son sometidos a los efectos del tráfico de vehículos. El procedimiento que se siguió para el desarrollo del ensayo fue el siguiente:

Para el material de 3/4"

- Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía al tipo "B". En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo.
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 1/2" y pasante el de 3/4".
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 3/8" y pasante el de 1/2".
- Introducir el material combinado dentro del tambor con 11 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.
- Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido.

## GRADACIONES PARA ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ANGELES

AASHTO T-96.

Tabla 24.- Gradaciones para Ensayo de Desgaste de los Angeles

Gradación	Pasa	Retiene	Peso (g)	Cant.	Vel.	
A (12)	1 1/2"	1"	1250	500 rev.	32.5 rpm	
	1"	3/4"	1250			
	3/4"	1/2"	1250			
	1/2"	3/8"	1250			
B (11)	3/4"	1/2"	2500			
	1/2"	3/8"	2500			
C (8)	3/8"	1/4"	2500			1000 rev.
	1/4"	N°4	2500			
D (6)	N°4	N°8	5000			
	3"	2 1/2"	2500			
E(12)	2 1/2"	2 "	2500			
	2 "	1 1/2"	5000			
F(12)	2 "	1 1/2"	5000			
	1 1/2"	1"	5000			
G(12)	1 1/2"	1"	5000			
	1"	3/4"	5000			

Gradación: B

Esferas a 32,5 RPM

Carga abrasiva con: 11

500 Revoluciones

Tabla 25.- Desgaste 3/4

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA
3/4	1/2	2500
1/2	3/8	2500
<b>RETENIDO TAMIZ DE CORTE N° 12 (1,7 mm)</b>		4.079
<b>DIFERENCIA</b>		921

$$\text{Desgaste} = \frac{\text{diferencia}}{5000} * 100$$

$$\text{Desgaste} = 18.42 \%$$

Material apto de acuerdo a especificaciones, el % debe ser menor a 40. Ensayo Realizado por el departamento de laboratorio del SEDECA.

### 3.2.1.3.- Desgaste de los Angeles gravilla.

Para el material de 3/8”:

- Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía a al tipo “C”. En base a estos resultados, se siguió el procedimiento del ensayo:
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz de 1/4” y pasante el de 3/4”.
- Se pesó 2500 kg de material retenido en el tamiz #4 y pasante el de 1/2”.
- Introducir el material combinado dentro del tambor con 8 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.
- Tamizar el material en el tamiz #12 y pesar el retenido.

GRADACIONES PARA EN  
SAYO DE DESGASTE DE LOS ANGELES  
AASTHO T-96.

Tabla 26.- Gradaciones para Ensayo de Desgaste de los Angeles

Gradación	Pasa	Retiene	Peso (g)	Cant.	Vel.	
A (12)	1 1/2"	1"	1250	500 rev.	32.5 rpm	
	1"	3/4"	1250			
	3/4"	1/2"	1250			
	1/2"	3/8"	1250			
B (11)	3/4"	1/2"	2500			
	1/2"	3/8"	2500			
C (8)	3/8"	1/4"	2500			
	1/4"	N°4	2500			
D (6)	N°4	N°8	5000			
E(12)	3"	2 1/2"	2500			1000 rev.
	2 1/2"	2 "	2500			
	2 "	1 1/2"	5000			
F(12)	2 "	1 1/2"	5000			
	1 1/2"	1"	5000			
G(12)	1 1/2"	1"	5000			
	1"	3/4	5000			



Tabla 28.-Caras fracturadas material de 3/4"

ENSAYO	Lecturas	Promedio	Especificación	
PESO TOTAL (grs.) (a)	1000			
PESO RETENIDO TAMIZ N° 8 (grs.) (b)	956,5			
CARAS NO FRACTURADAS (grs.) (a- b)	43,5			
% Caras Fracturadas = (b/a)*100	95,65	<b>95,7</b>	>	75

El agregado es apto para la elaboración de mezclas asfálticas de acuerdo al resultado óptimo del ensayo, ya que de acuerdo a la norma ASTM D 692 nos indica que el mínimo es 75%. Ensayo realizado por el laboratorio del SEDECA.

Tabla 29.- Caras fracturadas material de 3/8"

ENSAYO	Lecturas	Promedio	Especificación	
PESO TOTAL (grs.) (a)	1000			
PESO RETENIDO TAMIZ N° 8 (grs.) (b)	995,0			
CARAS NO FRACTURADAS (grs.) (a- b)	5,0			
% Caras Fracturadas = (b/a)*100	99,50	<b>99,5</b>	>	75

El agregado es apto para la elaboración de mezclas asfálticas de acuerdo al resultado óptimo del ensayo, ya que de acuerdo a la norma ASTM D 692 nos indica que el mínimo es 75%. Ensayo realizado por el departamento de laboratorio del SEDECA.

### 3.2.1.5.-Equivalente de Arena.

Con el ensayo de equivalente de arena se pretende determinar las proporciones de arena y arcilla presentes en el agregado fino para la elaboración de mezclas asfálticas u hormigones; para la realización del ensayo se ejecutó el siguiente procedimiento:

- Se tamizó el material, separando las partículas que quedan retenidas en el tamiz #4 y trabajando solamente con el material pasante.
- En una probeta, se vierte 4 pulgadas de solución (Cloruro de calcio combinado con agua destilada).

- Se vertió una tara con una cantidad determinada de arena (aproximadamente 350 gr) tamizada en el #4.
- Se dejó reposar 5 minutos, y posteriormente se agitó vigorosamente durante 30 segundos, con la finalidad de que las partículas de arcilla sean suspendidas completamente en la solución.
- Se agregó solución hasta completar las 15 pulgadas, haciendo que toda la arena pegada en las paredes y el corcho de goma, caigan hasta el fondo; se dejó reposar durante 20 minutos.
- Después de observar una evidente separación entre el material fino y la arena, se leyeron los resultados en la escala graduada de la probeta en pulgadas y se repitió el mismo procedimiento 3 veces.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 30.- Resultados Equivalente de Arena

ENSAYO	Lecturas			Promedio	Especificación	
	1	2	3			
ENSAYO N°						
LECTURA NIVEL SUPERIOR	12,8	12,7	12,8			
LECTURA NIVEL INFERIOR	7,3	7,8	7,5			
% DE ARENA	57,03	61,42	58,59	<b>59,0</b>	>	45

El material es apto para el uso en mezclas asfálticas según las especificaciones de las normas AASHTO T 176 y ASTM D 2419.

Este ensayo fue elaborado por el departamento de laboratorio de SEDECA.

### **3.2.2.-Caracterización de Cemento Asfáltico.**

Con el propósito de realizar la investigación sobre *INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE AGITACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS SOBRE SUS PROPIEDADES*, se realizaron en el laboratorio del SEDECA los ensayos para poder realizar la caracterización del Cemento Asfáltico.

El asfalto utilizado es de características 85/100 del fabricante STRATURA Asfaltos de la República del Brasil.

El cemento asfáltico fue proporcionado por el SEDECA, los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Viscosidad Saybolt Furol.
- Penetración.
- Punto de Inflamación.

### **3.2.2.1.-Viscosidad Saybolt Furol.**

Para la realización del ensayo de viscosidad se realizó el siguiente procedimiento:

- Se obtuvo un valor estable de temperatura para el baño, de 140 °C.
- Paralelamente, se calentó el cemento asfáltico, sobre una plancha eléctrica, y no con llama directa, para preservarlo de la oxidación o envejecimiento prematuro, a una temperatura entre 80 y 100 °C, de manera que un vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135 °C). El calentado previo no debe exceder los 1.7 °C (3 °F) por encima de la temperatura de ensayo.
- Se agitó la muestra y posteriormente filtró con un tamiz #100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto.
- Se insertó un tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.
- Se vertió el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel quede por encima del borde de reboce, es decir, que rebalse un poco de asfalto por encima del vaso que lo contiene.
- Se agitó la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, empleando un movimiento circular y cuidando de no botar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permaneció

constante a la temperatura del ensayo ( $\pm 0.05$  °C) durante un minuto de agitación continua se retiró el termómetro.

- Se verificó que el matraz se encontraba en la posición adecuada; se retiró el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en el mismo instante se puso a funcionar el cronómetro. Se detuvo en el instante en que el fondo del menisco del cemento alcanzó la marca de graduación de 60 ml. del frasco receptor.
- Se anotó el tiempo del flujo en segundos.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 31.- Resultados Viscosidad Saybolt Furol

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt 135 °C  AASHTO T-72	seg	140.0	132.0	136.0	85	----- -

Este asfalto cumple con las especificaciones mínimas requeridas y es apto para realizar mezclas asfálticas, ya que el mínimo para este ensayo es 85 de acuerdo a la norma AASHTO T-72.

Fig.23.- Ensayo Viscosidad Saybolt Furol



### 3.2.2.2.-Penetración.

El ensayo de penetración se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se calentó el asfalto homogéneamente para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar la fluidez del material para verterlo en los moldes. Se cuidó que la temperatura de calentamiento previo no exceda en 100 °C al punto de ablandamiento, también con el objeto de que colocado el asfalto en los moldes, el tiempo que demore hasta enfriarse a una temperatura estable no sea demasiado.
- Se llenaron los moldes, teniendo cuidado de que la profundidad de llenado sea por lo menos 10 mm mayor al rango de penetración esperada. Se prepararon dos moldes con las mismas dimensiones y características de la misma muestra.
- Se dejaron enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar entre 20 y 30 °C durante un período aproximado de 2 horas, cubiertos para protegerlos del polvo.
- Se puso los moldes en un baño de agua a una temperatura de 25 °C manteniendo esta temperatura constante durante un periodo de tiempo similar al anterior.

