

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Como es de conocimiento a nivel mundial, la construcción de caminos es un factor determinante para el desarrollo estratégico y económico de cualquier país, puesto que a través de los mismos se logra vincular ciudades importantes, departamentos y por ende la articulación del país generando un desarrollo económico además de reducir el costo de transporte de pasajeros como el de mercaderías, situación que ha hecho que la ingeniería dedique mayores esfuerzos a reducir el costo en la construcción de carreteras, además de la resistencia y durabilidad de estas estructuras en el tiempo.

En la actualidad, el pavimento asfáltico es la alternativa más usada en la infraestructura que compone la red vial de Bolivia, razón por la cual es importante conocer y estar al tanto de nuevos avances que permitan incrementar la vida útil y la calidad de éste.

El cemento asfáltico es un material de color marrón oscuro a negro, cementante, termoplástico encontrado en un estado natural u obtenido como residuo en la refinación del petróleo crudo.

Como ya es de entendimiento la ductilidad juega un papel importante en las propiedades de los asfaltos puesto que la misma es: la capacidad de un material de sufrir alargamientos sin disgregación de su masa; debido a la ductilidad el asfalto puede ser sometido a la acción de continuas fuerzas de tracción y compresión; que las resiste deformándose pero sin romperse. Se utiliza en mezclas asfálticas como aglomerante o ligante para la construcción de caminos, mezclando usualmente con áridos pétreos.

Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes. Por otra parte, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura, soportando las fuerzas de tracción y compresión generadas por el tráfico.

Por todo lo expuesto con anterioridad el presente trabajo de investigación está orientado a realizar el análisis de la incidencia de la temperatura en la ductilidad, de los cementos asfálticos convencionales, mediante ensayos de laboratorio para poder establecer el comportamiento de las propiedades mecánicas de los mencionados cementos asfálticos, con el fin de realizar la aplicación de los mismos de manera más adecuado según sus propiedades.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En el desempeño del asfalto uno de los aspectos importantes es la temperatura a la que éste se exponga, motivo por el cual se considera importante el análisis de la ductilidad en función a la variación de la temperatura ya que en el departamento no se cuenta con un análisis de la ductilidad en función a la incidencia de sus propiedades, ya que la ductilidad es la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.

Puesto que en Bolivia la alternativa más usada en la construcción de carreteras es la de pavimentos flexibles, situación que hace importante el conocer la incidencia de la ductilidad en las propiedades de los cementos asfálticos para incrementar la vida útil y la correcta aplicación de estos pavimentos. Ya que los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes, por otra parte, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura.

En otros términos, un asfalto es dúctil cuando la relación entre el alargamiento longitudinal producido por una tracción y la disminución de la sección transversal es muy elevada.

Razón que hace necesaria la obtención de una relación entre la ductilidad del asfalto y las demás propiedades de éste, con lo cual se logre determinar la incidencia de la ductilidad en el comportamiento de las propiedades de los cementos asfálticos convencionales. Esto permitirá observar a través de los ensayos de laboratorio realizados con el ductilímetro los parámetros de los resultados de la variación de la

temperatura para analizar cuál es el cemento asfáltico más adecuado en función de la temperatura.

Por lo tanto es importante la aplicación del análisis de la ductilidad para la determinación de su incidencia en las propiedades de los cementos asfálticos convencionales, ya que será de gran beneficio para profesionales del medio, estudiantes, instituciones y universidades.

Además del aporte académico importante que se obtendrá con este trabajo de investigación, esto permitirá lograr el grado académico de licenciatura en ingeniería civil.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA

El efecto de la temperatura sobre las carpetas de rodadura asfálticas es un aspecto que cada vez toma más importancia en el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

En la Provincia de Cercado del Departamento de Tarija la variación de temperatura opta rangos más grandes con el transcurso del tiempo, es decir, que en los veranos la temperatura aumenta y en invierno disminuye con relación a años anteriores. El pavimento flexible es la alternativa más usada en la infraestructura vial de esta región, donde su capa superficial de rodadura es una mezcla asfáltica sometida a temperaturas elevadas.

El comportamiento del asfalto utilizado en las vías de comunicación regional depende de la temperatura y el tiempo de carga. A altas temperaturas o bajo cargas sostenidas, el cemento asfáltico actúa como un líquido viscoso y fluye. La viscosidad es la característica que describe la resistencia de los líquidos a fluir. En climas cálidos algunos pavimentos asfálticos fluyen bajo cargas repetidas y forman ahuellamientos. A bajas temperaturas o los tiempos de cargas muy rápidas, el asfalto se comporta como un sólido elástico, es decir, se deforman al ser cargados y retornan a su forma original

al ser descargados. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura, puede volverse demasiado frágil y agrietarse o romperse bajo una carga excesiva. Es por esto que el agrietamiento a baja temperatura a veces ocurre en pavimentos asfálticos en clima frío.

La oxidación del asfalto cambia la estructura y composición de sus moléculas. El resultado es una estructura más frágil, y es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento. El endurecimiento por oxidación es estacional, y es más marcado en verano que en invierno. Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos viejos son más susceptibles al agrietamiento que los nuevos. Incluso, los pavimentos asfálticos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente. Todos estos fenómenos hacen que el asfalto pierda sus propiedades y reduzca su tiempo de vida útil, generando así mayores gastos para su mantenimiento, reparación o en el peor de los casos colocar una nueva carpeta asfáltica.

Situación que denota claramente la necesidad del análisis de la incidencia de la ductilidad con la aplicación de la variación de la temperatura en las propiedades de los cementos asfálticos

1.3.2. PROBLEMA

¿Cómo analizar la incidencia de la ductilidad tomando en cuenta la aplicación de la variación de la temperatura en las propiedades de los cementos asfálticos convencionales mediante los ensayos de laboratorio?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

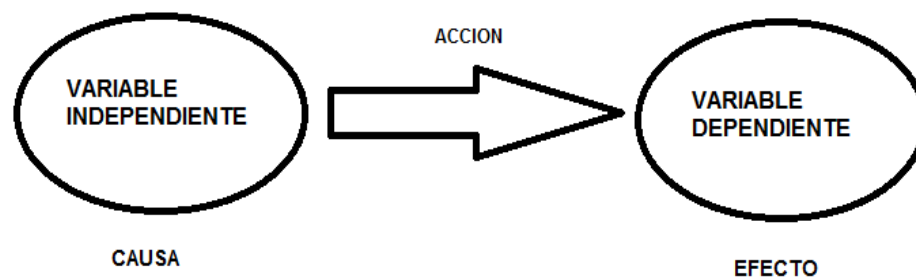
Analizar la ductilidad en función a la variación de la temperatura en cementos asfálticos convencionales, mediante ensayos de laboratorio según la normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), de tal manera se pueda establecer el comportamiento de sus propiedades.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar los ensayos de laboratorio para la obtención de resultados con la variación de temperatura.
- ✓ Analizar la ductilidad de los cementos asfálticos convencionales mediante la variación de temperatura
- ✓ Comparar las ductilidades en las diferentes muestras de cemento asfáltico convencional.
- ✓ Determinar la correlación de datos de ductilidad en modelos matemáticos con dos variables.
- ✓ Determinar correlaciones para datos de ductilidad en modelos matemáticos con tres variables.
- ✓ Proponer ecuaciones de la ductilidad en función a la variación de temperatura para la predicción del comportamiento de las propiedades de ductilidad, penetración y densidad en cementos asfálticos convencionales.
- ✓ Proponer rangos de trabajabilidad de la ductilidad en función a una temperatura de 25°C y a una penetración 85/100 y 60/70.
- ✓ Analizar la ductilidad mediante la variación de temperatura en las propiedades de penetración y densidad de los cementos asfálticos convencionales.

