

## **CAPÍTULO I**

### **DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

#### **1.1 Introducción**

El Cemento Asfáltico es un ligante flexible, impermeable y duradero. Mediante la aplicación de calor disminuye su viscosidad, permitiendo mezclarse con agregados pétreos, obteniéndose así una mezcla cuyas excelentes características han permitido un alto desarrollo tecnológico de su utilización en la ingeniería vial.

En su evolución, se han logrado avances significativos al tratar al cemento asfáltico original (obtenido del petróleo crudo) con otras sustancias que permiten mejorar su comportamiento cuando es sometido a condiciones extremas, como climas muy fríos o calurosos, tránsito de vehículos muy pesados o ambientes agresivos.

Dentro de los sistemas de clasificación de asfaltos existen una variedad de métodos y parámetros para su evaluación; de tal manera el presente trabajo está enfocado en determinar el grado de desempeño del asfalto "PG" el cual pertenece a uno de los sistemas de clasificación y éste como tal es un indicador del comportamiento que tendría el ligante en la mezcla asfáltica en función a sus temperaturas de servicio, además de medir y analizar la estabilidad y fluencia de la mezcla para cada PG conocido; particularmente el análisis será en asfaltos ya puestos en obra en tramos carreteros de nuestro medio y además se demostrara si el grado PG influye de alguna manera en el costo del asfalto, es decir si a mayor o menor grado PG existe una relación directa grado-costo.

#### **1.2 Justificación**

Esta investigación se realiza debido a que en las diferentes carreteras de nuestro medio al ser construidas se encuentra que en la mayoría de los casos aun que se tenga un buen diseño de estructura de pavimento y una adecuada ejecución del proceso constructivo, sea evidente el deterioro prematuro o presencia de fallas en la capa de rodaje debido a la poca importancia que se le da a la elección del tipo de cemento asfáltico a ser usado, por lo cual, es necesario conocer y utilizar un método que clasifique al ligante asfáltico a través de su comportamiento físico real en el lugar de su utilización.

El grado PG (grado de desempeño) como un indicador del comportamiento del ligante, permitirá realizar una adecuada caracterización en la clasificación de los cementos asfálticos en los tramos carreteros de nuestro medio, reduciendo el mal desempeño de los asfaltos en pavimentaciones futuras, de esta manera verificando que cumplan las especificaciones requeridas para poder adoptar el cemento asfáltico más adecuado de la pavimentación en obra.

Además si el pavimento se desempeña en forma no adecuada, ocasiona que en repetidas veces sea necesaria la intervención para reparar, o reconstruir partes de la carpeta asfáltica debido a los daños que se van presentando antes del tiempo previsto. Lo que conlleva efectos negativos para los usuarios dado que genera problemas de tráfico en las carreteras e incomodidades innecesarias sin mencionar el costo no planificado que representa para la ejecución de estas labores de reparación.

Con la determinación del grado de desempeño en algunas vías de nuestro medio se dejara la información en función a las condiciones de temperatura extremas de la región, haciendo que de esta manera en futuras pavimentaciones se tenga un parámetro de qué tipo de cemento asfáltico se desempeña adecuadamente según las regiones analizadas.

Dada la limitante descrita en el alcance de la investigación, se obtendrán los PG para cada sector analizado, dejando a disponibilidad de esta información para futuras aplicaciones o investigaciones que puedan complementar de manera directa con el paquete de ensayos en laboratorio a los cementos asfálticos que corresponderían a los sectores en función a sus temperaturas de servicio.

Este análisis está orientado y/o dirigido a las entidades licitantes de proyectos carreteros e ingenieros y técnicos viales constructores en general, pretendiendo que los mismos tengan un conocimiento más profundo acerca del tema en estudio y de esta manera los resultados sean favorables económicamente, es decir se tenga ahorros importantes en labores de reparación al usar los cementos adecuados en las diferentes redes viales de nuestra región.

Académicamente el presente documento de análisis de la evolución de grado PG en la clasificación de asfaltos en nuestro medio y su influencia en el costo, brindara una

adecuada información teórica-práctica para docentes y estudiantes del área de ingeniería civil en general.

### **1.3 Planteamiento del problema**

#### **1.3.1 Situación problemática**

En nuestro medio, particularmente en Tarija, no se brinda el interés necesario a la incidencia que tendrán las temperaturas extremas en los asfaltos de los diferentes pavimentos flexibles. Y si a esto agregamos que la elección de un cemento asfáltico para el diseño de una mezcla se basa en procedimientos de clasificación de asfaltos a partir de ensayos físicos determinados en laboratorio y otros procesos experimentales los cuales solo pueden garantizar que la carpeta asfáltica soporte la carga de diseño, nos vemos en el problema de no poder garantizar un buen desempeño de la carpeta asfáltica ante condiciones de altas temperaturas y muchas veces también elevadas cargas vehiculares y bajas velocidades de circulación, que son las principales causas de deterioros en los pavimentos flexibles.

Lo que conlleva un deterioro prematuro de las superficies de rodadura de los pavimentos y la incursión anticipada de labores de mantenimiento en estos, lo que genera aumentos no previstos en los costos del pavimento reflejados en la inversión de mantenimiento durante la vida útil de la obra.

Por lo que es de gran importancia el desarrollo del estudio y análisis de la evolución del grado de desempeño en la clasificación de asfaltos, el cual pretende que ayude a comprender y facilitar la tarea de seleccionar un cemento asfáltico adecuado, en función de un buen desempeño que este le otorgue a la mezcla para resistir eficientemente las solicitaciones reales de servicio y principalmente las temperaturas de la región.

#### **1.3.2 Problema**

¿Cómo un análisis de la forma de aplicación del PG establecerá, el uso de cemento asfáltico respecto a su desempeño?

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar la forma de aplicación del grado PG para cementos asfálticos, basándose en las temperaturas ambiente extremas de algunos sectores en nuestro medio, de tal manera que se pueda establecer un análisis grado-costos y determinar una relación de su uso con las propiedades medidas de la mezcla correspondiente.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Estudiar conceptos de los cementos asfálticos, sus propiedades, tipos y metodologías de clasificación.
- Analizar la información climatológica del Senamhi correspondiente.
- Convertir las temperaturas ambiente a temperaturas del pavimento.
- Recolectar las muestras de cemento asfáltico utilizados en los tramos escogidos y extracción de núcleos de mezcla correspondientes a estos.
- Realizar en laboratorio ensayos de estabilidad y fluencia de la mezcla de los núcleos extraídos.
- Realizar el análisis comparativo de los resultados entre ensayos correspondientes a caracterización del cemento asfáltico y de mezcla para los respectivos PG.

## **1.5 Hipótesis de la investigación**

Si se convierten las temperaturas ambiente a temperaturas del pavimento (PG); entonces, se establecerá cual es el comportamiento físico para cada región, clasificando al cemento asfáltico con su grado de desempeño.

## **1.6 Variables de la investigación**

Las variables que se presentan en este trabajo de investigación son dos, una variable independiente y otra dependiente.

Variable independiente: Temperaturas extremas del aire

Variable dependiente: Clasificación por el grado de desempeño PG.

### **1.7 Alcance**

El presente documento tiene como principales alcances brindar la información teórica necesaria acerca de cementos asfálticos. De esta manera de la información meteorológica en los diferentes tramos carreteros con pavimento flexible, se los pueda clasificar por el grado desempeño PG que es el indicador actualmente usado en el mundo en la clasificación de cementos asfálticos convencionales y modificados.

Se realizara un análisis de precios unitario para ligantes clasificados por PERFORMANCE GRADE y clasificados por los métodos convencionales (penetración) esto para cada región en estudio, pudiendo demostrar de esta manera si existe o no una variación en costo entre sectores diferentes de PG y entre los clasificados convencionalmente respecto a la clasificación por PG.

Además se determinara una relación del PG obtenido con ensayos convencionales por lo cual se realizaran los ensayos correspondientes en laboratorio de las muestras tanto del cemento como de núcleos para determinar algunas de sus propiedades para realizar una comparación entre estos con sus PG respectivos y poder determinar la variación existente entre estos.

Se debe dejar muy en claro lo siguiente en este trabajo de investigación:

El método de clasificación de los cementos asfálticos PG (performance grade, planteado por el SHRP, clasifica a un cemento asfáltico por su grado de desempeño dentro de un rango de temperaturas extremas, las cuales son las temperaturas del aire correspondientes al sector donde se realizara la pavimentación, convertidas a temperaturas del pavimento o llamadas también temperaturas de servicio; dicha conversión se realiza a través de un algoritmo descrito en el punto 2.2.3.2, este rango obtenido es el grado PG, dentro del cual SUPERPAVE exige un nuevo paquete de ensayos que se realizan en laboratorio para cada rango PG, ensayos que tienen al igual que los otros métodos de clasificación rangos o criterios máximos y mínimos que se deben cumplir para cada ensayo de los cementos asfálticos.

Los ensayos se realizan con una serie de nuevos equipos a diferencia de los métodos tradicionales de clasificación de cementos asfálticos, motivo por el cual se presenta la limitante de no realizar dichos ensayos en los laboratorios de nuestro medio para esta investigación, porque los mismos no cuentan con este paquete de equipos, por lo cual el alcance se reduce a la determinación del PG correspondiente a cada zona en estudio y sus relaciones de ensayos complementarios.

Los ensayos planteados por SUPERPAVE deben estar dentro del rango de temperatura para el grado PG obtenido del sector, por lo cual es muy importante y crucial la determinación adecuada del rango PG (Temperatura de servicio) de cada sector en particular.

Se establecerán las respectivas conclusiones y recomendaciones en función a los resultados que se obtengan.

## **1.8 Diseño metodológico**

**1.8.1 Unidad de estudio:** Una unidad de estudio en estadística se les llama a los componentes de una determinada población de datos centro del estudio estadístico.

En esta investigación la unidad de estudio es *el cemento asfáltico de una carretera*.

**1.8.2 Población:** La población es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación.

En este caso la población a estudiar son *todos los cementos asfálticos de las vías por determinada región*

**1.8.3 Muestra:** Es la definición de la población que se va a analizar. Esto depende del problema y los objetivos principales de la investigación.

En este caso la muestra corresponde a *los cementos de las vías seleccionadas*

**1.8.4 Muestreo:** El muestreo es el proceso de seleccionar un conjunto de individuos de una población con el fin de estudiarlos y poder caracterizar el total de la población. En este caso *dentro del departamento de Tarija se procede a elegir los tramos*

*carreteros con pavimento flexible* para los cuales esté disponible la información meteorológica de una o más estaciones cercanas.

## **1.9 Métodos**

El método para este trabajo de investigación es:

Método inductivo:

El método inductivo o inductivismo es aquel método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares.

Por lo que en este trabajo investigativo se identificarán los tramos carreteros, extrayendo las muestras de mezclas asfálticas con un determinado tipo de cemento asfáltico para realizar los ensayos correspondientes y así obtener una relación con el PG correspondiente y de esta manera poder llegar a las conclusiones de los correspondientes resultados.

### **1.10 Técnicas**

Son procedimientos metodológicos y sistemáticos que se encargan de operativizar e implementar los métodos de Investigación y que tienen la facilidad de recoger información de manera inmediata, las técnicas son también una invención del hombre y como tal existen tantas técnicas como problemas susceptibles de ser investigados.

Las Técnicas tienen ventajas y desventajas al mismo tiempo, y ninguna de ellos puede garantizar y sentirse más importante que otros, ya que todo depende del nivel del problema que se investiga y al mismo tiempo de la capacidad del investigador para utilizarlas en el momento más oportuno. Esto significa entonces que las técnicas son múltiples y variables que actúan para poder recoger información de manera inmediata.

Las técnicas a emplear en el presente trabajo de investigación son las siguientes:

#### **1.10.1 Mediciones**

En esta técnica se procederá a través de los algoritmos descritos anteriormente y mediante los datos de temperaturas extremas del aire del sector, a determinar el rango de grado PG para el cemento asfáltico correspondiente.

### **1.10.2 Ensayo**

El ensayo es el procedimiento probado, el cual tiene una secuencia de pasos a seguir para la obtención de resultados mediante materiales y equipos que permiten analizar a un objeto en estudio.

En la investigación se pueden presentar varios ensayos para poder obtener resultados que determinen la investigación.

Dentro de esta técnica aplicaremos ensayos al cemento asfáltico y a los núcleos de mezcla asfáltica extraídos de la capa de rodaje:

**Al cemento asfáltico:** Viscosidad cinemática, penetración, punto de inflamación, ductilidad y peso específico.

**A los núcleos:** Ensayo de estabilidad, fluencia y determinación del porcentaje de cemento asfáltico (ensayo de extracción).

### **1.11 Evaluación**

Una vez determinados los PG`s, su análisis de precio unitarios y los resultados de las pruebas de caracterización convencional del ligante y los núcleos, se compara estos ensayos para su correspondiente resultado de PG para los cuatro sectores escogidos buscando de esta manera una variación entre sectores diferentes de PG`s y la variación de caracterización de ligantes y núcleos para cada sector carretero correspondiente a cada PG.

De existir estas variaciones se deberá evaluar y justificar el porqué de los resultados para los sectores en estudio.

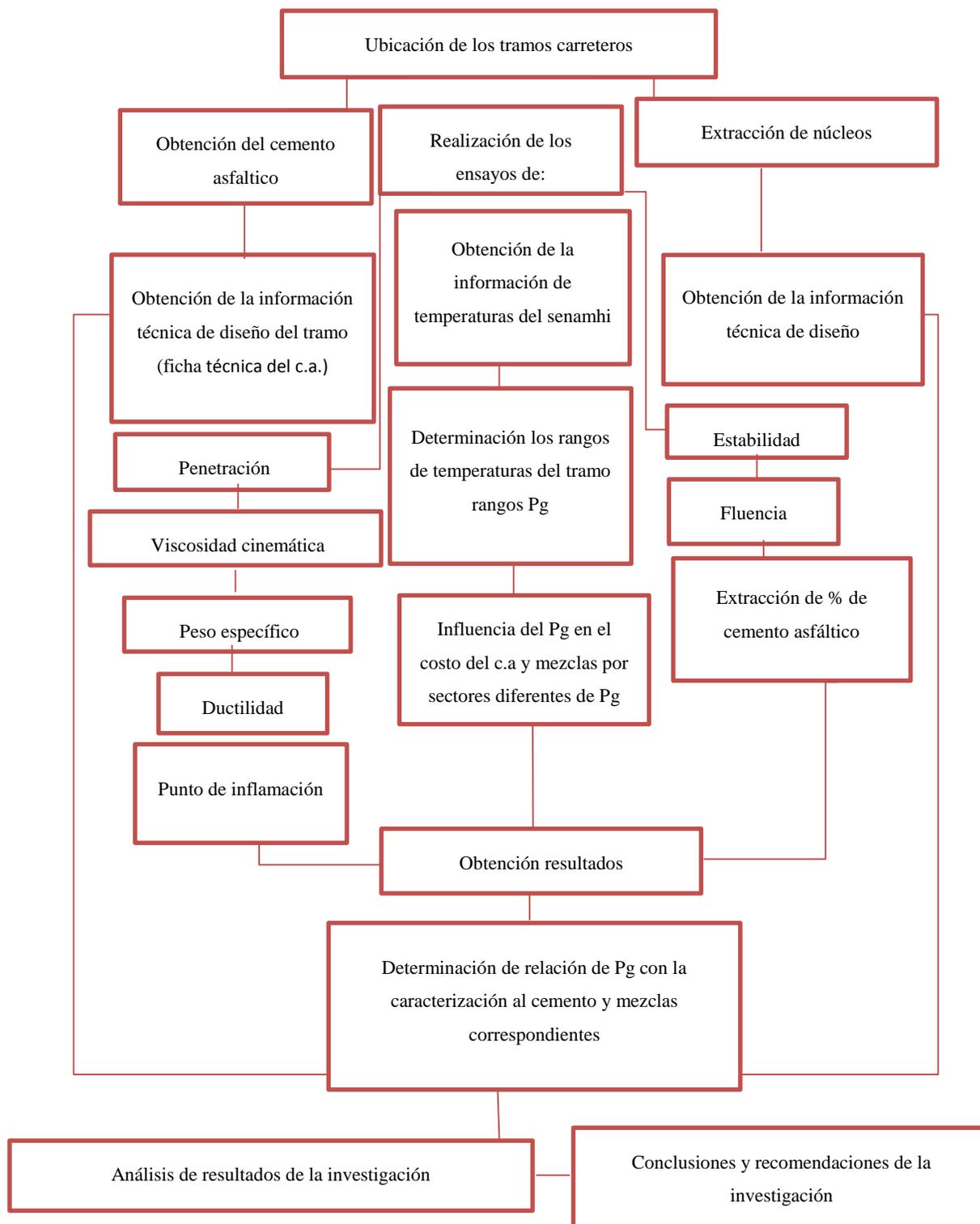
### **1.12 Medios**

Los medios a usar correspondientes a las técnicas aplicadas son todos los equipos materiales y herramientas tanto en campo como en laboratorio para lograr con los objetivos planteados.

### **1.13 Metodología**

Se plantea el siguiente flujograma esquemático del proceso de investigación: (pág. 9)

## FLUJOGRAMA ESQUEMÁTICO



### **1.13.1 Ubicación de los tramos carreteros**

Como primera parte del proceso de la investigación se identifican y ubican los tramos carreteros en departamento de Tarija los cuales deben estar pavimentados con pavimento flexible, además la elección de estos estará en función a la información meteorológica disponible más cercana a los tramos y también de la información técnica disponible por parte de las instituciones encargadas de la administración de estos o de las empresas que los hayan construido.

### **1.13.2 Obtención de información de temperaturas del Senamhi**

La información histórica de temperaturas del Servicio nacional de meteorología e hidrología, será solicitada a esta institución con la finalidad principal de contar con los máximos y mínimos de temperatura para los sectores analizados.

### **1.13.3 Determinación de las temperaturas de servicio del pavimento**

El método de clasificación de los cementos asfálticos plantea mediante un algoritmo la determinación de las temperaturas extremas de servicio del pavimento, las cuales son el grado PG en el cual un cemento asfáltico será clasificado por este método una vez cumpla los criterios de las especificaciones para el grado de desempeño que corresponda al sector analizado.

*Es decir, por ejemplo que para un sector clasificado como PG 46-34 (rango de temperaturas de diseño o temperaturas del pavimento), corresponderá a este un tipo de cemento asfáltico PG 46-34 una vez que cumpla los criterios para el paquete de ensayos en laboratorio correspondientes a ese rango de las especificaciones SUPERPAVE.*

Por lo cual la determinación del rango extremo de temperaturas a las cuales estará expuesto el pavimento de cada sector analizado son muy importantes en este trabajo de investigación.

#### **1.13.4 Influencia del costo por clasificación del ligante por PG respecto a la clasificación según los métodos tradicionales**

En la pavimentación de carreteras es importante conocer el costo final del pavimentado por unidad ( $m^3$ ) en el cual intervienen todos los materiales mano de obra y equipos; en este caso se analiza el costo del cemento asfáltico.

Los cementos tienen un determinado precio unitario según sea un cemento asfáltico convencional y modificado; los cuales en nuestro medio son ya conocidos, pero lo que se pretende es determinar si existe variación en el costo final entre sectores de PG diferentes y entre ligantes clasificados convencionalmente respecto a los ligantes clasificados por el nuevo método de clasificación PG.

#### **1.13.5 Obtención de las muestras**

Como complemento a este trabajo investigativo se realiza la obtención de las muestras que será tanto de los cementos asfálticos utilizados en la construcción de los tramos identificados, como también la extracción de núcleos de carpeta de rodaje.

Una vez trasladados a los lugares identificados para el estudio; la extracción de los núcleos se realizará a través de un extractor de muestras con diamantina en el número de treinta o más muestras para los ensayos de laboratorio.

La finalidad de la extracción de los núcleos es para realizar la medición de características de la mezcla; estabilidad, fluidez y también el contenido de cemento. Dichos ensayos son realizados para determinar la relación con su grado PG correspondiente a cada sector, ya de que la estabilidad y fluidez en la mezcla son físicamente influenciadas a lo largo de su servicio por las temperaturas del sector del pavimentado.

Por otra parte las muestras de cemento asfáltico serán solicitadas a las instituciones que hayan construido los tramos identificados para la investigación.

La finalidad de la obtención de muestras de CA, son para la realización de ensayos de caracterización al ligante asfáltico, de tal forma los resultados que se obtengan serán relacionados con los PG de los sectores correspondientes a cada tramo.

### **1.13.6 Obtención de resultados y relación de valores obtenidos de PG con la caracterización de cementos y núcleos correspondientes a cada sector.**

Lo que se pretende es que una vez obtenidos los valores del PG para los sectores identificados y analizados, es determinar el uso de este indicador en nuestro medio, para eso se lo relaciona con la caracterización a los cementos y mezcla correspondiente a los sectores.

### **1.13.7 Análisis de los resultados obtenidos**

Con el grado PG correspondiente a cada tramo analizado, se podrá evidenciar las posibles variaciones de rangos de temperatura en relación a las regiones donde se realizó la investigación y las posibles variaciones de costos en sectores diferentes de PG.

El análisis de resultados será también acompañado del análisis comparativo de los ensayos complementarios al trabajo de investigación como la caracterización de los cementos asfálticos y los ensayos a los núcleos.

### **1.13.8 Conclusiones y recomendaciones**

Éstas estarán en función al análisis que se haga a los resultados generales y comprobando si se pudieron cumplir con los objetivos planteados inicialmente para este trabajo investigativo.

## **1.14 Tratamiento estadístico**

La estadística descriptiva es la técnica matemática que obtiene, organiza, presenta y describe un conjunto de datos con el propósito de facilitar su uso generalmente con el apoyo de tablas, medidas numéricas o gráficas. Además, calcula parámetros estadísticos como las medidas de centralización y de dispersión que describen el conjunto estudiado.

Por lo tanto, el tratamiento estadístico de la información de esta investigación será **descriptivo** a través de las siguientes fórmulas estadísticas:

$$\text{Media aritmética: } \bar{x} = \frac{\sum fx}{n}$$

La media aritmética (también llamada promedio o 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.

$$\text{Desviación estándar: } S = \frac{\sqrt{\sum f(x-\bar{x})^2}}{n-1}$$

La desviación estándar es un índice numérico de la dispersión de un conjunto de datos (o población). Mientras mayor es la desviación estándar, mayor es la dispersión de la población. La desviación estándar es un promedio de las desviaciones individuales de cada observación con respecto a la media de una distribución.

$$\text{La moda: } M = Li + \left(\frac{D1}{D1+D2}\right)Ai$$

En estadística, la moda es el valor con mayor frecuencia en una distribución de datos

$$\text{La mediana: } Me = (Li - 1) + \frac{\frac{N}{2} - Fi-1}{fi} ai$$

Es el valor que ocupa el lugar central de todos los datos cuando éstos están ordenados de menor a mayor.

$$\text{Cuartiles: } Qk = (Li - 1) + \frac{\frac{K \cdot N}{4} - Fi-1}{fi} * ai$$

Los cuartiles son los tres valores de la variable dividen a un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales.

### *Deciles*

Los deciles son los nueve valores que dividen la serie de datos en diez partes iguales.

### *Cálculo de deciles*

En primer lugar buscamos la clase donde se encuentra,  $\frac{k \cdot N}{10}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 9$  en la tabla de las frecuencias acumuladas.

$$D_K = L_K + \frac{\frac{K \cdot N}{10} - F_{i-1}}{L_i} * a_i \quad k = 1, 2, \dots, 9$$

*Percentiles:*

Los percentiles son los 99 valores que dividen la serie de datos en 100 partes iguales.

Cálculo de percentiles

En primer lugar buscamos la clase donde se encuentra,  $\frac{k \cdot N}{100}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 99$  en la tabla de las frecuencias acumuladas.

$$P_K = L_i + \frac{\frac{K \cdot N}{100} - F_{i-1}}{f_i} * a_i \quad k = 1, 2, \dots, 9$$

*Desviación media:*

La desviación media es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la media.

La desviación media se representa por  $D_{\bar{x}}$

$$D_X = |X_1 - \bar{X}| + |X_2 - \bar{X}| + \dots + |X_n - \bar{X}|$$

$$D_{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{N}$$

*Varianza:*

La varianza es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística.

La varianza se representa por.  $\sigma^2$

$$\sigma^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{N}$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}$$

*Desviación típica*

La desviación típica es la raíz cuadrada de la varianza.

La **desviación típica** se representa por  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{\sqrt{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}}{N}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{N}$$

## CAPÍTULO II

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### 2.1 Cementos asfálticos convencionales y modificados con polímeros

##### 2.1.1 Asfaltos

El uso moderno del asfalto para carreteras y construcciones de calles comenzó a finales del siglo, y creció rápidamente con el surgimiento de la industria automotriz. Desde entonces, la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos, hoy día, los equipos y los procedimientos usados para construir estructuras de pavimentos asfálticos son bastantes sofisticados.

##### 2.1.2 Materiales asfálticos

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la proporción de mezcla en caliente.

Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daños químicos.

El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder capacidad de adherirse a las partículas de agregados. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto.

##### 2.1.3 Propiedades físicas y químicas del asfalto

El asfalto está presente en el petróleo crudo y su principal componente es el bitumen, también conocido como betún.

El betún es una mezcla de sustancias orgánicas altamente viscosa, negra de alta densidad y compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos.

El bitumen es la fracción residual, es decir, el fondo que queda tras la destilación fraccionada de petróleo, se trata de la parte más pesada y que tiene el punto de

ebullición más alto del proceso. Aunque comúnmente se los suele confundir y usar los términos indistintamente, no se debe confundir al betún con el asfalto, ya que este último es una mezcla de betún con minerales. Además, el asfalto es un material que se encuentra presente en la composición del petróleo crudo.

### **2.1.3.1 Propiedades químicas del asfalto**

El asfalto tiene propiedades químicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras.

Los ensayos existentes para analizar composiciones químicas requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen pruebas de asfalto.

La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento de la estructura del pavimento es todavía incierta.

De todas maneras, una breve descripción de la química del asfalto ayudara a que el supervisor entienda la naturaleza del material.

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrogeno, y carbono) y algunos residuos de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es disuelto con un heptano, puede separarse en dos partes principales, asfáltenos y máltenos.

Los asfáltenos no se disuelven en el heptano. Los asfáltenos una vez separados de los máltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso del grafito.

Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza.

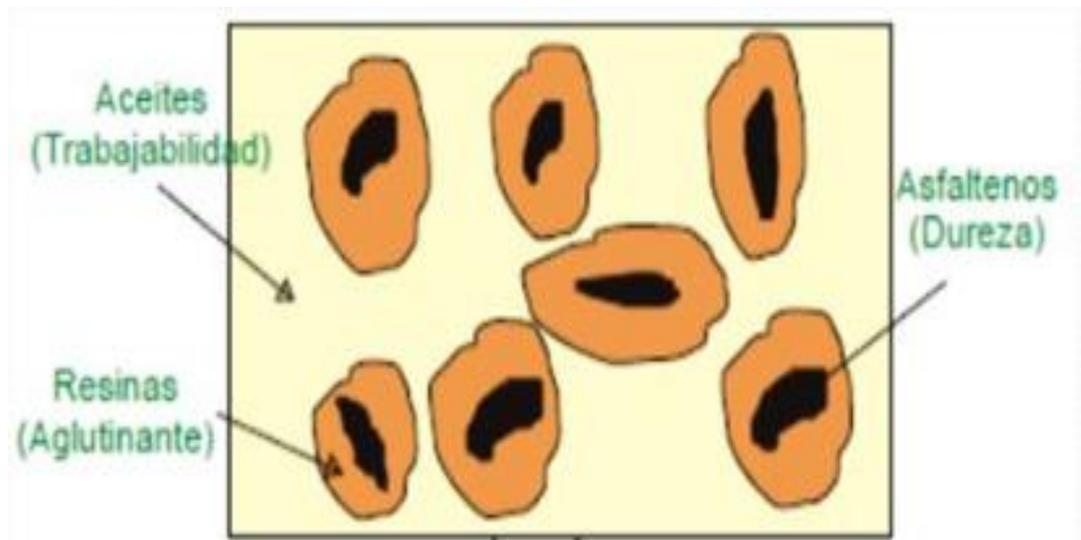
Los máltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas de aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las

cualidades adhesivas en el asfalto mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfáltenos y las resinas.

La proporción de asfáltenos y máltenos en el asfalto puede variar aun sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno tipo de agregados usados en la mezcla de pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregados.

Las reacciones que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburos con moléculas de oxígeno), polimeración (combinación de dos o más para formar una sola molécula más pesada) y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto.

**Figura 2.1 Composición química del asfalto**



**Fuente: cartilla del asfalto ASOPAC**

**Tabla 2.1 Elementos constitutivos del asfalto**

<b>Compuesto</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>
<b>% De carbono</b>	70	90
<b>% De hidrogeno</b>	7.3	10.1
<b>% De azufre</b>	0.56	9.5
<b>% De cenizas</b>	0.06	1.25
<b>% De nitrogeno</b>	0.05	7

**Fuente: cartilla del asfalto ASOPAC**

### **2.1.3.2 Propiedades físicas del asfalto**

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

### **2.1.4 Tipos de asfaltos**

Los asfaltos comúnmente usados en la construcción de pavimentos flexibles pueden dividirse en tres tipos:

Cemento asfáltico

Asfalto emulsificado

Asfalto cutback

#### **2.1.4.1 Cemento asfáltico**

A temperatura ambiente el cemento asfáltico es negro, pegajoso, semisólido, y altamente viscoso. Es un cemento fuerte y durable con excelentes características adhesivas e impermeables. También es muy resistente a la acción de muchos ácidos, álcalis y sales.

Los grados del cemento asfáltico, basados en su consistencia, son disponibles comercialmente. Para clasificar o definir la gradación del cemento asfáltico se usan tres métodos basados en la penetración, viscosidad o performance.

#### **2.1.4.2 Asfalto emulsificado**

El asfalto emulsificado es una mezcla de cemento asfáltico con agua y un agente emulsificador. El cemento asfáltico no se disuelve en agua. El cemento asfáltico caliente y agua con contenido de agente emulsificador son sometidos a presión a través de un molino coloidal para producir glóbulos o gotas de cemento asfáltico extremadamente pequeños (menos que 5-10 micrones) que son suspendidas en agua. El agente emulsificante reparte una carga eléctrica en la superficie de la gota que causa su repulsión uno a otro, y así los glóbulos son impedidos de cohesionarse. Una vez mezclado la emulsión con el agregado se produce el rompimiento de la emulsión cohesionándose las partículas de asfalto y liberando el agua. Los asfaltos emulsificados se categorizan como asfaltos líquidos porque, a diferencia de los cementos asfálticos, ellos son líquidos a temperatura ambiente.