- Se montó el equipo de penetración y se comprobó que el vástago que soporta la aguja esté completamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre la guía. La aguja de penetración se limpió con gasolina y se secó con un trozo de papel higiénico, se la fijó firmemente en su soporte.
- La penetración se realizó en un baño pequeño auxiliar, en el que se colocó la muestra de asfalto, completamente sumergido, hasta un nivel de 3 mm sobre la cara superior del asfalto.
- Una vez montado todo el equipo para la realización del ensayo, se aproximó la aguja del penetrómetro hasta que la punta tocó justamente la superficie de la muestra, sin que penetre.
- Se verificó que el penetrómetro se encuentre en cero, y se soltó la aguja, iniciando en el mismo instante el cronómetro para medir un tiempo de 5 segundos.
- Finalmente, se leyó y anotó la distancia expresada en décimas de milímetro.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 32.-Resultados Ensayo de Penetración

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25 °C, 100g, 5 seg. AASHTO T49	Lectura 1	Mm	89	90	89.5	-----	-----
	Lectura 2	Mm	89	91	90	-----	-----
	Lectura 3	Mm	89	92	90.5	-----	-----
	Promedio	Mm	89	91	90	85	100

Cumple con las especificaciones mínimas requeridas, de acuerdo a la norma AASHTO T49, en donde se puede clasificar que el asfalto es 85-100 de acuerdo a las lecturas realizadas.

### **3.2.2.3.-Punto de Inflamación.**

Para la realización de este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

- Se preparó el equipo, colocándolo sobre un mesón firme y a nivel. Se cerraron momentáneamente las ventanas y se apagó el ventilador para eliminar corrientes de aire.
- Se lavó la copa de ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior.
- Se colocó el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior esté a 6.4 mm (1/4") del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared de la misma.
- Se llenó la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no excediera de 100 °C, precisamente a la temperatura necesaria para que el asfalto pueda verterse. Hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.
- La copa se llenó lejos del resto del equipo, que ya se encontraba previamente montado.
- Se colocó la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.
- Se encendió la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la rata de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C por minuto, cuando la temperatura se aproximó a los 160°C se disminuyó el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5 a 6°C por minuto hasta que se alcanzó el punto de inflamación.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 210°C, se aplicó la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.
- Cuando la temperatura se aproximó a los 230°C, se tuvo la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa puesto que

cualquier movimiento de aire, dispersa los gases que se acumulan en la parte superior.

- Se registró como punto de inflamación, la lectura de temperatura del termómetro cuando apareció una llama sobre la superficie de la copa producto de la combustión de los gases emitidos por el calentamiento del asfalto.

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 33.- Tabla Resultados Punto de Inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	235	238	236.5	232	-----

Cumple con las especificaciones mínimas requeridas de acuerdo a la norma AASHTO T-48 donde se especifica el mínimo de 232 para el punto de inflamación.

Fig.24.-Punto de Inflamación



### **3.3.-Dosificación de Mezclas Asfálticas.**

#### **3.3.1.-Proporción de Agregados y Cemento Asfáltico.**

Para el porcentaje de cemento asfáltico y la proporción de agregados se recurrió al método por tanteos, ya que este método está ya normalizado y se puede contar con el porcentaje de cemento asfáltico de una forma más práctica y segura.

Este método consta como su nombre lo dice en tantear los porcentajes de aporte de cada material, hasta que la curva de la granulometría de la mezcla entre en el rango de las especificaciones.

Las especificaciones de esta combinación de agregados corresponden a la mezcla tipo IV (Gradación Densa), subtipo c, sugeridas por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

Tabla 34.- Tabla de agregados

MATERIAL	plg.	1"		3/4"		1/2"		3/8"		N°4		N° 10		N° 16		N° 40		N° 50		N° 80		N° 200	
	Mm.	25,40		19,05		12,70		9,53		4,75		2,00		1,16		0,43		0,300		0,18		0,075	
	%	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M	%	M
Grava de 3/4"	27,0	100,0	27,0	92,70	25,0	34,60	9,3	6,50	1,8	0,70	0,2	0,40	0,1	0,34	0,1	0,30	0,1	0,25	0,1	0,20	0,1	0,10	0,0
Grava de 3/8"	24,0	100,0	24,0	100,0	24,0	100,0	24,0	93,60	22,5	16,30	3,9	11,40	2,7	8,50	2,0	7,00	1,7	5,10	1,2	3,20	0,8	1,60	0,4
Arena	49,0	100,0	49,0	100,0	49,0	100,0	49,0	100,0	49,0	98,7	48,4	81,1	39,7	55,8	27,3	45,7	22,4	35,40	17,3	25,1	12,3	12,7	6,2
RESULTANTE	100,0	100,0	100,0	98,0	82,3	73,22	52,5	42,6	29,5	24,2	18,6	13,1	8,6	6,6									
ESPECIFICACIONES (min.-Máx.)	100	100	80	100	67	85	60	77	43	54	29	45			14	25				8	17	4	8