1.5. VARIABLES

FIGURA N° 1. 1. Gráfico Variable Dependiente – Variable Independiente.



FUENTE: Elaboración Propia.

1.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

- ✓ Temperatura

1.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE

- ✓ Ductilidad

1.5.3. VARIABLES INTERVINIENTES

- ✓ Penetración
- ✓ Densidad

1.5.4. CONCEPTUALIZACIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

1.5.4.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

TABLA N° 1. 1. Conceptualización y Operacionalización de Temperatura

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor - Acción
Temperatura	Se refiere a la magnitud física que refleja la intensidad del calor que posee un cuerpo sólido, líquido o gaseoso.	Cemento Asfáltico Convencional	Rango de Temperatura	Medición de la Temperatura con un Termómetro según norma ASTM.

FUENTE: Elaboración Propia.

1.5.4.2. VARIABLE DEPENDIENTE

TABLA N° 1. 2. Conceptualización y Operacionalización de Ductilidad

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor - Acción
Ductilidad	Es la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos al estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.	Cemento Asfáltico Convencional	Ensayo de Ductilidad	Caracterización
				Aplicación de variación de Temperatura de 10°C a 30°C.

FUENTE: Elaboración Propia.

1.5.3.3. VARIABLES INTERVINIENTES

TABLA N° 1. 3. Conceptualización y Operacionalización de Penetración

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor - Acción
Penetración	Se refiere a la distancia, expresada en décimas de milímetro, hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga,	Cemento Asfáltico Convencional	Ensayo de Penetración	Caracterización
				Aplicación de variación de Temperatura de 10°C a 30°C.

	tiempo y temperatura.			
--	-----------------------	--	--	--

FUENTE: Elaboración Propia.

TABLA N° 1. 4. Conceptualización y Operacionalización de Densidad

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor - Acción
Densidad	Es la proporción de la masa de cualquier volumen de material, bajo condiciones de temperatura especificada.	Cemento Asfáltico Convencional	Ensayo de Densidad	Caracterización
				Aplicación de variación de Temperatura de 10°C a 30°C.

FUENTE: Elaboración Propia.

1.6. HIPÓTESIS

La aplicación de la variación de la temperatura, en los ensayos de laboratorio de los cementos asfálticos convencionales, permitirá analizar la variación de la ductilidad para poder establecer el comportamiento de las propiedades de penetración y densidad.

1.7. ALCANCE

Dentro del alcance que se tiene previsto para esta investigación se efectuará lo siguiente:

- ✓ Realizar análisis de laboratorio a los cementos asfálticos convencionales, caracterizados con una penetración de 85/100 y 60/70.

- ✓ Caracterizar los cementos asfálticos según la norma boliviana ABC, con las herramientas y equipos disponibles en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho:
 - Ensayo de Penetración.
 - Ensayo de Ductilidad.
 - Ensayo de Densidad.
 - Ensayo de Punto de Inflamación.
 - Ensayo de Punto de Ablandamiento.
- ✓ Realizar ensayos de ductilidad para aplicar la variación de temperatura en el ductilímetro, para las muestras de los cementos asfálticos de distinta procedencia, Betupen Plus, Betunel, Greca y el Convencional 60/70, aumentando y disminuyendo la misma a partir de los 25°C, en $\pm 2^\circ\text{C}$ y 3°C .
- ✓ Efectuar una comparación del comportamiento de la ductilidad de los cementos asfálticos convencionales ensayados con la aplicación de la variación de la temperatura.
- ✓ Realizar una comparación entre los parámetros de los cementos asfálticos convencionales 85/100 y 60/70.
- ✓ Establecer un diagnóstico del comportamiento de la ductilidad en función de la variación de la temperatura para los cementos asfálticos convencionales.
- ✓ Elaborar gráficas de contorno y gráficas en 3 dimensiones para el análisis del comportamiento de las variables ductilidad, penetración y densidad, a través de la variación de la temperatura de los cementos asfálticos convencionales.
- ✓ Proponer rangos de trabajabilidad de la ductilidad en función a una temperatura de 25°C y a una penetración 85/100 y 60/70.
- ✓ Analizar las propiedades de la penetración y de la densidad mediante de la variación de la ductilidad en función a cambios de temperatura.

1.8. DISEÑO METODOLÓGICO

1.8.1. UNIDAD DE ESTUDIO

Es la unidad de la cual se necesita información, es el individuo o conjunto de individuos de donde se obtiene el dato; la unidad de estudio corresponde a la entidad que va a ser objeto de medición y se refiere al qué o quién es sujeto de interés en una investigación. La unidad de estudio o unidad de análisis está referida al contexto, característica o variable que se desea investigar. Es así como la unidad puede estar dada por una persona, un grupo, un objeto u otro que contengan claramente los eventos a investigar.

Por lo tanto, la unidad de estudio de la presente investigación son los cementos asfálticos convencionales.

El cemento asfáltico es un material formado por una mezcla compleja de hidrocarburos, de consistencia viscosa variable con la temperatura, pegajoso y de color negro.

1.8.2. POBLACIÓN

Es el conjunto de personas u objetos de los que se desea conocer algo en una investigación.

La población serán los cementos asfálticos convencionales clasificados por penetración, que se utilizarán en este trabajo de investigación, los cuales se enuncian a continuación:

- ✓ Cementos Asfálticos Convencionales 85/100
- ✓ Cemento Asfáltico Convencional 60/70

Estos cementos asfálticos convencionales son los utilizados en las obras viales del Departamento de Tarija.

1.8.3. MUESTRA

La muestra es una pequeña parte de la población. Los elementos de una población o un universo están compuestos por posibles muestras que tienen la probabilidad de ser

seleccionados. Por esas consideraciones la probabilidad de una muestra al ser elegida permite obtener una información representativa del interior o total de la población.