#### **2.1.4.3 Asfalto cutback**

Los cutbacks son asfaltos líquidos a temperatura ambiente que se preparan incorporando (cutting back) solventes de petróleo (cutter stock o diluentes) al cemento asfáltico. Esto se hace para reducir la viscosidad del asfalto para aplicaciones a inferiores temperaturas. Una vez mezclado con el agregado se produce la evaporación del solvente, abandonando el residuo de cemento asfáltico. En función de la rapidez de la evaporación del solvente (proceso de curado), los asfaltos cutback se dividen en tres tipos: de curado rápido, curado medio y curado lento.

Los asfaltos se los puede clasificar en asfaltos convencionales y asfaltos modificados, a los cuales se realiza una serie de ensayos de caracterización, a continuación mencionamos los mismos según sea el caso.

Para tener clara la diferencia entre asfaltos modificados y los convencionales, los conceptualizamos de la siguiente manera:

#### **2.1.5 Asfaltos Modificados**

Son asfaltos, que para mejorar algunas de sus propiedades, se les incorporan productos como polímeros, caucho molido, etc. Estos productos pueden ser disueltos o

incorporados en el asfalto ya que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura. Esta modificación favorece sus propiedades físicas y geológicas, también disminuye su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumenta la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga, reduciendo el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general, se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo.

### 2.1.5.1 Requisitos para asfaltos modificados

Los asfaltos modificados con polímeros deben cumplir los requisitos detallados en la tabla 2.2, los cuales son realizados mediante los métodos de ensayo nombrados:

**Tabla 2.2 Tabla resumen de requisitos para asfaltos modificados**

Norma IRAM 6596						
Esayo	Unid.	Ensayo	AM1	AM2	AM3	AM4
<u>Asfalto original</u>						
Penetración 25°	0,1 mm	IRAM 6576	20-40	50-80	50-80	120-150
R&B	°c	IRAM 115	>60	>60	>65	>60
Punto Frass	°c	IRAM 6831	< -5	< -10	< -12	< -15
Estabilidad al almacenamiento						
Diferencia R&B	°c	IRAM 115	< 5	< 5	< 5	< 5
Diferencia pen. (25°C)	0,1 mm	IRAM 6576	< 8	< 10	< 10	< 15
Recup. Elástica 25 °C tors.	%	IRAM 6830	>10	>40	>70	>60
Punto de inflamación v/a	°c	IRAM 6555	>230	>230	>230	>230
<u>Residuo RTFOT</u>						
Variación de masa	%	IRAM 6582	< 1	< 1	< 1	< 1
Penetración 25° C	% p.o	IRAM 6576	>70	>65	>65	>65
Variación R&B	°c	IRAM 115	-5/+10	-5/+11	-5/+12	-6/+13

Fuente: Presentación pro vial Chile 2002, por el ing. Mario Jair

### **2.1.6 Asfáltoes convencionales**

Se define como una sustancia sólida o semisólida, de características adhesivas a temperatura conveniente, obtenido como residuo de la destilación conservativa o destructiva de petróleos de base asfáltica o mixta, y que se adapta por tratamientos apropiados a los usos especiales a que se destine.

#### **2.1.6.1 Pruebas de calidad**

Para determinar las propiedades de los materiales asfálticos, así como su comportamiento, existen ensayos de laboratorio que tienen por objeto dar a conocer las propiedades, tanto físicas como mecánicas sometidos a esfuerzos y a temperaturas extremas, según sea el caso. A continuación se presentará la descripción de quizás los más importantes ensayos:

##### **Viscosidad:**

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente de ciertos valores de viscosidad a temperatura de 60 °C y 135°C.

La viscosidad a 60 °C (absoluta) es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C (cinemática) corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado.

##### **Penetración:**

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean usados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25°C.

La prueba normal de penetración consiste, como primera medida, en estabilizar una muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25 °C en un baño de agua con

temperatura controlada. Seguidamente, una aguja de dimensiones prescritas se coloca sobre la superficie de la muestra bajo una carga de 100 gramos y por un tiempo exacto de 5 segundos.

La distancia que la aguja penetra en el cemento asfáltico es registrada en unidades de 0.1 mm. La cantidad de estas unidades es llamada la penetración de la muestra.

**Punto de inflamación:**

El punto de inflamación de un cemento asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles del amuestra, y crean un destello en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y e quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las facciones volátiles q se están separando del asfalto.

El punto de inflamación de un cemento asfáltico se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado su peligro que se inflame. Esta información es muy importante debido a que el cemento asfáltico es generalmente calentado con su almacenaje con el fin de mantener una viscosidad lo suficiente baja para que el material pueda ser bombeado.

**Pruebas de película delgada en horno y prueba de película delgada en horno rotatorio:**

Estas pruebas no son verdaderas pruebas. Solamente son procedimientos que se exponen una muestra de asfalto a unas condiciones que aproximan las ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente. Las pruebas de viscosidad y penetración efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de estas pruebas, son usadas para medir el endureciendo anticipado del material, durante la construcción y durante el servicio del pavimento.

**Ductilidad:**

La ductilidad es una medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La ductilidad es la medida mediante una prueba de extensión en donde una probeta de cemento asfáltico es estirada a una velocidad y una temperatura específica de 25 °C. El estiramiento continúa hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompa. La longitud del hilo de material en el momento del corte se mide en cm. Y se denomina ductilidad de la muestra.

**Solubilidad:**

Éste es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como las sales, el carbono libre, y los contaminantes inorgánicos, no se disuelven sino que se depositan en forma de partícula. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de muestra original.

**Peso específico:**

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen igual al del agua, ambos a una temperatura determinada. Como ejemplo, una sustancia con un peso específico de 1.06 pesa 1.6 veces más que el agua.

El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, solamente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar las correcciones de temperatura-volumen.

El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacío de un pavimento compacto.

## **2.2 Clasificación de los cementos asfálticos**

El cemento asfáltico históricamente se evaluó con dos ensayos empíricos; penetración y viscosidad. Estos ensayos se desarrollaron a través del tiempo, usando la experiencia con pavimentos asfálticos.

Los ensayos de penetración y viscosidad se desarrollaron durante una época en la que el tráfico era menor y las cargas aplicadas significativamente inferiores. El peso de los camiones estuvo limitado a 72,000 lb y presión de llanta de 75 psi. En la actualidad, los camiones exceden las 80,000 lb. Y las presiones de llanta son de 125 psi. El incremento del 10% en el peso de los camiones puede no parecer significativo, pero resulta en un 40% de incremento en los esfuerzos aplicados al pavimento. Estos factores, junto con el incremento de la red vehicular someten a nuestros pavimentos asfálticos a esfuerzos, resultando en deformaciones permanentes y fallas prematuras.

Los cementos asfálticos se los clasifican actualmente bajo tres sistemas de clasificación los cuales son los siguientes:

### **Clasificación por penetración**

### **Clasificación por viscosidad**

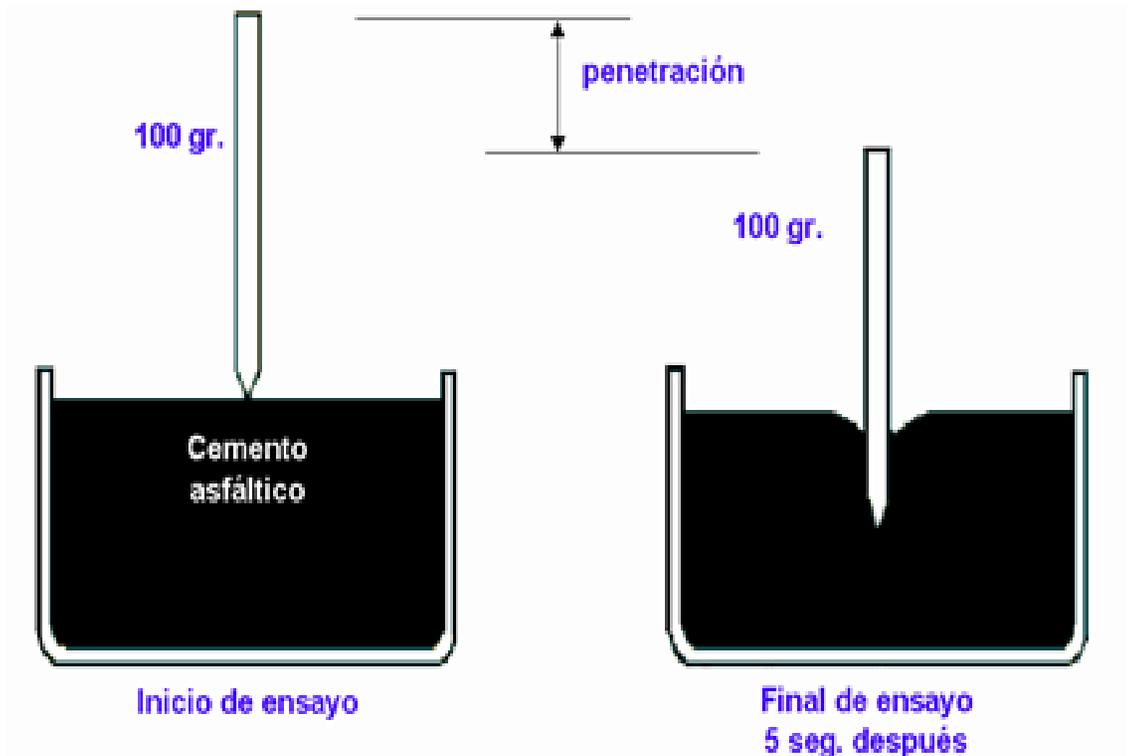
### **Clasificación por grado de desempeño**

#### **2.2.1 Clasificación por penetración**

El método de penetración fue el primer sistema desarrollado para la clasificación de asfaltos y todavía es utilizado por diferentes agencias de carreteras en la región. Dicho sistema fue desarrollado en 1918 por el Bureau of Public Works (ahora federal highway administration, FHWA), y posteriormente en 1931, la AASHTO publicó las primeras especificaciones técnicas para la clasificación de asfaltos por penetración. Cabe señalar que la clasificación del asfalto por penetración, conlleva el desarrollo de una serie de ensayos de laboratorio, los cuales están contemplados en la norma ASTM D 946, Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. A continuación, en la Tabla 2.3 se presentan las características físicas

que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D 946.

**Figura 2.2 Penetración de la aguja estándar en el cemento asfáltico**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

El desempeño del asfalto dependerá entre otros aspectos de la temperatura a la que éste se exponga y a su composición. Al respecto, se ha observado que algunos asfaltos, no obstante a que corresponden a un mismo tipo de clasificación por penetración, presentan consistencias o viscosidades diferentes a una misma temperatura. Lo anterior, constituye una de las limitantes de dicho sistema de clasificación de asfaltos.

### 2.2.1.1 Especificación por penetración

**Tabla 2.3 Especificaciones para cementos asfálticos clasificados por su grado de penetración**

Característica	Unid .	Método ASTM	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 s	...	D-5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación Cleveland copa abierta	°c	D-92	232	...	232	...	232	...	218	...	177	...
Ductilidad, 25° C, 5 cm/min.	cm	D-113	100	...	100	...	100	...	100	...	100	...
Solubilidad en tricloroetileno	%	D-2042	99	...	99	...	99	...	99	...	99	...
Penetración retenida después de la prueba de horno sobre película delgada	%	D-5 Después de realizar D-1754	55+	...	52+	...	47-	...	42+	...	37-	...
Ductilidad 25°C, 5 cm(min, después de prueba de horno sobre película delgada	cm	D-113 Después de realizar D-1754	...	...	50	...	75	...	100	...	100	...

**Fuente: Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfáltos, emulsiones asfálticas y asfáltos rebajados según reglamento técnico Centroamericano**

### 2.2.2 Clasificación por viscosidad

El sistema de clasificación por viscosidad fue introducido a principios de la década de 1960, mediante el cual es posible clasificar cementos asfálticos en estado virgen y en residuos asfálticos. Dicho sistema de clasificación fue concebido debido a las limitantes que presenta el sistema de clasificación por penetración, una de las cuales está relacionada con la imposibilidad de evaluar la susceptibilidad térmica del asfalto o no poder evaluar el comportamiento del mismo a temperaturas normales de operación de la mezcla asfáltica. Los ensayos requeridos para la clasificación del asfalto, están contemplados en la norma ASTM D 3381, Standard Specification for Viscosity-Graded

Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. Dentro de esta especificación se encuentran los asfáltos clasificados por a) **Viscosidad (AC)** y b) **Residuo asfáltico (AR)**, los cuales se detallan a continuación: a) **Viscosidad (AC)**. Los ensayos se realizan en el asfalto original (virgen), entre los asfáltos clasificados por viscosidad, tenemos los siguientes: AC 5, AC 10, AC 20, AC 30, AC 40. A continuación, en la Tabla 2.4, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfáltos:

### 2.2.2.1 Especificaciones por viscosidad

**Tabla 2.4 Especificaciones para cementos asfálticos clasificados por viscosidad a 60 ° C**

Característica	Unid.	Método ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m <sup>2</sup>	D-2170	250 +- 50	500+- 100	1000 +- 200	2000 +- 400	3000 +- 600	4000 +- 600
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm <sup>2</sup> /s	D-2170	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C 100 g, 5 s, mínimo	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland Copa abierta, mínimo	°c	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99	99	99	99	99	99
Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada		D-1754						
Viscosidad, 60°C	N s/m <sup>2</sup>	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100	100	75	50	40	25

**Fuente: Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfáltos, emulsiones asfálticas y asfáltos rebajados según reglamento técnico Centroamericano**

### **2.2.3 Clasificación por grado de desempeño PG**

La tercera forma de clasificar a los cementos asfálticos no es usual en nuestro medio, por lo cual es necesario realizar un desglose explicativo de cómo surge este nuevo método, como se lo realiza y cuáles son las nuevas especificaciones requeridas.

#### **2.2.3.1 El ligante SUPERPAVE**

Como la química del asfalto es muy compleja, la experiencia ha demostrado que las especificaciones deben estar relacionadas con las propiedades físicas o de manera más precisa, de su comportamiento mecánico. Las especificaciones actuales en muchos de los países utilizan todavía los ensayos de penetración, viscosidad para evaluar el asfalto. Muchos de los ensayos actuales son empíricos, significando que la experiencia es todavía necesaria que los resultados de los ensayos se puedan interpretar adecuadamente. Sin embargo, tal práctica ha demostrado que tiene importantes limitaciones.

Entre los años 40 y 50 el sistema de clasificación por penetración fue usado en los EE.UU. y Canadá. El ensayo de penetración realizado a 25°C (temperatura elegida como el promedio de la temperatura de servicio del pavimento), indica la rigidez del asfalto, que solo puede ser relacionado con su comportamiento en campo mediante la experiencia. Como el valor de la penetración no es una medida fundamental dicho valor no puede ser racionalmente incluida en modelos mecánicos.

El sistema de gradación por viscosidad se basó en los ensayos de viscosidad del ligante.

La viscosidad es una medida fundamental del flujo, que proporciona información acerca del comportamiento viscoso a mayores temperaturas. Las temperaturas de ensayo son de 60°C y 135°C. Sin embargo, este ensayo no es adecuado para controlar el comportamiento mecánico del ligante no newtonianos (y viscoelásticos), requiriendo de ensayos adicionales al de la viscosidad.

Entre los años 80 y 90 la Pacific Coast User Producer Conference adoptó un nuevo sistema de especificación propuesto por J. Goodrich y R. Reese1, llamado Especificaciones de Asfalto basado en su Performance (PBA) que intentó incluir las

variaciones regionales de climas y el envejecimiento o deterioro del asfalto durante su vida de servicio.

Las especificaciones actuales pueden calificar diferentes asfaltos como de similar grado (basado en ensayos puntuales a una determinada temperatura) cuando su comportamiento a otras temperaturas puede ser totalmente diferente.

Reconociendo las deficiencias de tal sistema, las agencias estatales de carreteras tuvieron que implementar un programa de investigación para adoptar un nuevo sistema para especificar el pavimento asfáltico. En 1987, la SHRP inició estudios para desarrollar nuevos ensayos que permitan medir las propiedades físicas del asfalto. La inversión de \$50 millones de dólares se plasmó en las *especificaciones del ligante llamado superpave*, que requiere de un nuevo *paquete de equipos para ensayos y procedimientos*. Se llamó especificaciones del “ligante” porque se engloba a los asfaltos modificados y no modificados.

Las especificaciones del ligante superpave adoptaron muchos de los conceptos de las especificaciones PBA. El avance más significativo fue probablemente cambiar ensayos empíricos por ensayos *donde el ligante puede ser caracterizado a variaciones de temperaturas controladas obtenidas de campo*. Los ensayos de Reómetro de corte dinámico (DSR), reómetro de viga de flexión (BBR) y ensayo de tensión directa (DTT) reemplazaron a los ensayos de viscosidad, penetración y ductilidad, respectivamente. Junto con el envejecimiento en planta (RTFO) se adoptó el envejecimiento durante la vida de servicio (PAV).

El tercer método de clasificación del ligante asfáltico a diferencia de las especificaciones de penetración y viscosidad anteriores, la especificación del ligante SUPERPAVE se basa directamente entre las propiedades físicas básicas del ligante y su comportamiento observado.

Fundamentalmente, representa un sistema mejorado de especificaciones para materiales, diseño y análisis de mezclas asfálticas, y predicción del comportamiento de pavimentos. El sistema incluye equipos de ensayo, procedimientos y criterios.

### 2.2.3.2 Elección del ligante asfáltico

Los ligantes asfálticos son normalmente seleccionados en función del clima.

SUPERPAVE ofrece al usuario tres métodos para la elección del ligante:

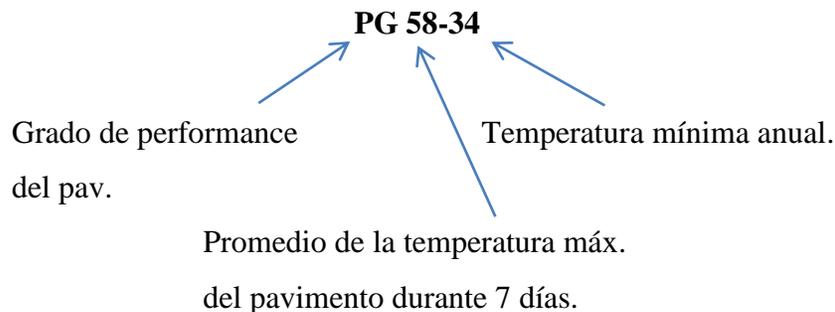
Por área geográfica: un organismo vial elabora un mapa indicando el grado de ligante a ser utilizado por el proyectista, en base al clima o a decisiones de política vial.

Por la temperatura del pavimento: en este caso el proyectista necesita conocer la temperatura de diseño del pavimento.

Por la temperatura del aire: el proyectista determina las temperaturas del aire para diseño, las que son convertidas en temperaturas de diseño del pavimento.

El grado de comportamiento del ligante o performance grade (PG) generalmente se selecciona basado en las temperaturas extremas de servicio del ligante.

La diferencia entre los diferentes tipos de PG o grados del ligante vienen a ser las temperaturas mínima y máxima de servicio. Por ejemplo, un ligante clasificado como PG 58-34 se le evaluará físicamente a 58°C y -34°C.



Junto con el grado del ligante clasificado de acuerdo a altas y bajas temperaturas, se requiere mayor información para seleccionar el PG que debe tener el ligante en un lugar en particular. Se debe conocer el *área geográfica*, *temperatura del pavimento* y la *temperatura del aire*, variables que deben ser convertidas a la temperatura del pavimento.

### 2.2.3.3 Temperaturas del pavimento

Los datos históricos medioambientales se convierten a temperaturas del pavimento. Los investigadores de la SHRP desarrollaron algoritmos para convertir temperaturas de aire altas y bajas a temperaturas de pavimento. El algoritmo original de la SHRP para determinar la temperatura extrema baja del pavimento fue corregido porque no determinaba adecuadamente este valor. La FHWA con el programa LTPP (Long Term Pavement Performance) desarrolló un nuevo algoritmo basado en 30 estaciones medioambientales a lo largo de los EE.UU.

#### Modelo con Confiabilidad del LTPP para Temperaturas Altas

$$T_{(pav)} = 54.32 + 0.78 T_{(aire)} - 0.0025 Lat^2 - 15.14 \text{Log}_{10}(H + 25) + z(9 + 0.61 \sigma^2_{aire})^{\frac{1}{2}}$$

T (pav) = Temperatura alta del pavimento bajo la superficie, °C

T (aire) = Temperatura alta del aire, °C

Lat. = Latitud de la zona, (En grados)

H= Profundidad desde la superficie, mm

$\sigma$  (aire) = Desviación estándar de la temperatura media del aire de los 7 días más altos, °C

z = Para distribución estándar normal y una confiabilidad del 98%, z = 2.055.

Nota = La profundidad H generalmente es de 20 mm

#### Modelo con Confiabilidad del LTPP para Temperaturas Bajas

$$T_{(pav)} = -1.56 + 0.72 T_{(aire)} - 0.004 Lat^2 + 6.26 \text{Log}_{10}(H + 25) - z(4.4 + 0.52 \sigma^2_{aire})^{\frac{1}{2}}$$

T (pav) = Temperatura baja del pavimento bajo la superficie, °C

T (aire) = Temperatura baja del aire, °C

Lat. = Latitud de la zona, (En grados)

H = Profundidad desde la superficie, mm

$\sigma$  (aire) = Desviación estándar de la temperatura media del aire durante el año, °C

$z =$  Para distribución estándar normal y una confiabilidad del 98%,  $z=2.055$ .

### **Confiabilidad**

La confiabilidad es el factor de seguridad que se incorpora en el Sistema de Gradación PG basado en la confiabilidad de la temperatura. El 50% de confiabilidad en la temperatura representa el promedio de los datos de la estación. La confiabilidad del 98% de temperatura se determina en función de la desviación estándar a bajas temperaturas ( $\sigma_{baja}$  temperatura) y alta ( $\sigma_{alta}$  temperatura).

$T_{m\acute{a}x}$  al 98% =  $T_{m\acute{a}x}$  al 50% +  $2\sigma_{alta}$  temperatura

$T_{m\acute{i}n}$  al 98% =  $T_{m\acute{i}n}$  al 50% -  $2\sigma_{baja}$  temperatura

El nivel del tráfico y la velocidad también se consideran en la selección del grado de performance (PG). La Tabla 2.5 muestra las consideraciones de elección del ligante en función de la velocidad y nivel de tráfico. Los grados de performance varían cada 6°C, la Tabla 2.6 muestra los PG Superpave.

Junto con el grado del ligante clasificado de acuerdo a altas y bajas temperaturas, se requiere mayor información para seleccionar el PG que debe tener el ligante en un lugar en particular. Se debe conocer el área geográfica, temperatura del pavimento y la temperatura del aire, variables que deben ser convertidas a la temperatura del pavimento.

**Tabla 2.5 Selección del ligante en función de la velocidad y nivel de tráfico.****AASHTO MP2**

ESAL <sup>1</sup> de diseño (millones)	Grado del ligante corregido, PG <sup>5</sup>		
	Rata de la carga de tráfico		
	Permanente <sup>2</sup>	Bajo <sup>3</sup>	Estándar <sup>4</sup>
< 0.3	-6	-	-
0.3 a < 3	2	1	-
3 a < 10	2	1	-
10 a < 30	2	1	-
≥ 30	2	1	1

**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

- (1) ESAL de diseño es el tráfico esperado en el carril de diseño para un período de 20 años.
- (2) Tráfico permanente, donde la velocidad del tráfico promedio es menos que 20 km/h
- (3) Tráfico bajo, donde la velocidad del tráfico promedio está entre 20 y 70 km/h
- (4) Tráfico estándar, donde la velocidad del tráfico promedio es mayor que 70 Km/h
- (5) Incrementar el grado de la temperatura del aire el número de grado equivalente Indicado (1 grado equivale a 6°C). Usar el grado bajo de temperatura como se indicó antes.
- (6) Se puede considerar el incremento de la temperatura alta en 1 grado equivalente.

**Tabla 2.6 Grados de ligante asfáltico SUPERPAVE**

Grado de alta temperatura	Grado de baja temperatura
PG 46-	34,40,46
PG 52-	10,16,22,28,34,40,46
PG 58-	16,22,28,34,40
PG 64-	10,16,22,28,34,40
PG 70-	10,16,22,28,,34,40
PG 76-	10,16,22,28,34
PG 82-	10,16,22,28,34

**Fuente: Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE**

### 2.3 Ensayos superpave del ligante

El tema central de las especificaciones del ligante Superpave es someter a ensayos en condiciones que simulen las tres etapas críticas durante la vida del ligante.

Los ensayos realizados en el ligante original representan la primera etapa crítica de la vida del ligante que corresponde al transporte, almacenamiento y manipuleo.

La segunda etapa representa el asfalto durante la producción de las mezclas y construcción y es simulado por un proceso de envejecimiento en el **Horno Rotatorio de Película Delgada**. Este procedimiento expone la película delgada del ligante a calentamiento y aire aproximándolo al envejecimiento del asfalto durante la mezcla y construcción.

La tercera etapa ocurre cuando el ligante se envejece durante la operación o vida de servicio. Esta etapa se simula con el ensayo de **Envejecimiento en la Cámara de Presión Vessel**. Este procedimiento expone la muestra de ligante a calentamiento y presión para simular el envejecimiento durante la vida de servicio.

Las especificaciones del ligante Superpave y los métodos de ensayo usados para caracterizar el asfalto están siendo actualmente evaluados por la AASHTO y ASTM. En este texto se incorporan los últimos procedimientos y especificaciones, sin embargo, estos pueden ser modificados.

Los ensayos Superpave miden las propiedades físicas que se pueden relacionar directamente con el comportamiento en campo por principios ingenieriles. Los ensayos se realizan a la temperatura de servicio del pavimento. En la Tabla 2.7 se listan los nuevos equipos y el propósito para los que se utilizan.

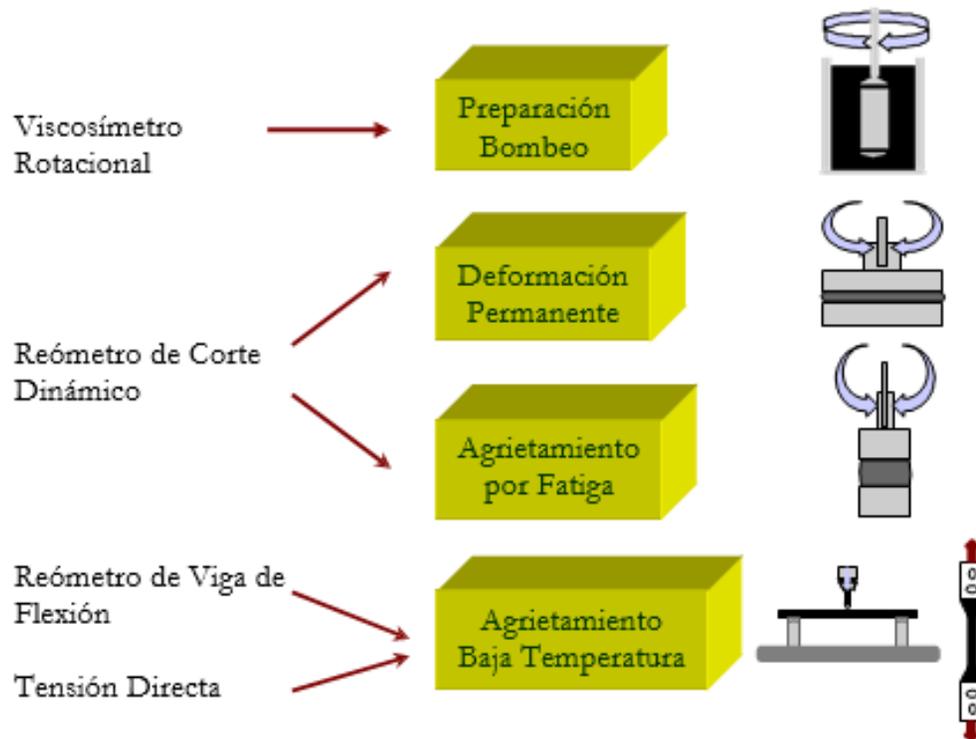
La Figura 2.3 describe como cada ensayo está relacionado al comportamiento del ligante en campo.

**Tabla 2.7 Equipos para ensayos superpave**

<b>Equipos</b>	<b>Propósito</b>
Película fina en horno rotatorio (RTFO)	Simula el envejecimiento inicial del ligante
Presión de envejecimiento Vessel (PAV)	Simula el envejecimiento durante la vida de servicio del ligante.
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Mide las propiedades del ligante a temperaturas altas e intermedias.
Viscosímetro rotational (RV)	Mide las propiedades del ligante a temperaturas altas.
Reómetro de viga de flexión (BBR)	Mide las propiedades del ligante a temperaturas bajas.
Ensayo de tensión directa (DTT)	

**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

**Figura 2.3 Ensayos de laboratorio superpave relacionados con su comportamiento**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

## 2.4 Envejecimiento del asfalto

### 2.4.1 Ensayo de película fina en horno rotatorio, RTFO AASHTO T240 ó ASTM D 2872

El ensayo de RTFO tiene dos propósitos. Uno es determinar la cantidad de masa de volátiles perdidos durante el proceso y el segundo es envejecer el asfalto que será usado en ensayos posteriores.

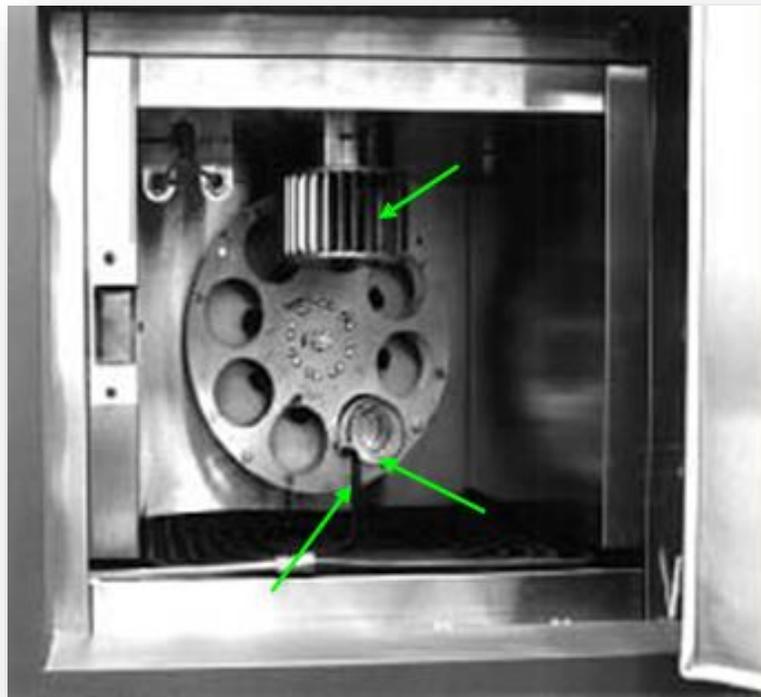
La masa perdida de volátiles indica el envejecimiento que puede ocurrir en el asfalto durante los procesos de mezcla y construcción. Algunos asfaltos dan peso constante durante el proceso de RTFO porque se formó el producto oxidado. Esto indica la relativa importancia de la pérdida de peso sobre el proceso de envejecimiento en sí.