Fig.-25.- Granulometría de Diseño

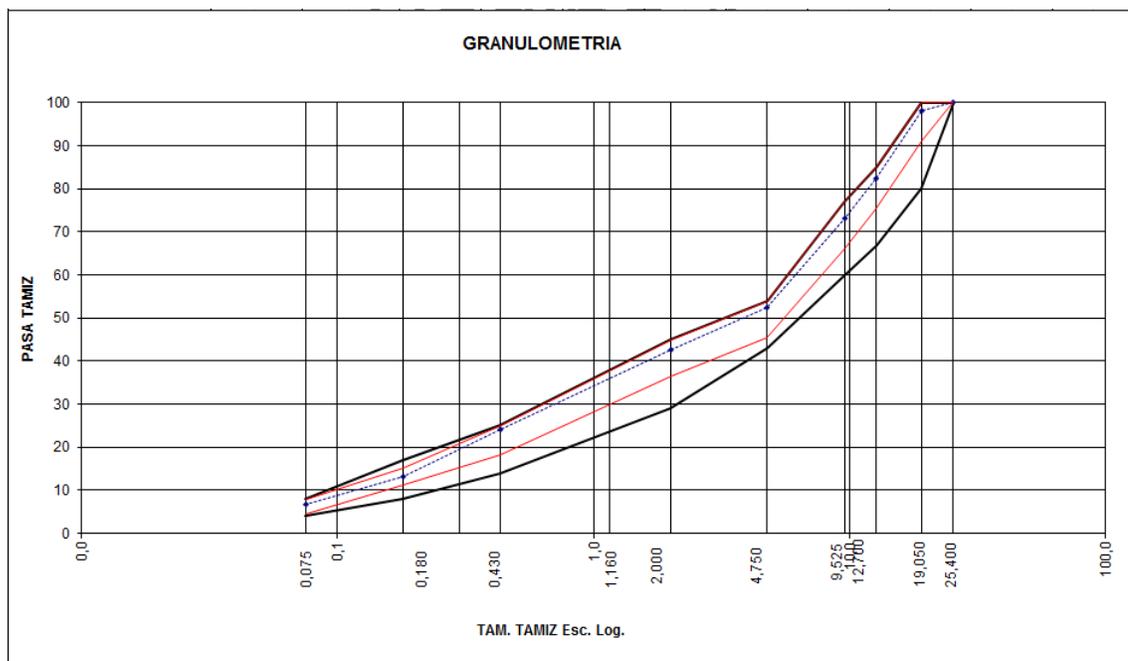


Fig.26.- Grafica del Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

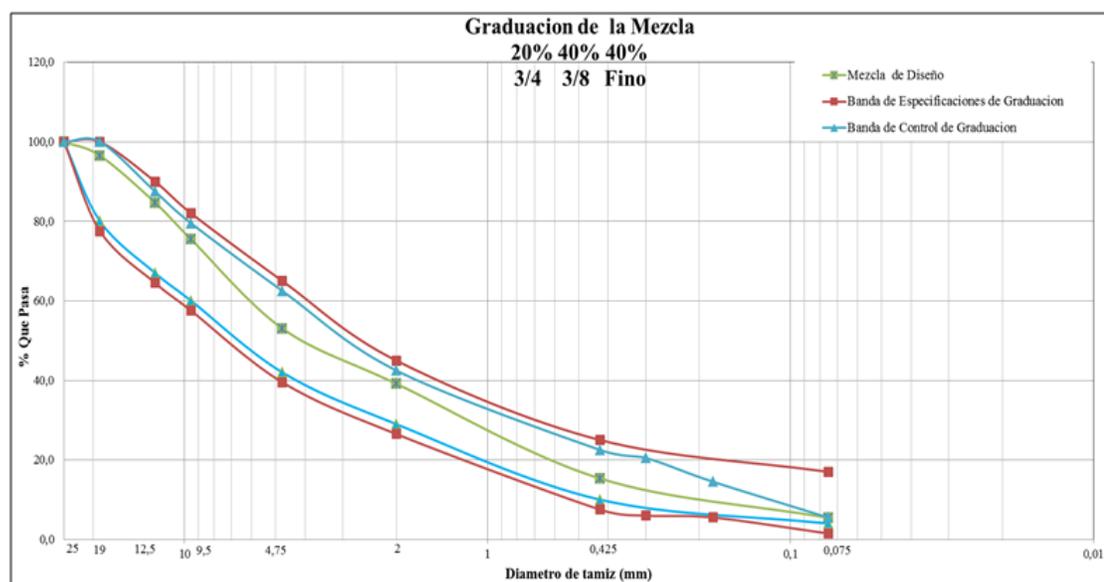


Tabla 35.- Pesos para la realización de Briquetas

Tamiz				% C.A.	PST	PSA	
Pasa	Retiene			5,6	1200,0	1132,8	
				PA (1)	PP (1)	PA(2)	PA(2)
1"	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1"	3/4"	100,0	2,0	22,3	22,3	22,3	22,3
3/4"	1/2"	98,03	15,69	177,7	200,0	177,7	200,0
1/2"	3/8"	82,34	9,12	103,3	303,4	103,3	303,4
3/8"	N°4	73,22	20,76	235,1	538,5	235,1	538,5
N°4	N° 10	52,46	9,88	111,9	650,4	111,9	650,4
N° 10	N° 16	42,58	13,11	148,5	798,9	148,5	798,9
N° 16	N° 40	29,47	5,32	60,3	859,2	60,3	859,2
N° 40	N° 50	24,15	5,52	62,5	921,7	62,5	921,7
N° 50	N° 80	18,64	5,52	62,5	984,2	62,5	984,2
N° 80	N° 200	13,12	6,49	73,5	1057,7	148,6	1132,8
N° 200	N° 80	6,63	-6,49	-73,5	984,2		
N° 80	N° 200	13,12	6,49	73,5	1057,7		
N° 200	Fondo	6,63	6,63	75,1	1132,8		
Suma Total				1132,8		1132,8	
Cemento Asfáltico				67,2			
				1,0			

## **CAPITULO 4.-**

### **INVESTIGACION SOBRE EL EFECTO DE LA AGITACION EN LAS MEZCLAS ASFALTICAS**

#### **4.1.-Enfoque de la Investigación.**

##### **4.1.1.-Principios.**

La agitación es el componente que tiene una mezcla asfáltica para poder llegar a tener una adecuada homogeneidad.

La agitación es el movimiento que se realiza para la unión del asfalto con los agregados para poder llegar a cubrir los agregados por completos con el asfalto, esta agitación no se encuentra estandarizada, para lo cual depende del laboratorista de realizar la adecuada agitación.

La agitación tendrá éxito cuando se encuentre a temperaturas adecuadas para el mezclado, cumpliendo así la temperatura para mezclado obteniendo tener una densidad del asfalto óptima para que la agitación sea adecuada y cumpla con su característica de cubrir las partículas y obtener una mezcla homogénea.

##### **4.1.2.-Procedimientos.**

###### **4.1.2.1.-En obra.**

La agitación en obra se realiza con un conjunto de equipos mecánicos electrónicos en donde los agregados son combinados, calentados, secados y mezclados con asfalto para producir una mezcla asfáltica en caliente que debe cumplir con ciertas especificaciones.

El propósito de la agitación es producir una mezcla en caliente que posea las proporciones deseadas de asfalto y agregado, y que cumpla con todas las especificaciones. La diferencia entre los dos tipos de planta es que las plantas de dosificación secan y calientan el agregado y después se realiza la agitación, en un

mezclador separado, que combinan el asfalto en dosis individuales; mientras que las plantas mezcladoras de tambor secan el agregado y lo combinan con el asfalto en un proceso de agitación continua y en la misma sección del equipo.

#### **4.1.2.2.-En Laboratorio.**

La agitación en el laboratorio se realiza de acuerdo al criterio del laboratorista, para lo cual se realiza en un bol que cumpla con las características de resistir temperaturas elevadas para poder realizar distintas agitaciones.

La agitación empieza una vez que se introduce los agregados con el asfalto a una temperatura adecuada en bol que está en contacto con el calor para realizar una mezcla asfáltica, la agitación se realiza con un cucharón plano que con este se realiza la agitación. La agitación no está estandarizada para lo cual dependerá del laboratorista el cómo hacer y en que materiales utilizar para realizar la agitación.

En esta investigación se realizó con un bol metálico el cual es sometido al calor, un cucharón plano que sirve para agitar la mezcla para que esta cumpla con la homogeneidad de la mezcla entre partículas y asfalto.

##### **4.1.2.2.1.-Materiales no Estandarizados.**

Materiales:

- Cucharón.

Fig.27.- Cucharón



- Recipiente Metálico.

Fig.28.- Recipiente Metálico



- Hornalla.

Fig.- 29.- Hornalla



#### 4.1.2.2.2.- Materiales Estandarizados.

Equipo de Marshall:

- Molde, Base y Collarín.

Fig.30.- Molde, Base y Collarín.



- Martillo de Compactación.

Fig.31.- Martillo de Compactación.



- Prensa de Ensayo.

Fig.32.- Prensa de Ensayo.



Otros:

- Termómetro.

Fig.- 33.-Termómetro.



- Equipo de Baño María.

Fig.34.-Equipo de Baño María.



## 4.2.-Elaboracion de Mezclas de Prueba.

La elaboración de las mezclas de prueba se realizó en el Laboratorio del SEDECA, cumpliendo con los cuidados para poder optimizar las mezclas, se siguieron los siguientes pasos:

1. Se tamizaron las muestras para tener los respectivos materiales retenidos en diferentes mallas granulométricas.

Fig.35.- Muestras Tamizadas



2. Se realizó el pesaje de los agregados en sus diferentes proporciones.

Fig.36.- Balanza



3. Las muestras pesadas se llevaron al horno para que adquieran calor para poder realizar la mezcla.

Fig.37.-Horno



4. Se volvió a pesar las muestras para agregar el porcentaje de asfalto en peso.

Fig.- 38.-Muestra con asfalto



5. Se traspara la muestra a un bol, para poder mezclas con temperatura producida por una cocinilla.

Fig.39.-Proceso de Agitación



6. Una vez que la mezcla adquiere la temperatura de mesclado se saca del calor, para poder enfriar hasta que llegue a temperatura de compactación.

Fig. 40.-Muestra a Temperatura Ambiente



7. La mezcla enfriada se traspasa a los moldes de MARSHALL, para su compactación.

Fig.41.-Mezcla a Compactar



#### **4.3.-Investigación Sobre el Efecto de Agitación.**

Para realizar esta investigación se utilizó el procedimiento del ensayo de Marshall, para poder realizar las comparaciones buscadas para la valoración de este estudio.

Las Briquetas realizadas son todas compactadas a setenta y cinco golpes por cada cara, para cumplir con una compactación adecuada para poder comparar entre las Briquetas realizadas.

El porcentaje de cemento asfáltico para cada muestra fue de 5.6%, para todas las Briquetas, ya que así se podrá comparar las Fluencias y Resistencias de las muestras obtenidas.

### **4.3.1.-Elaboración de Mezclas con Variabilidad de la Agitación.**

#### **4.3.1.1.-Por tiempo.**

Este procedimiento trata de realizar mezclas asfálticas en laboratorio con diferentes tiempos de mezclado, buscando analizar si la resistencia que puede variar si las mezcla son sometidas a diferentes tiempos de mezclado.

Para la realización de este punto se tomó en cuenta temperaturas variables con rangos de diez grados centígrados.

A continuación se muestra el rango que se utilizó:

- 160<sup>0</sup>C – 170<sup>0</sup>C      5 minutos de mezclado
- 180<sup>0</sup>C – 190<sup>0</sup>C      10 minutos de mezclado
- 190<sup>0</sup>C – 200<sup>0</sup>C      15 minutos de mezclado

Debido a que no se puede mezclar a una sola temperatura ya que controlar entre un rango pequeño de temperatura es muy complicado, ya que existen dos factores que hacen que varíe la temperatura muy rápidamente y sea muy difícil de controlar.

Estas dos variables son, el calor producido por la hornalla y control de la temperatura que en segundos varia muy rápidamente.

El tiempo de mezclado es muy importante ya que en una mezcla asfáltica se busca la homogeneidad de las partículas pétreas con el asfalto, es por esta razón que se busca estudiar un tiempo adecuado para realizar una mezcla asfáltica

Ya que a mayor tiempo de mezclado sin sobrepasar las temperaturas de mezclado se encontrará una mejor homogeneidad de las mezclas asfálticas.

El tiempo con el que se realizó las mezclas asfálticas para este punto son de cinco minutos, en intervalos de 5 minutos alcanzadas las temperaturas de mezclado.

Se muestra a continuación la tabla de datos realizados mediante la variable del tiempo para el estudio de esta investigación.