De la población se tomará la muestra, la cual será útil para la investigación de la incidencia de la variación de la ductilidad en las propiedades de densidad y penetración de los cementos asfálticos.

Por ende, la muestra serán los tres cementos asfálticos convencionales 85/100, con distinta procedencia, y el cemento asfáltico convencional 60/70 que se utilizarán en este trabajo de investigación, los cuales se enuncian a continuación:

- ✓ C.A. Betupen Plus 85/100
- ✓ C.A. Greca 85/100
- ✓ C.A. Betunel 85/100
- ✓ C.A. Convencional 60/70

Se tomarán en cuenta estos cementos asfálticos para la determinación de sus propiedades, los cuales serán sometidos a los ensayos de ductilidad, penetración y densidad en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.8.4. MUESTREO

Es el método utilizado para seleccionar a los componentes de la muestra del total de la población. El muestreo es una herramienta de investigación cuya función es determinar que parte de la población será objeto a estudio.

Por lo cual que para cada uno de los cementos asfálticos, Betupen Plus, Betunel, Greca y convencional 60/70, se realizarán 12 muestras para cada temperatura, desde los 10°C hasta los 30°C, lo que representará un total de 1296 muestras, donde se subdividirán en 432 muestras de ductilidad, 432 muestras de penetración y 432 muestras de densidad a partir de una temperatura de 25 °C y una velocidad constante de 5 centímetros por minuto, especificadas por la norma ABC.

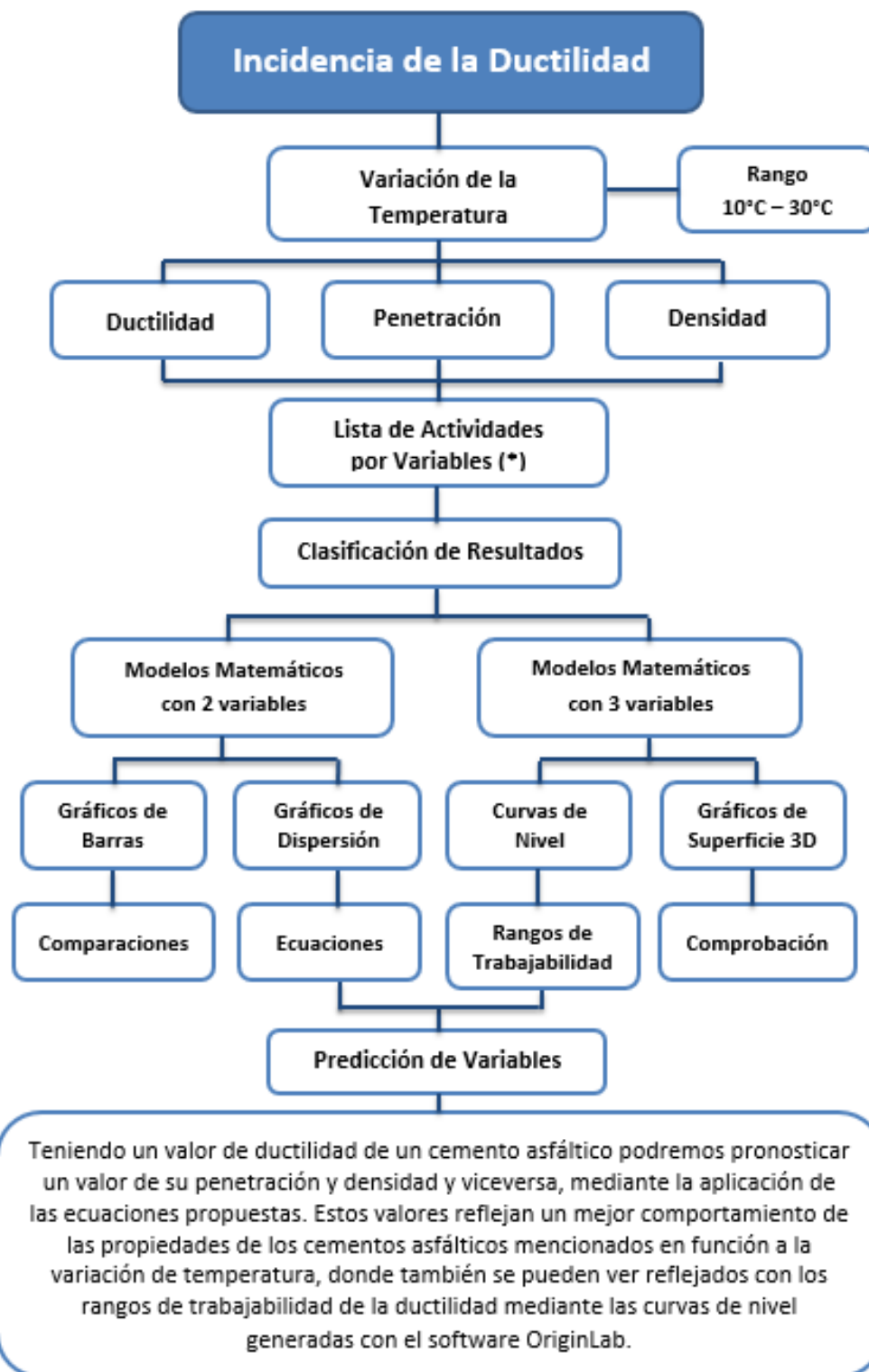
1.8.5. DISEÑO PATRÓN DE LA PERSPECTIVA “ANALIZAR”

Cada trabajo de investigación debe tener un criterio de organización según la perspectiva del autor. En este caso, se optó por establecer un análisis de la incidencia de la ductilidad en el comportamiento de propiedades de los cementos asfálticos convencionales.

Una vez determinado el objeto de estudio de la investigación, se procede a fragmentar éste en varios objetos de estudio para poder analizar todo el conjunto de una manera más precisa, y así obtener una clasificación de los resultados más detallada.

A continuación, se presenta el siguiente mapa conceptual de la organización del trabajo de investigación, seguido por las listas de actividades por variables y sus respectivos productos:

FIGURA N° 1. 2. Modelo Patrón de la Perspectiva Analizar



FUENTE: Elaboración Propia.

1.8.5.1. LISTA DE ACTIVIDADES POR VARIABLES (*)

TEMPERATURA.-

1. Variación de temperatura, para los ensayos de laboratorio de cementos asfálticos convencionales, con un rango desde los 10°C hasta los 30°C.

1.1. Aplicación del rango de temperatura para el ensayo de Ductilidad.

1.2. Aplicación del rango de temperatura para el ensayo de Penetración.

1.3. Aplicación del rango de temperatura para el ensayo de Densidad.

DUCTILIDAD.-

1. Caracterización de los cementos asfálticos convencionales mediante el ensayo correspondiente para esta variable.

2. Aplicación del rango de temperatura para el ensayo de Ductilidad para los cuatro cementos asfálticos convencionales.

3. Discretización de datos de la ductilidad para diferentes temperaturas mediante la aplicación de estadística.

4. Comparación de ductilidades en las diferentes muestras de cemento asfáltico convencional en función al rango la temperatura estipulada.