El ensayo de Película Fina en Horno Rotatorio, RTFO simula el envejecimiento corto del ligante, producido durante el transporte, manipuleo y producción. En la prueba, el ligante en forma de película fina es sometido a calentamiento y un flujo de aire.

El procedimiento de ensayo requiere de un horno eléctrico con base circular giratoria (Foto 2.1). La base circular sujeta envases de muestra que rotan alrededor de su centro.

Se aplicará flujo de aire dentro de cada envase de muestra con una boquilla ubicada en la parte inferior de la base rotatoria. El horno RTFO debe ser precalentado a la temperatura de envejecimiento de  $163^{\circ}\text{C}$ , por un período mínimo de 16 horas antes de ser usado.

**Fotografía 2.1** Ensayo de película fina en horno rotatorio



**Fuente:** Superpave y el diseño de mezclas asfálticas

### Fotografía 2.2 Envases para ensayo RTFO



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

La muestra que se ensayará se debe calentar hasta que fluya, no excediendo los 150°C.

Los envases de RTFO se llenan con 35 gr del ligante. Se requiere ensayar ocho envases de muestras para Superpave. Dos envases se requieren para determinar la pérdida de masa, y las otras seis se usan para ensayos posteriores. La Foto 2.2. Muestra dos envases, el primero luego del ensayo y el segundo antes de verter la muestra.

Los envases se colocan en la base y se hacen rotar a 15 rev/min sometiéndolos a un flujo de aire de 4000 ml/min por 85 minutos.

Luego del envejecimiento, los dos envases conteniendo las muestras para determinar la pérdida de masa se enfrían y pesan con una aproximación de 0.001 gramo, luego esta muestra se descarta. El residuo RTFO de los otros envases se vierte dentro de un contenedor y se remueve hasta alcanzar homogeneidad.

La pérdida de masa es el promedio de los dos envases envejecidos RTFO y se expresa en porcentaje, según la siguiente ecuación:

$$Perdida\ de\ masa\ (\%) = \frac{Masa\ original - Masa\ envejecida}{Masa\ original} * 100$$

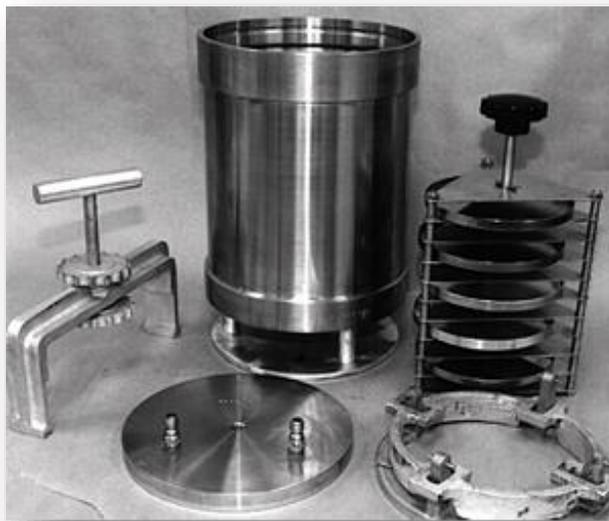
#### 2.4.2 Presión de envejecimiento Vessel, PAV. AASHTO PP1

El ensayo de presión Vessel, PAV simula el envejecimiento largo del ligante, para un período de servicio entre 7 a 10 años. Como el ligante es sometido a un envejecimiento largo (durante vida de servicio) debe haber sufrido envejecimiento corto (durante la mezcla y construcción), por lo que la muestra que se envejece en el PAV será aquella que fue previamente envejecida en el RTFO.

El equipo de presión de envejecimiento consiste de una cámara de presión Vessel y un horno con corriente de aire a presión. La presión Vessel es diseñada para operar bajo las condiciones de presión y temperatura del ensayo (2070 kPa y 90°C, 100°C ó 110°C). En el portamuestras se pueden acomodar hasta diez muestras. Foto 2.3.

Antes de ensayar en PAV, el ligante envejecido en RTFO se calienta hasta que fluya y removido para asegurar homogeneidad. Tres muestras PAV de 50 g cada una se preparan y se colocan en el portamuestras.

**Fotografía 2.3 Equipo para ensayo de presión de envejecimiento Vessel**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

El PAV no presurizado es precalentado a la temperatura de ensayo. Luego del precalentamiento, el portamuestras con las muestras son colocadas en el Vessel caliente y se tapa inmediatamente. El envejecimiento se realiza a diferentes temperaturas dependiendo del clima de diseño. Cuando la temperatura del Vessel está dentro de 2C de la temperatura requerida, se aplica la presión.

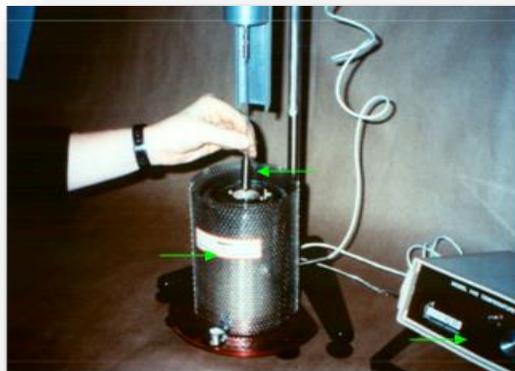
Luego de 20 horas, la presión se disminuye paulatinamente y el portamuestras se retira del PAV. Las muestras se llevan a horno de 163C por 30 minutos. Este paso elimina el aire atrapado en la muestra. Las muestras son retiradas y guardadas en un contenedor para ser posteriores ensayos.

## 2.5 Ensayos reológicos

### 2.5.1 Viscosímetro rotacional, RV. ASTM D4402

El ensayo en el viscosímetro rotacional o de Brookfield es usado para determinar las características de flujo del ligante asfáltico asegurando que puede ser bombeado y manipulado para la mezcla en caliente. Como se muestra en la Foto 2.4 el viscosímetro rotacional está compuesto por un contenedor térmico, un controlador de temperatura, eje de extensión, llaves de control y lector digital. El viscosímetro automáticamente calcula la viscosidad a la temperatura de ensayo.

**Fotografía 2.4 Viscosímetro rotacional**

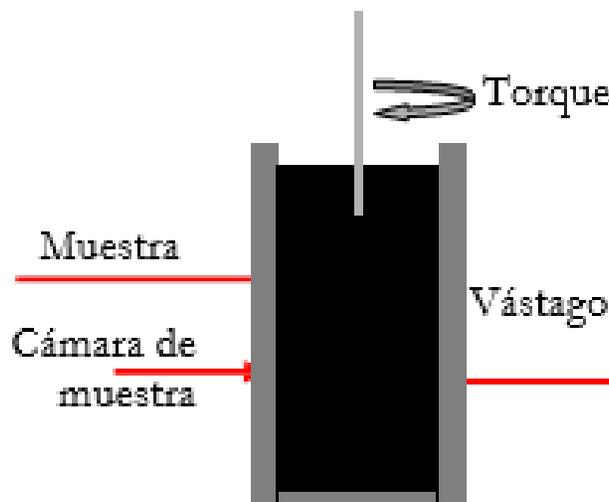


**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

La viscosidad rotacional se calcula midiendo el torque requerido para mantener una velocidad constante de rotación del vástago mientras está dentro de la muestra de

asfalto a temperatura constante, Figura 2.4. Este torque se relaciona directamente con la viscosidad del ligante, que se calcula automáticamente por el viscosímetro. Esta viscosidad del ligante se usa para asegurar que el asfalto es lo suficientemente fluido durante el bombeo y mezcla con el agregado. El viscosímetro también puede ser empleado para elaborar cartas de temperatura-viscosidad para estimar las temperaturas de mezcla y compactación durante el diseño.

**Figura 2.4 Operación del viscosímetro rotacional**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

El ensayo se realiza en ligante original, y consiste en calentar aproximadamente 30 g de ligante en un horno a una temperatura no mayor de 150°C hasta fluir. La muestra debe ser removida durante el calentamiento para eliminar el aire atrapado. La cantidad de asfalto usado durante el ensayo esta entre 8 a 11 gramos y varía con el tamaño del vástago. La cámara de muestra conteniendo la muestra de ligante se coloca en un contenedor térmico precalentado, el eje precalentado se introduce en la muestra, y el ligante está listo para ser ensayado cuando la temperatura se estabilice.

Un período de espera de 15 minutos puede necesitarse para alcanzar la temperatura uniforme de 135°C. Durante este período, el motor del viscosímetro se acciona a 20 rpm y se lee la viscosidad y porcentaje de torque. La viscosidad se reporta como el

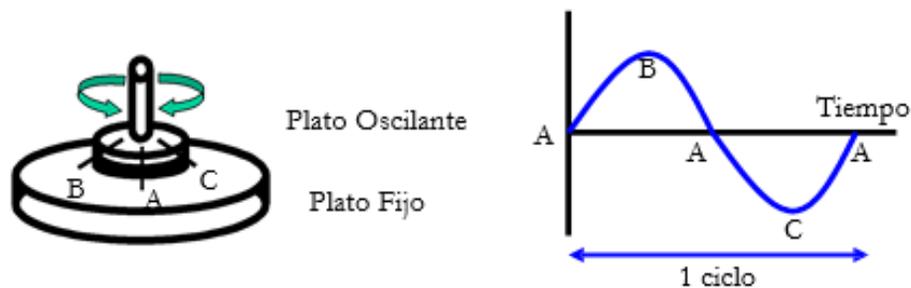
promedio de tres lecturas. La lector digital está en unidades de centipoise (cP) mientras que las especificaciones superpave usan Pascal-segundo, Pa-s. La conversión usada es  $1000 \text{ cP} = 1 \text{ Pa-s}$ . Las especificaciones del ligante superpave indica que la viscosidad no debe ser mayor de 3 Pa-s.

### 2.5.2 Reómetro de corte dinámico, DSR. AASHTO TP5

El Reómetro de corte dinámico, DSR determina el comportamiento elástico- viscoso del ligante a través del módulo de corte complejo,  $G^*$  y el ángulo de fase,  $\delta$  para temperaturas altas e intermedias.

El ensayo consiste en colocar la muestra de asfalto entre dos platos paralelos, uno que es fijo y el otro oscilante, figura 2.5. El movimiento del plato oscilante es de A a B; de B a C pasando por A; y de C a A. Esta oscilación es un ciclo y se repite constantemente durante la operación de DSR. Todos los ensayos en ligante Superpave se hacen a una frecuencia de 10 rad/s que es aproximadamente igual a 1.59 Hz (ciclos por segundo).

**Figura 2.5 Operación del reómetro de corte dinámico**



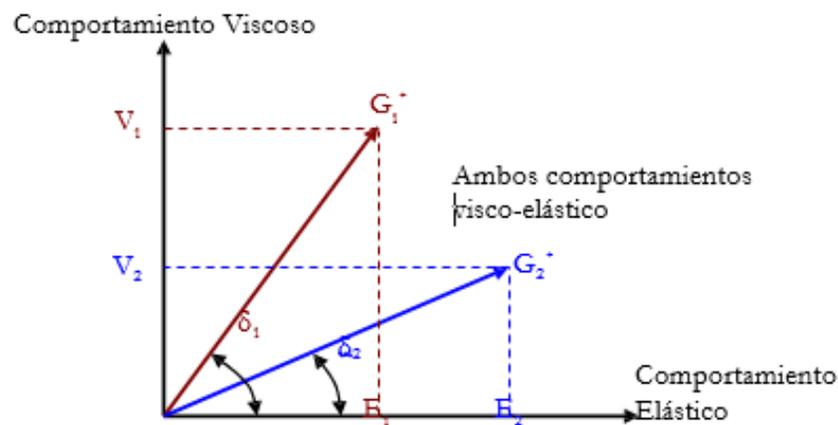
**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

Hay dos tipos de DSR: de esfuerzos controlados y deformaciones controladas. El reómetro de esfuerzos controlados trabaja aplicando un torque fijo para mover el plato oscilante del punto A a B. Dependiendo de la rigidez del ligante asfáltico, el torque necesario para mover el plato puede ser variable. Los ensayos en ligantes Superpave se realizan a esfuerzos controlados. Los reómetros de deformación controlada trabajan moviendo el plato oscilante del punto A a B a una frecuencia

especificada y midiendo el torque. La diferencia entre ambos reómetros es que el reómetro de deformación controlada mantiene un esfuerzo máximo en el espécimen (nivel fijo de torque) y la distancia radial del plato puede variar ligeramente entre ciclos. Para un reómetro de deformación controlada, la distancia entre los platos es fija y el torque o esfuerzo varía.

El Módulo de corte complejo,  $G^*$  es la resistencia total del material a deformarse cuando se expone a pulsos repetidos de esfuerzos cortante, tiene 2 componentes: elástico (recuperable) y viscoso (no recuperable). El ángulo de fase,  $\delta$  es un índice de la cantidad relativa de deformaciones recuperables y no recuperables. Los valores de  $G^*$  y  $\delta$  dependen directamente de la temperatura y la frecuencia de carga. A temperaturas altas el asfalto se comporta como un líquido viscoso sin capacidad de recuperación. En este caso, el asfalto puede representarse en el eje vertical con  $\delta = 90^\circ$  (componente solamente viscoso) en la figura 2.6.

**Figura 2.6 Comportamiento Visco-elástico**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

A bajas temperaturas, el asfalto se comporta como un sólido elástico. Esta condición se representa en el eje horizontal (solamente componente elástica) en la figura 2.6. En este caso,  $\delta = 0^\circ$ .

Bajo temperaturas normales de pavimento y cargas de tráfico, el asfalto actúa con características de sólido elástico y líquido viscoso. En la figura 2.6  $G_1^*$  y  $G_2^*$  representan los módulos complejos de los asfaltos 1 y 2. Cuando estos asfaltos son

sometidos a cargas parte de su deformación es elástica (E) y parte es viscosa (V); de esta manera el asfalto es un material viscoelástico. En la figura 2.6. El asfalto 2 es más elástico que el asfalto 1, porque su  $\delta$  es menor. Como el asfalto 2 tiene una componente elástica mayor, se recuperará más luego de aplicársele la carga.

La muestra empleada para el ensayo tiene un diámetro igual al diámetro del plato oscilante, su espesor debe ser controlado durante todo el proceso de ensayo. El ligante asfáltico debe ser calentado hasta fluir, mezclando ocasionalmente para eliminar las burbujas de aire y obtener una muestra homogénea. Los ligantes asfálticos modificados requieren mayores temperaturas, pero no debe exceder los  $163^{\circ}\text{C}$ . La muestra se puede poner directamente sobre el plato o utilizando un molde que luego será colocado en el plato fijo. Luego de la colocación se corta el excedente de muestra y controla el espesor. Como las propiedades del ligante asfáltico dependen de la temperatura, debe ser controlada y mantenida uniforme durante el ensayo. Puede usarse un baño de agua alrededor de la muestra o aire caliente de horno.

Cuando la temperatura se equilibre, se aplica un esfuerzo oscilatorio constante y se registran las deformaciones y los tiempos de retardo,  $\delta$ . La velocidad de oscilación especificada en superpave es 10 rad/s. Luego de un período de acondicionamiento de 10 ciclos se aplican 10 ciclos más para obtener los datos de ensayo. El software del reómetro automáticamente calcula el valor de  $G^*$  y  $d$ , usando las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes.

El módulo complejo de corte,  $G^*$ , es la relación del esfuerzo total de corte ( $\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}$ ) y la deformación total por corte ( $\gamma_{\text{máx}} - \gamma_{\text{mín}}$ ). El tiempo de retardo entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante (para reómetros de esfuerzo constante) o entre la deformación aplicada y el esfuerzo resultante (para reómetros de deformación constante) se relaciona con el ángulo de fase,  $\delta$ . Para un material perfectamente elástico, la carga aplicada causa una respuesta inmediata; así, el tiempo de retardo o ángulo de fase es cero. Un material viscoso (como el asfalto a temperatura de mezcla en caliente) tiene un largo tiempo de retardo; en este caso, el ángulo se aproxima a  $90^{\circ}$ .

Como el ligante asfáltico es viscoelástico a temperaturas normales de pavimentos, su comportamiento estará entre los dos extremos y el DSR generará una respuesta similar a la mostrada en la Figura 2.7.

Las fórmulas usadas por el software del reómetro para calcular  $\tau_{\text{máx}}$  y  $\gamma_{\text{máx}}$  son:

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \qquad \gamma = \frac{\theta r}{h}$$

Donde:

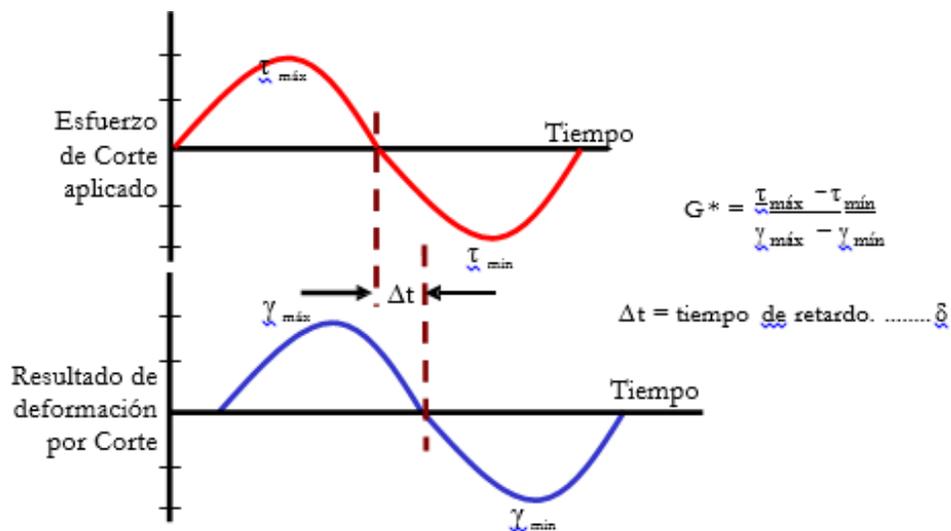
T= Torque máximo aplicado

r= Radio del espécimen (cualquiera de los dos 12.5 ó 4 mm)

$\theta$ = Ángulo de rotación

h= Altura del espécimen (cualquiera de los dos 1 ó 2 mm)

**Figura 2.7 Comportamiento esfuerzo-deformación de material viscoelástico:  $0 < \delta < 90^\circ$**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

Las especificaciones Superpave utilizan de dos maneras los valores de  $G^*$  y  $\delta$ . Para evaluar la capacidad del ligante a resistir deformaciones permanentes que es gobernada por la relación  $G^*/\text{sen}\delta$  a la temperatura de ensayo, este valor debe ser mayor a 1 kPa en el ligante original y mayor a 2.2 kPa para el ligante con envejecimiento corto. Para controlar el agrietamiento por fatiga el ensayo se realiza en el ligante con envejecimiento corto (RTFO) y largo (PAV) a la temperatura promedio y las especificaciones recomiendan que el valor  $G^*\text{sen}\delta$  sea menor o igual a 5000 kPa.

### **2.5.3 Reómetro de viga de flexión, BBR. AASHTO TP1**

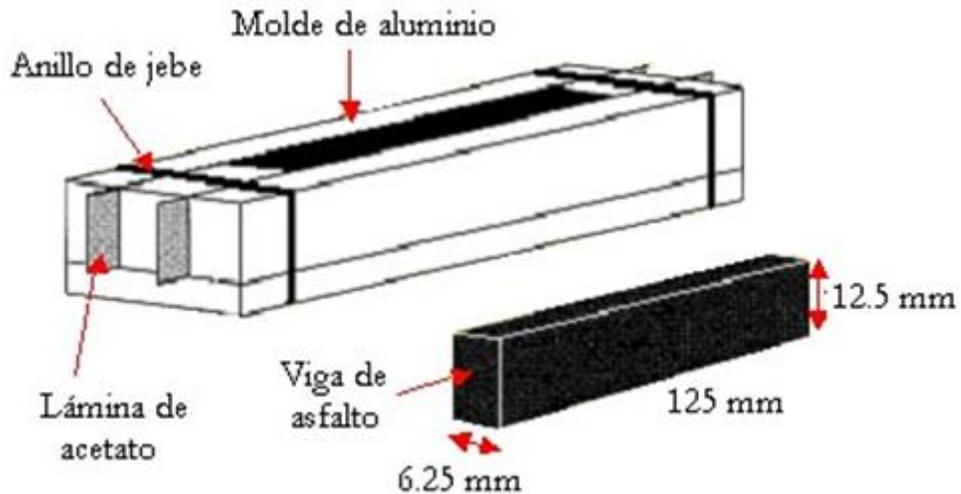
El reómetro de viga de flexión, BBR determina la propiedad del ligante a bajas temperaturas. El BBR se usa para medir cómo el ligante se deflecta o fluye bajo carga y temperatura constante. Las temperaturas de ensayo en el BBR se relacionan a las temperaturas de servicio mínimas del pavimento, cuando el asfalto actúa más como un sólido elástico. De esa manera, el ensayo se realiza sobre ligante doblemente envejecido en RTFO y PAV.

Las partes del equipo son: un marco de carga, baño de temperatura controlada, y el sistema de control de computadora y adquisición de datos. El método de ensayo usa la teoría de la viga para calcular la rigidez de una muestra de asfalto en forma de viga bajo una carga de flujo. Aplicando la carga constante en el centro de la viga se puede medir su deflexión luego de cuatro minutos de ensayo, la rigidez al flujo (s) y la razón de flujo (m). La carga de flujo simula el esfuerzo térmico que gradualmente actúa en el pavimento cuando la temperatura desciende. La rigidez al flujo es la resistencia del ligante asfáltico a la carga de flujo y el valor “m” es la variación de la rigidez del asfalto con respecto al tiempo de aplicación de carga.

El espécimen tiene las dimensiones mostradas en la figura 2.8. Antes de verter la muestra en el molde debe ser calentado hasta fluir (usualmente alrededor de 135°C, pero no debe exceder los 163°C). Luego de un período de enfriamiento entre 45 a 60 minutos, el exceso de asfalto es cortado. El espécimen de asfalto permanece en el molde por un período no mayor de 2 horas. Desmoldar el espécimen y acondicionarlo por 60

minutos a la temperatura de ensayo dentro de un baño. Luego del período de acondicionamiento la viga se ensaya.

**Figura 2.8 Ensamblaje del espécimen de ensayo**

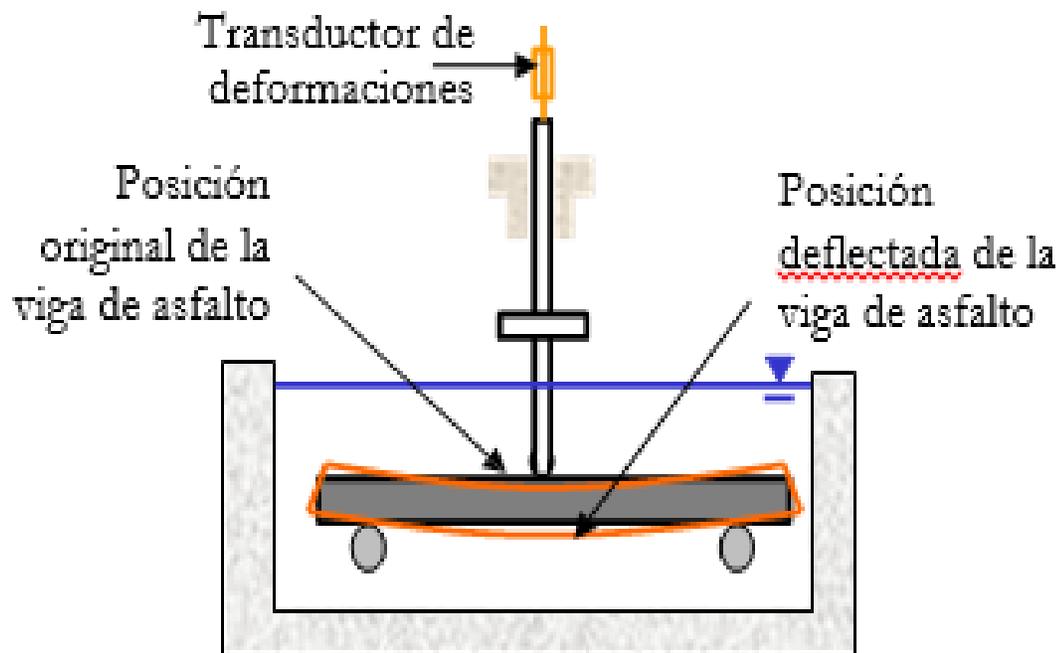


**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

Luego de los 60 minutos de acondicionamiento, la viga de asfalto se coloca en los soportes. La viga es sometida a un acondicionamiento de carga. Se aplica manualmente 30 mN (milinewtons) para asegurar que la viga tiene un firme contacto con los soportes. Se aplica 980 mN de carga automáticamente por un segundo. Luego de realizar este paso, se reduce la carga hasta el nivel de precarga por un período de recuperación de 20 segundos.

Luego de los 20 segundos de período de recuperación, el ensayo se inicia. Se aplica a la viga 980 mN de carga por un período de 240 segundos. Se mide la deflexión con el transductor de deformaciones, figura 2.9. Durante el ensayo se grafica la carga y deflexión versus el tiempo. Luego de 240 segundos, la carga de ensayo es automáticamente retirada y el software del reómetro calcula la rigidez al flujo y razón de flujo.

Figura 2.9 Ensayo de viga de flexión, BBR



Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas

La ecuación para calcular la rigidez al flujo,  $S(t)$ , es:

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)}$$

$S(t)$  = Rigidez (MPa) en un tiempo  $t$

$P$  = Carga constante aplicada, N

$L$  = Distancia entre soportes

$B$  = Altura de viga, 12.5 mm

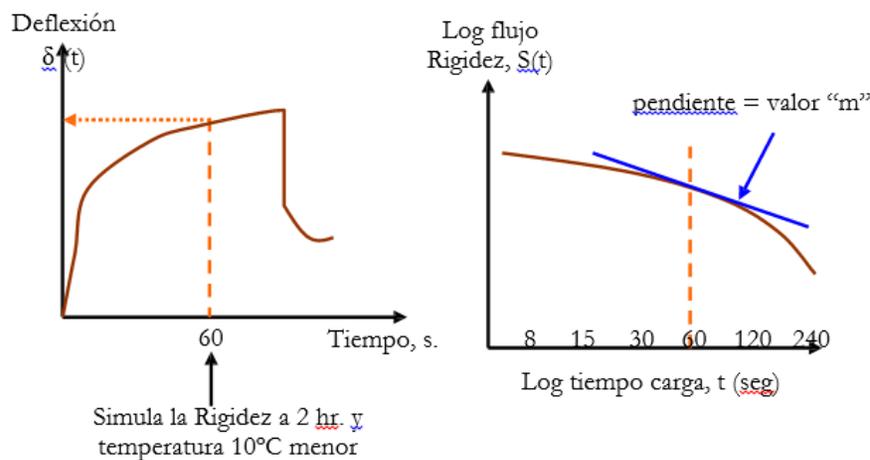
$H$  = Ancho de viga, 6.25 mm

$\delta(t)$  = Deflexión (mm) en el tiempo  $t$

La Fig. 2.10 muestra los gráficos usados y el procedimiento para obtener  $\delta(t)$ . El valor deseado de rigidez al flujo es cuando el asfalto es cargado por dos horas a la temperatura mínima de diseño de pavimento. Sin embargo, usando el concepto de superposición tiempo-temperatura, los investigadores de la SHRP confirmaron que elevando la temperatura de ensayo en  $10^{\circ}\text{C}$ , la rigidez al flujo se obtiene a 60 segundos de carga.

Superpave especifica que la rigidez del ligante sea menor a 300 MPa. En caso que la rigidez se ubica entre 300 y 600 MPa, comportamiento poco dúctil del ligante a baja temperatura, deberá realizarse el ensayo de Tensión Directa, DTT a la temperatura mínima incrementado en  $10^{\circ}\text{C}$  con el ligante envejecido, PAV.

**Figura 2.10 Deflexión y Valor “m” del BBR**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

El segundo parámetro determinado es el valor “m”. El valor “m” es la pendiente del logaritmo de la rigidez versus el logaritmo del tiempo para un tiempo, t. Las especificaciones Superpave indican que “m” sea mayor igual a 0.3000 a 60 segundos.

#### 2.5.4 Ensayo de Tensión Directa, DTT. AASHTO TP3

Numerosos estudios del comportamiento del ligante a bajas temperaturas muestran que existe una fuerte relación entre la rigidez del ligante asfáltico y la cantidad de elongamiento que el ligante puede sufrir antes de romperse. Los asfaltos que

experimentan considerables elongamientos antes de la falla son llamados dúctiles; y los que se rompen a poca distancia se llaman frágiles. Es importante que el ligante asfáltico sea capaz de elongarse una cantidad mínima.

La rigidez al flujo medida con el BBR no es completamente adecuada para caracterizar la capacidad del asfalto a elongarse antes de romperse. Por ejemplo, algunos ligantes muestran alta rigidez al flujo pero pueden elongarse bastante antes de romperse. En consecuencia, los investigadores de la SHRP desarrollaron un sistema para especificar estos ligantes rígidos pero dúctiles. Este requisito adicional se aplica a ligantes que con el ensayo BBR tuvieron rigidez al flujo entre 300 y 600 MPa. Si la rigidez al flujo es menor de 300 MPa, este requisito adicional no es necesario.

El equipo que mide la cantidad de deformación del ligante antes de la falla a temperaturas muy bajas es el ensayo de tensión directa, DTT. El ensayo se realiza a un rango de temperatura entre  $-0^{\circ}\text{C}$  a  $-36^{\circ}\text{C}$ . El ligante debe ser doblemente envejecido por RTFO y PAV.

El ensayo DTT consiste en jalar un espécimen de asfalto hasta que falle. La elongación a la que falla, se usa para calcular la deformación de falla, que es un índice que despeja la duda de cómo se comportaría el ligante (frágil o dúctil) a bajas temperaturas de ensayo. La fig. 2.11. ilustra el procedimiento de ensayo.