Tabla 36.- Datos – Por Tiempo

MUESTRA	TEMPERATURA °C	TIEMPO DE MEZCLADO	MUESTRA	TEMPERATURA °C	TIEMPO DE MESCLADO
1	160 - 170	5 MINUTOS	21	200 - 210	15 MINUTOS
2	160 - 170	5 MINUTOS	22	200 - 210	15 MINUTOS
3	160 - 170	5 MINUTOS	23	200 - 210	15 MINUTOS
4	160 - 170	5 MINUTOS	24	200 - 210	15 MINUTOS
5	160 - 170	5 MINUTOS	25	200 - 210	15 MINUTOS
6	160 - 170	5 MINUTOS	26	200 - 210	15 MINUTOS
7	160 - 170	5 MINUTOS	27	200 - 210	15 MINUTOS
8	160 - 170	5 MINUTOS	28	200 - 210	15 MINUTOS
9	160 - 170	5 MINUTOS	29	200 - 210	15 MINUTOS
10	160 - 170	5 MINUTOS	30	200 - 210	15 MINUTOS
11	180 - 190	10 MINUTOS			
12	180 - 190	10 MINUTOS			
13	180 - 190	10 MINUTOS			
14	180 - 190	10 MINUTOS			
15	180 - 190	10 MINUTOS			
16	180 - 190	10 MINUTOS			
17	180 - 190	10 MINUTOS			
18	180 - 190	10 MINUTOS			
19	180 - 190	10 MINUTOS			
20	180 - 190	10 MINUTOS			

#### 4.3.1.2.-Por Diferente Procedimiento.

Para este estudio se realizó un procedimiento muy particular, ya que no se cuenta ni se desarrolla este tipo de ensayo que es a criterio del investigador.

Se realizaron mezclas asfálticas con distintos tipos de velocidades a la hora de realizar el mezclado con el cemento asfáltico, las velocidades medidas fueron en revoluciones.

Las mezclas para este procedimiento tienen el mismo proceso ya indicado para realizar una mezcla asfáltica, solamente que a la hora de mezclar el asfalto con el agregado pétreo se toma en cuenta las revoluciones constantes que tendrá dicha mezcla.

Para este proceso se tomarán distintos valores de revoluciones, teniendo en cuenta que a la hora de aplicar este método las revoluciones no sean grandes en su magnitud, para que no sean expulsados los agregados del recipiente de mezclado.

Las revoluciones tomadas en cuenta fueron de:

- 40 rev/min
- 50 rev/min
- 60 rev/min

Con este procedimiento se verificará si tiene influencia en las mezclas asfálticas las revoluciones de mezclado.

Este proceso de laboratorio pretende normalizar el uso de revoluciones a la hora de mezclar, ya que no existe un parámetro que dé a conocer con cuantas revoluciones se realiza una mezcla asfáltica en laboratorio.

La temperatura de mezclado para todas las muestras será de 160<sup>0</sup>C.

Tabla 37.- Datos por Diferente Procedimiento

MUESTRA	TEMPERATURA °C	REVOLUCIONES rev/min	MUESTRA	TEMPERATURA °C	REVOLUCIONES rev/min
1,00	160,00	40,00	16,00	160,00	50,00
2,00	160,00	40,00	17,00	160,00	50,00
3,00	160,00	40,00	18,00	160,00	50,00
4,00	160,00	40,00	19,00	160,00	50,00
5,00	160,00	40,00	20,00	160,00	50,00
6,00	160,00	40,00	21,00	160,00	60,00
7,00	160,00	40,00	22,00	160,00	60,00
8,00	160,00	40,00	23,00	160,00	60,00
9,00	160,00	40,00	24,00	160,00	60,00
10,00	160,00	40,00	25,00	160,00	60,00
11,00	160,00	50,00	26,00	160,00	60,00
12,00	160,00	50,00	27,00	160,00	60,00
13,00	160,00	50,00	28,00	160,00	60,00
14,00	160,00	50,00	29,00	160,00	60,00
15,00	160,00	50,00	30,00	160,00	60,00

### 4.3.1.3.-Por Temperatura.

Este procedimiento trata de realizar mezclas asfálticas en laboratorio con diferentes temperaturas de mezclado, buscando analizar si la resistencia que puede variar si las mezclas son sometidas a diferentes temperaturas de mezclado.

Para la realización de este punto se tomó en cuenta temperaturas variables de mezclado con rangos de diez grados centígrados, para el mezclado.

A continuación se muestran las temperaturas de mezclado:

- 160°C; 170°C; 180°; 190°C; 200°C; 210°C; 220°C

Para la realización de estas muestras que llegan se tomó el mismo procedimiento ya citado para realizar una mezcla asfáltica, solamente que se variará la temperatura de mezclado en siete ocasiones. Cabe recalcar que las mezclas son sacadas de la hornalla que da temperatura ni bien llegan a la temperatura llegada, para que la mezcla no sobrepase la temperatura deseada de la mezcla y pase a ser enfriada para la compactación correspondiente.

Tabla 38.- Datos por Temperatura

MUESTRA	TEMP°C	MUESTRA	TEMP°C
1	160	12	190
2	160	13	200
3	160	14	200
4	170	15	200
5	170	16	210
6	170	17	210
7	180	18	210
8	180	19	220
9	180	20	220
10	190	21	220
11	190		

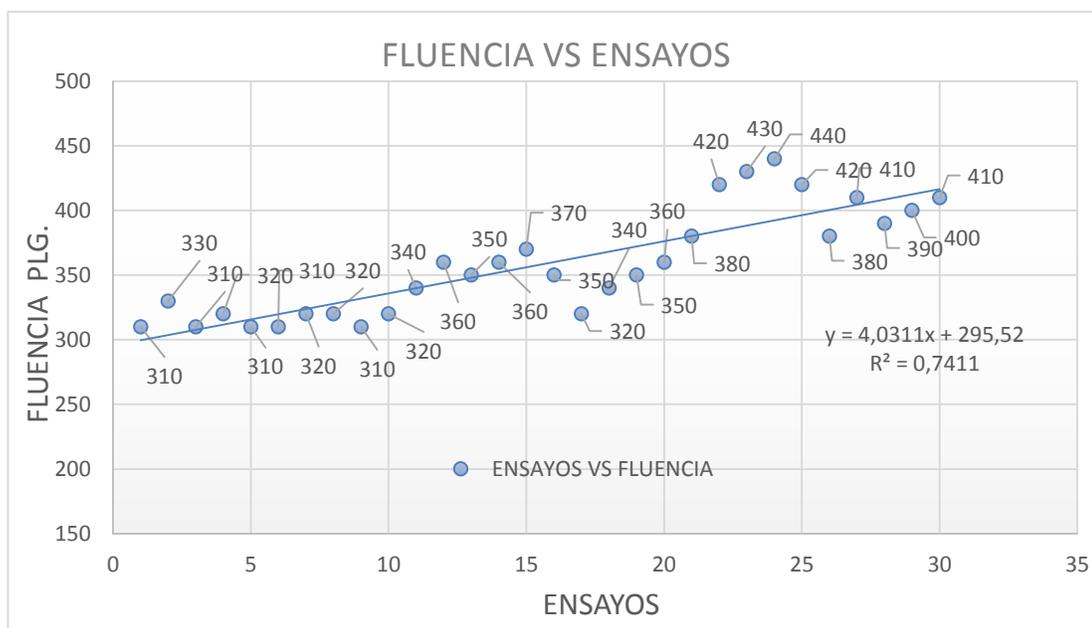
## 4.4.-Valoración de resultados.

### 4.4.1-Por Tiempo.

Tabla 39.- Resultados – Por Tiempo

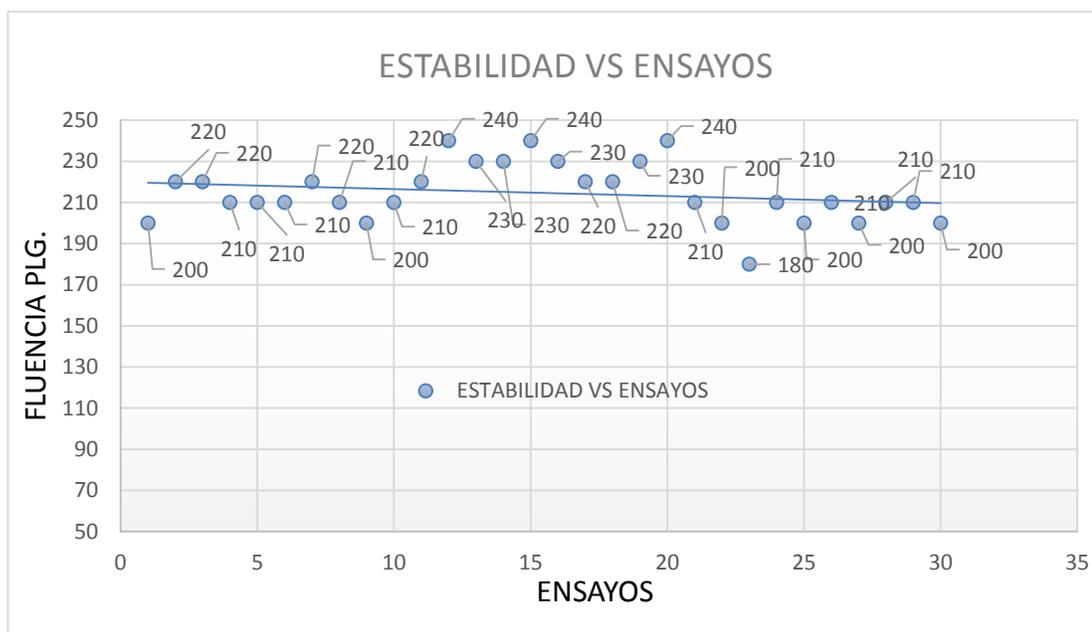
MUESTRA	TEMPERATURA °C	TIEMPO DE MESCLADO	VOLUMEN cm3	DENSIDAD gr./cm3	FLUENCIA plg	ESTABILIDAD plg
1	160 - 170	5 MINUTOS	488,4	2,41	310	200
2	160 - 170	5 MINUTOS	494,7	2,39	330	220
3	160 - 170	5 MINUTOS	490,7	2,40	310	220
4	160 - 170	5 MINUTOS	491,1	2,40	320	210
5	160 - 170	5 MINUTOS	495,6	2,39	310	210
6	160 - 170	5 MINUTOS	490,3	2,41	310	210
7	160 - 170	5 MINUTOS	490,4	2,41	320	220
8	160 - 170	5 MINUTOS	491,5	2,40	320	210
9	160 - 170	5 MINUTOS	494,6	2,38	310	200
10	160 - 170	5 MINUTOS	495,1	2,39	320	210
11	180 - 190	10 MINUTOS	489	2,41	340	220
12	180 - 190	10 MINUTOS	490,6	2,40	360	240
13	180 - 190	10 MINUTOS	491,5	2,41	350	230
14	180 - 190	10 MINUTOS	487,8	2,42	360	230
15	180 - 190	10 MINUTOS	489,8	2,41	370	240
16	180 - 190	10 MINUTOS	490,7	2,41	350	230
17	180 - 190	10 MINUTOS	491	2,40	320	220
18	180 - 190	10 MINUTOS	488,8	2,41	340	220
19	180 - 190	10 MINUTOS	489,7	2,41	350	230
20	180 - 190	10 MINUTOS	493,4	2,40	360	240
21	200 - 210	15 MINUTOS	494,7	2,38	380	210
22	200 - 210	15 MINUTOS	493,2	2,39	420	200
23	200 - 210	15 MINUTOS	489,1	2,41	430	180
24	200 - 210	15 MINUTOS	494,2	22,62	440	210
25	200 - 210	15 MINUTOS	496,3	2,37	420	200
26	200 - 210	15 MINUTOS	490,9	2,39	380	210
27	200 - 210	15 MINUTOS	489,3	2,41	410	200
28	200 - 210	15 MINUTOS	491,2	2,40	390	210
29	200 - 210	15 MINUTOS	490,3	24,03	400	210
30	200 - 210	15 MINUTOS	491,5	2,40	410	200