5. Determinación de la correlación de datos en modelos matemáticos con dos variables.

6. Comparación de correlaciones de ductilidades de los cementos asfálticos convencionales.

7. Determinación de la correlación de datos en modelos matemáticos con tres variables mediante la aplicación del software OriginLab.

7.1. Comprobación de resultados de las variables mediante curvas de nivel:

7.1.1. Ductilidad vs Temperatura vs Penetración.

7.1.2. Ductilidad vs Temperatura vs Densidad.

7.2. Comprobación de resultados de las variables mediante Superficies en 3D:

7.2.1. Ductilidad vs Temperatura vs Penetración.

7.2.2. Ductilidad vs Temperatura vs Densidad.

PENETRACIÓN.-

1. Caracterización de los cementos asfálticos convencionales mediante el ensayo correspondiente para esta variable.

2. Aplicación del rango de temperatura para el ensayo de Penetración para los cuatro cementos asfálticos convencionales.

3. Discretización de datos de la penetración para diferentes temperaturas mediante la aplicación de estadística.

4. Determinación de la correlación de datos en modelos matemáticos con tres variables mediante la aplicación del software OriginLab.

4.1. Comprobación de resultados de las variables mediante curvas de nivel:

4.1.1. Penetración vs Temperatura vs Ductilidad.

4.2. Comprobación de resultados de las variables mediante Superficies en 3D:

4.2.1. Penetración vs Temperatura vs Ductilidad.

DENSIDAD.-

1. Caracterización de los cementos asfálticos convencionales mediante el ensayo correspondiente para esta variable.

2. Aplicación del rango de temperatura para el ensayo de Densidad para los cuatro cementos asfálticos convencionales.

3. Discretización de datos de la densidad para diferentes temperaturas mediante la aplicación de estadística.

4. Determinación de la correlación de datos en modelos matemáticos con tres variables mediante la aplicación del software OriginLab.

4.1. Comprobación de resultados de las variables mediante curvas de nivel.

4.1.1. Densidad vs Temperatura vs Ductilidad.

4.2. Comprobación de resultados de las variables mediante Superficies en 3D.

4.2.1. Densidad vs Temperatura vs Ductilidad.

1.8.5.2. PRODUCTO DE ACTIVIDAD POR VARIABLE

TEMPERATURA.-

1. Aplicación del rango de temperatura para poder observar un mejor comportamiento de las variables en función de la temperatura.

DUCTILIDAD.-

1. Caracterización de los cementos asfálticos convencionales para ver el cumplimiento de la normativa ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

2. Aplicación del rango de temperatura para poder observar un mejor comportamiento de las variables en función de la temperatura.

3. Discretización de datos para la optimización de los datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

4. Comparación de ductilidades en función al rango la temperatura para poder observar las diferencias entre los diferentes cementos asfálticos convencionales.

5. Correlación de datos en modelos matemáticos con dos variables para determinar ecuaciones para la predicción de valores de las variables.

6. Comparación de correlaciones de ductilidades para poder observar las líneas de tendencia polinómicas con sus respectivas ecuaciones.

7. Correlación de datos en modelos matemáticos con tres variables, mediante la aplicación del software OriginLab, para la comprobación de resultados en gráficos en tres dimensiones.

PENETRACIÓN.-

1. Caracterización de los cementos asfálticos convencionales para ver el cumplimiento de la normativa ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).
2. Aplicación del rango de temperatura para poder observar un mejor comportamiento de las variables en función de la temperatura.
3. Discretización de datos para la optimización de los datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.
4. Correlación de datos en modelos matemáticos con tres variables, mediante la aplicación del software OriginLab, para la comprobación de resultados en gráficos en tres dimensiones.

DENSIDAD.-

1. Caracterización de los cementos asfálticos convencionales para ver el cumplimiento de la normativa ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).
2. Aplicación del rango de temperatura para poder observar un mejor comportamiento de las variables en función de la temperatura.
3. Discretización de datos para la optimización de los datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.
4. Correlación de datos en modelos matemáticos con tres variables, mediante la aplicación del software OriginLab, para la comprobación de resultados en gráficos en tres dimensiones.

1.8.6. PROCESO METODOLÓGICO

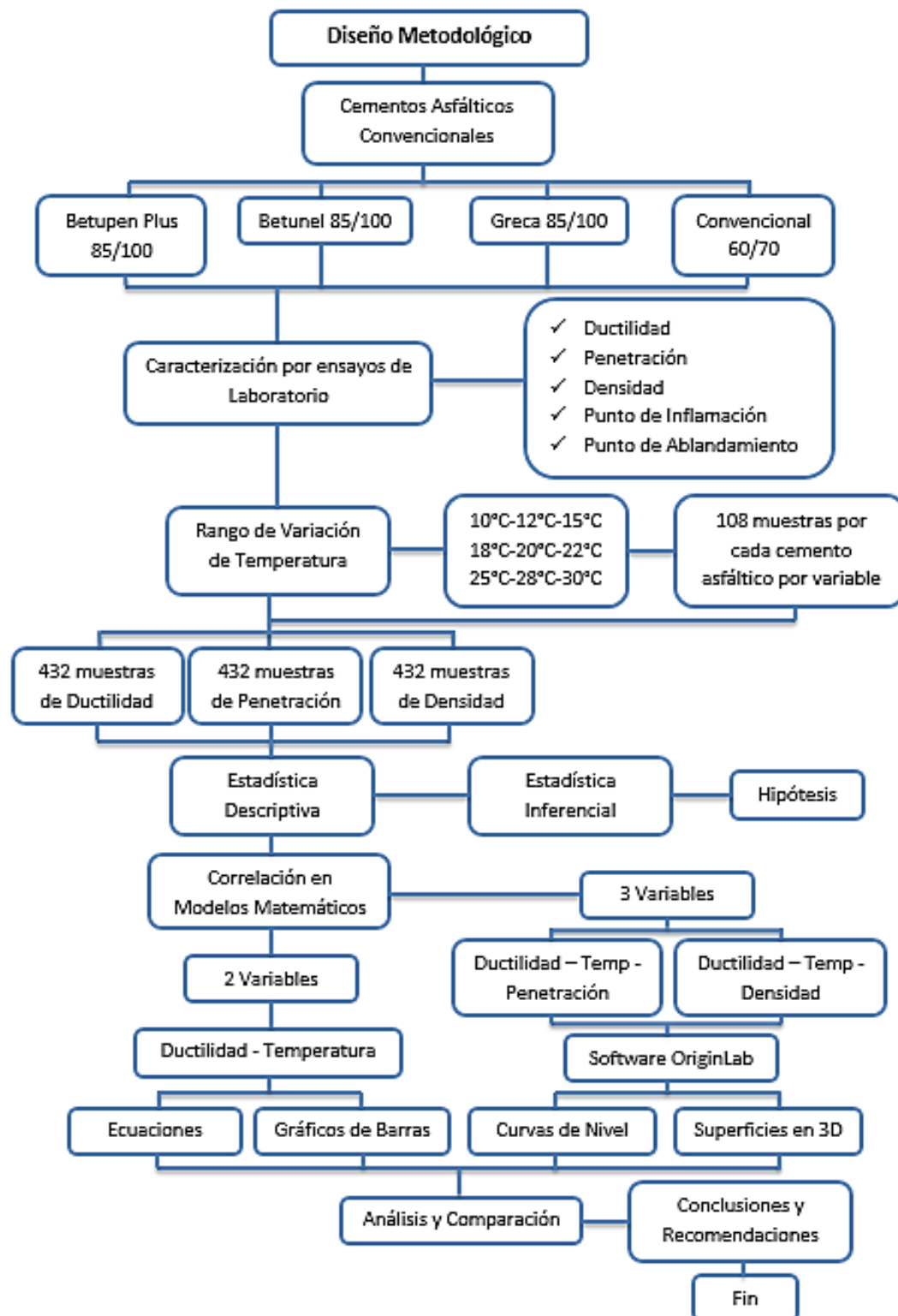
La metodología a seguir en la aplicación del desarrollo del presente estudio:

- ✓ Recopilación de información existente.
- ✓ Procedencia de las muestras de estudio y realización de ensayos.
- ✓ Equipos y herramientas disponibles del laboratorio.
- ✓ Ensayos de laboratorio.
 - Ensayo de Penetración.
 - Ensayo de Ductilidad.
 - Ensayo de Densidad.
 - Ensayo de Punto de Inflamación.
 - Ensayo de Punto de Ablandamiento.
- ✓ Generación de fichas de registro de datos.
 - Caracterización de cementos asfálticos convencionales 85/100.
 - Caracterización del cemento asfáltico 60/70.
 - Determinación de un rango de variación de temperatura.
 - Ensayos de Ductilidad con variación de temperatura.
 - Ensayos de Penetración con variación de temperatura.
 - Ensayos de Densidad con variación de temperatura.
- ✓ Comparación de resultados en función a la variación de temperatura.
 - Comparación de la ductilidad de cementos asfálticos convencionales.
 - Comparación de la ductilidad con la penetración de cementos asfálticos en función a la temperatura.

- Comparación de ductilidad con la densidad de cementos asfálticos en función a la temperatura.
- ✓ Analizar las propiedades en asfaltos convencionales a través de la variación de la ductilidad en función a la temperatura.
- ✓ Comparar la variación de la ductilidad con la densidad y la penetración en cementos asfálticos convencionales.
- ✓ Establecer un diagnóstico del comportamiento de la ductilidad en función a la variación de la temperatura.
- ✓ Elaborar gráficas de contorno y gráficas en 3 dimensiones para el análisis del comportamiento de las variables ductilidad, penetración y densidad, a través de la variación de la temperatura de los cementos asfálticos convencionales.
- ✓ Proponer rangos de trabajabilidad de la ductilidad en función a una temperatura de 25°C y a una penetración 85/100 y 60/70.
- ✓ Analizar la ductilidad mediante la variación de temperatura en las propiedades de penetración y densidad de los cementos asfálticos convencionales.
- ✓ Conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Con esta metodología a seguir del presente trabajo de investigación, se procede a realizar el siguiente esquema del diseño metodológico, expuesto a continuación:

FIGURA N° 1. 3. Esquema del Diseño Metodológico



FUENTE: Elaboración Propia.

1.9. ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

Es la parte de la estadística matemática que comprende el estudio de los métodos y procedimientos para la obtención del modelo de probabilidad (forma funcional y parámetros que determinan la función de distribución) que sigue una variable aleatoria de una determinada población, a través de una muestra (parte de la población) obtenida de la misma para verificar la hipótesis propuesta.

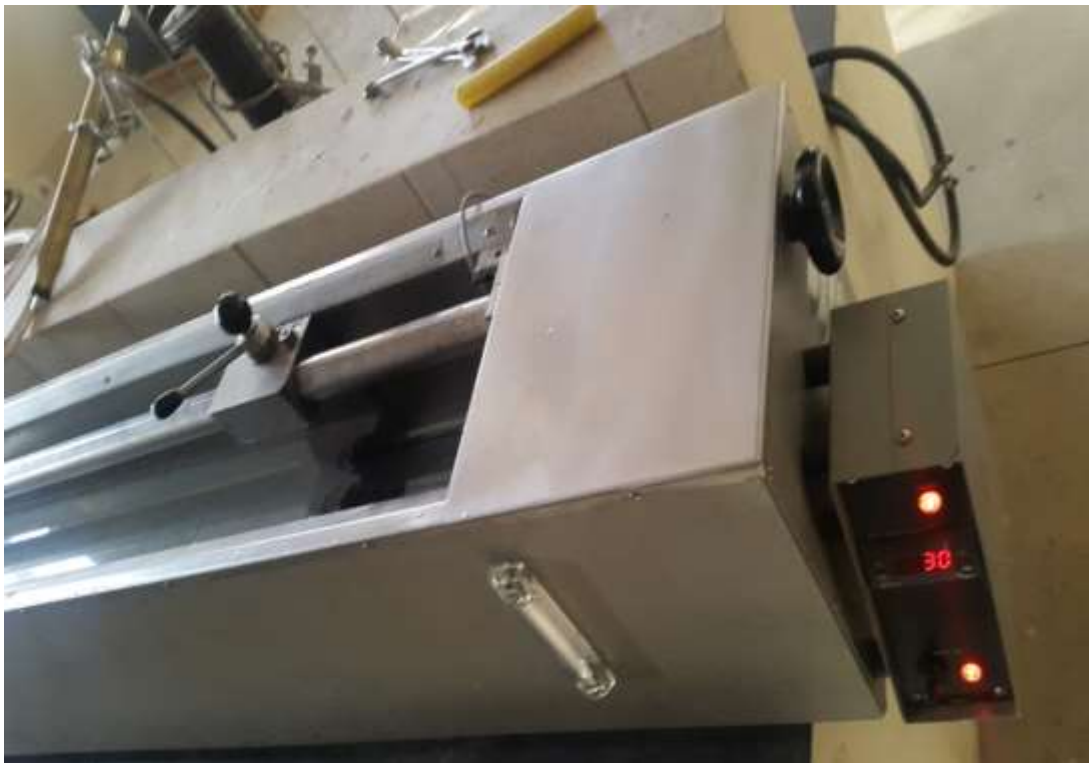
1.10. MEDIOS.