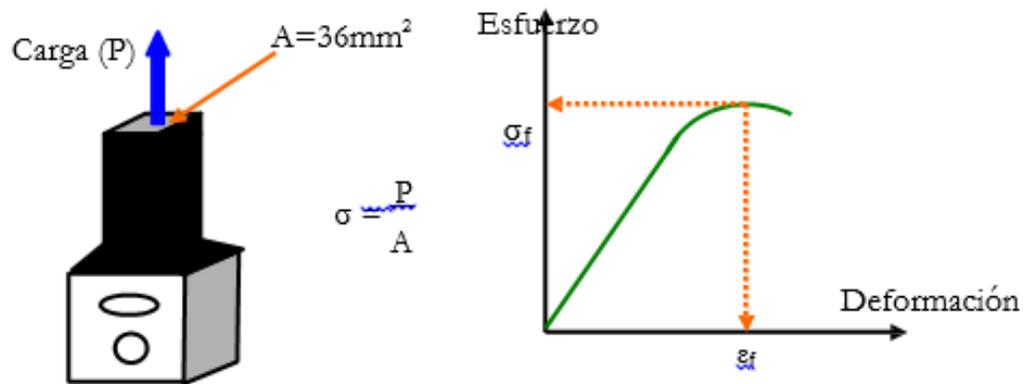
**Figura 2.11 Ensayo de tensión directa, DTT**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

En el ensayo de tensión directa, la falla se define como la carga a la cual el esfuerzo alcanza su máximo valor, fig. 2.12, que no es necesariamente la carga a la cual el espécimen se rompe. El esfuerzo en falla ( $\sigma_f$ ) es la carga en falla dividido entre el área de su sección transversal del espécimen, A, (36 mm<sup>2</sup>). Las especificaciones requieren que la deformación en falla debe ser por lo menos 1% de la falla.

**Figura 2.12 Curva esfuerzo-deformación**



**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

Se ensayan cuatro muestras para cada ensayo. El espécimen tiene aproximadamente 3 gramos y 100 mm de largo, incluyendo los extremos de soporte. El equipo consta de una máquina universal de ensayo para aplicar carga, un sistema de medida de elongación, y un sistema de control medioambiental. La máquina universal debe ser capaz de aplicar por lo menos 500 N a razón de 1.0 mm/minuto.

Cada uno de los cuatro especímenes se ensaya por separado. La temperatura de ensayo es la misma temperatura del ensayo BBR.

En febrero de 1996 se publicaron los resultados de un proyecto de investigación tenía por finalidad verificar las especificaciones Superpave para el evitar el agrietamiento por bajas temperaturas. Dichos trabajos se relatan en el artículo *Prediction of Low-Temperature Cracking Using Superpave Binder Specifications*, de P. Kandhal y otros de la NCAT.

La investigación se inicia con la evaluación de seis diferentes cementos asfálticos que se usaron para un proyecto en Pensilvania en setiembre de 1976. Dos de los seis pavimentos desarrollaron agrietamiento por baja temperatura en enero de 1977. Los otros cuatro pavimentos se agrietaron a diferentes grados luego de tres años. Se obtuvieron muestras de estos seis cementos asfálticos entre 1976 y 1995 (19 años) para ensayarlos con el BBR siguiendo las especificaciones Superpave.

Se llegaron a la conclusión que el valor de rigidez máxima de 300 MPa y el valor mínimo de “m” de 0.300, recomendado por las especificaciones generalmente parecen ser razonables en la mitigación del agrietamiento por bajas temperaturas, cinco de los cementos asfálticos cumplieron con las especificaciones.

El cemento asfáltico T-3 excedió la rigidez máxima de 300 MPa pero no se agrietó; esto indica que tiene una alta deformación a la falla por su ductilidad. Esta propiedad se verificó con el ensayo DTT.

Otra de las importantes conclusiones fue que el valor de la rigidez para ensayos realizados en ligantes envejecidos con RTFO y PAV no es significativa. Sin embargo, el valor de “m” decrece significativamente.

## 2.6 Ejemplo de Aplicación

El ligante del proyecto elegido es PG 58-22, los resultados de ensayos en laboratorio y especificaciones se muestran en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8: Resultados de los ensayos de laboratorio**

Ensayo	Resultado	Criterio
<b>Ligante Original</b>		
<b>Punto de inflamación</b>	310°C	$\geq 230^\circ\text{C}$
<b>Viscosímetro rotacional</b> <b>135°C</b>	0.364 Pa.s	$\leq 3 \text{ Pa.s}$
<b>Viscosímetro rotacional</b> <b>165°C</b>	0.100 Pa.s	n/a
<b>Reómetro de corte dinámico, <math>G^*/\text{sen}\delta</math></b> <b>58°C</b>	1.7 kPa	$\geq 1\text{kPa}$

<b>Ligante envejecido – residuo RTFO</b>		
<b>Pérdida de masa</b>	0.4%	$\leq 1.0\%$
<b>Reómetro de corte dinámico, <math>G^*/\text{sen}\delta</math> 58°C</b>	2.8 kPa	$\geq 2.2$ kPa
<b>Ligante envejecido – residuo RTFO + PAV</b>		
<b>Reómetro de corte dinámico, <math>G^*\text{sen}\delta</math> 22°C</b>	3.4 MPa	$\leq 5$ MPa
<b>Reómetro de viga de flexión, rigidez -12°C</b>	280 MPa	$\leq 300$ MPa
<b>Reómetro de viga de flexión, valor “m” -12°C</b>	0.334	$\geq 0.3$

**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

## 2.7 Especificaciones Superpave

En la Tabla 2.9 se muestran las especificaciones Superpave para los diferentes grados de performance (PG).

**Tabla 2.9 Especificaciones del ligante Superpave**

Grado de comportamiento	PG 46			PG 52						PG 58				PG 64							
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
Temperatura diseño, ° C promedio max 7 días pavimento	< 46			< 52						< 58				< 64							
Temperatura diseño, ° C mínimo pavimento	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
	Ligante original																				
T° punto de inflamación, T48: min °C	230																				
Viscosidad, ASTM D 4402: max, 3 Pas (3000 cP) temp ensayo, ° C	135																				
Corte dinámico, TP5: G*/sen, min 2,20 kPa temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	46			52						58				64							
	Envejecimiento RTFO (T240) o horneado de película delgada (T179) residuo																				
Perdida masa, max, %	1																				
Corte dinámico, TP5: G*/sen, min 2,20 kPa temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	46			52						58				64							
	Presión de envejecimiento Vessel residuo (PP1)																				
PAV temp envej, ° C	90			90						100				100							
Corte dinámico, TP5: G*/sen, min 2,20 kPa temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	10		4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Endurecimiento físico	Reporte																				
Rigidez al flujo, TP1 S, max 300 mPa valor m, min 0,300 temp ensayo @ 60s, ° C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión directa, TP3: deform falla, min 1% temp ensayo @ 1 mm min, ° C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

**Tabla 2.10 Especificaciones del Ligante Superpave, continuación**

Grado de comportamiento	PG 70						PG 76						PG 82					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	
Temperatura diseño, ° C promedio max 7 días pavimento	< 70						< 76						< 82					
Temperatura diseño, ° C mínimo pavimento	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	
	Ligante original																	
T° punto de inflamación, T48: min °C	230																	
Viscosidad, ASTM D 4402: max, 3 Pas (3000 cP) temp ensayo, ° C	135																	
Corte dinámico, TP5: G*/sen, min 2,20 kPa temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	70						76						82					
	Envejecimiento RTFO (T240) o horneado de película delgada (T179) residuo																	
Perdida masa, max, %	1																	
Corte dinámico, TP5: G*/sen, min 2,20 kPa temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	70						76						82					
	Presión de envejecimiento Vessel residuo (PP1)																	
PAV temp envej, ° C	100 (110)						100 (110)						100 (110)					
Corte dinámico, TP5: G*/sen, min 2,20 kPa temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	22	19	40	37	34	31	28	
Endurecimiento físico	Reporte																	
Rigidez al flujo, TP1 S, max 300 mPa valor m, min 0,300 temp ensayo @ 60s, ° C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	
Tension directa, TP3: deform falla, min 1% temp ensayo @ 1 mm min, ° C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	

**Fuente: Superpave y el diseño de mezclas asfálticas**

Las nuevas especificaciones SUPERPAVE para ligantes asfálticos (las especificaciones completas han sido pensadas en función del control de la deformación permanente, de la fisuración por bajas temperaturas y de la fisuración por fatiga de los pavimentos asfálticos. Esto se logra controlando las distintas propiedades físicas medidas con los equipos descritos anteriormente.

Una diferencia importante entre las actuales especificaciones para asfaltos y estas nuevas especificaciones SUPERPAVE es el enfoque. Observe en la fig. 2.13 que las propiedades físicas permanecen constantes para todos los grados, pero las temperaturas para las cuales esas propiedades deben ser cumplidas varían en función del tipo de clima en el cual se espera que el ligante asfáltico servirá. Por ejemplo, el tipo PG (Performance Grade) 52-40 está pensado para garantizar un buen comportamiento con una temperatura máxima de 52°C (promedio de los siete días sucesivos cuyas temperaturas sumadas dan el máximo) y una temperatura mínima de diseño de -40°C.

### **2.7.1 Deformación permanente ( ahuellamiento)**

Esta forma de falla ocurre a altas temperaturas. La especificación define y establece requisitos para un factor de ahuellamiento (rutting factor) ,  $G^*/\sin(\delta)$ , que representa el componente viscoso de la rigidez total del ligante a alta temperatura. Este factor se llama "G asterisco sobre seno de ( $\delta$ )". Se calcula dividiendo el módulo complejo ( $G^*$ ) por el seno del ángulo de fase ( $\delta$ ), ambos medidos utilizando el reómetro dinámico de corte.  $G^*/\sin(\delta)$  debe ser como mínimo 1.00 kPa para el ligante asfáltico original (sin envejecimiento) y 2.20 kPa como mínimo para el residuo de RTFO. Ambos requisitos de la especificación se muestran en la fig. 2.13.

**Figura 2.13 Ejemplo de la especificación SUPERPAVE para ligantes**

Grado de comportamiento	PG 52						PG 58						PG 64					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	
Temperatura diseño, ° C promedio max 7 días pavimento	< 52						< 58						< 64					
Temperatura diseño, ° C mínimo pavimento	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	
	Ligante original																	
Tº punto de inflamación, T48: min °C	230																	
Viscosidad, ASTM D 4402: max, 3 Pas (3000 cP) temp ensayo, ° C	135																	
Corte dinámico, TP5: G*/sen, min 2,20 kPa temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	52						58						64					

Los requisitos de la especificación son invariables

La temperatura del ensayo cambia

**Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de SUPERPAVE**

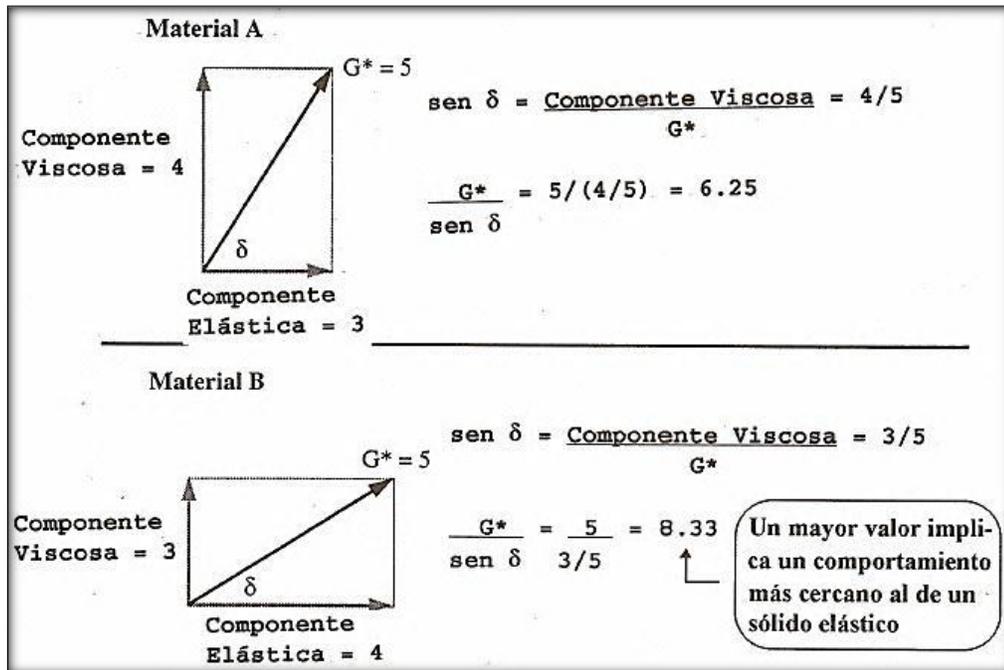
**Figura 2.14 Requisitos del factor de ahuellamientos de la especificación SUPERPAVE**

Tº punto de inflamación, T48: min °C	Requisitos de la especificación para control de ahuellamiento
Viscosidad, ASTM D 4402: max, 3 Pas (3000 cP) temp ensayo, ° C	
Corte dinámico, TP5: <b>G*/sen, min 1.00 kPa</b> temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	
Horno rotatorio de película delgada (T 240)	
Perdida masa, max, %	
Corte dinámico, TP5: <b>G*/sen, min 2,20 kPa</b> temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	

**Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de SUPERPAVE**

Es lógico utilizar  $[G^*/\text{sen}(\delta)]$  para el análisis del comportamiento al ahuellamiento.  $\text{Sen}(\delta)$  se calcula a partir del cociente entre la parte viscosa de  $G^*$  y el valor total de  $G^*$ . Para los dos materiales A y B mostrados en la fig. 2.15 (de igual  $G^*$ ) hay una marcada diferencia en los valores de  $(\delta)$ .

**Figura 2.15 Control de ahuellamiento en la especificación SUPERPAVE**



**Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de SUPERPAVE**

Para el material A, el  $\text{sen}(\delta)$  ( $= 4/5$ ) es mayor que para el material B ( $= 3/5$ ). Esto significa que  $G^*/(\text{sen } \delta)$  es menor para el material A que para el B. Por lo tanto, el material B ofrecerá mayor resistencia al ahuellamiento que el material A. Esto tiene sentido porque la componente viscosa de material B es mucho menor que la del material A. Un mayor valor de  $G^*$  y un menor valor de  $(\delta)$  incrementan el valor de  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , lo que es deseable para la resistencia a ahuellamiento.

### 2.7.2 Fisuración por fatiga

$G^*$  y  $(\delta)$  también se emplean en las especificaciones SUPERPAVE para ligantes asfálticos para prevenir la fatiga en pavimentos asfálticos. Dado que la fatiga sucede a temperaturas del pavimento entre bajas y moderadas, luego de un lapso de servicio, la especificación exige que los ensayos de RTFO y PAV se realicen antes de medir estas propiedades.

$G^*$  y  $\text{sen}(\delta)$  son determinados utilizando el ensayo de corte dinámico. Sin embargo, en lugar de calcular el cociente de ambos parámetros (como sucedía para ahuellamiento) calculamos el producto  $G^* \times \text{sen}(\delta)$ . El factor de agrietamiento por fatiga ( $G^* \times \text{sen}(\delta)$ ) se denomina "G asterisco seno de delta". La especificación SUPERPAVE para ligantes establece un valor máximo de 5000 kPa para el producto  $G^* \times \text{sen}(S)$ , como se muestra en la figura 2.16.

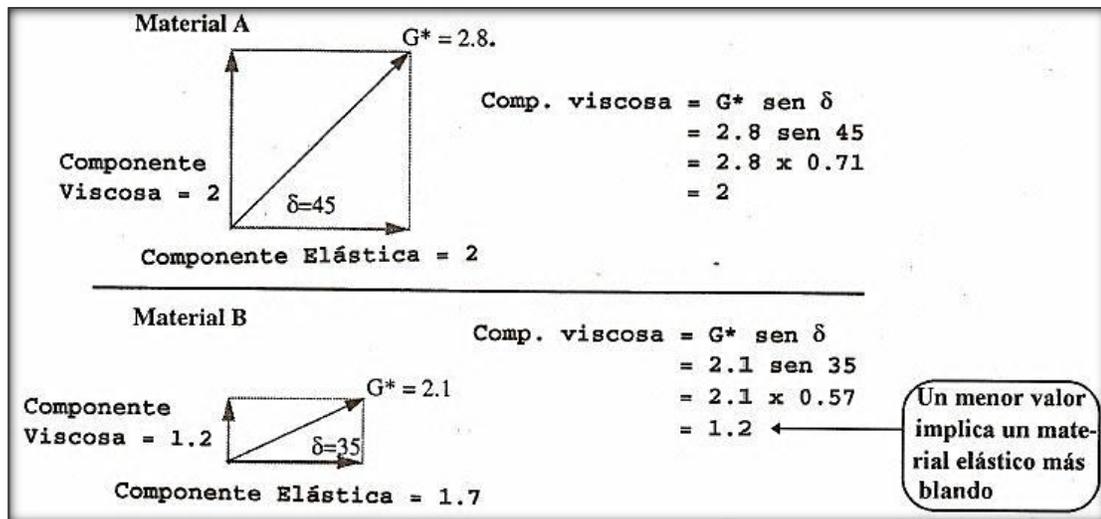
**Figura 2.16 Requisitos del factor de agrietamiento de la especificación SUPERPAVE**

PAV temp envejecimiento, ° C	
Corte dinámico, TP5: G*/sen, max 5000 kPa Temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	Requisitos de la especificación para control de fisuración por fatiga
Endurecimiento físico	
Rigidez al flujo, TP1: S, max 300 mPa valor m, min 0,300 Temp ensayo @ 60s, ° C	
Tensión directa, TP3: Deform. falla, min 1% Temp ensayo @ 1 mm min, ° C	

**Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de SUPERPAVE**

La figura 2.17 sintetiza el concepto del factor de fatiga. En este ejemplo, el Material B se caracteriza por una combinación de valores de  $G^*$  y  $(\delta)$  menores que los correspondientes al Material A; sus componentes elástica y viscosa son menores. Debido a su menor  $(\delta)$ , el Material B se comporta más como un material elástico blando que el Material A. Por esta razón, el Material B se flexiona repetidamente y recobra su forma original mejor que el Material A. La capacidad para funcionar como un material elástico blando y recuperarse de la deformación por las cargas es una cualidad deseable del ligante para resistir el agrietamiento por fatiga. Es posible que una combinación de  $G^*$  y  $(\delta)$  resulte en un valor tan grande de  $G^* \times \text{sen}(\delta)$ , que las componentes elástica y viscosa resulten demasiado altas y el ligante deje de resistir eficazmente la fatiga por fatiga. Ésta es la razón por la cual la especificación fija un límite máximo de 5000 kPa para el producto  $G^* \times \text{sen}(\delta)$ .

**Figura 2.17 Control del agrietamiento por fatiga en la especificación SUPERPAVE**



**Fuente: Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE**

El ensayo de corte dinámico sólo provee parte de la información necesaria para evidenciar las propiedades vinculadas al agrietamiento. El resto de la información

proviene del ensayo con la viga de flexión y, en algunos casos, del ensayo de tracción directa.

### 2.7.3 Fisuración por bajas temperaturas

Los ligantes se comportan como sólidos a muy bajas temperaturas ( $< -50^{\circ}\text{C}$ ) y como líquidos a altas temperaturas ( $> 70^{\circ}\text{C}$ ). Las temperaturas del pavimento asfáltico están habitualmente entre esos extremos. La viga de flexión es otra forma de definir si el comportamiento del ligante se parecerá más al de un sólido elástico o más al de un líquido viscoso, pero a temperaturas mucho más bajas que las correspondientes a los ensayos con el reómetro de corte dinámico. El reómetro de viga de flexión aplica una pequeña carga de creep al espécimen en forma de viga, midiendo la rigidez a la fluencia (creep stiffness) de la pieza. Si la rigidez a la fluencia es muy alta, el asfalto tendrá un comportamiento frágil, y la probabilidad de agrietamiento será mayor. Por lo tanto, un límite máximo de 300 MPa se ha fijado para evitar este problema. (Fig. 2.18).

**Figura 2.18 Requisitos de la especificación SUPERPAVE para baja temperatura**

PAV temp envejecimiento, ° C	
Corte dinámico, TP5: G*/sen, max 5000 kPa Temp ensayo @ 10 rad/s, ° C	
Endurecimiento físico	
Rigidez al flujo, TP1: S, max 300 mPa valor m, min 0,300 Temp ensayo @ 60s, ° C	Requisitos de la especificación para control de fisuración por bajas temperaturas
Tensión directa, TP3: Deform. falla, min 1% Temp ensayo @ 1 mm min, ° C	

**Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE**

En la especificación SUPERPAVE para ligantes, la velocidad con la cual cambia la rigidez del ligante con la carga de creep, a bajas temperaturas, es controlada con el valor-m. Un alto valor-m es deseable, pues esto significa que al bajar las temperaturas y acumularse tensiones térmicas, la rigidez cambiará con relativa rapidez. Un cambio relativamente rápido en la rigidez implica que el ligante tenderá a disipar tensiones que de otro modo se acumularían hasta un punto en el que el agrietamiento por bajas temperaturas tendría lugar. La especificación SUPERPAVE para ligantes asfálticos exige un mínimo de 0.300 para el valor-m.

A medida que la temperatura del pavimento disminuye, éste se contrae. Esta contracción acumula tensiones en el pavimento. Cuando estas tensiones superan la resistencia del ligante, aparece una fisura. Estudios han demostrado que si el ligante puede estirarse más del 1% de su longitud inicial durante este fenómeno de contracción, hay menor probabilidad de agrietamiento. Por lo tanto, el ensayo de tracción directa se incluye en la especificación SUPERPAVE. Ésta sólo se aplica a ligantes con rigidez a fluencia entre 300 y 600 MPa. Si la rigidez a fluencia está por debajo de 300 MPa, no es necesario realizar el ensayo de tracción directa. En el ensayo se estira, muy despacio, una probeta de ligante, simulando la condición el pavimento a medida que ocurre la contracción. La deformación específica que tiene lugar antes de que la muestra rompa se registra y se compara con el valor mínimo de 1% establecido en la especificación (fig. 2.18).

#### **2.7.4 Criterios comunes de especificación**

La especificación de ligantes tiene otros requisitos. Ellos se incluyen para controlar las características de los ligantes asfálticos en lo que respecta a manejo y seguridad. El ensayo de punto de inflamación (AASHTO T 48) se utiliza para considerar problemas de seguridad. El valor mínimo para todos los grados es 230°C; se aplica sólo a ligantes sin envejecer.

Para asegurar que los ligantes pueden ser bombeados y manipulados en la planta de mezclado en caliente, la especificación fija una viscosidad máxima para ligantes sin envejecer. Este valor es 3 Pa-s (3000 cP en el ensayo con el viscosímetro rotacional)

para todos los grados. Los organismos viales que compran ligantes pueden obviar este requisito si el proveedor del ligante garantiza que el ligante puede ser bombeado y mezclado a temperaturas seguras.

Para evitar un excesivo envejecimiento (volatilización) durante la mezcla en caliente y la construcción, se especifica una máxima pérdida de masa para todos los ligantes. Esta exigencia se aplica al residuo RTFO y no debe superar el 1%. Durante el almacenamiento u otros periodos de inactividad, particularmente a bajas temperaturas, tiene lugar en los ligantes asfálticos un endurecimiento físico. Este se debe a la asociación de las moléculas de asfalto entre sí. Debido a este fenómeno, SUPERPAVE exige que el endurecimiento físico sea cuantificado. Para ello debe realizarse el ensayo de la viga de flexión BBR) sobre un ligante asfáltico envejecido en el PAV; las muestras se acondicionan durante 24 horas a la temperatura requerida por el ensayo. Dos conjuntos de vigas se elaboran para medición de la rigidez a la fluencia y del valor-m. Un conjunto se ensaya en las condiciones habituales (1 hora de acondicionamiento); el otro se ensaya luego de las 24 horas de acondicionamiento. Se informan los valores de rigidez a la fluencia y de m de las vigas acondicionadas 24 horas. No hay valores especificados a cumplir.

## **CAPÍTULO III**

### **RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

#### **3.1 Ubicación de los sectores de la investigación**

Para el presente trabajo de investigación se identificaron tres tramos carreteros y un sector puntual pavimentado recientemente como lo es el área de parqueos de la nueva terminal de autobuses de nuestra ciudad de Tarija.

Los tramos identificados son los siguientes:

Pavimentado La Higuera- Colon Sud

Pavimentado Tolomosa-Pampa Redonda

Pavimentado Bermejo-Km 16 (carretera Bermejo-San Antonio)

Área de parqueos de autobuses en el interior de la nueva terminal de autobuses de la ciudad de Tarija.

Se escogió estos sectores pavimentados de nuestro departamento por motivo de que la información de diseño de los mismos estaba disponible en las diferentes instituciones que administran estos tramos y también de manera más importante se dispone de la información meteorológica provista por el senamhi.

#### **3.2 Características de temperaturas en las áreas de estudio**

Para esta investigación fundamentalmente se precisa de la información meteorológica, más propiamente las temperaturas extremas del ambiente registradas por las estaciones más cercanas a los sectores a los largo de su funcionamiento.

En el sector del tramo La Higuera-Colon Sud ubicado en la provincia Avilés, por donde se realizó el pavimento, presentan climas templados semihumedos con presencias esporádicas de heladas. La temperatura media anual es de 18 °C, en verano de 25.4 °C y en invierno de 13.7 °C, con máximas que superan los 40 °C en los meses de verano y mínimas que bajan hasta -12 °C en invierno.

Las comunidades Tolomosa y Pampa Redonda, por donde se realizó el asfaltado, predominan durante la mayor parte del año un clima templado o mesotérmico, sin

embargo durante los inviernos (especialmente durante el mes de julio) la temperatura suele bajar de los  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  llegando a disminuciones térmicas increíbles para la latitud y altitud del lugar, y en épocas de verano llegando hasta los  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

De manera general la provincia Cercado presenta un clima mesotérmico templado semi-humedo, con presencias esporádicas de heladas. Los inviernos son templados y secos.

El clima de la ciudad de Tarija y el valle en la que se encuentra la nueva terminal de autobuses, predomina durante la mayor parte del año un clima templado o mesotérmico, sin embargo durante los inviernos (especialmente durante el mes de julio) la temperatura suele bajar de los  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  llegando a disminuciones térmicas increíbles para la latitud y altitud, y en los meses que comprenden el verano suelen incrementarse las temperaturas hasta los  $39\text{ }^{\circ}\text{C}$  es decir que se suele tener un rango muy amplio en la variación de las temperaturas.

El clima en el tramo Bermejo-Km 16 y en las localidades adyacentes al mismo, tiene una predominancia de características tropicales con una temperatura media anual de  $22,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con temperaturas máximas registradas de hasta  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$  y mínimas muy eventualmente registradas de  $-4^{\circ}\text{C}$ .

### **3.3 Relación de temperaturas en áreas de estudio**

Para realizar la relación de temperaturas existentes en los sectores analizados, se recurre al registro histórico de información meteorológica de cada uno de estos, proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI.