Fig.42.-Gráfica Fluencia vs. Ensayos



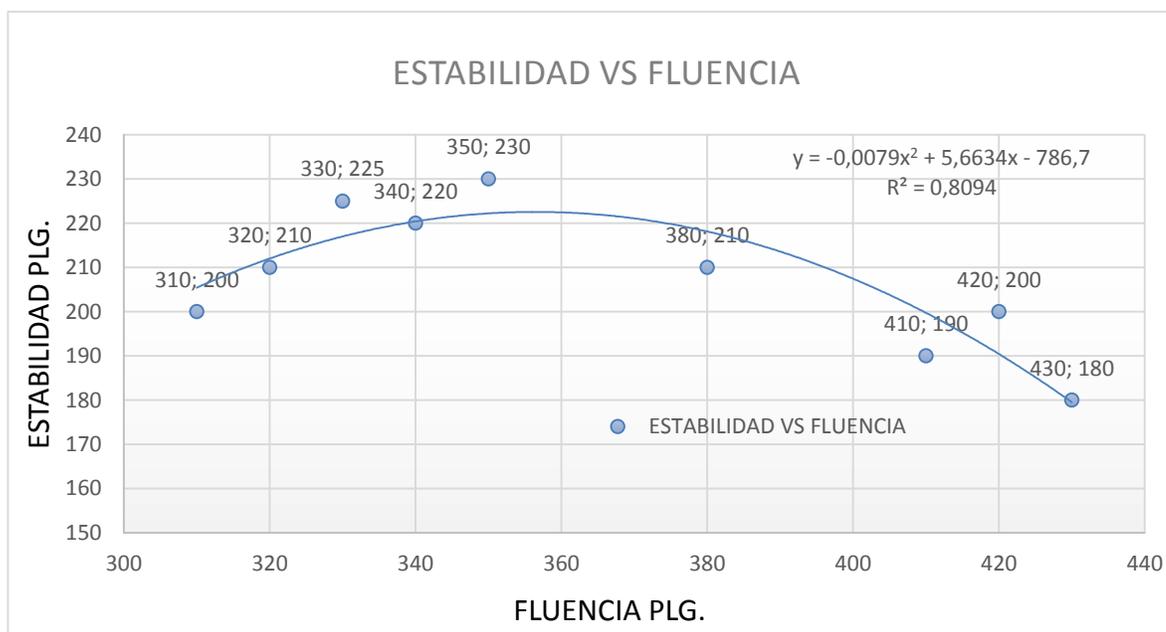
Se puede observar que la fluencia varía en un rango de 300 a 410 plg. Comprobando que la fluencia es estable en un rango específico, permitiendo establecer que el comportamiento es el mismo. Esta grafica tiene una línea creciente ya que de acuerdo a la variación de la temperatura en los ensayos a tomar en cuenta que van desde 160 °C – 210°C, haciendo que la fluencia suba y la resistencia disminuya por el incremento de temperatura que se tomó en cuenta para este estudio, de acuerdo a los rangos tomados de intervalos en tiempo de 5 minutos y en temperatura de 10 °C, se puede comprobar que la agitación no tiene influencia ya que los resultados comprendidos en los rangos citados son casi iguales variando en proporciones muy pequeñas como se muestra en la tabla 39.- de resultados por tiempo.

Fig.43.-Gráfica Estabilidad vs. Ensayos



En esta gráfica se puede verificar, que la estabilidad tiene un máximo y un mínimo comprendido entre 180 y 240 plg., comprendiendo un rango de variación que nos muestra que no varían significativamente los resultados, dándonos una estabilidad si se puede decir constante, ya que las variación de algunos resultados es por la lectura realizada en el aparato de Marshall. Las variaciones de temperaturas que tienen estos ensayos en grupos donde estos tienen intervalos de 10 °C que hacen que la temperatura incremente dándonos resultados de fluencia en cada intervalo mayores. Se puede verificar en la tabla de resultados que en los tres grupos de datos estos no varían en gran amplitud en sus resultados, mostrándonos que la agitación no influye en las características de las mezclas asfálticas.

Fig.44.- Gráfica Estabilidad vs. Fluencia



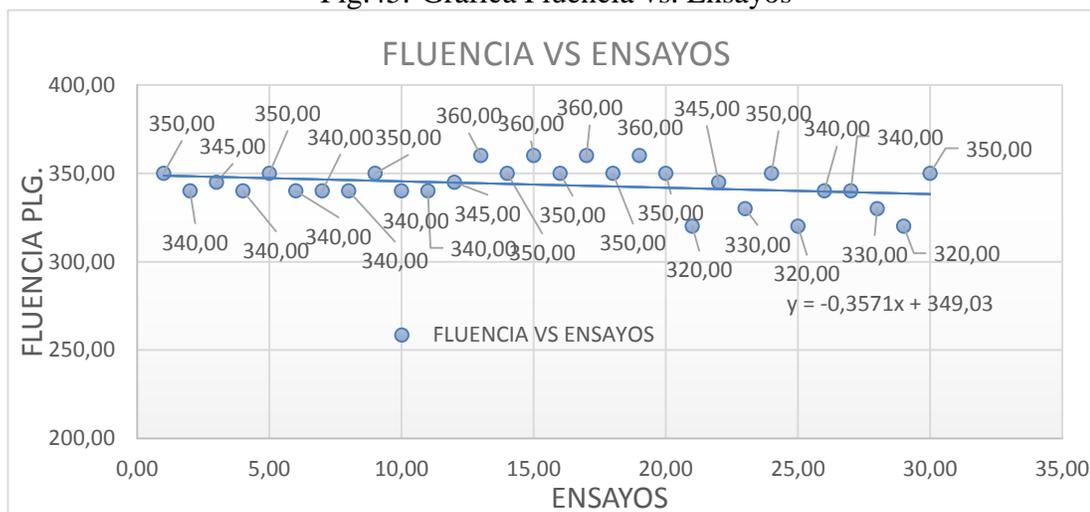
Esta gráfica nos muestra que a medida que la fluencia crece la resistencia decrece, pero como se nota las variaciones tanto de fluencia como de la estabilidad no rompieron un rango mayor a 40 unidades en la fluencia y en la estabilidad 30 unidades dándonos si se puede decir resultados que están relativamente cercanos, comprendiendo que los resultados de los ensayos fueron casi constantes. También esta grafica tiene esta característica de acuerdo a los intervalos de temperatura que varían en un rango de 160°C – 210°C, haciendo que la fluencia se comporte linealmente creciente entre los ensayos, pero linealmente entre los grupos de ensayos tomados en intervalos de 10°C de temperatura y un rango de 5 minutos. Notándose que la agitación no influye en las características de una mezcla asfáltica como la fluencia y la estabilidad tomadas en esta investigación.