Para la obtención de datos se necesitará la utilización de los siguientes equipos:

1.10.1. DUCTILÍMETRO

El equipo para la determinación de la ductilidad es el ductilímetro y en esencia, consta de un tanque de agua en el que se sumergen los especímenes, provisto de un mecanismo de arrastre que no produzca vibraciones, capaz de separar a la velocidad especificada un extremo de la probeta del otro, que permanece fijo.

FIGURA N° 1. 4. Ductilímetro



1.10.2. TERMÓMETRO

El termómetro se utilizará para medir la temperatura de las diferentes muestras de asfalto y de mezclas asfálticas. El rango de temperatura debe estar entre 10 a 200°C para determinar las temperaturas del asfalto.

FIGURA N° 1. 5. Termómetro



1.10.3 PENETRÓMETRO

Se utiliza para medir con precisión la penetración de una muestra bituminosa, bajo condiciones fijadas de peso, tiempo y temperatura. La columna es suficientemente alta y permite un recorrido para utilizar la aguja de penetración o un cono para grasas y ubicar un recipiente conteniendo el bitumen. Posee un cuadrante de fácil lectura de 380 divisiones que corresponde cada una a 0,1mm.

FIGURA N° 1. 6. Penetrómetro



1.10.4. PICNÓMETRO

El Picnómetro es un instrumento de medición cuyo volumen es conocido y permite conocer la densidad o peso específico de cualquier fluido ya sea líquido o sólido mediante gravimetría a una determinada temperatura.

FIGURA N° 1. 7. Picnómetro



1.10.5. APARATO DE COPA ABIERTA CLEVELAND

El medidor automático de Punto de Inflamación por Copa Abierta Cleveland determina en forma exacta la temperatura de inflamación en productos con puntos de inflamación por encima 79°C (175°F). Es aplicable a todos los productos viscosos derivados del petróleo con puntos de inflamación por encima de 79°C y por debajo de los 400°C , incluidos aceites y bitúmenes.

Permite examinar muestras con viscosidades altas, usando la función de precalentamiento fijando el tiempo y temperatura necesarios para que la muestra fluya en el momento del análisis.

FIGURA N° 1. 8. Aparato de Copa Abierta Cleveland



1.11. CONCEPTO DE CORRELACIÓN DE DATOS

La aplicación se realizará mediante la estadística descriptiva, que es la rama de las matemáticas que recolecta, presenta y caracteriza un conjunto de datos con el fin de describir apropiadamente las diversas características, calcula los parámetros estadísticos, que describen el conjunto estudiado.

1.11.1. MEDIA ARITMÉTICA

La media aritmética de n valores, es igual a la suma de todos ellos dividida entre n . Se denota por \bar{x} . Esto es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{ECUACIÓN 1. 1}$$

1.11.2. MODA

La moda de un conjunto de datos numéricos es el valor que más se repite, es decir, el que tiene el mayor número de frecuencias absolutas. La moda puede ser no única e inclusive no existir.

La moda es una medida de tendencia central muy importante, porque permite planificar, organizar y producir para satisfacer las necesidades de la mayoría.

1.11.3. MEDIANA

La mediana es el punto central de una serie de datos ordenados de forma ascendente o descendente.

1.11.4. COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Cuando se quiere comparar el grado de dispersión de dos distribuciones que no vienen dadas en las mismas unidades o que las medias no son iguales se utiliza el coeficiente de variación de Pearson que se define como el cociente entre la desviación estándar y el valor absoluto de la media aritmética:

$$\% CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad \text{ECUACIÓN 1. 2}$$

Este coeficiente, representa el porcentaje que la desviación estándar contiene a la media aritmética y por lo tanto cuanto mayor es CV mayor es la dispersión y menor la representatividad de la media.

1.11.5. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

La desviación estándar o desviación típica se define como la raíz cuadrada de los cuadrados de las desviaciones de los valores de la variable respecto a su media. Esto es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{ECUACIÓN 1. 3}$$

La desviación estándar es una medida estadística de la dispersión de un grupo o población. Una gran desviación estándar indica que la población está muy dispersa respecto de la media. Una desviación estándar pequeña indica que la población está muy compacta alrededor de la media.

Para el caso de datos agrupados, la desviación estándar se calcula por medio de:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f \cdot (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{ECUACIÓN 1. 4}$$

1.12. TÉCNICAS.

Las técnicas usadas para la realización del trabajo son:

1.12.1. MEDICIONES.

Una Medición es lo que se obtiene a través de la acción de medir, la palabra medir proviene del latín “metiri” que significa comparar una cantidad obtenida de algo con una cantidad (medida) convencional, la cual se conoce previamente al estudio de

medición. Esta cantidad o medida convencional viene dada por unidades, por ejemplo (metro o kilo), pero también puede ser obtenida a través de dimensiones, por ejemplo (peso, altura, superficie o volumen). La medición es considerado uno de los procesos básicos en los estudios científicos la cual es utilizada para determinar la proporción que existe en la comparación de dos patrones, en donde uno de ellos ya está previamente establecido (es conocido a través de una magnitud física) y el otro se desea conocer. Es necesario recalcar que para que pueda existir una medición correcta tanto la dimensión de lo que se quiere como la unidad con la que se va a comparar correspondan a la misma naturaleza o magnitud.

1.12.2. MODELACIÓN.

Es aquello que sirve para representar o describir otra cosa, es decir crea prototipos (primer diseño).

El modelo puede tener una forma semejante o ser totalmente distinto del objeto real.

Un modelo se puede definir como una representación simplificada de un sistema real, un proceso o una teoría, con el que se pretende aumentar su comprensión, hacer predicciones y posiblemente ayudar a controlar el sistema.

Existen tres formas de modelos:

- ✓ **Icónico:** Versión a escala del objeto real y con sus propiedades relevantes más o menos representadas.
- ✓ **Analógico:** Modelo con apariencia física distinta al original, pero con comportamiento representativo.
- ✓ **Analítico:** Relaciones matemáticas o lógicas que representen leyes físicas que se cree gobiernan el comportamiento de la situación bajo investigación.

1.13. CONCEPTO DE MODELO MATEMÁTICO

Un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de

hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables de las operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad. El término modelización matemática es utilizado también en diseño gráfico cuando se habla de modelos geométricos de los objetos en dos (2D) o tres dimensiones (3D).