Para este análisis se tomaron las estaciones meteorológicas más cercanas a cada tramo de pavimento flexible analizado como se muestra en la tabla 3.9 y 3.10, las cuales están en base a la siguiente información histórica:

**Tabla 3.1 Temperaturas máximas extremas registradas (estación Aeropuerto-Tarija)**



### TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA (°C)

Estación: AEROPUERTO

Lat. S.: 21° 32' 48''

Provincia: CERCADO

Long. W.: 64° 42' 39''

Departamento: TARIJA

Altura: 1,849 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Máxima
1962					28.0	29.0	17.0	27.0	24.0	32.0	36.0	31.0	
1963	31.0	30.0	29.0	29.5	27.0	31.0	33.0	31.0	33.5	38.3	37.0	30.1	38.3
1964	28.0	32.9	32.0	31.0	27.0	29.6	27.0	34.5	32.0	30.8	32.0	32.0	34.5
1965	30.0	32.0	30.0	24.0	29.0	28.0	28.8	35.0	34.5	35.0	35.2	32.6	35.2
1966	32.0	32.2	32.0	30.1	28.1	29.0	31.0	32.6	36.5	36.0	34.6	38.0	38.0
1967	33.5	32.0	29.4	30.2	32.0	30.0	31.0	32.5	34.0	34.0	34.0	38.2	38.2
1968	32.0	29.1	33.0	30.0	28.2	31.0	30.0	30.5	34.0	36.0	37.3	35.0	37.3
1969	34.2	36.3	37.0	34.4	34.4	33.0	34.0	33.2	36.0	35.0	37.0	30.0	37.0
1970	31.0	32.0	30.6	29.5	33.0	32.0	31.0	32.3	35.0	35.6	36.0	35.0	36.0
1971	33.5	34.4	31.4	32.0	30.1	30.0	30.0	32.0	33.0	35.5	39.0	34.6	39.0
1972	31.6	31.0	31.8	33.3	33.0	33.0	32.0	34.0	35.0	34.0	36.2	31.8	36.2
1973	34.2	34.0	31.8	32.2	32.8	31.0		34.6	34.5	36.2	33.6		
1974	32.4	31.0	30.6	31.0	32.0	31.0	36.0	34.4	36.0	32.8	35.8	33.4	36.0
1975	31.4	32.0	32.0	36.0	31.3	31.0	31.1	32.4	33.4	34.5	37.8	34.0	37.8
1976	31.0	32.4	31.3	34.0	31.0	30.0	31.4	33.2	36.3	38.0	38.0	38.2	38.2
1977	33.3	32.0	35.0	37.3	32.0	32.0	32.0	34.0	35.4	39.3	36.0	34.6	39.3
1978	33.1	30.6	31.0	30.2	32.3	30.0	33.6	33.0	32.6	35.0	36.0	30.0	36.0
1979	30.0	30.0	29.0	31.0	32.4	31.4	33.0	33.6	37.0	34.8	35.0	37.0	37.0
1980	33.0	35.0	31.0	37.4	33.0	31.0	33.4	33.4	36.7	35.0	34.0	35.8	37.4
1981	33.0	31.0	33.0	30.6	33.0	30.4	32.0	33.0	33.8	33.0	32.6	34.4	34.4
1982	31.2	32.0	30.5	30.4	33.2	31.6	31.4	36.2	34.0	37.4	37.2	30.4	37.4
1983	32.7	34.7	35.1	35.0	35.2	33.2	32.8	35.0	36.2	34.5	30.7	32.5	36.2
1984	31.6	32.6	34.6	29.0	36.2	33.2	31.4	32.4	35.6	35.2	32.0	31.2	36.2
1985	31.0	31.0	34.0	36.2	32.6	30.2	32.6	35.5	33.5	34.7	35.8	30.6	36.2
1986	32.0	30.2	30.6	34.0	34.2	33.0	30.0	32.6	33.8	35.6	36.0	29.6	36.0

1987	30.2	31.7	33.3	35.7	32.0	31.0	33.3	34.5	36.0	37.3	35.0	33.6	37.3
1988	34.0	29.0	32.6	30.6	31.0	31.4	33.2	36.0	36.0	36.4	36.6	32.6	36.6
1989	31.4	30.8	33.4	32.8	31.8	30.0	31.6	33.9	34.0	37.2	34.9	31.5	37.2
1990	33.5	29.4	33.6	34.5	33.0	30.4	31.6	32.2	34.2	36.2	37.5	32.0	37.5
1991	30.6	29.6	30.8	33.2	34.8	31.2	32.0	32.2	34.0	39.0	34.0	34.5	39.0
1992	28.5	32.6	31.4	33.5	32.5	32.2	31.2	32.2	34.8	36.1	34.7	33.0	36.1
1993	32.0	28.5	30.8	33.6	33.2	31.6	32.8	35.3	35.3	35.0	35.5	34.8	35.5
1994	30.8	31.8	32.4	34.8	33.4	30.6	34.2	33.2	35.6	35.3	33.2	38.8	38.8
1995	31.6	37.4	32.4	32.8	29.2	31.6	33.0	36.5	35.4	34.8	34.7	32.6	37.4
1996	33.7	34.4	31.2	34.2	30.9	31.4	31.3	32.6	34.6	36.7	35.4	31.4	36.7
1997	32.0	33.5	31.5	32.2	32.6	34.0	33.0	33.5	39.0		37.0	37.0	
1998	36.0	36.0	34.4	36.0	33.8	34.2	34.8	35.2	36.4	36.6	35.2	34.2	36.6
1999	32.5	32.0	31.0	29.5	30.4	30.7	30.6	34.5	35.0	34.5	32.2	34.0	35.0
2000	32.8	32.2	30.6	30.5	32.6	32.2	33.2	33.4	35.5	35.5	36.2	35.5	36.2
2001	33.5	31.4	31.0	32.4	32.0	30.2	34.4	35.0	36.6	35.5	36.5	31.6	36.6
2002	35.0	32.0	35.0	34.0	34.0	32.5	32.2	34.8	35.0	37.6	34.8	35.0	37.6
2003	32.5	34.0	30.5	32.8	32.8	31.2	34.0	33.5	35.0	36.8	35.5	34.2	36.8
2004	33.6	33.0	35.0	32.2	29.6	32.2	31.8	35.0	37.8	36.2	35.0	34.2	37.8
2005	32.4	30.4	32.0	31.2	33.0	32.6	32.8	35.4	35.2	37.0	35.0	33.0	37.0
2006	32.4	32.0	31.8	30.9	30.5	33.0	32.8	33.4	33.2	35.2	33.4	32.5	35.2
2007	31.0	32.5	32.1	32.9	31.6	33.2	31.6	34.9	32.2	36.8	35.3	32.4	36.8
2008	30.8	30.8	28.3	31.6	33.1	30.4	32.2	35.0	37.2	35.0	32.8	31.3	37.2
2009	30.0	32.8	31.8	29.8	31.7	31.6	29.4	34.4	35.8	37.4	37.2	31.8	37.4
2010	31.4	36.6	34.2	32.6	34.7	34.6	34.4	36.2	34.5	37.0	34.8	35.4	37.0
2011	35.2	28.8	30.8	30.4	29.3	31.8	33.0	35.1	38.0	36.4	34.8	33.4	38.0
2012	31.5	32.7	29.8	32.8	33.8	31.2	33.0	36.2	37.2	38.2	34.2	36.4	38.2
2013	33.6	32.1	33.4	34.0	35.2	31.8	35.6	33.0	35.0	38.5	37.0	37.4	38.5
2014	36.0	31.5	36.0	35.0	32.9	33.7	34.6	35.8	37.2	39.7	35.4	36.0	39.7
2015	31.3	32.0	30.0	31.2	31.9	32.0	34.0	37.4	37.5	38.8	35.9	37.7	38.8
2016	36.5	36.8	37.0	37.0	34.0	30.8	32.8	35.3	39.5	35.9			
Máxima	36.5	37.4	37.0	37.4	36.2	34.6	36.0	37.4	39.5	39.7	39.0	38.8	39.7

**Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)**

**Tabla 3.2 Temperaturas máximas extremas registradas (estación Aeropuerto-Bermejo)**



### TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA (°C)

Estación: BERMEJO

Lat. S.: 22° 46' 15''

Provincia: ARCE

Long. W.: 64° 18' 42''

Departamento: TARIJA

Altura: 385 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Maxima
1998	41.2	42.5	40.0	32.2	31.3	30.2	31.7	32.5	39.0	42.9	40.0	44.0	44.0
1999	38.5	37.2	36.7	34.0	31.5	27.6	31.0	36.5	44.5	42.0	40.5	44.5	44.5
2000	44.3	42.0	34.2	35.2	32.0	30.0	29.4	36.4	40.3	42.3	38.5	38.0	44.3
2001	40.0	38.3	38.0	36.0	31.5	31.8	32.1	35.3	39.6	42.0	41.2	40.8	42.0
2002	39.3	36.5	38.0	35.0	32.0	27.0	31.0	43.5	40.8	43.2	43.9	45.8	45.8
2003	42.3	42.3	40.2	35.8	32.9	31.1	32.4	35.1	41.5	41.5	44.1	37.8	44.1
2004	41.2	39.2	40.5	36.8	28.5	28.4	32.7	37.4	40.6	39.5	42.4	40.1	42.4
2005	42.4	40.3	37.8	33.2	31.5	30.3	34.9	37.3	39.8	43.2	44.2	40.6	44.2
2006	40.8	40.3	39.5	34.6	29.6	28.7	32.5	35.5	37.5	40.9	42.0	38.5	42.0
2007	38.0	37.2	36.0	36.0	32.0	28.4	28.3	34.0	37.5	43.0	40.0	40.0	43.0
2008	39.0	39.0	36.5	36.0	33.5	27.0	34.0	38.0	40.5	39.8	44.0	39.0	44.0
2009	39.8	38.5	40.0	35.0	32.0	29.5	31.5	40.0	41.0	44.0	45.5	38.2	45.5
2010	41.0	38.0	36.0	35.8	31.0	28.5	32.0	37.5	40.0	46.0	41.7	43.0	46.0
2011	38.5	38.0	35.5	34.0	31.0	26.0	32.2	37.5	41.0	40.0	44.5	41.5	44.5
2012	40.0	38.0	37.8	34.0	33.0	29.5	29.0	36.5	41.0	45.0	40.0	42.5	45.0
2013	39.0		39.0	35.5	36.0	32.0	35.5	36.0	41.0	44.5	44.5	43.8	
2014	40.0	36.5	35.0	35.2	30.5	29.5	32.5	36.5	36.5	43.0	40.0	38.4	43.0
2015	39.0	38.8	36.5	34.5	32.5	31.4	33.0	37.3	38.5	38.0	42.8	41.4	42.8
2016	39.5	40.0	39.0		25.5	25.0	29.0	37.7					
Maxima	44.3	42.5	40.5	36.8	36.0	32.0	35.5	43.5	44.5	46.0	45.5	45.8	46.0

**Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)**

**Tabla 3.3 Temperaturas máximas extremas registradas (estación Cenavit)****TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA (°C)**

Estación: CeNaVit.

Lat. S.: 21° 41' 31''

Provincia: AVILÉS

Long. W.: 64° 39' 29''

Departamento: TARIJA

Altura: 1,730 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Maxima
1989										31.0	29.0	33.0	
1990	33.0	32.0	34.0	34.0	32.0	31.0	32.0	33.0		39.0	37.0	39.0	
1991	31.0	33.0	31.0	35.0	35.0	32.0	34.0	32.0	34.0	38.0	36.0	36.0	38.0
1992	30.0	34.0	34.0	31.0	34.0	34.0	32.5	35.5	34.0	38.5	37.0	34.0	38.5
1993	33.0	31.5	32.0	34.5	33.0	33.0	34.0	35.5	37.5	35.0	38.0	33.0	38.0
1994	31.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	36.0	34.0	37.0	36.0	33.0	35.0	37.0
1995	34.0	33.0	31.0	35.0	32.0	33.0	39.0	35.0	35.0	35.0	37.0	35.0	39.0
1996	36.0	35.0	32.0	36.0	32.0	32.0	33.0	35.0	40.0	39.0	35.0	32.0	40.0
1997	34.0	33.0	30.0	34.0	33.0	37.0	34.0	36.0	40.0	40.0	35.0	35.5	40.0
1998	35.5	35.0	34.5	37.5	35.5	33.0	32.5	33.5	36.0	37.5	34.0	35.0	37.5
1999	31.5	35.5	32.0	31.5	33.0	31.5	32.5	36.5	37.5	34.5	31.0	35.5	37.5
2000	33.0	33.5	30.5	31.5	32.3	34.0	35.0	36.0	36.0	36.0	33.0	35.0	36.0
2001	35.0	33.5	33.0	33.0	34.0	30.0	34.0	34.0	34.0	37.0	36.0	33.0	37.0
2002	37.0	34.0	36.0	35.0	36.0	36.0	36.0	36.0	37.0	41.0	40.0	38.0	41.0
2003	36.0	36.0	32.0	33.0	34.0	35.0	37.0	36.0	38.0	40.0	37.0	37.0	40.0
2004	37.0	36.0	38.0	36.0	32.0	35.0	36.0	38.0	39.0	39.0	39.0	35.0	39.0
2005	37.0	35.0	35.0	35.0	36.0	35.0	36.0	39.0	37.0	40.0	36.0	36.0	40.0
2006	34.0	34.0	35.0	34.0	34.0	33.0		35.0	35.0	37.0	35.0	35.0	
2007	33.0	36.0	35.0	35.0	34.0	32.5		36.1		34.3	39.0	35.0	
2008	33.5	31.5		32.3	32.9	30.3	31.7	34.1	37.0		32.0	31.6	
2009	31.0	34.0	35.0	31.0	32.0	32.0	29.0	39.0	36.0	36.0	37.0	31.0	39.0
2010	36.0	36.0	35.0	35.0	35.0	34.0	36.0	35.0	36.0	37.0	34.0	37.5	37.5
2011	36.0	29.0	30.5	29.0	31.0	32.0	34.0	36.0	38.0	36.0	35.5	32.0	38.0
2012	31.0	31.5	32.0	31.0	33.5	31.0	31.5	38.0	37.5	36.5	33.0	37.0	38.0
2013	35.0	30.0	29.5	32.5	33.0	29.0	34.5				35.0	36.4	
2014	34.0	32.1	33.5	32.9	31.2	33.7	33.6	34.4	36.0	38.0	35.0	36.0	38.0

2015	33.0	33.0	30.0	32.0	31.0	32.0	32.0	37.5	37.0	39.0	35.0	37.0	39.0
2016	36.0	35.0	37.0	36.0	30.5	28.0	32.5	35.0	40.0	34.0	35.0		
2017	33.0	31.0											
Máxima	37.0	36.0	38.0	37.5	36.0	37.0	39.0	39.0	40.0	41.0	40.0	39.0	41.0

Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)

Tabla 3.4 Temperaturas máximas extremas registradas (estación San Andrés)



### TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA (°C)

Estación: SAN ANDRES

Lat. S.: 21° 37' 23.88''

Provincia: CERCADO

Long. W.: 64° 48' 54.00''

Departamento: TARIJA

Altura: 2.277 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Máxima
1990							27.0	30.5	30.0	30.5	30.5	29.0	
1991	29.5	26.0	25.5	30.5	34.5	33.5	28.2	27.5	29.8	33.5	27.0	32.0	34.5
1992	23.0	28.0	27.0	27.0	30.0	28.0	28.0	26.0	26.5	32.5	30.0	29.0	32.5
1993	27.0	25.0	27.0	33.0	32.0	28.0	29.5	32.0	33.0	32.0	29.0	30.0	33.0
1994	27.0	28.0	28.0	29.0	30.0	32.5	32.0	33.0	33.0	30.0	29.0	33.0	33.0
1995	29.5	24.0	29.0	32.0	26.0	31.0	30.0	33.5	36.0	31.0	32.0	36.0	36.0
1996							26.0	29.0	30.0	31.5	33.0	33.8	
1997	32.0	30.0	29.4	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	35.0	33.0	30.0	32.5	35.0
1998	33.0	31.5	29.5	28.0	31.0	28.0	29.0	28.5	32.5	34.0	30.5	32.0	34.0
1999	26.0	28.5	29.0	26.5	29.5	31.5	28.5	33.0	33.5	33.0	30.0	31.0	33.5
2000	27.5	29.0	25.0	29.0	29.0	30.0	29.5	27.0	30.0	33.0	30.5	32.5	33.0
2001	31.5	27.5	28.0	28.5	31.0	30.5	31.5	31.0	29.5	33.0	31.5	28.0	33.0
2002	33.5	28.0	32.5	30.5	32.0	30.0	28.0	30.5	30.0	33.5	31.0	30.5	33.5
2003	26.5	27.5	24.5	27.0	28.0	29.0	28.0	29.5	32.0	33.0	32.0	31.5	33.0
2004	25.5	29.5	31.0	29.5	30.0	30.0	30.5	29.0	31.5	33.0	31.0	27.0	33.0
2005	28.5	25.0	27.0	32.0	31.5	28.0	29.5	31.5	29.5	31.5	30.5	26.0	32.0
2006	25.0	25.0	27.0	26.0	29.0	28.5	32.0	31.0	29.5	31.0	30.5	29.5	32.0
2007	28.5	28.0	27.5	29.0	27.5	26.5	27.0	29.5	29.0	31.0	32.5	26.5	32.5
2008	23.5	24.0	24.0	29.0	30.5	29.0	30.0	30.0	31.5	29.0	29.0	25.0	31.5

2009	24.5	28.0	26.0	26.5	29.0	28.0	28.0	32.0	31.0	27.5	28.0	24.0	32.0
2010	30.5	33.0	28.5	31.0	29.0	30.5	32.5	32.0	31.0	31.0	30.5	31.5	33.0
2011	30.0	25.0	25.5	30.0	28.5	28.0	27.0	30.0	34.5	32.0	31.0	29.5	34.5
2012	29.5	29.0	31.0	23.0	31.5	28.5	30.5	32.0	32.5	33.0	33.0	35.5	35.5
2013	30.0	27.5	28.5	31.0	31.0	27.0	33.5	31.5	31.0	35.0	32.5	32.5	35.0
2014	31.0	27.0	29.0	31.0	30.0	30.0	30.0	31.0	34.0	34.0	31.5	30.0	34.0
2015	34.0	28.0	27.0	29.0	29.0	29.5	30.0	32.5	34.5	33.5	31.5	34.0	34.5
2016	30.0	33.0	33.0	34.0	28.0	27.0	30.0	32.0	37.0	31.5	34.0	31.5	37.0
2017	37.0	31.0	34.0										
MEDIA	37.0	33.0	34.0	34.0	34.5	33.5	33.5	33.5	37.0	35.0	34.0	36.0	37.0

**Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)**

**Tabla 3.5 Temperaturas mínimas extremas registradas (estación Aeropuerto-Tarija)**



### TEMPERATURA MÍNIMA EXTREMA (°C)

Estación: AEROPUERTO

Lat. S.: 21° 32' 48''

Provincia: CERCADO

Long. W.: 64° 42' 39''

Departamento: TARIJA

Altura: 1,849 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Mínima
1962					-2.0	-5.0	-6.2	-3.0	4.0	3.0	7.0	11.4	
1963	8.0	9.0	9.0	3.2	3.0	-3.0	-1.5	-2.5	4.6	5.5	3.0	8.5	-3.0
1964	10.3	11.0	7.5	3.5	-0.1	-2.5	-4.5	-3.0	0.0	5.0	10.0	6.5	-4.5
1965	10.2	11.0	8.0	1.2	0.4	-1.5	-3.3	-3.0	2.6	5.0	5.7	7.5	-3.3
1966	11.0	9.3	7.5	3.3	-1.0	-3.5	-4.2	-8.0	-4.0	7.0	8.0	7.4	-8.0
1967	9.0	10.0	10.0	3.0	3.0	-4.6	-1.0	0.6	0.4	7.0	6.7	12.0	-4.6
1968	9.5	11.2	7.0	1.0	-1.0	-2.8	-2.6	0.6	0.8	6.0	10.0	10.0	-2.8
1969	10.0	8.0	8.0	4.0	-1.0	-5.0	-6.0	-4.0	-3.0	1.0	10.0	7.8	-6.0
1970	10.6	4.0	7.6	6.0	-3.0	-5.0	-7.4	-3.8	1.3	4.4	6.0	6.5	-7.4
1971	7.4	9.0	8.0	-2.0	-2.0	-6.5	-6.0	-5.0	3.5	2.0	6.0	5.0	-6.5
1972	9.0	7.4	8.0	2.8	1.0	0.0	-4.2	-2.0	-3.0	1.0	7.0	11.0	-4.2
1973	11.0	10.6	10.0	7.0	-0.2	-3.0		-3.4	-2.0	6.5	5.4		

1974	10.2	10.0	6.0	1.0	-2.0	-4.0	-6.1	-5.0	-1.0	1.4	5.0	7.6	-6.1
1975	9.3	7.4	10.0	3.0	0.4	-6.4	-7.8	-4.7	3.0	5.3	8.2	7.4	-7.8
1976	11.0	9.6	5.0	1.0	0.0	-5.1	-4.4	-3.2	-2.0	3.0	7.0	10.0	-5.1
1977	11.5	12.0	8.8	3.0	0.6	-4.0	-3.0	-3.5	3.0	5.0	9.0	9.0	-4.0
1978	8.0	11.0	7.0	4.0	0.0	-2.0	2.0	-7.9	0.0	7.4	10.0	9.5	-7.9
1979	11.3	8.4	11.0	3.0	-2.0	-1.6	-2.2	3.0	-3.0	6.0	7.0	8.0	-3.0
1980	6.0	10.3	11.2	5.0	2.0	-1.0	-2.0	-1.0	0.2	3.5	3.4	8.5	-2.0
1981	11.9	11.5	9.5	4.4	3.2	-4.0	-7.4	1.5	-4.2	3.0	8.4	9.7	-7.4
1982	9.2	10.6	6.4	7.6	0.2	-5.0	-1.4	-1.2	7.4	7.8	7.6	11.3	-5.0
1983	13.0	11.2	8.6	3.2	1.5	-4.6	-3.5	-1.0	0.0	2.4	5.5	8.2	-4.6
1984	8.8	12.5	12.7	5.2	-1.4	-2.0	-1.6	-2.0	3.0	8.3	11.0	12.0	-2.0
1985	9.5	12.4	10.8	4.5	1.2	-1.8	-3.0	-6.2	4.4	6.5	11.0	9.5	-6.2
1986	12.3	12.4	11.5	4.0	-1.7	-2.2	-3.3	-1.5	4.6	5.6	9.0	11.0	-3.3
1987	14.0	8.0	7.8	7.0	-1.2	-5.6	0.0	-3.6	1.5	7.2	10.5	10.0	-5.6
1988	9.4	9.6	11.0	8.2	0.0	-4.5	-6.2	0.3	4.0	2.6	7.0	12.0	-6.2
1989	9.3	10.0	5.0	6.4	0.0	0.0	-4.8	-0.6	0.0	3.5	4.0	9.4	-4.8
1990	7.2	11.4	8.4	5.1	1.0	-2.0	-5.5	-2.0	-2.8	4.7	9.0	10.7	-5.5
1991	9.6	11.5	10.6	4.8	2.0	-0.6	-3.2	-2.2	5.0	3.0	9.8	11.4	-3.2
1992	12.4	11.3	7.6	5.8	-2.8	-2.2	-5.5	-4.4	-1.2	7.2	7.4	11.8	-5.5
1993	8.0	5.0	10.0	5.2	-0.4	-1.2	-6.4	-4.6	-0.6	8.0	8.0	10.0	-6.4
1994	9.4	10.0	8.0	6.0	2.7	-4.0	-5.0	-2.3	2.0	9.5	8.7	9.8	-5.0
1995	12.0	11.0	11.6	3.5	0.6	-3.0	-3.2	-2.2	-0.4	2.8	9.2	10.6	-3.2
1996	10.3	8.4	9.3	5.5	1.5	-7.7	-3.4	2.5	0.2	3.0	9.2	10.0	-7.7
1997	7.0	11.4	9.2	5.2	-2.4	-2.5	-2.4	-0.2	5.5		9.2	10.2	
1998	13.2	10.5	8.6	3.8	-1.5	-2.0	0.4	-0.5	-2.2	4.2	7.0	5.8	-2.2
1999	9.2	11.8	11.2	0.0	0.2	-5.0	-5.6	-3.2	4.0	3.0	4.2	11.2	-5.6
2000	12.5	12.0	7.0	6.0	-1.0	-5.6	-6.8	0.0	1.8	5.0	6.0	10.0	-6.8
2001	10.0	11.3	10.8	4.2	0.0	-5.9	-3.8	3.2	3.4	6.6	9.4	7.0	-5.9
2002	11.4	12.6	9.5	7.0	3.0	-2.8	-2.4	-1.5	0.6	4.0	7.2	12.4	-2.8
2003	11.4	7.2	11.0	4.0	3.5	0.5	-2.0	-2.8	-2.4	7.5	5.5	8.5	-2.8
2004	12.8	11.0	12.0	6.0	-1.0	-4.2	-2.2	-2.0	-1.6	6.2	4.8	11.4	-4.2
2005	12.0	8.0	10.4	0.0	0.0	-1.4	-4.2	-0.2	-0.6	5.5	7.6	11.0	-4.2
2006	12.0	10.4	11.4	4.8	-1.0	-0.2	-1.3	-4.8	-2.0	4.3	7.3	11.7	-4.8
2007	11.6	11.4	9.0	4.6	-2.0	-2.3	-6.2	-3.8	0.3	9.0	7.0	10.0	-6.2
2008	12.8	9.4	10.4	4.4	-5.2	-3.8	-1.8	1.0	-1.2	3.7	9.6	11.2	-5.2
2009	10.8	11.3	9.4	6.4	-2.7	-3.0	-5.3	-1.7	1.8	2.0	12.2	14.2	-5.3

2010	12.6	12.8	9.8	6.4	-2.7	-0.8	-9.2	-2.7	2.7	6.3	6.8	6.0	-9.2
2011	10.2	12.3	11.0	8.4	2.4	-5.0	-6.4	-4.8	3.0	7.3	10.2	12.0	-6.4
2012	11.4	12.0	9.5	1.8	1.3	-3.3	-3.7	0.4	3.4	8.0	11.5	10.6	-3.7
2013	11.8	11.7	6.8	4.6	0.4	-2.2	-6.4	-4.6	1.7	3.2	9.4	13.0	-6.4
2014	10.2	10.0	8.5	6.3	0.7	-2.5	-3.8	1.2	7.2	11.0	8.6	8.3	-3.8
2015	12.8	13.0	9.3	6.6	1.0	-0.8	-2.5	1.0	2.4	2.7	7.1	12.3	-2.5
2016	10.4	13.7	10.6	-1.8	-1.0	-1.5	-2.0	-0.4	-1.0	5.3			
Minima	6.0	4.0	5.0	-2.0	-5.2	-7.7	-9.2	-8.0	-4.2	1.0	3.0	5.0	-9.2

Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)

**Tabla 3.6 Temperaturas mínimas extremas registradas (estación Aeropuerto-Bermejo)**



### TEMPERATURA MÍNIMA EXTREMA (°C)

Estación: BERMEJO

Lat. S.: 22° 46' 15''

Provincia: ARCE

Long. W.: 64° 18' 42''

Departamento: TARIJA

Altura: 385 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Minima
1998	11.1	17.1	12.0	10.5	7.2	3.0	3.5	3.0	2.5	6.5	15.9	15.1	2.5
1999	16.5	17.0	16.5	0.9	10.0	3.2	2.0	-2.0	5.0	6.0	10.0	15.0	-2.0
2000	19.0	15.2	13.8	14.0	8.2	2.0	-1.5	5.0	5.0	12.5	9.5	15.9	-1.5
2001	15.0	18.0	14.0	8.5	7.0	-1.0	-0.5	3.8	4.3	12.5	13.2	13.1	-1.0
2002	17.2	16.0	18.0	13.0	10.0	2.0	3.0	1.0	5.1	10.2	10.3	15.7	1.0
2003	18.2	11.2	16.7	10.5	8.1	7.1	0.5	1.7	1.3	10.5	9.7	15.1	0.5
2004	16.1	15.0	16.7	12.5	4.4	0.3	-0.6	3.1	3.5	11.2	10.9	17.3	-0.6
2005	15.3	15.5	13.4	7.3	6.7	8.3	1.2	-0.1	0.2	8.9	13.0	16.7	-0.1
2006	17.2	14.8	15.5	11.4	5.4	9.7	6.2	2.0	2.3	9.8	14.0	17.2	2.0
2007	18.5	16.0	16.7	10.7	3.5	3.0	-2.0	0.8	5.5	13.8	12.2	18.0	-2.0
2008	18.0	14.5	17.0	9.0	1.5	1.5	7.5	3.0	2.5	10.0	13.0	16.5	1.5
2009	15.5	18.0	16.5	14.5	8.5	4.0	-3.0	2.0	4.0	3.0	18.0	15.5	-3.0
2010	16.5	15.0	17.0	12.0	5.0	3.0	-4.0	-1.6	2.5	8.3	9.5	9.0	-4.0
2011	18.5	18.0	12.0	14.5	7.0	1.0	-1.0	-1.5	3.0	12.0	13.0	17.0	-1.5

2012	14.5	18.0	10.0	10.0	8.0	4.0	-1.0	2.0	6.0	10.0	16.0	16.0	-1.0
2013	19.0		13.0	11.0	6.5	2.5	-4.0	-2.0	4.0	7.0	13.5	19.0	
2014	13.5	14.0	14.0	10.0	7.5	3.5	-0.5	4.0	9.0	14.0	13.0	14.2	-0.5
2015	17.2	17.5	15.5	15.5	11.5	4.0	4.5	4.0	6.0	10.5	11.5	16.8	4.0
2016	19.0	19.0	15.0		6.0	2.5	2.5	2.0					
Mínima	11.1	11.2	10.0	0.9	1.5	-1.0	-4.0	-2.0	0.2	3.0	9.5	9.0	-4.0

Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)

Tabla 3.7 Temperaturas mínimas extremas registradas (estación Cenavit)



### TEMPERATURA MÍNIMA EXTREMA (°C)

Estación: CeNaVit.

Lat. S.: 21° 41' 31''

Provincia: AVILÉS

Long. W.: 64° 39' 29''

Departamento: TARIJA

Altura: 1,730 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Minima
1989										4.0	4.0	10.0	
1990	9.0	12.0	8.0	5.0	0.0	-3.0	-6.0	-3.0		2.0	9.0	11.0	
1991	10.0	10.0	11.0	4.0	2.0	-2.0	-4.0	-4.0	3.0	3.0	10.0	12.0	-4.0
1992	12.0	11.0	8.0	5.0	-4.0	-3.0	-7.0	-5.5	-2.0	7.0	5.5	10.5	-7.0
1993	9.0	5.0	10.0	3.5	-2.0	-3.0	-8.0	-5.0	-1.5	8.0	8.0	9.0	-8.0
1994	11.0	10.0	8.0	5.5	1.0	-6.0	-6.5	-2.0	1.0	9.0	10.0	9.0	-6.5
1995	12.0	12.0	10.0	2.0	-3.0	-4.0	-5.0	0.0	-3.0	9.0	9.0	10.0	-5.0
1996	12.0	9.0	9.0	7.0	1.0	-9.0	-4.0	2.0	0.0	3.0	9.0	11.0	-9.0
1997	11.0	11.0	9.0	5.0	-2.0	-4.0	-3.0	-2.0	1.0	4.0	6.0	9.0	-4.0
1998	13.5	11.0	8.5	1.0	-3.5	-2.5	-1.0	-1.0	-2.5	3.0	8.5	4.0	-3.5
1999	11.5	11.5	12.0	-2.0	-1.5	-5.5	-7.5	-4.5	2.5	3.1	4.5	11.0	-7.5
2000	12.0	11.5	6.5	6.0	-2.5	-7.0	-8.5	-1.0	-1.0	7.0	6.0	9.0	-8.5
2001	9.0	11.0	11.0	5.0	0.0	-6.0	-3.0	-2.0	1.0	4.0	10.0	8.0	-6.0
2002	11.0	10.0	8.0	5.0	1.0	-6.0	-5.0	-5.0	-2.0	6.0	9.0	10.0	-6.0
2003	11.0	10.0	10.0	1.0	0.0	-5.0	-6.0	-5.0	-6.0	5.0	6.0	10.0	-6.0
2004	12.0	9.0	11.0	6.0	-4.0	-6.0	-5.0	-2.0	-5.0	4.0	6.0	11.0	-6.0
2005	11.0	8.0	8.0	-1.0	-1.0	-5.0	-8.0	-4.0	-5.0	3.0	7.0	12.0	-8.0

2006	10.0	9.0	11.0	5.0	-4.0	-3.0		-7.0	-5.0	9.0	6.0	11.0	
2007	12.0	11.0	9.5	4.0	-3.0	-4.3		-4.9		10.0	7.0	12.0	
2008	13.5	10.0		2.5	-3.3	-4.0	-0.4	0.8	-1.6		10.6	12.7	
2009	8.0	8.0	8.0	8.0	-1.0	-5.0	-2.0	-4.5	-1.0	0.0	9.0	8.0	-5.0
2010	9.0	10.0	6.0	3.0	-3.0	-2.0	-12.0	-3.0	1.0	2.0	4.0	0.0	-12.0
2011	12.0	12.5	10.5	10.0	0.0	-3.0	-5.0	-9.0	-2.0	3.5	9.0	9.0	-9.0
2012	8.5	9.5	8.0	8.0	-1.0	-5.0	-4.5	-3.0	2.5	4.5	10.0	12.0	-5.0
2013	6.0	11.0	11.0	1.0	0.5	-3.5	-10.0				6.4	11.6	
2014	11.3	7.6	7.4	6.0	-0.6	-4.5	-5.0	0.3	7.3	10.0	8.0	7.0	-5.0
2015	11.0	12.0	8.0	4.0	-2.0	-5.0	-5.0	-4.0	-1.0	0.5	6.5	10.5	-5.0
2016	11.0	15.0	9.5	-5.0	-5.0	-5.5	-5.0	-2.0	-4.0	3.0	2.5		
2017	9.0	8.0											
Mínima	6.0	5.0	6.0	-5.0	-5.0	-9.0	-12.0	-9.0	-6.0	0.0	2.5	0.0	-12.0

Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)

Tabla 3.8 Temperaturas mínimas extremas registradas (estación San Andrés)



### TEMPERATURA MÍNIMA EXTREMA (°C)

Estación: San Andres

Lat. S.: 21° 22' 20''

Provincia: CERCADO

Long. W.: 64° 33' 03''

Departamento: TARIJA

Altura: 2.277 m.s.n.m.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Minima
1990							-3.5	-1.0	7.0	10.5	12.0	9.0	
1991	7.5	8.0	7.0	2.0	2.0	-2.0	-4.0	-2.5	2.0	0.0	5.5	8.5	-4.0
1992	7.0	8.0	3.0	-1.0	-3.0	-1.0	-7.5	-3.5	-3.0	3.5	0.0	6.0	-7.5
1993	4.0	2.0	6.0	0.5	-4.0	-3.0	-8.0	-4.0	-2.0	6.0	7.0	7.0	-8.0
1994	6.0	7.0	5.8	4.0	-2.0	-4.0	-7.0	-4.0	1.0	6.5	5.0	7.0	-7.0
1995	9.0	7.0	7.0	-1.0	-2.0	-4.0	-4.0	-2.0	0.0	3.5	6.0	11.0	-4.0
1996							-3.0	-1.5	-5.0	-1.0	8.0	12.5	
1997	11.0	11.0	6.5	3.5	-1.0	-4.5	-1.5	-2.0	4.5	5.5	7.0	8.0	-4.5
1998	11.5	8.0	5.5	0.8	-4.0	-3.0	-2.0	-4.0	-3.5	2.5	6.0	4.0	-4.0
1999	8.0	9.0	9.5	-1.5	0.5	-4.0	-6.0	-4.5	2.5	3.0	3.5	7.5	-6.0

2000	9.0	10.0	4.5	3.0	-3.0	-4.0	-8.5	-1.0	-1.5	3.0	4.0	7.0	-8.5
2001	3.5	7.0	3.0	2.0	-0.5	-6.5	-5.0	-1.0	0.0	4.0	4.5	3.5	-6.5
2002	7.0	7.0	8.5	2.0	1.5	-4.0	-5.0	-2.0	-3.0	4.5	4.0	9.0	-5.0
2003	6.0	6.0	6.5	-1.5	-0.5	-1.5	-6.0	-6.0	-5.0	3.0	1.0	7.0	-6.0
2004	8.5	7.0	8.0	4.0	-3.5	-6.0	-3.0	0.0	-4.5	2.5	3.0	8.5	-6.0
2005	7.0	5.0	4.0	-1.0	-3.0	-1.5	-6.5	-3.0	-2.5	3.5	3.0	7.5	-6.5
2006	8.0	7.0	6.5	1.0	-3.0	-1.0	0.0	-2.0	-2.5	2.5	5.0	9.5	-3.0
2007	10.0	7.0	6.0	-1.0	-5.5	-6.0	-8.5	-7.0	-0.5	6.0	4.5	8.5	-8.5
2008	8.5	6.0	3.0	0.0	-2.0	-3.0	-1.0	-1.5	-4.0	0.0	4.5	6.0	-4.0
2009	6.0	7.0	6.0	4.0	-3.0	-4.0	-6.0	-3.0	-5.0	-3.0	6.5	4.0	-6.0
2010	9.5	10.0	5.5	4.0	-2.5	-4.0	-10.0	-3.5	0.0	3.0	3.5	1.0	-10.0
2011	10.0	8.5	7.0	4.0	-1.0	-5.0	-2.5	-6.0	-1.5	4.5	8.0	10.0	-6.0
2012	9.5	9.5	9.0	-1.5	1.0	-2.0	-4.0	-0.5	3.5	7.0	9.5	9.0	-4.0
2013	10.0	8.0	4.0	2.5	0.0	-1.0	-9.0	-6.5	-1.0	1.0	5.0	9.5	-9.0
2014	8.5	6.0	6.0	4.0	-1.0	-4.0	-5.0	-2.0	6.0	11.0	6.0	5.0	-5.0
2015	9.5	11.5	7.0	7.0	-0.5	-1.0	-1.5	-1.0	2.0	2.0	17.5	9.0	-1.5
2016	11.0	12.0	7.5	-3.0	-2.0	-2.0	-5.0	-2.5	-1.0	3.0	4.0	11.0	-5.0
2017	9.5	11.5	6.5										
MEDIA	3.5	2.0	3.0	-3.0	-5.5	-6.5	-10.0	-7.0	-5.0	-3.0	0.0	1.0	-10.0

**Fuente: Servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI)**

En la tabla 3.9 y 3.10 se muestran los máximos y mínimos de temperaturas extremas registradas desde el inicio de operatividad de las estaciones en los sectores.