#### 4.4.2.-Por Diferente Procedimiento.

Tabla 40.- Resultados –Por Diferente Procedimiento

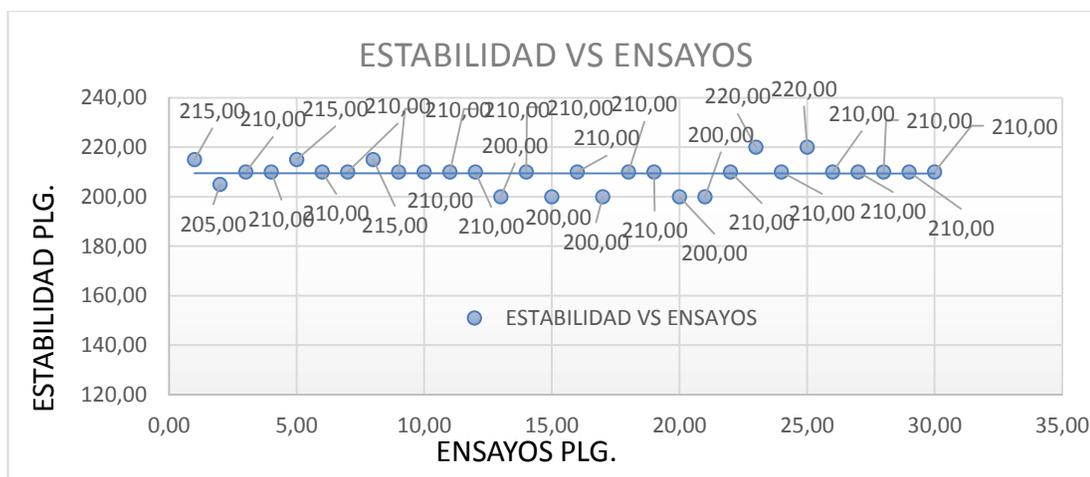
MUESTRA	TEMPERATURA °C	REVOLUCIO NES rev/min	DENSIDAD gr./cm <sup>3</sup>	FLUENCIA plg	ESTABILIDAD plg
1,00	160,00	40,00	2,40	350,00	215,00
2,00	160,00	40,00	2,40	340,00	205,00
3,00	160,00	40,00	2,38	345,00	210,00
4,00	160,00	40,00	2,41	340,00	210,00
5,00	160,00	40,00	2,43	350,00	215,00
6,00	160,00	40,00	2,36	340,00	210,00
7,00	160,00	40,00	2,38	340,00	210,00
8,00	160,00	40,00	2,43	340,00	215,00
9,00	160,00	40,00	2,38	350,00	210,00
10,00	160,00	40,00	2,40	340,00	210,00
11,00	160,00	50,00	2,42	340,00	210,00
12,00	160,00	50,00	2,43	345,00	210,00
13,00	160,00	50,00	2,40	360,00	200,00
14,00	160,00	50,00	2,40	350,00	210,00
15,00	160,00	50,00	2,35	360,00	200,00
16,00	160,00	50,00	2,42	350,00	210,00
17,00	160,00	50,00	2,39	360,00	200,00
18,00	160,00	50,00	2,43	350,00	210,00
19,00	160,00	50,00	2,40	360,00	210,00
20,00	160,00	50,00	2,47	350,00	200,00
21,00	160,00	60,00	2,40	320,00	200,00
22,00	160,00	60,00	2,47	345,00	210,00
23,00	160,00	60,00	2,44	330,00	220,00
24,00	160,00	60,00	2,43	350,00	210,00
25,00	160,00	60,00	2,44	320,00	220,00
26,00	160,00	60,00	2,32	340,00	210,00
27,00	160,00	60,00	2,41	340,00	210,00
28,00	160,00	60,00	2,47	330,00	210,00
29,00	160,00	60,00	2,33	320,00	210,00
30,00	160,00	60,00	2,32	350,00	210,00

Fig.45.-Gráfica Fluencia vs. Ensayos



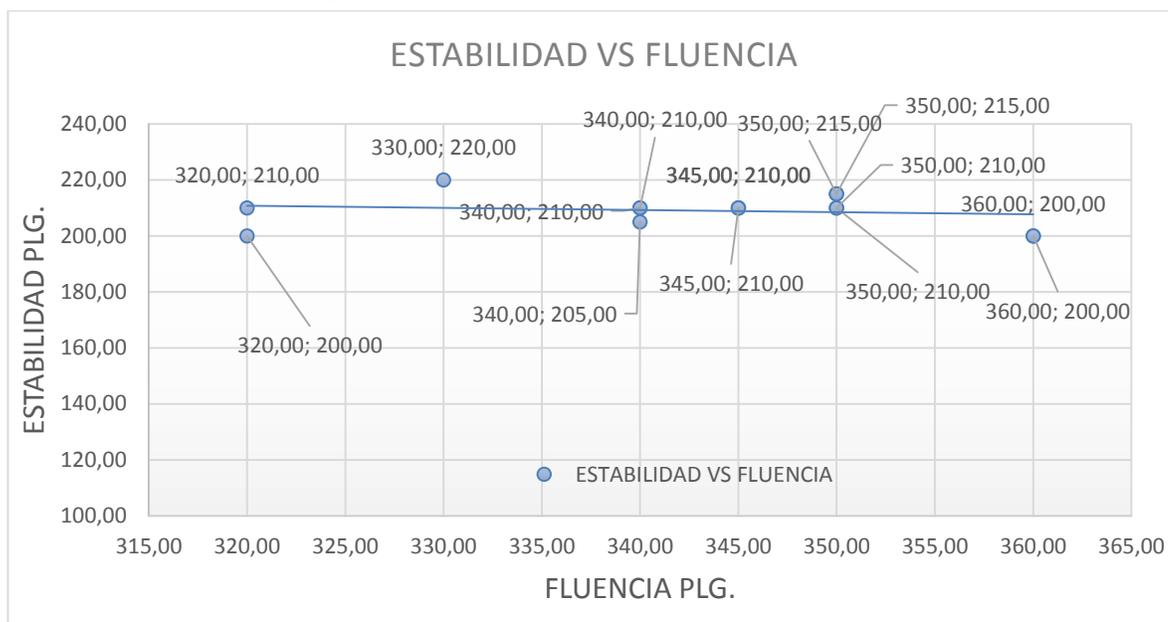
La gráfica nos muestra, que la fluencia tiene un carácter lineal lo que nos indica que no variaron en gran proporción la fluencia de las muestras analizadas, demostrando que por diferente procedimiento analizado en rev/min no afecta la agitación sobre las propiedades de las mezclas.

Fig.46.-Gráfica Estabilidad vs. Ensayos



La estabilidad se comporta a también en un rango donde se puede decir que la estabilidad es lineal ya que no varía en un gran magnitud de un ensayo a otro, demostrando que por el denominado estudio por diferente procedimiento no afecta la agitación sobre las propiedades de las mezclas.

Fig.47.-Gráfica Estabilidad vs. Fluencia



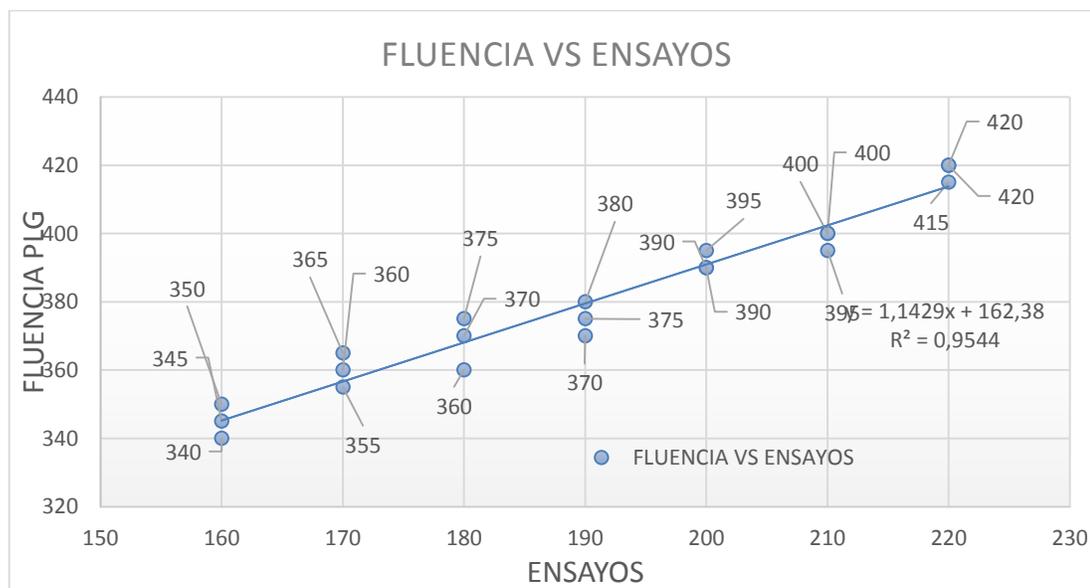
La gráfica nos da a conocer por su comportamiento lineal que el procedimiento aplicado para este ensayo en la agitación de una mezcla asfáltica, no tiene influencia sobre las propiedades de una mezcla asfáltica.