1.13.1. FASES DE CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO

En muchos casos la construcción o creación de modelos matemáticos útiles sigue una serie de fases bien determinadas:

- ✓ Identificación de un problema o situación compleja que necesita ser simulada, optimizada o controlada y por tanto requeriría un modelo matemático predictivo.
- ✓ Elección del tipo de modelo, esto requiere precisar qué tipo de respuesta pretende obtenerse, cuales son los datos de entrada o factores relevantes, y para qué pretende usarse el modelo. Esta elección debe ser suficientemente simple como para permitir un tratamiento matemático asequible con los recursos disponibles. Esta fase requiere además identificar el mayor número de datos fidedignos, rotular y clasificar las incógnitas (variables independientes y dependientes) y establecer consideraciones físicas, químicas, geométricas, etc. que representen adecuadamente el fenómeno en estudio.
- ✓ Formalización del modelo en la que se detallarán qué forma tienen los datos de entrada, qué tipo de herramienta matemática se usará, como se adaptan a la información previa existente. También podría incluir la confección de algoritmos, ensamblaje de archivos informáticos, etc. En esta fase posiblemente se introduzcan también simplificaciones suficientes para que el problema matemático de modelización sea tratable computacionalmente.
- ✓ Comparación de resultados: los resultados obtenidos como predicciones necesitan ser comparados con los hechos observados para ver si el modelo está prediciendo bien. Si los resultados no se ajustan bien, volver a la fase 1.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS Y SUS PROPIEDADES

2.1. ANTECEDENTES

Desde el momento del planteamiento del problema, surge la necesidad de recurrir a los elementos teóricos existentes alrededor del tema en estudio, con el fin de construir un marco conceptual y teórico que permita mayor profundidad y alcance en el análisis, comprensión y explicación del problema seleccionado para la investigación.

Este capítulo permite describir, comprender, explicar e interpretar el problema desde un plano teórico.

Por eso mismo, en el presente Trabajo de investigación con lo que planteamos en este capítulo, nos aproximaremos a detallar el “status of art” de la problemática de la investigación científica, las connotaciones sociales e institucionales del proceso investigativo, tratando de señalar sus bases esenciales, para recién abordar la investigación.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

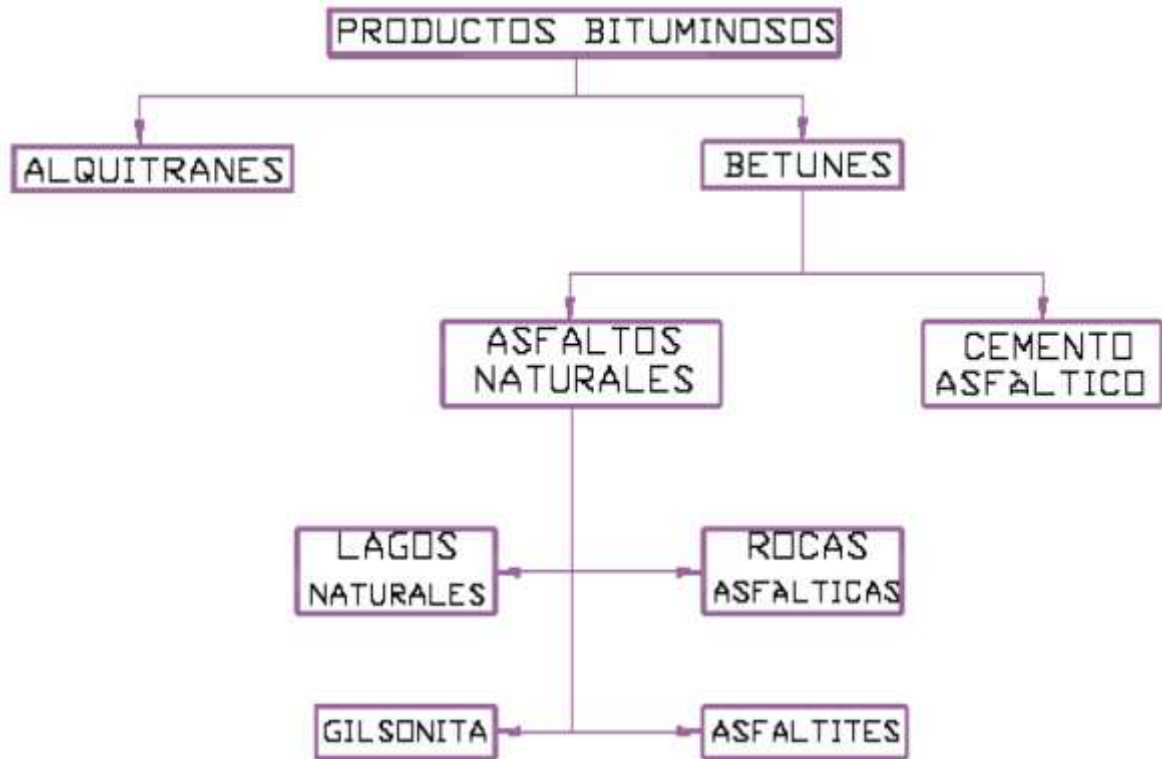
2.2.1. CEMENTO ASFÁLTICO

Es el material obtenido por refinación de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos.

El cemento asfáltico es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Es el material obtenido por refinación de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos.

Los asfaltos son ligantes que se encuentran de diversas maneras en la naturaleza o se pueden producir por el hombre a partir del proceso de destilación del petróleo en una planta de refinación.

FIGURA N° 2. 1. Productos Bituminosos.



FUENTE: Instituto del Asfalto. Manual del Asfalto.

2.2.2. TEMPERATURA

La temperatura es la magnitud física que refleja la intensidad del calor que posee un cuerpo sólido, líquido o gaseoso.

La temperatura se mide con un instrumento de precisión llamado termómetro que posee un estrecho tubo capilar comunicado a un recipiente que suele contener mercurio o alcohol, que sufre dilatación y contracción cuando la temperatura aumenta o disminuye respectivamente. La altura del fluido capilar es directamente proporcional a la temperatura.

Los termómetros pueden ser calibrados de acuerdo a una multitud de escalas que dan lugar a unidades de medición de la temperatura. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el kelvin (K), y la escala correspondiente es la escala Kelvin o escala absoluta, que asocia el valor «cero kelvin» (0 K) al «cero absoluto», y se gradúa con un tamaño de grado igual al del grado Celsius. Sin embargo, fuera del ámbito científico el uso de otras escalas de temperatura es común. La escala más extendida es la escala Celsius, llamada «centígrada»; y, en mucha menor medida, y prácticamente solo en los Estados Unidos, la escala Fahrenheit.

2.2.3. PAVIMENTO ASFÁLTICO

Pavimento flexible compuesto por una o más capas de mezclas asfálticas que pueden o no apoyarse sobre una base granular y una subbase.

Son los asfaltos utilizados en pavimentación, que son muy susceptibles a la variación de temperatura. Se clasifican en base a su consistencia, mediante los ensayos de penetración y viscosidad.