Se puede ver que en algunos años no se tienen registros de datos (espacios en blanco), por motivos de la antigüedad de las estaciones, siendo la más completa la estación Aeropuerto- Tarija, la cual posee registros desde el año 1962 a diferencia de las demás estaciones que registran desde 1991 y 1998.

**Tabla 3.9 Resumen temperaturas máximas extremas**

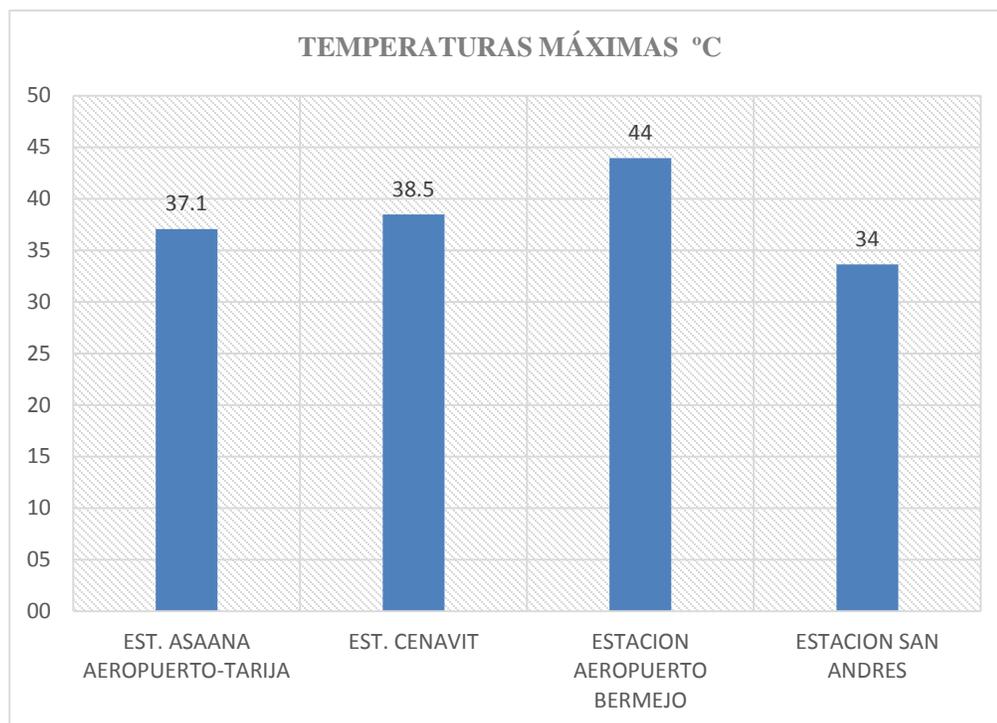
<b>Sector</b>	<b>Pavimentación interior nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija</b>	<b>Pavimentado tramo la Higuera-Colon Sud</b>	<b>Pavimentado tramo Bermejo km-16</b>	<b>Pavimentado tramo Tolomosa-pampa Redonda</b>
<b>Año</b>	<b>Est. asaana aeropuerto-Tarija</b>	<b>Est. cenavit</b>	<b>Estación aeropuerto Bermejo</b>	<b>Estación san Andres</b>
1962				
1963	38.3			
1964	34.5			
1965	35.2			
1966	38.0			
1967	38.2			
1968	37.3			
1969	37.0			
1970	36.0			
1971	39.0			
1972	36.2			
1973				
1974	36.0			
1975	37.8			
1976	38.2			
1977	39.3			
1978	36.0			
1979	37.0			
1980	37.4			
1981	34.4			
1982	37.4			
1983	36.2			
1984	36.2			
1985	36.2			

1986	36.0			
1987	37.3			
1988	36.6			
1989	37.2			
1990	37.5			
1991	39.0	38.0		34.5
1992	36.1	38.5		32.5
1993	35.5	38.0		33.0
1994	38.8	37.0		33.0
1995	37.4	39.0		36.0
1996	36.7	40.0		
1997		40.0		35.0
1998	36.6	37.5	44.0	34.0
1999	35.0	37.5	44.5	33.5
2000	36.2	36.0	44.3	33.0
2001	36.6	37.0	42.0	33.0
2002	37.6	41.0	45.8	33.5
2003	36.8	40.0	44.1	33.0
2004	37.8	39.0	42.4	33.0
2005	37.0	40.0	44.2	32.0
2006	35.2		42.0	32.0
2007	36.8		43.0	32.5
2008	37.2		44.0	31.5
2009	37.4	39.0	45.5	32.0
2010	37.0	37.5	46.0	33.0
2011	38.0	38.0	44.5	34.5
2012	38.2	38.0	45.0	35.5
2013	38.5			35.0
2014	39.7	38.0	43.0	34.0
2015	38.8	39.0	42.8	34.5
2016				37.0

<b>Promedio de altas temp.</b>	<b>37.1</b>	<b>38.5</b>	<b>43.9</b>	<b>33.6</b>
<b>Desviación estándar de la alta temperatura</b>	<b>1.22</b>	<b>1.25</b>	<b>1.25</b>	<b>1.36</b>

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 3.1 Temperaturas máximas extremas de las regiones analizadas**



**Fuente: Elaboración propia**

Tabla 3.10 Temperaturas mínimas extremas

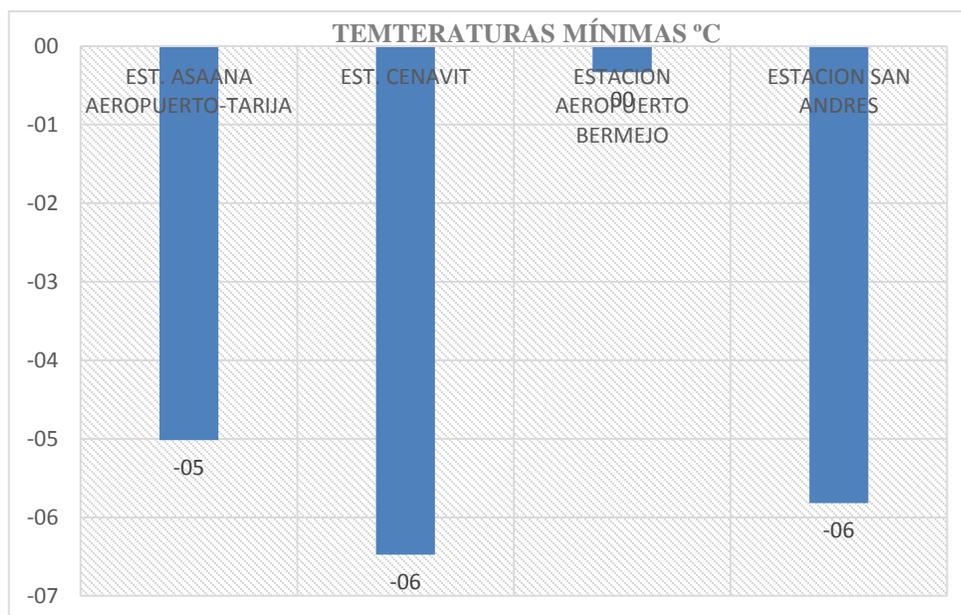
Sector	Pavimentación interior nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija	Pavimentado tramo la Higuera-Colón Sud	Pavimentado tramo Bermejo km-16	Pavimentado tramo Tolomosa-Pampa Redonda
Año	Est. asaana aeropuerto-Tarija	Est. cenavit	Est. aeropuerto Bermejo	Est. San Andrés
1962				
1963	-3.0			
1964	-4.5			
1965	-3.3			
1966	-8.0			
1967	-4.6			
1968	-2.8			
1969	-6.0			
1970	-7.4			
1971	-6.5			
1972	-4.2			
1973				
1974	-6.1			
1975	-7.8			
1976	-5.1			
1977	-4.0			
1978	-7.9			
1979	-3.0			
1980	-2.0			
1981	-7.4			
1982	-5.0			
1983	-4.6			
1984	-2.0			
1985	-6.2			

1986	-3.3			
1987	-5.6			
1988	-6.2			
1989	-4.8			
1990	-5.5			
1991	-3.2	-4.0		-4.0
1992	-5.5	-7.0		-7.5
1993	-6.4	-8.0		-8.0
1994	-5.0	-6.5		-7.0
1995	-3.2	-5.0		-4.0
1996	-7.7	-9.0		
1997		-4.0		-4.5
1998	-2.2	-3.5	2.5	-4.0
1999	-5.6	-7.5	-2.0	-6.0
2000	-6.8	-8.5	-1.5	-8.5
2001	-5.9	-6.0	-1.0	-6.5
2002	-2.8	-6.0	1.0	-5.0
2003	-2.8	-6.0	0.5	-6.0
2004	-4.2	-6.0	-0.6	-6.0
2005	-4.2	-8.0	-0.1	-6.5
2006	-4.8		2.0	-3.0
2007	-6.2		-2.0	-8.5
2008	-5.2		1.5	-4.0
2009	-5.3	-5.0	-3.0	-6.0
2010	-9.2	-12.0	-4.0	-10.0
2011	-6.4	-9.0	-1.5	-6.0
2012	-3.7	-5.0	-1.0	-4.0
2013	-6.4			-9.0
2014	-3.8	-5.0	-0.5	-5.0
2015	-2.5	-5.0	4.0	-1.5
2016				-5.0

<b>Promedio de baja temp.</b>	<b>-5.00</b>	<b>-6.50</b>	<b>-0.30</b>	<b>-5.80</b>
<b>Desviación estándar de la baja temperatura</b>	<b>1.76</b>	<b>2.08</b>	<b>2.06</b>	<b>2.03</b>

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 3.2 Temperaturas mínimas extremas**



**Fuente: Elaboración propia**

Las figuras 3.1 y 3.2 nos muestran el promedio del registro de máximas y mínimas extremas de temperaturas del aire en los cuatro sectores, pudiendo ver que en el valle central de Tarija el promedio de las máximas alcanza hasta los 38.5 grados y para el sector de Bermejo 6 grados por encima del antes mencionado y en cuanto a las mínimas extremas el valle central de Tarija en este caso registra un promedio de hasta -6.5 grados bajo cero quedando Bermejo con -0.3 grados bajo cero.

Estos promedios de temperaturas son muy importantes ya que constituyen la base para la determinación del PG de estos sectores que se determinaran más adelante.

### 3.4 Ubicación de los agregados

Los agregados utilizados en la pavimentación de los sectores en investigación provienen de diferentes ríos como se muestra de referencia en la siguiente tabla:

**Tabla 3.11 Ubicación de los agregados**

<b>Sector pavimentado</b>	<b>Procedencia del agregado</b>	<b>Chancadora</b>
<b>La Higuera- Colon Sud</b>	Rio Guadalquivir, El Rancho	Erika Srl
<b>Tolomosa-Pampa Redonda</b>	Rio Guadalquivir	Erika Srl
<b>Bermejo-Km 16</b>	Rio Bermejo	---
<b>Área de parqueos nueva terminal de autobuses Tarija</b>	Rio Santa Ana, La Pintada	Chancadora Fernández

**Fuente: Elaboración propia**

### 3.5 Ubicación de los cementos asfálticos

Los cementos asfálticos analizados en este trabajo de investigación fueron recolectados mediante solicitud a las instituciones o empresas que construyeron los tramos carreteros analizados, las cantidades solicitadas de cemento asfáltico fue de 3 litros aproximadamente de cada tipo, el cual fue provisto tal y como se muestra en la fotografía 3.1, de tal forma se detalla a continuación el lugar de ubicación de los cementos asfálticos:

**Tabla 3.12 Ubicación de los cementos asfálticos**

<b>Tipo (según clasificación por penetración)</b>	<b>Lugar de obtención</b>	<b>Lugar de utilización</b>
<b>BETUPEN PLUS 85/100 (stratura) de procedencia Brasileira.</b>	Planta de mezcla asfáltica de la Empresa Constructora Erika Srl-El Rancho	Pavimentación tramo La Higuera-Colon Sud
<b>BETUPEN PLUS 85/100 (stratura) de procedencia Brasileira</b>	Planta de mezcla asfáltica del Servicio Departamental de Caminos-Charaja	Pavimentación tramo Tolomosa-Pampa Redonda
<b>BETUPEN PLUS 60/70 (stratura) de procedencia Brasileira</b>	Planta de mezcla asfáltica del Servicio Departamental de Caminos-Charaja	Pavimentación tramo Bermejo-Km 16
<b>BETUCAP 85/100 de procedencia Brasileira</b>	Planta de mezcla asfáltica de La Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija-La Pintada	Pavimentación de las áreas de parqueo en la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija

**Fuente: Elaboración propia**

**Fotografía 3.1 Muestras de cemento asfáltico**



**Fuente: Elaboración propia**

### **3.6 Ubicación de los núcleos**

Los núcleos fueron extraídos mediante un equipo extractor de núcleos de la capa de rodaje de los respectivos tramos carreteros.

**Fotografía 3.2 Muestras de núcleos de pavimento flexible**



**Fuente: Elaboración propia**

## CAPÍTULO IV

### DISEÑO, ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4. Diseño

##### 4.1 Determinación del PG en áreas de estudio

Para determinar el grado de desempeño PG de la presente investigación, se empleara el tercer método de selección mencionado en **2.2.3.2 Elección del ligante asfáltico:** Por la temperatura del aire, que es convertida en temperatura de diseño del pavimento.

Para tal fin se cuenta con:

Registros de temperatura necesarios para emplear el método: Específicamente para el grado de alta temperatura, el registro de temperaturas extremas máximas en el aire por las estaciones, el promedio de los 7 días más calurosos durante el año registrado; para el grado de baja temperatura el registro de temperaturas mínimas extremas del aire. Los datos que se presentan en las tablas 3.09 y 3.10 son los máximos y mínimos de temperaturas extremas de las tablas 3.01 a la 3.08, datos que fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

El algoritmo desarrollado por los investigadores de la SHRP para el cálculo del grado de alta y baja temperatura del pavimento con los datos de las tablas 3.09 y 3.10.

Modelo con confiabilidad del LTPP para temperaturas altas:

$$T_{(pav)} = 54.32 + 0.78 T_{(aire)} - 0.0025 Lat^2 - 15.14 \text{Log}_{10}(H + 25) + z(9 + 0.61 \sigma^2_{aire})^{\frac{1}{2}}$$

Modelo con confiabilidad del LTPP para temperaturas bajas:

$$T_{(pav)} = -1.56 + 0.72 T_{(aire)} - 0.004 Lat^2 + 6.26 \text{Log}_{10}(H + 25) - z(4.4 + 0.52 \sigma^2_{aire})^{\frac{1}{2}}$$

De tal forma para el cálculo se tienen los siguientes datos:

Latitudes de las estaciones (En grados):

Estación Aeropuerto-Tarija: **Lat.**  $21^{\circ}32'48'' = 21.55^{\circ}$

Estación Aeropuerto –Bermejo: **Lat.**  $22^{\circ}46'15'' = 22.77^{\circ}$

Estación Cenavit: **Lat.**  $21^{\circ}41'31'' = 21.69^{\circ}$

Estación San Andrés: **Lat.**  $21^{\circ}37'24'' = 21.62^{\circ}$

Promedio de Alta Temperatura: Calculando el promedio anual de la tabla 3.9:

Estación Aeropuerto-Tarija:  **$T_{(AIRE)} = 37.1^{\circ}\text{C}$**

Estación Aeropuerto –Bermejo:  **$T_{(AIRE)} = 43.9^{\circ}\text{C}$**

Estación Cenavit:  **$T_{(AIRE)} = 38.5^{\circ}\text{C}$**

Estación San Andrés:  **$T_{(AIRE)} = 33.6^{\circ}\text{C}$**

Desviación Estándar para Alta Temperatura: Calculando la desviación estándar de los datos anuales de máxima temperatura de la tabla 3.9:

Estación Aeropuerto-Tarija:  **$\gamma_{(AIRE)} = 1.22$**

Estación Aeropuerto –Bermejo:  **$\gamma_{(AIRE)} = 1.25$**

Estación Cenavit:  **$\gamma_{(AIRE)} = 1.25$**

Estación San Andrés:  **$\gamma_{(AIRE)} = 1.36$**

Promedio de Baja Temperatura: Calculando el promedio anual de la tabla 3.10:

Estación Aeropuerto-Tarija:  **$T_{(AIRE)} = -5^{\circ}\text{C}$**

Estación Aeropuerto –Bermejo:  **$T_{(AIRE)} = -0.3^{\circ}\text{C}$**

Estación Cenavit:  **$T_{(AIRE)} = -6.5^{\circ}\text{C}$**

Estación San Andrés:  **$T_{(AIRE)} = -5.8^{\circ}\text{C}$**

Desviación Estándar para Baja Temperatura: Calculando la desviación estándar de los datos anuales de mínima temperatura de la tabla 3.10:

Estación Aeropuerto-Tarija:  **$\gamma_{(AIRE)} = 1.76$**

Estación Aeropuerto –Bermejo:  **$\gamma_{(AIRE)} = 2.06$**

Estación Cenavit:  **$\gamma_{(AIRE)} = 2.08$**

Estación San Andrés:  $\gamma$  (AIRE)=**2.03**

Confiabilidad: Se tomara la confiabilidad recomendada por SUPERPAVE que es de:  
**98%  $z=2.055$**

Profundidad a la que se calcula la máxima temperatura = **20 mm**

**No se realizara la corrección o ajuste del ligante por tráfico y velocidad**, porque no se cuenta con información de la rata de tráfico ni la velocidad de diseño de los tramos.

Con todos los datos descritos, se obtiene mediante los modelos de ecuación de alta y baja temperatura del pavimento, las respectivas temperaturas de diseño de los pavimentos.

Según los modelos LTPP se tienen:

**Tabla 4.01 Temperaturas de diseño del pavimento**

Sector:	Temperatura de diseño del pavimento	
	Alto	Bajo
<b>Nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija</b>	64	-1
<b>Bermejo-km 16</b>	69	2
<b>Tolomosa-Pampa Redonda</b>	61	-2
<b>La Higuera-Colon Sud</b>	65	-2

**Fuente: Elaboración propia**

Se redondea los valores obtenidos a los inmediatos superiores de la tabla 2.06, de esta manera se tienen los respectivos Grados PG de ligante de cada una de las zonas analizadas.

Se toma el inmediato superior referente a la tabla 2.06, porque esto implica un mayor nivel de confiabilidad de que la temperatura real no exceda la temperatura de diseño del pavimento.

**Tabla 4.2 Grados PG de los sectores**

<b>Sector:</b>	<b>Performance grade</b>	
	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>
<b>Nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija</b>	70	-10
<b>Bermejo-km 16</b>	76	-10
<b>Tolomosa-Pampa Redonda</b>	70	-10
<b>La Higuera-Colon Sud</b>	70	-10

**Fuente: Elaboración propia**

De tal manera es que se tiene como resultado al análisis de las temperaturas extremas mediante los algoritmos correspondientes, la tabla 4.02 la cual nos indica que para los sectores analizados, se tienen los PERFORMANCE GRADE o grados de desempeño PG en grados centígrados °C con sus rangos correspondientes a alto y bajo performance.

Esto quiere decir que por ejemplo para el sector de la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija, el cemento asfáltico a ser usado en este sector debe responder al análisis de propiedades físicas en laboratorio para todas las temperaturas dentro de este rango de manera satisfactoria, indicando entonces que este es el ligante asfáltico con desempeño adecuado para dicho sector.

Desde luego que en esta investigación no se realiza el análisis físico propuesto por SUPERPAVE dadas las limitantes mencionadas anteriormente, por lo cual no es

posible determinar mediante este método que un ligante en particular responda a las propiedades del método como tal.

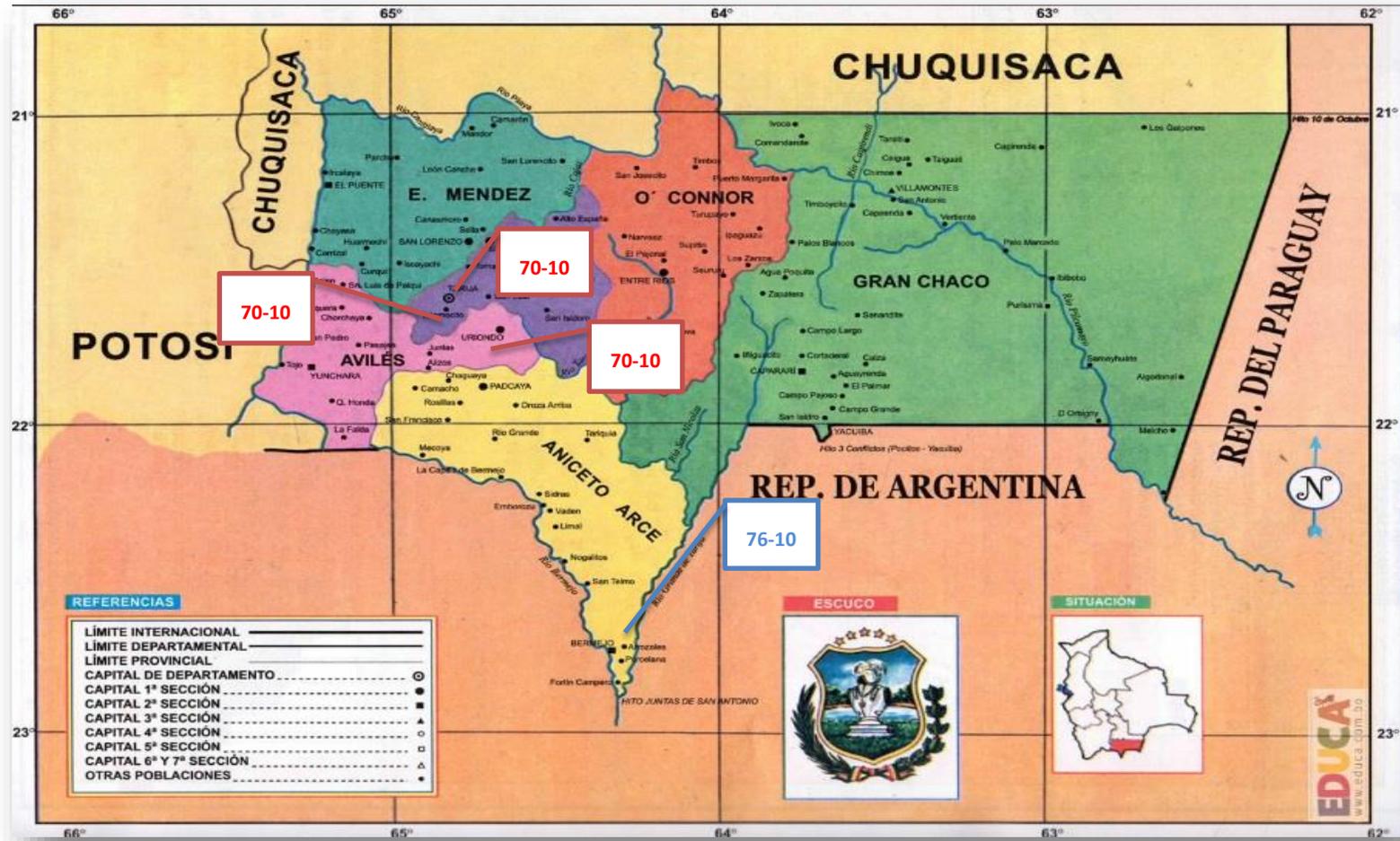
De igual manera el análisis es aplicable también a los demás rangos obtenidos para los sectores con PG 70-10 y 76-10.

Lo que se buscara más adelante es que con estos resultados se pueda determinar una relación del PG determinado para cada sector con las características propias de la mezcla asfáltica extraída de cada tramo.

Es decir, encontrar una utilización en nuestro medio para los resultados obtenidos analizando la mezcla asfáltica (midiendo sus propiedades de comportamiento), la cual estaría trabajando dentro del PG correspondiente, es decir dentro de las temperaturas de diseño del pavimento encontradas.

4.2 Clasificación de PG estimado en el los sectores

Imagen 4.1 Distribución de los grados de desempeño calculados



Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Influencia del PG en el costo del cemento asfáltico de mezclas por áreas diferentes de PG.

En la realización de un pavimentado como en la construcción de cualquier obra de ingeniería civil, el costo de la construcción es uno de los factores determinantes en la viabilidad del proyecto, para ello se debe tener presente el costo de cada uno de los materiales de construcción que intervendrán en el mismo.

El cemento asfáltico en este caso, es uno de ellos, ya que es el material con mayor costo en un pavimentado como se puede ver en la tablas de análisis de precio unitario.

Lo que se realizará en este caso es verificar si realizando un análisis de precio unitario bajo los mismos parámetros de diseño solamente variando el tipo de ligante asfáltico entre los convencionales usados en los tramos elegidos y cemento asfáltico clasificado por PG, existe variación de costo por m<sup>3</sup> de pavimentado. Además de verificar si existe variación de costo entre sectores de PG diferentes para el ligante asfáltico.

Se realiza un análisis de precios unitario en función a la cotización de ligantes asfálticos provisto por empresas importadoras las cuales se detallan en los anexos 18 al 21.

El costo del ligante por el proveedor está en función al lugar de donde proviene y en el lugar de entrega final, por lo que las cotizaciones realizadas son de importadores de diferentes lugares hasta destinos diferentes de entrega, por lo cual se realiza el análisis de precio unitario por un solo proveedor.