### 4.4.3.-Por Temperatura.

Tabla 41.- Resultados – Por Temperatura

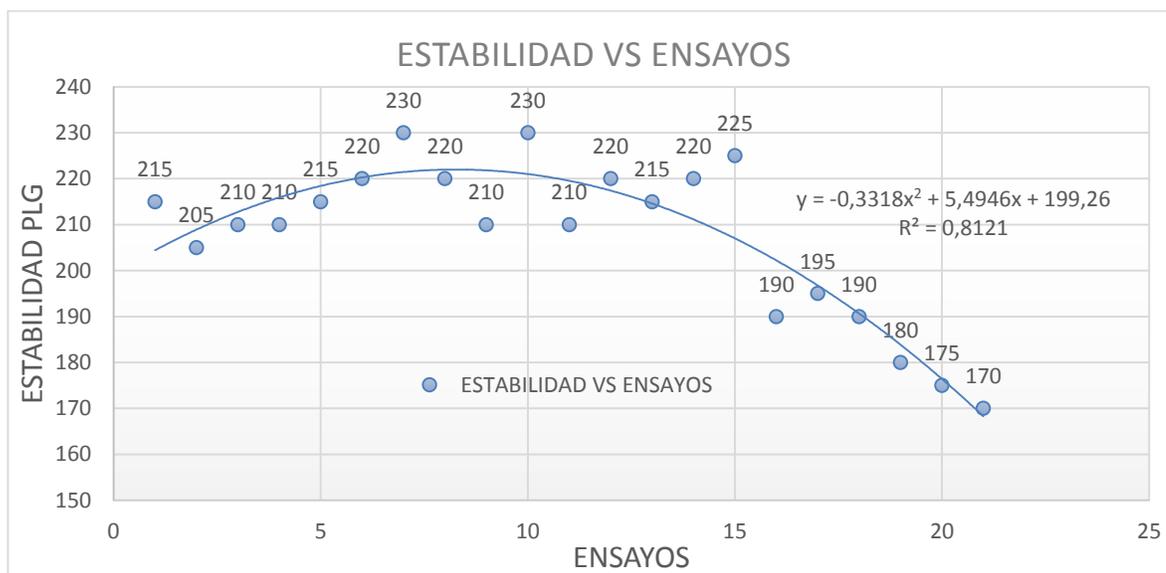
MUESTRA	TEMP°C	ALTURA cm	VOLUMEN cm <sup>3</sup>	DENSIDAD gr./cm <sup>3</sup>	FLUENCIA plg	ESTABILIDA D plg
1	160	6,18	487,70	2,40	350	215
2	160	6,18	490,90	2,40	340	205
3	160	6,26	494,00	2,38	345	210
4	170	6,21	491,50	2,41	365	210
5	170	6,32	498,40	2,38	355	215
6	170	6,24	493,40	2,40	360	220
7	180	6,18	487,30	2,40	360	230
8	180	6,13	488,30	2,40	370	220
9	180	6,20	493,70	2,39	375	210
10	190	6,18	491,10	2,40	370	230
11	190	6,14	486,80	2,42	380	210
12	190	6,15	490,80	2,40	375	220
13	200	6,24	487,80	2,40	390	215
14	200	6,19	492,50	2,42	395	220
15	200	6,13	479,70	2,44	390	225
16	210	6,18	489,20	2,42	400	190
17	210	6,13	499,50	2,37	395	195
18	210	6,14	492,80	2,40	400	190
19	220	6,13	487,40	2,41	420	180
20	220	6,10	490,40	2,40	415	175
21	220	6,13	485,90	2,43	420	170

Fig.48.-Gráfica Fluencia vs. Ensayos



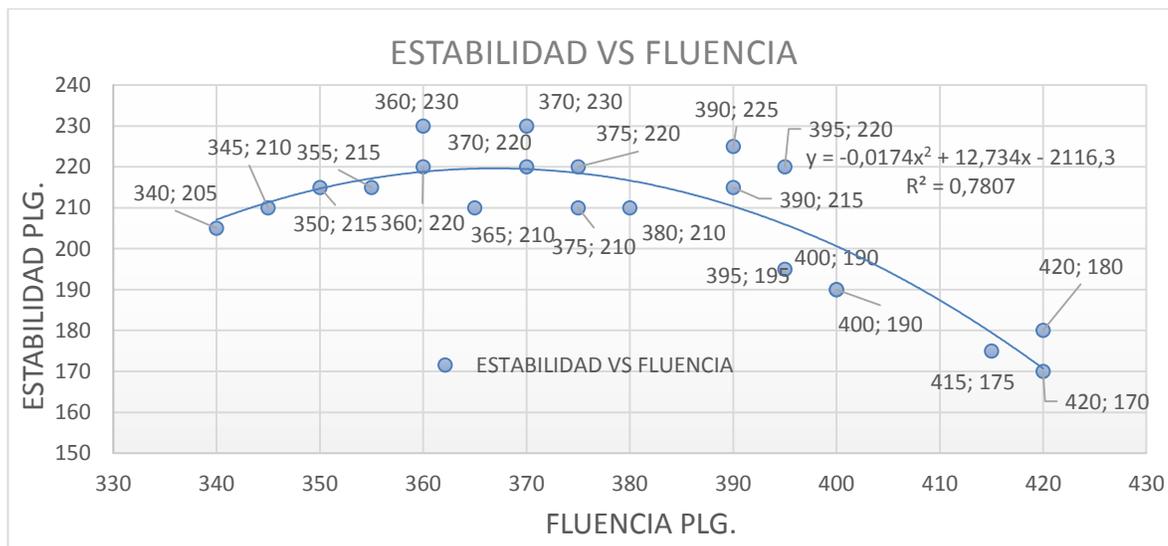
La gráfica nos muestra, que la fluencia es directamente proporcional al incremento de temperatura, dándonos una gráfica con tendencia lineal creciente lo que demuestra que la temperatura en la agitación tiene una influencia sobre las mezclas asfálticas.

Fig.49.-Gráfica Estabilidad vs. Ensayos



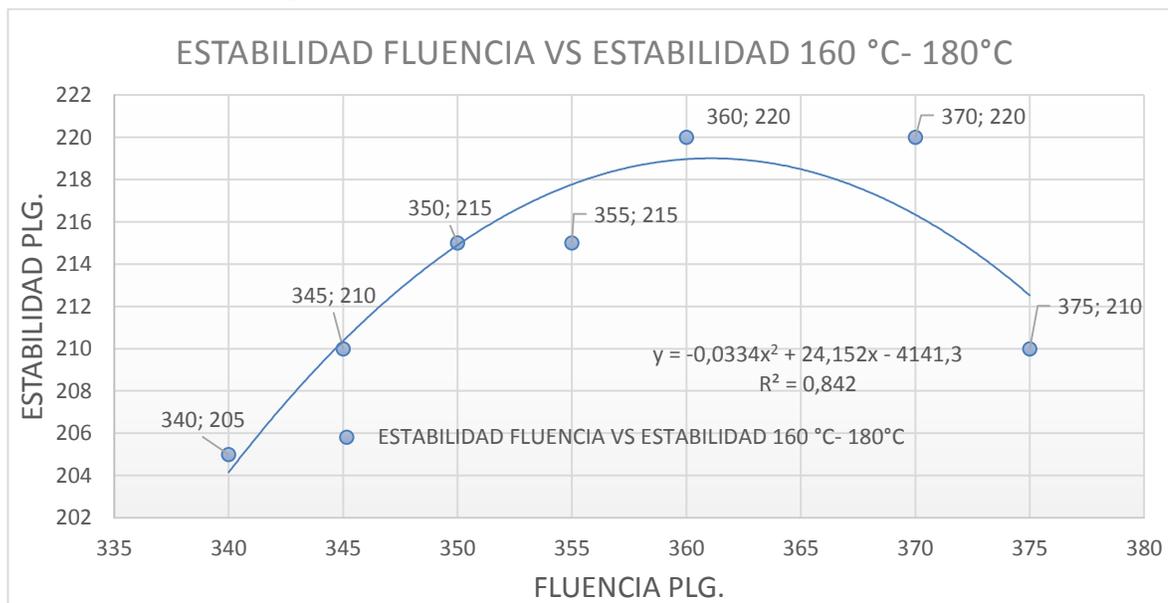
La gráfica nos hace conocer que la estabilidad tiene un comportamiento de una curva polinómica, dándonos valores que empiezan bajos, subiendo a un máximo y terminando en un valor bajo, demostrando que la temperatura tiene una influencia sobre las mezclas asfálticas.

Fig.50.- Estabilidad Vs. Fluencia



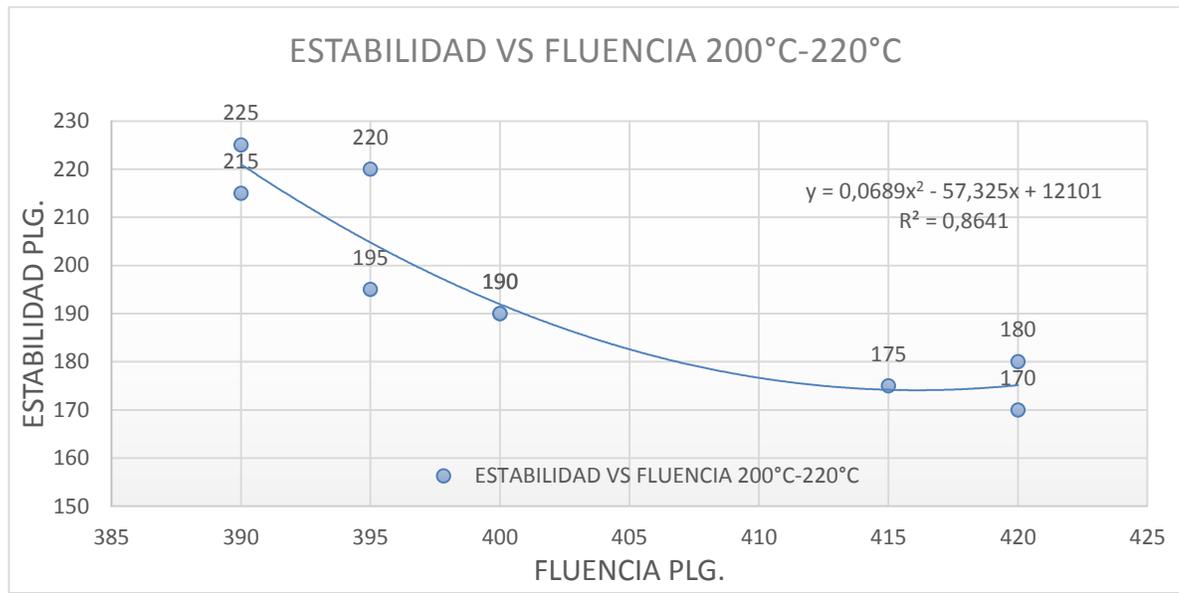
Esta gráfica, nos demuestra que por el comportamiento que tiene la curva los valores de la estabilidad como de la fluencia variaron de acuerdo a la temperatura de mezclado, teniendo la temperatura influencia sobre las mezclas asfálticas, afectando la estabilidad como la fluencia aspectos tomados en cuenta para analizar esta investigación.

Fig.51.-Fluencia vs. Estabilidad 1600C-1800C



La gráfica nos muestra con claridad que a medida que la fluencia crece la estabilidad decrece hasta que la fluencia pasa de su valor máximo proporcionando valores bajos en la estabilidad, al incremento de la temperatura en la agitación de las mezclas.

Fig.52.- Fluencia vs. Estabilidad 200°C-220°C



Por la característica que tiene la curva, nos muestra que a mayor fluencia provocada por el incremento de la temperatura en la agitación de una mezcla asfáltica, menor es la estabilidad.

#### 4.4.4.-Valoración Estadística.

##### 4.4.4.1.-Por Tiempo.

- **5 Minutos de Mezclado**

Muestra 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Estabilidad 200, 200, 200, 210, 210, 210, 220, 210, 200, 210

Calcular la media o promedio:  $u = \frac{\sum X}{N}$  Suma todos los datos y divide esa cantidad entre el tamaño del conjunto de datos.

$u =$  Temperatura 160 – 170 grados C.

Muestra 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Estabilidad 200, 200, 200, 210, 210, 210, 220, 210, 200, 210

$$u = \frac{200+200+200+210+\dots+210}{10} = 207$$

Calcular la Desviación Estándar.  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(200-207)^2 + (200-207)^2 + \dots + (210-207)^2}{10}} = 41 \text{ Poblacional}$$

Calculando la desviación estándar de la muestra, se divide entre n-1, es decir, el tamaño de la muestra menos 1.

$$\sigma = 45,5 \text{ Muestral.}$$

Calcular el Error Estándar.

E. Estándar = 13 %, valor aceptable por estar en un rango menor a 30 % de error utilizado en investigaciones.

El error estándar y la desviación estándar de muestras pequeñas tienden a infravalorar sistemáticamente el error estándar y la desviación estándar de la población: el error estándar de la media es un **parámetro sesgado** del error estándar de la Muestra. Con n=10 la infravaloración puede ser del 13%, pero para n=15 la infravaloración es sólo del 8.2%

- **10 Minutos de Mezclado.**

Muestra 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20

Estabilidad 220, 240, 230, 230, 240, 230, 220, 220, 230, 240

$$u = \frac{220+240+230+\dots+240}{10} = 230$$

Calcular la Desviación Estándar.  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(220-230)^2 + (240-230)^2 + \dots + (240-230)^2}{10}} = 60 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 66,6 \text{ Muestral.}$$

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{E. Estándar} = 18 \text{ \%}.$$

- **15 Minutos de Mezclado.**

Muestra 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

Estabilidad 210, 200, 180, 210, 200, 210, 200, 210, 210, 200

$$u = \frac{210+200+180+\dots+200}{10} = 203$$

$$\text{Calcular la Desviación Estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(210-203)^2 + (200-203)^2 + \dots + (200-203)^2}{10}} = 81 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 90 \text{ Muestral.}$$

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{E. Estándar} = 25 \text{ \%}.$$

El Error Estandar promedio de las 30 muestras de *5 minutos*, *10 minutos* y *15 minutos de mezclado.es: 18 %*

Con  $n=30$  la infravaloración puede ser del 18%, pero para  $n=15$  la infravaloración es sólo del 12%, teniendo valores óptimos de error.

El porcentaje de los errores no tienen una magnitud considerable los que nos dan errores bajos mostrándonos que las muestras se encuentran aceptables.

#### 4.4.4.2.-Diferente Procedimiento.

- **40 rev/min.**

Muestra 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Estabilidad 215, 205, 210, 210, 215, 210, 210, 215, 210, 210

$$u = \frac{215+205+210+\dots+210}{10} = 211$$

Calcular la Desviación Estándar.  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(215-203)^2 + (205-203)^2 + \dots + (210-203)^2}{10}} = 9 \text{ Poblacional}$$

$\sigma = 10$  Muestral.

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

E. Estándar = 2,8 %.

- **50 rev/min.**

Muestra 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20

Estabilidad 210, 210, 200, 210, 200, 210, 200, 210, 210, 200

$$u = \frac{210+210+200+\dots+200}{10} = 206$$

Calcular la Desviación Estándar.  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(210-206)^2 + (210-206)^2 + \dots + (200-206)^2}{10}} = 24 \text{ Poblacional}$$

$\sigma = 26.6$  Muestral.

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

E. Estándar = 7,5 %

- **60 rev/min.**

Muestra 21, 22, 23, 24, 12, 26, 27, 28, 29, 30

Estabilidad 200, 210, 220, 210, 220, 210, 210, 210, 210, 210

Los errores en los tres casos son aceptables l que nos indica que las muestras están correctas y que se las puede tomar en cuenta.

$$u = \frac{200+210+220+\dots+210}{10} = 211$$

$$\text{Calcular la Desviación Estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(200-211)^2 + (210-211)^2 + \dots + (210-211)^2}{10}} = 29 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 32 \text{ Muestral.}$$

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{E. Estándar} = 9 \%$$

El Error Estándar promedio de las 30 muestras de *Temperatura 160 grados C.*, es: 6.4 %

Con n=30 la infravaloración puede ser del 18%, pero para n=15 la infravaloración es sólo del 12%

#### 4.4.4.3.-Por Temperatura.

Muestras tomadas en muestras de tres unidades por el incremento de temperatura.

Muestra 1, 2, 3

Estabilidad 215, 205, 210

$$u = \frac{215+205+210}{3} = 210$$

$$\text{Calcular la Desviación Estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(215-210)^2 + (205-210)^2 + (210-210)^2}{3}} = 16.6 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 25 \text{ Muestral.}$$

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{E. Estándar} = 14,7 \%$$

Muestra 4, 5, 6

Estabilidad 210, 215, 220

$$u = \frac{210+215+220}{3} = 215$$

$$\text{Calcular la Desviación Estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(210-215)^2 + (215-215)^2 + (220-215)^2}{3}} = 16.6 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 25 \text{ Muestral.}$$

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{E. Estándar} = 14,7 \%$$

Muestra 7, 8, 9

Estabilidad 230, 220, 210

$$u = \frac{230+220+210}{3} = 220$$

$$\text{Calcular la Desviación Estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(230-220)^2 + (220-220)^2 + (210-220)^2}{3}} = 66.6 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 100 \text{ Muestral.}$$

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{E. Estándar} = 59 \%$$

Muestra 10, 11, 12

Estabilidad 230, 210, 220

$$u = \frac{230+210+220}{3} = 220$$

$$\text{Calcular la Desviación Estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(230-220)^2 + (210-220)^2 + (220-220)^2}{3}} = 66.6 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 100 \text{ Muestral.}$$

$$\text{E. Estándar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{E. Estándar} = 59 \%$$

Muestra 13, 14, 15

Estabilidad 215, 220, 225

$$u = \frac{215+220+225}{3} = 220$$

$$\text{Calcular la Desviación Estándar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(215-220)^2 + (220-220)^2 + (225-220)^2}{3}} = 66.6 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 100 \text{ Muestral.}$$

$$E. \text{ Est\acute{a}ndar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$E. \text{ Est\acute{a}ndar} = 59 \%$$

Muestra 16, 17, 18

Estabilidad 190, 195, 190

$$u = \frac{190+195+190}{3} = 191$$

$$\text{Calcular la Desviaci3n Est\acute{a}ndar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(190-191)^2 + (195-191)^2 + (190-191)^2}{3}} = 6 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 9 \text{ Muestral.}$$

$$E. \text{ Est\acute{a}ndar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$E. \text{ Est\acute{a}ndar} = 500.29 \%$$

Muestra 19, 20, 21

Estabilidad 180, 175, 170

$$u = \frac{180+175+170}{3} = 58$$

$$\text{Calcular la Desviaci3n Est\acute{a}ndar. } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - u)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(180-58)^2 + (175-58)^2 + (170-58)^2}{3}} = 13.705 \text{ Poblacional}$$

$$\sigma = 20.558 \text{ Muestral.}$$

$$E. \text{ Est\acute{a}ndar} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$E. \text{ Est\acute{a}ndar} = 12,092 \%$$

El error Estándar promedio de las 21 muestras por *Temperatura*, es: 1,757 %, debido a que por la temperatura se incrementa, produciendo que la estabilidad decaiga, mostrándonos que los datos están variando dando un error considerable.