**Tabla 4.03 Análisis de precio unitario con ligante PG 70-16**

<b>PROYECTO:</b>	PROVISIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CONFORMADA EN PLATAFORMA	<b>CANTIDAD</b>	1
<b>ACTIVIDAD:</b>		<b>MONEDA</b>	Bolivianos
<b>UNIDAD:</b>	m3 (suelto)*	<b>PERIODO</b>	OCT-17

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
<b>1.- MATERIALES</b>				
ASFALTO 60/85E (PG 70-16)	KG	110.0000	5.8460	643.06
GRAVA 3/4	M3	0.3465	130.0000	45.05

	GRAVILLA 3/8	M3	0.2100	160.0000	33.60
	ARENA	M3	0.5123	130.0000	66.60
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>788.30</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>					
	JEFE DE PLANTA	HR	0.0833	45.0000	3.75
	OPERADOR DE PLANTA	HR	0.0833	25.0000	2.08
	AYUDANTE DE PLANTA	HR	0.5831	15.0000	8.75
	OPERADOR DE PALA	HR	0.0833	20.0000	1.67
	LABORATORISTA	HR	0.0520	35.0000	1.82
	AYUDANTE DE LABORATORIO	HR	0.0520	15.0000	0.78
	CHOFER VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
	CHOFER VOLQUETA 4 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
	OPERADOR DE COMPRESORA TIPO CICLON	HR	0.0312	15.0000	0.47
	OPERADOR DE TERMINADORA	HR	0.0833	25.0000	2.08
	OPERADOR DE RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	20.0000	1.25
	OPERADOR DE RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	20.0000	3.75
	AYUDANTE DE PLATAFORMA	HR	0.5000	15.0000	7.50
	OPERADOR MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	15.0000	0.31
	CHOFER CAMIONETA 4X4	HR	0.1660	15.0000	2.49
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>52.70</b>
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				71.18%	37.51
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGA SOCIALES) (14,94%)				14.94%	13.48
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>103.68</b>
<b>3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	PLANTA ASFALTICA	HR	0.0833	2 100.0000	174.93
	TERMOTANQUE	HR	0.0833	50.0000	4.17
	CALDERO	HR	0.0833	220.0000	18.33
	DILUIDOR DE TURRILES	HR	0.0833	50.0000	4.17
	PALA CARGADORA	HR	0.0833	348.0000	28.99
	LABORATORIO DE ASFALTO	HR	0.0520	80.0000	4.16
	VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	140.0000	56.00

	VOLQUETA 4 M3 PARA FINO	HR	0.4000	55.0000	22.00
	TERMINADORA DE ASFALTO	HR	0.0833	556.8700	46.39
	RODILLO VIBROCOMPACTADO R	HR	0.0625	313.2000	19.58
	RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	278.4000	52.20
	COMPRESORA TIPO CICLÓN	HR	0.0312	31.2500	0.98
	MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	31.2500	0.65
	CAMIONETA 4X4 PLATAFORMA/PLANT A	HR	0.1660	45.0000	7.47
<b>SUBTOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					<b>439.99</b>
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				5.00%	5.18
<b>TOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					<b>445.18</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % DE 1+2+3				15.00%	200.57
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					<b>200.57</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDAD = % 1+2+3+4				10.00%	153.77
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>153.77</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>					
IT				3.09%	52.27
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>52.27</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO 1+2+3+4+5+6</b>					<b>1 743.78</b>
* PARA CALCULAR EL PRECIO DEL m3 DE MEZCLA ASFALTICA COMPACTADA SE DEBE APLICAR EL COEFICIENTE DE COMPACTACION (NORMALMENTE 1,24)					

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 4.04: Analisis de precio unitario con ligante PG 76-22**

**PROYECTO:** PROVISIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CONFORMADA EN PLATAFORMA **CANTIDAD** 1

**ACTIVIDAD:** PLATAFORMA **MONEDA** Bolivianos

**UNIDAD:** m3 (suelto)\* **PERIODO** OCT-17

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
<b>1.- MATERIALES</b>				
ASFALTO 60/85 E (PG 76-22)	KG	110.0000	5.8460	643.06
GRAVA 3/4	M3	0.3465	130.0000	45.05
GRAVILLA 3/8	M3	0.2100	160.0000	33.60
ARENA	M3	0.5123	130.0000	66.60
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>788.30</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
JEFE DE PLANTA	HR	0.0833	45.0000	3.75
OPERADOR DE PLANTA	HR	0.0833	25.0000	2.08
AYUDANTE DE PLANTA	HR	0.5831	15.0000	8.75
OPERADOR DE PALA	HR	0.0833	20.0000	1.67
LABORATORISTA	HR	0.0520	35.0000	1.82
AYUDANTE DE LABORATORIO	HR	0.0520	15.0000	0.78
CHOFER VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
CHOFER VOLQUETA 4 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
OPERADOR DE COMPRESORA TIPO CICLON	HR	0.0312	15.0000	0.47
OPERADOR DE TERMINADORA	HR	0.0833	25.0000	2.08
OPERADOR DE RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	20.0000	1.25
OPERADOR DE RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	20.0000	3.75
AYUDANTE DE PLATAFORMA	HR	0.5000	15.0000	7.50
OPERADOR MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	15.0000	0.31
CHOFER CAMIONETA 4X4	HR	0.1660	15.0000	2.49
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>52.70</b>
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)			71.18%	37.51

IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGA SOCIALES) (14,94%)				14.94%	13.48
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>103.68</b>
<b>3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	PLANTA ASFALTICA	HR	0.0833	2 100.0000	174.93
	TERMOTANQUE	HR	0.0833	50.0000	4.17
	CALDERO	HR	0.0833	220.0000	18.33
	DILUIDOR DE TURRILES	HR	0.0833	50.0000	4.17
	PALA CARGADORA	HR	0.0833	348.0000	28.99
	LABORATORIO DE ASFALTO	HR	0.0520	80.0000	4.16
	VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	140.0000	56.00
	VOLQUETA 4 M3 PARA FINO	HR	0.4000	55.0000	22.00
	TERMINADORA DE ASFALTO	HR	0.0833	556.8700	46.39
	RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	313.2000	19.58
	RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	278.4000	52.20
	COMPRESORA TIPO CICLÓN	HR	0.0312	31.2500	0.98
	MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	31.2500	0.65
	CAMIONETA 4X4 PLATAFORMA/PLANTA	HR	0.1660	45.0000	7.47
SUBTOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					439.99
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				5.00%	5.18
<b>TOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					<b>445.18</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % DE 1+2+3				15.00%	200.57
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					<b>200.57</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDAD = % 1+2+3+4				10.00%	153.77
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>153.77</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>					
IT				3.09%	52.27
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>52.27</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO 1+2+3+4+5+6</b>					<b>1 743.78</b>

\* PARA CALCULAR EL PRECIO DEL m3 DE MEZCLA ASFALTICA COMPACTADA SE DEBE APLICAR EL COEFICIENTE DE COMPACTACION (NORMALMENTE 1,24)

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 4.05: Análisis de precio unitario con ligante PG 76-28**

<b>PROYECTO:</b>	PROVISIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CONFORMADA EN PLATAFORMA	<b>CANTIDAD</b>	1
<b>ACTIVIDAD:</b>	PLATAFORMA	<b>MONEDA</b>	Bolivianos
<b>UNIDAD:</b>	m3 (suelto)*	<b>PERIODO</b>	OCT-17

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
<b>1.- MATERIALES</b>				
ASFALTO 60/85 (PG 76-28)	KG	110.0000	5.8460	643.06
GRAVA 3/4	M3	0.3465	130.0000	45.05
GRAVILLA 3/8	M3	0.2100	160.0000	33.60
ARENA	M3	0.5123	130.0000	66.60
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>788.30</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
JEFE DE PLANTA	HR	0.0833	45.0000	3.75
OPERADOR DE PLANTA	HR	0.0833	25.0000	2.08
AYUDANTE DE PLANTA	HR	0.5831	15.0000	8.75
OPERADOR DE PALA	HR	0.0833	20.0000	1.67
LABORATORISTA	HR	0.0520	35.0000	1.82
AYUDANTE DE LABORATORIO	HR	0.0520	15.0000	0.78
CHOFER VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
CHOFER VOLQUETA 4 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
OPERADOR DE COMPRESORA TIPO CICLON	HR	0.0312	15.0000	0.47
OPERADOR DE TERMINADORA	HR	0.0833	25.0000	2.08
OPERADOR DE RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	20.0000	1.25
OPERADOR DE RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	20.0000	3.75
AYUDANTE DE PLATAFORMA	HR	0.5000	15.0000	7.50
OPERADOR MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	15.0000	0.31
CHOFER CAMIONETA 4X4	HR	0.1660	15.0000	2.49
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>52.70</b>
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)			71.18%	37.51

IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGA SOCIALES) (14,94%)				14.94%	13.48
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>103.68</b>
<b>3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	PLANTA ASFALTICA	HR	0.0833	2 100.0000	174.93
	TERMOTANQUE	HR	0.0833	50.0000	4.17
	CALDERO	HR	0.0833	220.0000	18.33
	DILUIDOR DE TURRILES	HR	0.0833	50.0000	4.17
	PALA CARGADORA	HR	0.0833	348.0000	28.99
	LABORATORIO DE ASFALTO	HR	0.0520	80.0000	4.16
	VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	140.0000	56.00
	VOLQUETA 4 M3 PARA FINO	HR	0.4000	55.0000	22.00
	TERMINADORA DE ASFALTO	HR	0.0833	556.8700	46.39
	RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	313.2000	19.58
	RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	278.4000	52.20
	COMPRESORA TIPO CICLÓN	HR	0.0312	31.2500	0.98
	MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	31.2500	0.65
	CAMIONETA 4X4 PLATAFORMA/PLANT A	HR	0.1660	45.0000	7.47
SUBTOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					439.99
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				5.00%	5.18
<b>TOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					<b>445.18</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % DE 1+2+3				15.00%	200.57
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					<b>200.57</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDAD = % 1+2+3+4				10.00%	153.77
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>153.77</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>					
IT				3.09%	52.27
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>52.27</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO 1+2+3+4+5+6</b>					<b>1 743.78</b>
* PARA CALCULAR EL PRECIO DEL m3 DE MEZCLA ASFALTICA COMPACTADA SE DEBE APLICAR EL COEFICIENTE DE COMPACTACION (NORMALMENTE 1,24)					

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.06: Análisis de precio unitario con ligante 85/100**

<b>PROYECTO:</b>	PROVISIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CONFORMADA EN	<b>CANTIDAD</b>	1
<b>ACTIVIDAD:</b>	PLATAFORMA	<b>MONEDA</b>	Bolivianos
<b>UNIDAD:</b>	m3 (suelto)*	<b>PERIODO</b>	OCT-17

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
<b>1.- MATERIALES</b>				
ASFALTO 85/100	KG	110.0000	5.7770	635.47
GRAVA 3/4	M3	0.3465	130.0000	45.05
GRAVILLA 3/8	M3	0.2100	160.0000	33.60
ARENA	M3	0.5123	130.0000	66.60
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>780.71</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
JEFE DE PLANTA	HR	0.0833	45.0000	3.75
OPERADOR DE PLANTA	HR	0.0833	25.0000	2.08
AYUDANTE DE PLANTA	HR	0.5831	15.0000	8.75
OPERADOR DE PALA	HR	0.0833	20.0000	1.67
LABORATORISTA	HR	0.0520	35.0000	1.82
AYUDANTE DE LABORATORIO	HR	0.0520	15.0000	0.78
CHOFER VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
CHOFER VOLQUETA 4 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
OPERADOR DE COMPRESORA TIPO CICLON	HR	0.0312	15.0000	0.47
OPERADOR DE TERMINADORA	HR	0.0833	25.0000	2.08
OPERADOR DE RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	20.0000	1.25
OPERADOR DE RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	20.0000	3.75
AYUDANTE DE PLATAFORMA	HR	0.5000	15.0000	7.50
OPERADOR MOTO FUMIGADORA	HR	0.0208	15.0000	0.31

	CHOFER CAMIONETA 4X4	HR	0.1660	15.0000	2.49
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>52.70</b>
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				71.18%	37.51
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGA SOCIALES) (14,94%)				14.94%	13.48
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>103.68</b>
<b>3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	PLANTA ASFALTICA	HR	0.0833	2 100.0000	174.93
	TERMOTANQUE	HR	0.0833	50.0000	4.17
	CALDERO	HR	0.0833	220.0000	18.33
	DILUIDOR DE TURRILES	HR	0.0833	50.0000	4.17
	PALA CARGADORA	HR	0.0833	348.0000	28.99
	LABORATORIO DE ASFALTO	HR	0.0520	80.0000	4.16
	VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	140.0000	56.00
	VOLQUETA 4 M3 PARA FINO	HR	0.4000	55.0000	22.00
	TERMINADORA DE ASFALTO	HR	0.0833	556.8700	46.39
	RODILLO VIBROCOMPACT ADOR	HR	0.0625	313.2000	19.58
	RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	278.4000	52.20
	COMPRESORA TIPO CICLÓN	HR	0.0312	31.2500	0.98
	MOTOFUMIGADO RA	HR	0.0208	31.2500	0.65
	CAMIONETA 4X4 PLATAFORMA/PL ANTA	HR	0.1660	45.0000	7.47
<b>SUBTOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					<b>439.99</b>
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				5.00%	5.18
<b>TOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					<b>445.18</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % DE 1+2+3				15.00%	199.44
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					<b>199.44</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDAD = % 1+2+3+4				10.00%	152.90
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>152.90</b>

6.-	<b>IMPUESTOS</b>		
IT		3.09%	51.97
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>			<b>51.97</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b> 1+2+3+4+5+6			<b>1 733.88</b>
* PARA CALCULAR EL PRECIO DEL m <sup>3</sup> DE MEZCLA ASFALTICA COMPACTADA SE DEBE APLICAR EL COEFICIENTE DE COMPACTACION (NORMALMENTE 1,24)			

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 4.07: Análisis de precio unitario con ligante 60/70**

<b>PROYECTO:</b>	PROVISIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CONFORMADA EN	<b>CANTIDAD</b>	1
<b>ACTIVIDAD:</b>	PLATAFORMA	<b>MONEDA</b>	Bolivianos
<b>UNIDAD:</b>	m <sup>3</sup> (suelto)*	<b>PERIODO</b>	OCT-17

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
<b>1.- MATERIALES</b>				
ASFALTO 60/70	KG	110.0000	5.7770	635.47
GRAVA 3/4	M3	0.3465	130.0000	45.05
GRAVILLA 3/8	M3	0.2100	160.0000	33.60
ARENA	M3	0.5123	130.0000	66.60
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>780.71</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
JEFE DE PLANTA	HR	0.0833	45.0000	3.75
OPERADOR DE PLANTA	HR	0.0833	25.0000	2.08
AYUDANTE DE PLANTA	HR	0.5831	15.0000	8.75
OPERADOR DE PALA	HR	0.0833	20.0000	1.67
LABORATORISTA	HR	0.0520	35.0000	1.82
AYUDANTE DE LABORATORIO	HR	0.0520	15.0000	0.78
CHOFER VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00
CHOFER VOLQUETA 4 M3	HR	0.4000	20.0000	8.00

	OPERADOR DE COMPRESORA TIPO CICLON	HR	0.0312	15.0000	0.47
	OPERADOR DE TERMINADORA	HR	0.0833	25.0000	2.08
	OPERADOR DE RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	20.0000	1.25
	OPERADOR DE RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	20.0000	3.75
	AYUDANTE DE PLATAFORMA	HR	0.5000	15.0000	7.50
	OPERADOR MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	15.0000	0.31
	CHOFER CAMIONETA 4X4	HR	0.1660	15.0000	2.49
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>52.70</b>
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				71.18%	37.51
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGA SOCIALES) (14,94%)				14.94%	13.48
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>103.68</b>
<b>3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					
	PLANTA ASFALTICA	HR	0.0833	2 100.0000	174.93
	TERMOTANQUE	HR	0.0833	50.0000	4.17
	CALDERO	HR	0.0833	220.0000	18.33
	DILUIDOR DE TURRILES	HR	0.0833	50.0000	4.17
	PALA CARGADORA	HR	0.0833	348.0000	28.99
	LABORATORIO DE ASFALTO	HR	0.0520	80.0000	4.16
	VOLQUETA 12 M3	HR	0.4000	140.0000	56.00
	VOLQUETA 4 M3 PARA FINO	HR	0.4000	55.0000	22.00
	TERMINADORA DE ASFALTO	HR	0.0833	556.8700	46.39
	RODILLO VIBROCOMPACTADOR	HR	0.0625	313.2000	19.58
	RODILLO NEUMÁTICO	HR	0.1875	278.4000	52.20
	COMPRESORA TIPO CICLÓN	HR	0.0312	31.2500	0.98
	MOTOFUMIGADORA	HR	0.0208	31.2500	0.65

	CAMIONETA 4X4 PLATAFORMA/P LANTA	HR	0.1660	45.0000	7.47
SUBTOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA					439.99
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				5.00%	5.18
<b>TOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>					<b>445.18</b>
<b>4.- GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					
GASTOS GENERALES = % DE 1+2+3				15.00%	199.44
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					<b>199.44</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>					
UTILIDAD = % 1+2+3+4				10.00%	152.90
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>152.90</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>					
IT				3.09%	51.97
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>51.97</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO 1+2+3+4+5+6</b>					<b>1 733.88</b>
* PARA CALCULAR EL PRECIO DEL m3 DE MEZCLA ASFALTICA COMPACTADA SE DEBE APLICAR EL COEFICIENTE DE COMPACTACION (NORMALMENTE 1,24)					

**Fuente: Elaboración propia**

Los resultados obtenidos serán expuestos en el análisis de resultados.

#### **4.4 Ensayos complementarios al trabajo de investigación**

Una vez que se determinó los valores de Performance Grade los cuales corresponden a cada uno de los sectores analizados en función a sus temperaturas históricas ambientales; es necesario relacionar el uso de estos grados PG con las características de comportamiento de la mezcla asfáltica y cemento asfáltico usados en los tramos correspondientes.

Por lo que se realiza ensayos de caracterización en laboratorio a los núcleos extraídos y también a los ligantes asfálticos que se utilizaron en su momento en el pavimentado de los cuatro tramos correspondientes.

La caracterización a los ligantes no se realiza según SUPERPAVE, sino con el análisis convencional de caracterización de ligantes según ASHTO.

#### **4.4.1 Características de los cementos asfálticos evaluados**

Los cementos asfálticos que se utilizaron en el pavimentado de los tramos tienen las siguientes características, después de ser sometidos cinco ensayos de caracterización en laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho:

- Ensayo de penetración    ASTM D 5 AASTHO T49-97
- Ensayo de viscosidad cinemática    ASTM D 2170 AASTHO T201-01
- Ensayo de peso específico    AASTHO T-228 I.N.V.E - 707
- Ensayo de ductilidad    ASTM D 113 AASTHO T51-00
- Ensayo de punto de inflamación    ASTM D 1310-01-AASTHO T79-96

**Tabla 4.08 Caracterización del cemento asfáltico 85/100**

UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAE SARACHO  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA  
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE ASFALTOS

<b>PROYECTO:</b>	Pavimentado tramo La Higuera-Colon Sud
<b>Provincia:</b>	Avilés
<b>PROCEDENCIA:</b>	Brasil
<b>REFERENCIA:</b>	Cemento asfáltico 85/100 BETUPEN PLUS (stratura)

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Resultado	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	62	62.01			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	142.75	142.75			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	112.5	109.10			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	140.6	141.20			
Peso Específico AASHTO T-228	grs./cm <sup>3</sup>	0.956	0.965	<b>0.961</b>	<b>0.95</b>	<b>1.05</b>
Punto de Inflamación ASTM D 1310-01 AASHTO T-79-98	°C	>241	>243	<b>&gt;242</b>	<b>&gt;232</b>	
Ductilidad a 25°C ASTM D 113 AASHTO T-51	cm.	122.67	122.67	<b>122.67</b>	<b>100</b>	-
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg.( 0.1mm) ASTM D 5 AASHTO T-49-97	mm.	90.83	91.67	91	<b>85</b>	<b>100</b>
Viscosidad cinemática a 135 °C(ASTM D 2170 AASHTO T201-01)	Cts.	280.3	297.5	<b>288.9</b>	<b>170</b>	-

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
 CARLOS SUBIA

TECNICO DEL LABORATORIO DE ASFALTOS

UJMS

**Tabla 4.09 Caracterización del cemento asfáltico 85/100**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAE SARACHO  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
 PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
 LABORATORIO DE ASFALTOS

<b>PROYECTO:</b>	Pavimentado tramo Tolomosa-Pampa Redonda
<b>Provincia:</b>	Cercado
<b>PROCEDENCIA:</b>	Brasil
<b>REFERENCIA:</b>	Cemento asfáltico 85/100 BETUPEN PLUS (stratura)

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Resultado	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	62.01	62.01			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	142.78	142.75			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	103.51	103.20			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	143.22	143.09			
Peso Específico AASHTO T-228	grs./c m3	1.008	1.005	<b>1.007</b>	<b>0.95</b>	<b>1.05</b>
Punto de Inflamación ASTM D 1310-01 AASHTO T-79-98	°C	>238	>239	<b>&gt;239</b>	<b>&gt;232</b>	
Ductilidad a 25°C ASTM D 113 AASHTO T-51	cm.	116.67	118.33	<b>117.50</b>	<b>100</b>	-
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (0.1mm) ASTM D 5 AASHTO T-49-97	mm.	85.50	85.73	86	<b>85</b>	<b>100</b>
Viscosidad cinemática a 135 °C (ASTM D 2170 AASHTO T201-01)	Cts.	287.0	291.2	<b>289.1</b>	<b>170</b>	-

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
 CARLOS SUBIA

TECNICO DEL LABORATORIO DE ASFALTOS  
 UAJMS

**Tabla 4.10 Caracterización del cemento asfáltico 60/70**



UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAE SARACHO  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA  
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE ASFALTOS

<b>PROYECTO:</b>	Pavimentado tramo Bermejo-Km 16
<b>Provincia:</b>	Arce
<b>PROCEDENCIA:</b>	Brasil
<b>REFERENCIA:</b>	Cemento asfáltico 60/70 BETUPEN PLUS (stratura)

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Resultado	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	70.57	70.57			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	195.06	195.02			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	123.85	123.20			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	196.07	196.02			
Peso Específico AASHTO T-228	grs./cm <sup>3</sup>	1.016	1.016	<b>1.016</b>	<b>0.95</b>	<b>1.05</b>
Punto de Inflamación ASTM D 1310-01 AASHTO T-79-98	°C	>255	>256	<b>&gt;256</b>	<b>&gt;232</b>	
Ductilidad a 25°C ASTM D 113 AASHTO T-51	cm.	124.00	122.67	<b>123.33</b>	<b>100</b>	-
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg.(0.1mm) ASTM D 5 AASHTO T-49-97	mm	66.67	68.00	67	<b>60</b>	<b>70</b>
Viscosidad cinemática a 135 °C(ASTM D 2170 AASHTO T201-01)	Cts.	209.5	206.7	<b>208.1</b>	<b>170</b>	-

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
 CARLOS SUBIA  
 TECNICO DEL LABORATORIO DE ASFALTOS  
 UAJMS

**Tabla 4.11 Caracterización del cemento asfáltico 85/100**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAE SARACHO  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA  
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE ASFALTOS

<b>PROYECTO:</b>	Pavimentado parqueo vehicular nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija
<b>Provincia:</b>	Cercado
<b>PROCEDENCIA:</b>	Brasil
<b>REFERENCIA:</b>	Cemento asfáltico 85/100 BETUCAP

ENSAYO	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Resultado	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	72.42	72.42			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	195.5	195.25			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	127.42	127.34			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	195.85	195.92			
Peso Específico AASHTO T-228	grs./cm <sup>3</sup>	1.003	1.009	<b>1.006</b>	<b>0.95</b>	<b>1.05</b>
Punto de Inflamación ASTM D 1310-01 AASHTO T-79-98	°C	>268	>272	<b>&gt;270</b>	<b>&gt;232</b>	
Ductilidad a 25°C ASTM D 113 AASHTO T-51	cm.	105.00	109.67	<b>107</b>	<b>100</b>	-
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg.( 0.1mm) ASTM D 5 AASHTO T-49-97	mm.	90.17	89.00	90	<b>85</b>	<b>100</b>
Viscosidad cinemática a 135 °C(ASTM D 2170 AASHTO T201-01)	Cts.	193.4	206.6	<b>200</b>	<b>170</b>	-

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
 CARLOS SUBIA

TECNICO DEL LABORATORIO DE ASFALTOS

UAJMS

#### 4.4.2 Determinación del contenido de ligante en mezclas asfálticas por centrifugación-ensayo de extracción

Este ensayo se realiza para determinar cuantitativamente el contenido de ligante asfáltico en una mezcla, mediante el proceso de centrifugación, usando como materiales solventes en el proceso de centrifugación el tricloroetileno, cloruro de metileno o tricloroetano (usado en este caso gasolina), el peso del cemento asfáltico recuperado se lo expresa en porcentaje respecto al peso total de la muestra de mezcla asfáltica tomada.

Lo que se pretende es determinar el contenido de ligante presente en la mezcla extraída de cada tramo ya que esta influye en la estabilidad y fluidez de la capa de pavimento. El procedimiento está de acuerdo al método A0604 de los manuales de la ABC anexo 29.

Las tablas de datos y resultados son las siguientes:

**Tabla 4.12 Determinación del contenido de cemento asfáltico**



LABORATORIO DE SUELOS Y  
ASFALTOS

Tramo	Peso del material seco (gr) (horno a 110 °c)	Peso del material despues del centrifugo (gr) (horno a 110 °c )	Diferencia de peso en el material seco (gr)	% de cemento asfáltico	% de cemento asfáltico promedio
LA HIGUERA-COLON SUD	532.7	502.8	29.9	5.61	5.50
	531.9	503.3	28.6	5.38	
	532.4	503.1	29.3	5.50	

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
LABORATORIO DE SUELOS Y ASFALTOS  
EMPRESA CONSTRUCTORA ERIKA

**Tabla 4.13 Determinación del contenido de cemento asfáltico**



**LABORATORIO DE SUELOS  
ASFALTOS Y HORMIGONES**

<b>Tramo</b>	<b>Peso del material seco (gr) (horno a 110 °c)</b>	<b>Peso del material después del centrifugo (gr) (horno a 110 °c )</b>	<b>Diferencia de peso en el material seco (gr)</b>	<b>% de cemento asfáltico</b>	<b>% de cemento asfáltico promedio</b>
<b>Tolomosa-Pampa Redonda</b>	500	469.0	31.0	6.20	6.05
	500	469.6	30.4	6.08	
	500	470.7	29.3	5.86	
<b>Bermejo-km 16</b>	500	469.5	30.5	6.10	6.07
	500	469.6	30.4	6.08	
	500	469.8	30.2	6.04	
<b>Nueva terminal de buses Tarija</b>	500	471.4	28.6	5.72	5.77
	500	471.1	28.9	5.78	
	500	471.0	29.0	5.8	

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
**LABORATORIO DE SUELOS ASFALTOS Y HORMIGONES**

SERVICIO DEPARTAMENTAL DE CAMINOS

#### 4.4.3 Ensayos de estabilidad y Deformación

Los ensayos de estabilidad y fluidez o deformación de la mezcla extraída en los núcleos, serán realizados de acuerdo al procedimiento del METODO AASHTO T 245-97, el cual es utilizado para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall.

Estos ensayos son determinados para cada sector o tramo carretero correspondiente los cuales tienen un PG o rango de temperatura de servicio propio de cada región, a la cual la mezcla asfáltica está siendo sometida a lo largo de su vida útil.

Los datos lecturados en el aparato y con resultados corregidos (unidades) son los siguientes:

**Tabla 4.14 Ensayo de estabilidad y fluencia**



LABORATORIO DE SUELOS Y  
ASFALTOS

Tramo	n° de núcleo	Estabilidad (lb)	Fluidez (plg)
<b>La Higuera-Colon Sud</b>	1	1588.45	12.40
	2	1589.34	12.40
	3	1588.91	12.40
	4	1589.87	12.41
	5	1599.14	12.48
	6	1592.49	12.43
	7	1591.00	12.42
	8	1589.24	12.40
	9	1589.18	12.40

	10	1596.42	12.46
	11	1589.12	12.40
	12	1598.64	12.48
	13	1593.21	12.43
	14	1590.33	12.41
	15	1592.55	12.43
	16	1589.27	12.40
	17	1590.26	12.41
	18	1589.72	12.41
	19	1596.00	12.45
	20	1591.34	12.42
	21	1593.27	12.43
	22	1588.96	12.40
	23	1588.32	12.40
	24	1588.71	12.40
	25	1588.63	12.40
	26	1589.38	12.40
	27	1589.84	12.41
	28	1599.11	12.48
	29	1595.48	12.45
	30	1590.59	12.41

	31	1588.96	12.20
	32	1588.96	12.40

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
**LABORATORIO DE SUELOS Y ASFALTOS**  
 EMPRESA CONSTRUCTORA ERIKA

**Tabla 4.15 Ensayo de estabilidad y fluencia**



**LABORATORIO DE SUELOS,  
 ASFALTOS Y HORMIGONES**

<b>Tramo</b>	<b>n° de núcleo</b>	<b>Estabilidad (lb)</b>	<b>Fluidez (plg)</b>
<b>Tolomosa-Pampa Redonda</b>	1	1875.34	12.84
	2	1880.44	12.88
	3	1864.35	12.77
	4	1855.86	12.71
	5	1839.42	12.60
	6	1837	12.58
	7	1828.77	12.52
	8	1824.48	12.49
	9	1867.22	12.79
	10	1832.25	12.55
	11	1841.74	12.61

	12	1824.69	12.49
	13	1801.33	12.33
	14	1866.42	12.78
	15	1849.84	12.67
	16	1836.18	12.57
	17	1871.36	12.81
	18	1868.62	12.80
	19	1809.24	12.39
	20	1826.72	12.51
	21	1855.74	12.71
	22	1835.92	12.57
	23	1864.44	12.77
	24	1826.97	12.51
	25	1840.36	12.60
	26	1846.78	12.65
	27	1820.57	12.47
	28	1872.69	12.82
	29	1801.17	12.7
	30	1825.43	12.5
<b>Bermejo-km 16</b>	1	2844.81	10.1
	2	2914.64	10.35

	3	2987.33	10.61
	4	2789.19	9.90
	5	2655.94	9.43
	6	2777.35	9.86
	7	2846.72	10.11
	8	2910.44	10.33
	9	2866.48	10.18
	10	2780.66	9.87
	11	2879.62	10.22
	12	2865.68	10.17
	13	2905.31	10.31
	14	2675.56	9.50
	15	2871.18	10.19
	16	2867.41	10.18
	17	2899.42	10.29
	18	2844.85	10.10
	19	2647.69	9.40
	20	2864.86	10.17
	21	2738.17	9.72
	22	2461.71	8.74
	23	2678.52	9.51

	24	2932.45	10.41
	25	2779.46	9.87
	26	2689.32	9.55
	27	2867.41	10.18
	28	2835.74	10.07
	29	2740.76	9.73
	30	2987.45	10.38
<b>Nueva terminal de buses Tarija</b>	1	1843.06	13.9
	2	1809.99	13.12
	3	1820.46	13.20
	4	1867.25	13.54
	5	1932.47	14.01
	6	1972.66	14.30
	7	1847.78	13.39
	8	1858.69	13.47
	9	1874.65	13.59
	10	1916.82	13.89
	11	1898.61	13.76
	12	1903.12	13.80
	13	1935.74	14.03
	14	1964.24	14.24

	15	1896.34	13.75
	16	1845.74	13.38
	17	1931.75	14.00
	18	1924.77	13.95
	19	1864.54	13.52
	20	1873.34	13.58
	21	1867.54	13.54
	22	1926.11	13.96
	23	1877.95	13.61
	24	1897.71	13.76
	25	1889.32	13.70
	26	1912.65	13.86
	27	1897.32	13.75
	28	1932.58	14.01
	29	1884.35	13.66
	30	1817.35	13.17

**Fuente: Elaboración propia**

.....  
**LABORATORIO DE SUELOS ASFALTOS Y HORMIGONES**  
SERVICIO DEPARTAMENTAL DE CAMINOS

## 4.5 Análisis de resultados

### 4.5.1 Grado de desempeño de los ligantes asfálticos

La determinación del grado de desempeño para la clasificación de los cementos asfálticos en sectores de nuestro medio, arroja resultados como se muestran en la tabla 4.16, los cuales están en función principalmente de las temperaturas extremas ambientales de cada región donde se encuentra los tramos con pavimento flexible.

Las temperaturas históricas del aire registradas a lo largo del tiempo nos proporcionan los datos de las máximas y mínimas extremas temperaturas que ocurren en un sector en particular, las cuales afectan de sobremanera en este caso al comportamiento físico o desempeño que tenga la mezcla asfáltica de las capas de rodaje.

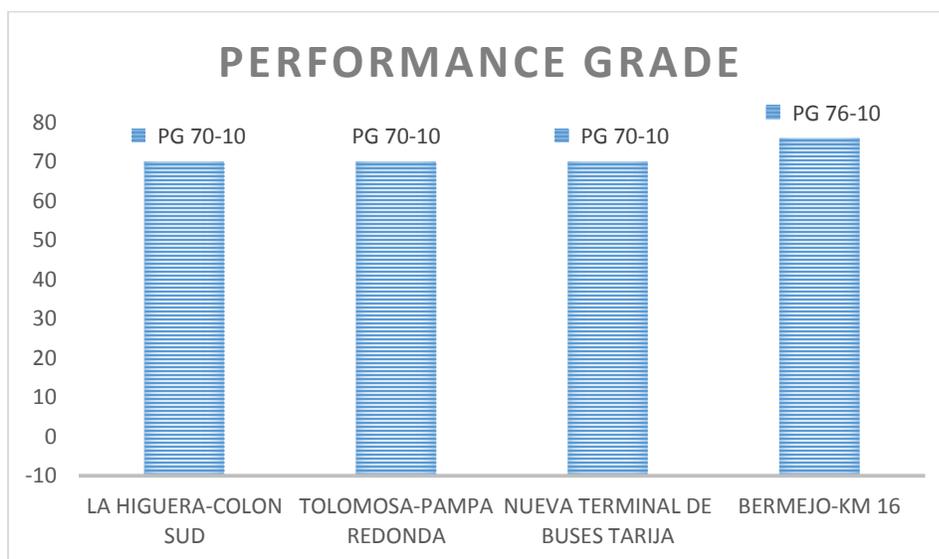
Las temperaturas extremas promediadas y convertidas a temperaturas del pavimento mediante los algoritmos mencionados anteriormente y ajustadas en función de parámetros de diseño como la velocidad y la cantidad de vehículos esperada por carril en 20 años, nos muestran los rangos de comportamiento físico real que tendrá un cemento asfáltico en la mezcla durante su servicio.

**Tabla 4.16: Grado de desempeño PG para cementos asfálticos en función de las temperaturas de los sectores**

Sector:	Performance grade	
	Alto	Bajo
Nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija	70	-10
Bermejo-km 16	76	-10
Tolomosa-Pampa Redonda	70	-10
La Higuera-Colon Sud	70	-10

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 4.1: Grado de desempeño para los cemento asfálticos analizados**



**Fuente: Elaboración propia**

Estos rangos de desempeño obtenidos para cada sector nos determinan que un cemento asfáltico por ejemplo será clasificado como PG 70-10 para el sector de la provincia Cercado; es decir que para la elección del ligante asfáltico en este sector le corresponde ser considerados dentro de este rango las pruebas de comportamiento físico propuestas por SUPERPAVE las cuales deben cumplir las especificaciones para este PG, teniendo de esta manera la selección de un ligante asfáltico que cumpla con un adecuado comportamiento físico real y desde luego su desempeño sometido a las cargas de diseño y la temperaturas de servicio, sea el más favorable para que las fallas en la estructura de rodaje que pudieran presentarse, sean las mínimas posibles.

Cabe recordar que este sistema fue implementado por que el sistema de clasificación por penetración si bien nos clasifica a los cementos con un mismo tipo de clasificación a una temperatura de 25 °C, el ligante puede presentar viscosidades diferentes a la misma temperatura; es decir que el comportamiento físico depende en gran mayoría de la temperatura de exposición, de su composición y del tiempo de carga.

La clasificación por viscosidad de igual manera nos clasifica a los ligantes asfálticos a 60 °C, los cuales a esta temperatura pueden tener el mismo grado o consistencia, pero no tendrán la misma consistencia a diferentes temperaturas.

Es decir que no se comportaran o no tendrán esta consistencia a otras temperaturas diferentes a 60 °C ya sean altas o bajas temperaturas de servicio.

Es por ello que este nuevo sistema de clasificación lo que hace es mejorar y predecir el comportamiento del ligante en el lugar donde será colocado, es decir por ejemplo en este caso para el PG 70-10 mantiene los requisitos de la propiedad física, pero lo hace cumplir a diferentes temperaturas dentro del rango 70 °C y -10 °C.

Es importante remarcar que en esta investigación no se realizaron las pruebas de laboratorio al ligante dentro del nuevo paquete de ensayos de SUPERPAVE por la limitante de que no existen los mismos en los laboratorios de nuestro medio, sino más bien se determina los PG de estos sectores para conocer bajo qué circunstancias extremas de temperaturas de servicio están trabajando los pavimentos de los tramos dentro del cada sector y dejar a disposición los rangos PG de las regiones analizadas para la consideración en futuras pavimentaciones cercanas a estos lugares teniendo así de esta manera la información disponible en la tabla 4.02.

En este caso como se dijo anteriormente por falta de equipamiento es que también no se realizara el diseño granulométrico de la mezcla asfáltica por el método de SUPERPAVE lo cual sería ideal para una comparación entre la mezcla extraída de campo y el diseño de la mezcla de SUPERPAVE dentro del rango de PG determinado para cada sector. Esto podría mostrar la variación de comportamiento de la mezcla para ambos casos y verificar el desempeño de ambas bajo las condiciones reales de cada sector en particular.

#### 4.5.2 Influencia del PG en el costo del cemento asfáltico y mezclas por áreas diferentes de PG.

Los resultados arrojados por el análisis de precios unitarios para el costo unitario de pavimentación según el tipo de ligante asfáltico son los siguientes:

**Tabla 4.17 Costo por m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica según ligante**

Tipo	Ligante				
	PG 70-16	PG 76-22	PG 76-28	85/100	60/70
<b>Precio unitario de mezcla bs/m<sup>3</sup></b>	1743.78	1743.78	1743.78	1733.88	1733.88

**Fuente: Elaboración propia**

Los resultados obtenidos después del análisis de precio unitario para una mezcla en particular, demuestran los siguientes aspectos que son muy importantes:

No existe variación de costo final unitario por áreas diferentes de PG

Existe una variación del 0.6 % del costo unitario entre el uso de un ligante convencional y un ligante clasificado por grado de desempeño PG.

Para este trabajo de investigación no se pudo obtener precios unitarios para ligantes del tipo 70-10 y 76-10 los cuales corresponden a los sectores en estudio, pero se pudo determinar con otros tipos de PG que la relación de áreas diferentes de PG no es un factor que influya en el costo directo del ligante, sino que serán otros parámetros como la lejanía del lugar de pavimentación donde serán considerados en el precio productivo del costo unitario para el ligante.

Por otro lado relacionando la utilización de un ligante clasificado como convencional y otro por PG en el pavimento, es que se tiene relativamente poca diferencia de costo final del pavimentado, en este caso 0.6% que equivale a 10 bs/m<sup>3</sup> de incremento; pero como SUPERPAVE indica y es el objetivo final de la utilización de este método, es que brinda ventajas de comportamiento del pavimento bajo condiciones reales de funcionamiento en particular para cada área diferente de PG, lo cual hace de que se tengan a futuro seguramente ahorros en labores de mantenimiento y reparación.

### 4.5.3 Relación de PG con las características de los cementos asfálticos de los tramos

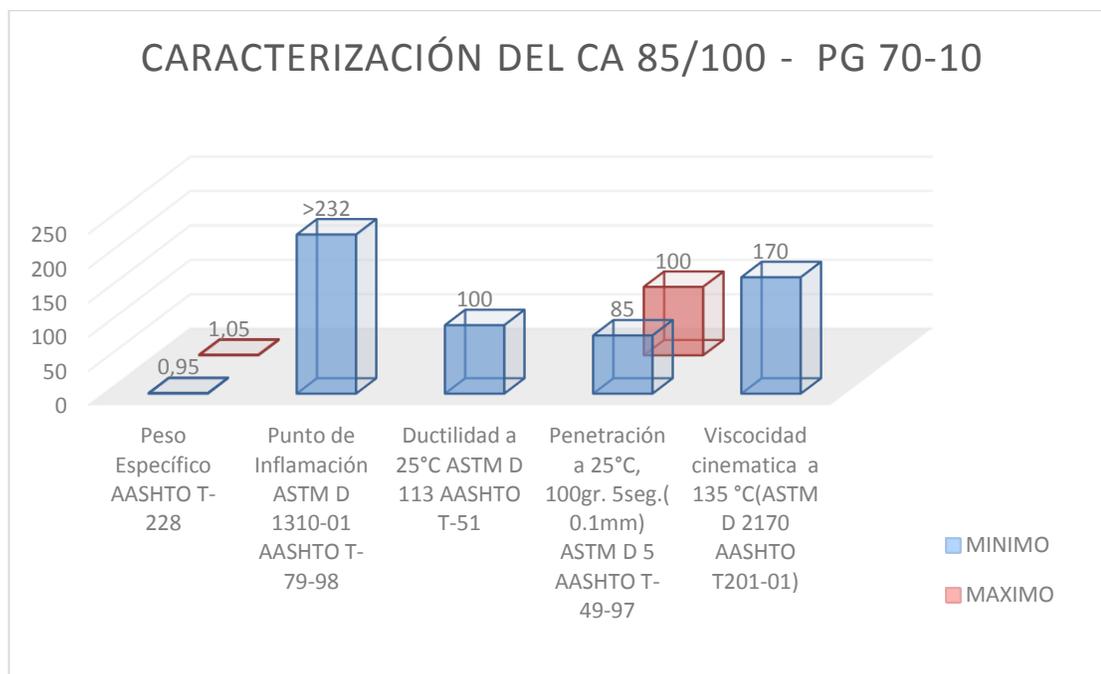
El tipo de clima en Tarija es variable, con temperaturas del aire que superan los 40 °C y en invierno están alrededor de -10 °C en algunos sectores, haciendo que la elección de un ligante asfáltico sea muy importante ya que este estará sujeto a cambios de temperatura y deberá ser capaz de soportar satisfactoriamente dichos cambios sin sufrir daños en el conjunto con la mezcla asfáltica es por ello que al conocer las temperaturas del pavimento para la zona en la cuales el cemento asfáltico debe desempeñarse físicamente de manera óptima, se determinaron para los 4 tramos las características del ligante asfáltico las cuales se presentan para los PG encontrados, los cuales tres de ellos corresponden a un PG 70-10, uno a PG 76-10 y éstos a su vez después de su caracterización por los métodos tradicionales presentan y cumplen sus especificaciones para los siguientes tipos:

**Tabla 4.18 Caracterización para un ligante 85/100 –PG 70-10**

Ensayo	Unidad	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
<b>Peso Específico AASHTO T-228</b>	<b>grs./cm<sup>3</sup></b>	0.95	1.05
<b>Punto de Inflamación ASTM D 1310-01 AASHTO T-79-98</b>	<b>°C</b>	>232	
<b>Ductilidad a 25°C ASTM D 113 AASHTO T-51</b>	<b>cm.</b>	100	
<b>Penetración a 25°C, 100gr. 5seg.( 0.1mm) ASTM D 5 AASHTO T-49-97</b>	<b>mm</b>	85	100
<b>Viscosidad cinemática a 135 °C(ASTM D 2170 AASHTO T201-01)</b>	<b>Cts.</b>	170	

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 4.2 Ligante 85/100 PG 70-10**



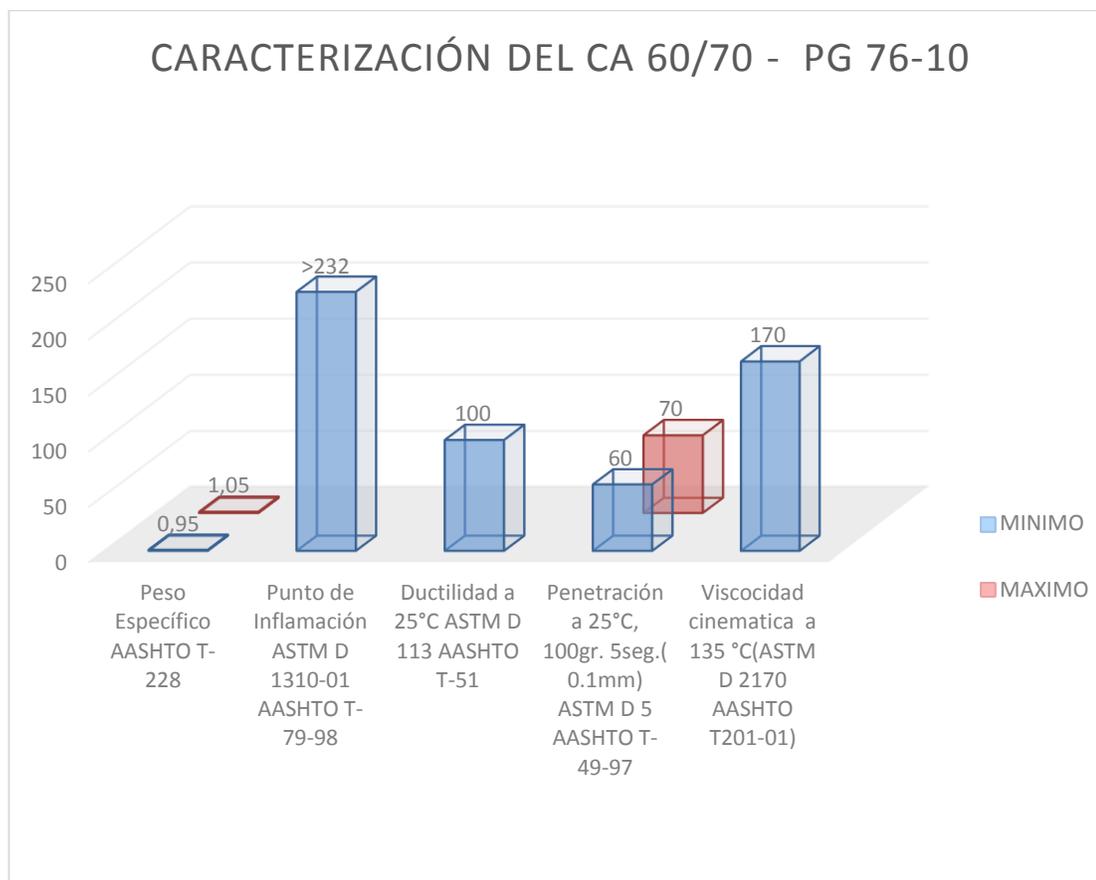
**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 4.19 Caracterización para un ligante 60/70 PG 76-10**

Ensayo	Unidad	Especificaciones	
		Mínimo	Máximo
<b>Peso Específico AASHTO T-228</b>	<b>grs./cm<sup>3</sup></b>	0.95	1.05
<b>Punto de Inflamación ASTM D 1310-01 AASHTO T-79-98</b>	<b>°C</b>	>232	
<b>Ductilidad a 25°C ASTM D 113 AASHTO T-51</b>	<b>cm.</b>	100	
<b>Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (0.1mm) ASTM D 5 AASHTO T-49-97</b>	<b>mm</b>	60	70
<b>Viscosidad cinemática a 135 °C (ASTM D 2170 AASHTO T201-01)</b>	<b>Cts.</b>	170	

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 4.3 Ligante 60/70 PG 76-10**



**Fuente: Elaboración propia**

Esto significa que conociendo el PG para las zonas de los tramos Tolomosa-Pampa Redonda, La Higuera Colon y el sector de parqueos de la Nueva Terminal de buses de Tarija, el cual es un 70-10, las características y especificación correspondientes del ligante 85/100 corresponden en nuestro medio para estas condiciones de PG y las cuales son las correspondientes a la tabla 4.18

Para el sector de Bermejo el cual presenta un PG 76-10 las características del ligante asfáltico responden las especificaciones de la tabla 4.19 para un ligante clasificado por penetración como 60/70 para climas con predominancia de características tropicales.

Si bien esta caracterización no es la que deberíamos hacer por SUPERPAVE, es la realizada con los equipos tradicionales de clasificación de ligantes con los que cuentan laboratorios de nuestro medio, dichas características son transmitidas a la mezcla asfáltica en el pavimentado e influyen como parte del comportamiento físico de la misma.

#### **4.5.4 Trabajo de laboratorio para la verificación de estabilidad y fluidez a la mezcla asfáltica de los tramos**

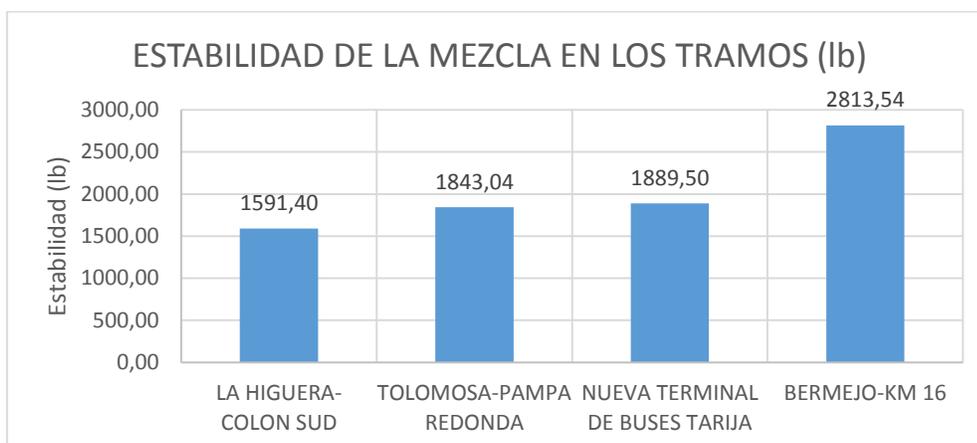
En esta investigación también se realizaron ensayos a los núcleos extraídos de cada uno de los tramos analizados, para lo cual se siguieron los procedimientos de realización de cada ensayo tal y como se especifica en los manuales de la ABC, anexo 5.

**Tabla 4.20 Estabilidad y fluidez de la mezcla asfáltica**

<b>Tramo</b>	<b>Estabilidad promedio (lb) <math>\geq 1500</math></b>	<b>Fluidez promedio (plg) 8 a 18</b>
<b>la Higuera-Colon Sud</b>	1591.40	12.41
<b>Tolomosa-Pampa Redonda</b>	1843.04	12.63
<b>Nueva terminal de buses Tarija</b>	1889.50	13.71
<b>Bermejo-km 16</b>	2813.54	9.98

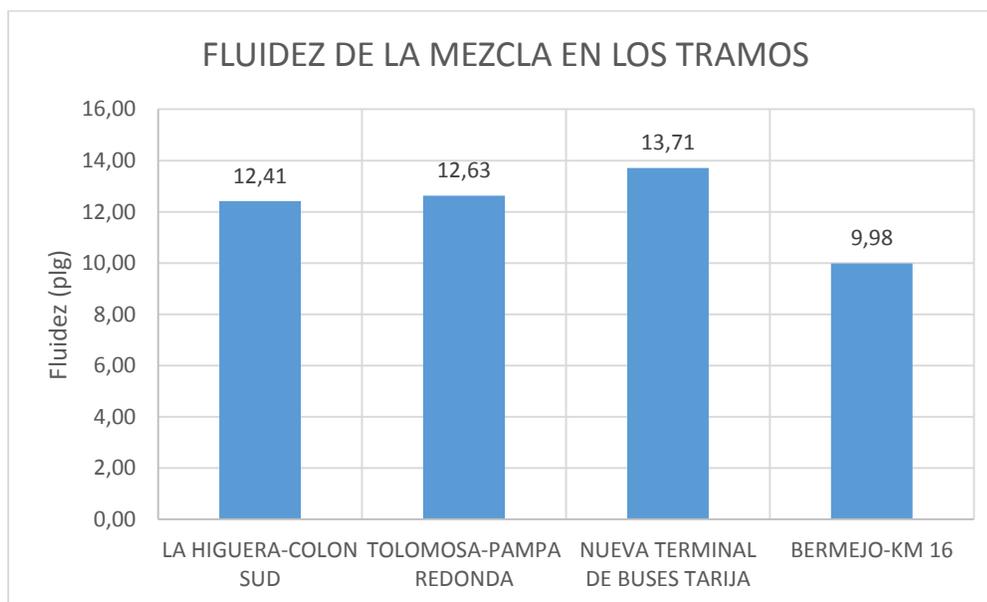
**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 4.4 Estabilidad de la mezcla asfáltica**



**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 4.5 Fluidez de la mezcla asfáltica**



**Fuente: Elaboración propia**

En los figuras 4.4 y 4.5 se puede ver que para los tramos en donde se utilizó CA convencional 85/100 para tramos con climas de características templados

correspondientes a un PG 70-10, las lecturas de estabilidades son parecidas entre sí presentando valores entre 1591.4 y 1843.04 lb a diferencia de Bermejo donde se usó ligante 60/70 se tiene que para un PG 76-10 la estabilidad de la mezcla del tramo se eleva a 2813.54 lb. De la misma manera las lecturas promediadas de fluidez, entre sí tienen similitud para sectores con características climáticas promedio similares PG 70-10 con valores de 12.41 a 13.71 plg y en Bermejo la fluidez baja a 9.98 plg para un PG 76-10

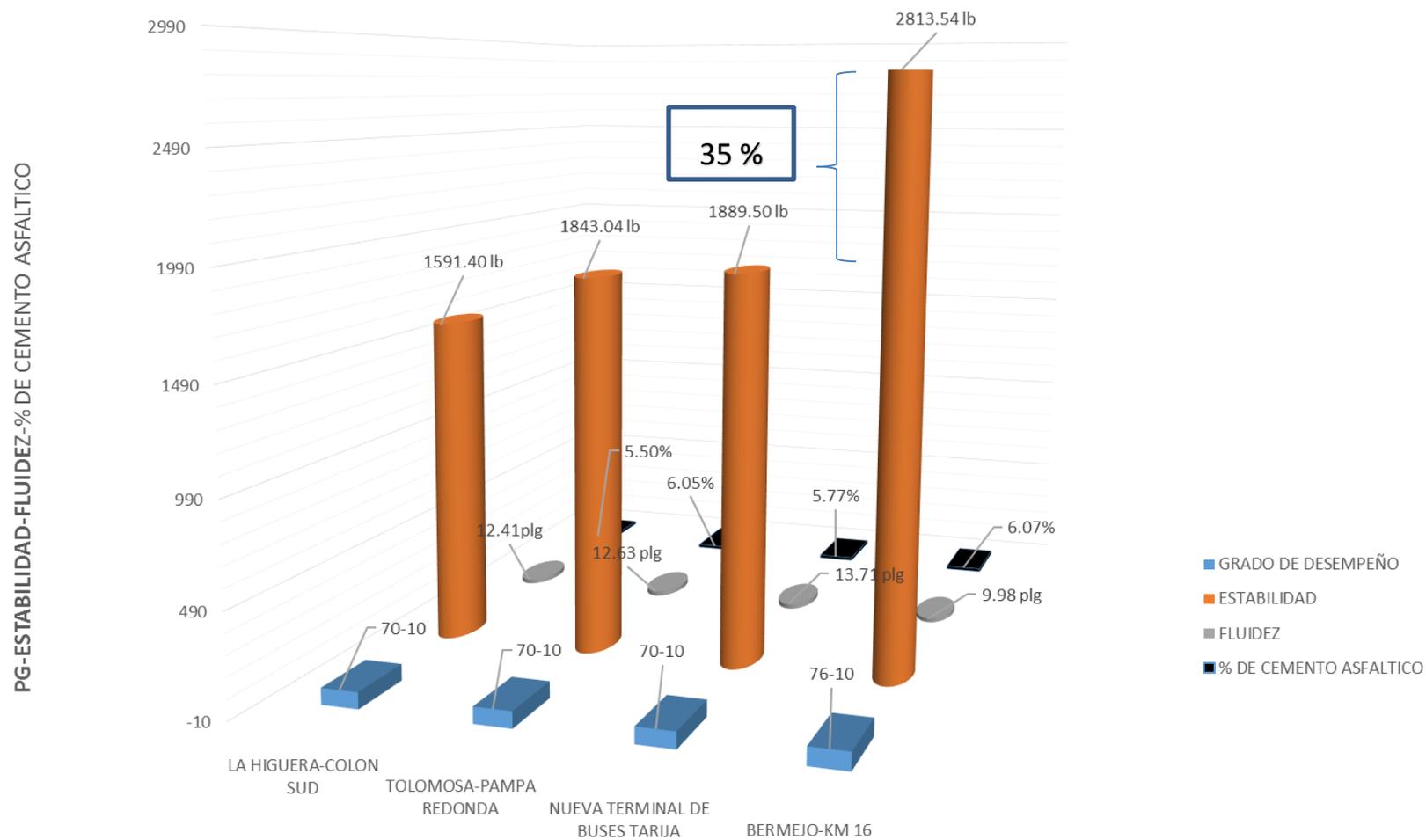
Para el ligante correspondiente a PG 76-10 el cual es utilizado para climas de característica tropicales, la estabilidad es mayor, ya que como durante la mayor parte del tiempo el clima tiende a mantenerse bajo la acción casi permanente de elevadas temperaturas, el tipo de ligante debe tener mayor consistencia por lo que la fluidez en este caso es menor.

**Tabla 4.21 Estabilidad-fluidez-contenido asfáltico correspondientes a los Grados de Desempeño determinados para los sectores analizados**

<b>Tramo</b>	<b>Grado de desempeño</b>	<b>Estabilidad (lb)</b>	<b>Fluidez (plg)</b>	<b>% de cemento asfáltico</b>
<b>La Higuera-Colon Sud</b>	70-10	1591.40	12.41	5.50
<b>Tolomosa-Pampa Redonda</b>	70-10	1843.04	12.63	6.05
<b>Nueva terminal de buses Tarija</b>	70-10	1889.50	13.71	5.77
<b>Bermejo-km 16</b>	76-10	2813.54	9.98	6.07

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 4.6 Relación PG con características de la mezcla de los tramos**



**Fuente: Elaboración propia**

Agrupando los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras de mezcla asfálticas de los cuatro tramos escogidos del departamento de Tarija como se muestra en la figura 4.8, se puede determinar que en estos tramos con los porcentajes de ligante asfáltico encontrados en los núcleos y dentro de los rangos de PG correspondiente a los sectores, se tiene que para rangos de PG correspondientes a 70-10 °C la estabilidad tiene valores cercanos entre si y que a su vez menor en un promedio de 35% respecto al sector de PG 76-10 del tramo de Bermejo.

La fluidez a su vez para los sectores de la provincia Cercado y Avilés tiene en valores de 12.41, 12.63 y 13.71 plg y para un sector con PG 76-10 la fluidez se reduce a casi 10 plg.

Existe en este caso una variación del 22.7% aproximadamente de fluidez entre las mezclas correspondientes a los tramos con PG 70-10 y 76-10 respectivamente.

El comportamiento de la mezcla asfáltica de estos sectores probablemente tendría mejores y adecuadas características físicas si esta hubiera sido diseñada tanto la granulometría como la elección del ligante por SUPERPAVE, la cual ofrece resultados para diseño en condiciones propias de temperatura del pavimento del sector donde se emplaza la vía.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

La determinación del grado de desempeño correspondiente a cementos asfálticos para las regiones analizadas, permite tener una información clara de la variación de las temperaturas de servicio a las cuales están sometidos los cementos asfálticos en funcionamiento dentro de la mezcla a lo largo de su vida útil.

Se puede evidenciar que en el valle central de Tarija, compuesto en este caso por los sectores correspondientes a los tramos carreteros construidos de Tolomosa-Pampa Redonda, Bermejo-Km 16 y el parque en la nueva Terminal de Buses de Tarija, el PG para estos sectores tiene el mismo rango 70-10 °C, y en la provincia Arce perteneciente a una región de características tropicales como lo es Bermejo, el PG es 76-10 °C, ya que la mayor parte del tiempo las características son de temperaturas mayormente elevadas, haciendo de que la amplitud en el PG en este caso sea mayor.

De tal forma, es que después de analizar las temperaturas medias y extremas ambientales convirtiendo estas últimas a temperaturas de servicio de pavimento como un indicador de comportamiento físico para clasificar a los ligantes asfálticos, se tiene las siguientes conclusiones:

Para cuatro sectores de Tarija analizados se tienen 2 indicadores de clasificación PG correspondientes a 70-10 y 76-10 °C.

Después de realizado un análisis de precios unitario, es que para sectores diferentes de PG no influye económicamente el que un PG de un sector sea diferente otro respecto al ligante que se usará en éstos.

La utilización de un ligante clasificado por PG respecto a la utilización de un ligante convencional, económicamente está con una variación de alrededor del 0.6 % de diferencia, estando por encima un ligante clasificado por grado de desempeño, es decir que para pavimentar un m<sup>3</sup> con un ligante convencional respecto a un ligante

clasificado por PG, la diferencia de costo esta alrededor de 10 bs, siendo mas caro el ligante clasificado por PG.

Al relacionar la utilización de los ligantes convencionales en nuestro medio, es que se puede determinar que en climas de características templadas como lo son los sectores de Tolomosa-Pampa Redonda, La Higuera-Colon Sud y el sector de la Nueva Terminal de Buses de Tarija, se utiliza o es apto tradicionalmente el ligante 85/100, pero que analizando las temperaturas donde se utiliza este ligante le corresponde un ligante clasificado por PG 70-10 °C el cual desde luego físicamente sus propiedades se desempeñan y corresponden de manera más óptima al rango de temperaturas de diseño o PG de estos sectores.

De la misma forma para un clima de características tropicales, en éste caso el sector de Bermejo, tradicionalmente se utiliza un ligante 60/70 y que realizando la determinación del PG a este le corresponde un ligante PG 76-10 °C.

Conociendo el PG como indicador para las zonas analizadas es que se determina la caracterización tanto del ligante como de núcleos de mezcla extraídos de campo para los correspondientes rangos de temperaturas de servicio PG 70-10 y 76-10 °C calculados.

Dentro de la caracterización tradicional por ASSHTO los resultados obtenidos para los ligantes están dentro de sus especificaciones y estas a su vez conociendo que un ligante 85/100 corresponde a características templadas de temperatura el cual corresponde a su vez para un PG 70-10 °C, y las características del ligante 60/70 corresponden para un clima tropical y estas características están dentro de un PG 76-10 °C.

Realizada también la caracterización a los núcleos es que se determina que entre PG 70-10 y 76-10 °C, el comportamiento físico en cuanto a estabilidad tiene una variación aprox. Del 35 % y en fluidez del 27 %. Es decir que para un rango mayor (temperatura máxima más elevada) de PG, la estabilidad es mayor y la deformación es menor en los porcentajes mencionados para los sectores analizados.

## **5.2 Recomendaciones**

Que este trabajo de investigación sirva de conocimiento para que en futuro los docentes tengan una base de cómo funciona este sistema de clasificación y que ahondando en el mismo se pueda impartir y poner en práctica dicho método.

Es importante también gestionar la obtención del paquete de equipos que son necesarios e imprescindibles para las pruebas exigidas por el método y no tener así la limitante que se presentó en esta investigación.

Es necesario poner en práctica este método ya que se presentan en la gran mayoría de nuestras carreteras fallas de comportamiento físico de la capa de rodaje, siendo la solución actual a este tipo de problemas la producción de mezcla en caliente con granulometría SUPERPAVE (el cual es otro tema más amplio), y la selección del ligante con Grado de Desempeño (PERFORMANCE GRADE).