2.2.4. PENETRACIÓN

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

La prueba de penetración es otro método para cuantificar la consistencia del asfalto, también utilizada como guía y para caracterizar asfaltos por grado de penetración. En general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los más rígidos. Los ensayos de penetración fueron utilizados dentro de las primeras metodologías de clasificación de asfaltos y aun se siguen utilizando.

FIGURA N° 2. 2. Penetrómetro del laboratorio de asfalto para determinar la penetración.



2.2.5. DENSIDAD

Es la proporción de la masa de cualquier volumen de material a la masa de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. La densidad es determinada generalmente usando el método del picnómetro. Los resultados para el cemento asfáltico, como para el agua, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. Esto se debe a que este varía con la expansión y la contracción del cemento asfáltico a diferentes temperaturas.

FIGURA N° 2. 3. Picnómetro con muestra de cemento asfáltico y agua destilada.



2.2.6. DUCTILIDAD

La ductilidad es una característica de los betunes asfálticos importante en muchas aplicaciones. Los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica.

Por otra parte, los cementos asfálticos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y en el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

FIGURA N° 2. 4. Ductilímetro del laboratorio de asfaltos para determinar la Ductilidad



2.2.7. VISCOSIDAD

Se denomina coeficiente de viscosidad a la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y a la tasa de corte; es una medida de la resistencia del líquido a fluir y, comúnmente, se denomina viscosidad. En el sistema Internacional, la unidad de viscosidad es el pascal segundo (Pa s); en el sistema CGS, la unidad de viscosidad es el poise (dinas/cm²) y equivale a 0,1 Pa s. Frecuentemente, se usa como unidad de viscosidad el centipoise, que equivale a un milipascal segundo (1 m Pa s).

La viscosidad de un asfalto es usualmente medida en un viscosímetro capilar en una manera similar a la que se miden los aceites lubricantes. Este método mide la viscosidad cinemática que se reporta en centistokes (cst). La dinámica o absoluta se mide en centipoises (cp) y puede obtenerse de la cinemática multiplicándola por la densidad a esa temperatura determinada.

FIGURA N° 2. 5. Viscosímetro del laboratorio de asfaltos para determinar la viscosidad



2.2.8. PUNTO DE INFLAMACIÓN

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

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de "vaso abierto Cleveland" (COC), que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto, y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de

tiempo estipulados. El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

FIGURA N° 2. 6. Copa Cleveland para determinar Punto de Inflamación



2.2.9. PUNTO DE ABLANDAMIENTO

El ablandamiento de un material bituminoso no tiene lugar a una temperatura definida cualquiera, sino más bien, hay un cambio gradual en la consistencia debido al incremento de temperatura, entonces cualquier procedimiento que se adopte para determinar el punto en que se inicia el ablandamiento puede ser de naturaleza un tanto arbitraria.

FIGURA N° 2. 7. Aparato de anillo y bola para determinar Punto de Ablandamiento



2.3. ORIGEN Y APLICACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO

Este material es una sustancia que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo, del cual es su residuo en el proceso de destilación.

Los asfaltos naturales se encuentran en depresiones de la corteza terrestre formando los lagos de asfalto o aparecen impregnados en calizas, formaciones de areniscas o similares, formando las llamadas rocas asfálticas, también se encuentran mezclados por impurezas minerales, como por ejemplo, los depósitos naturales en el lago Asfaltites (de ahí su nombre) o mar Muerto (lo que se llamó “betún de Judea”), en la isla de Trinidad y en el lago Guanoco de Venezuela.

El cemento asfáltico es un material al que los ingenieros civiles del Departamento de Tarija destinan un amplio, y funcional, número de aplicaciones en la actualidad. Se emplea significativamente en la construcción de carpetas, superficie de rodamiento; revestimientos de obras hidráulicas, impermeabilización de edificaciones, etc.

Se utiliza en mezclas asfálticas como aglomerante o ligante para la construcción de caminos, mezclando usualmente con áridos pétreos. Además se emplea como revestimiento de muros y techados a modo de impermeabilizante.

2.4. REFINAMIENTO DEL PETRÓLEO

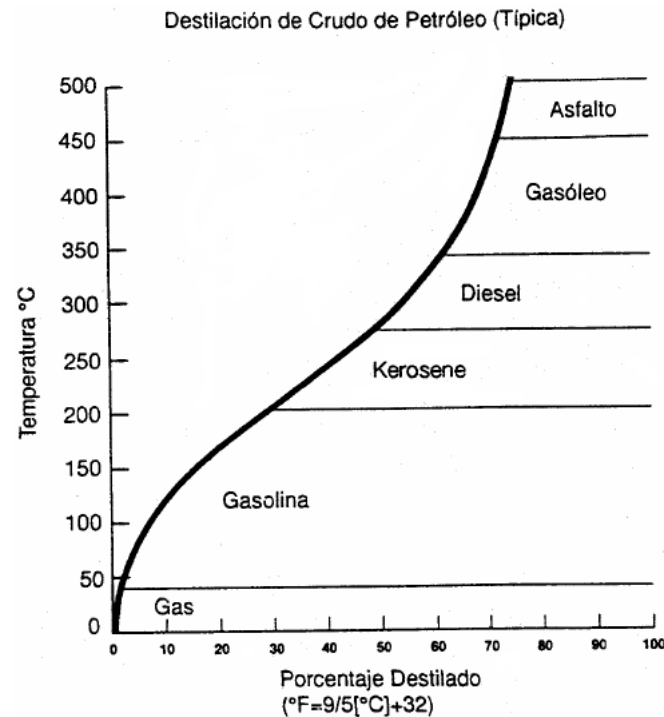
Los procesos de refinación para la obtención de asfaltos, dependen del rendimiento en asfalto que presenta el petróleo. En los petróleos que presentan bajo rendimiento, se utiliza la destilación en dos etapas: una a presión atmosférica, seguida de otra al vacío. Si el rendimiento del asfalto es alto, basta la etapa de destilación al vacío.

Si se tuviese en un depósito alcohol y agua y éste se llevase a calentar, a 72°C aprox. El alcohol comenzaría a evaporarse. Cuando la temperatura alcance los 100°C el agua se evaporaría de manera similar se refina el petróleo.

Mediante el incremento paulatino de temperatura el crudo del petróleo se descompone liberando los solventes más livianos, como la gasolina, el kerosene y el diésel. Para separar los destilados más pesados, no solo es necesario incrementar la temperatura sino someterlo a vacío. Luego de un periodo de tiempo se obtendrá el cemento asfáltico.

En la figura 2.8 se muestra la temperatura a la cual los solventes se van separando del crudo del petróleo y en la figura 2.9 hay un esquema del proceso de refino del petróleo, donde se puede observar cómo se obtiene los cementos asfálticos y sus demás derivados.

FIGURA N° 2. 8. Productos y Temperaturas Típicas de Destilación



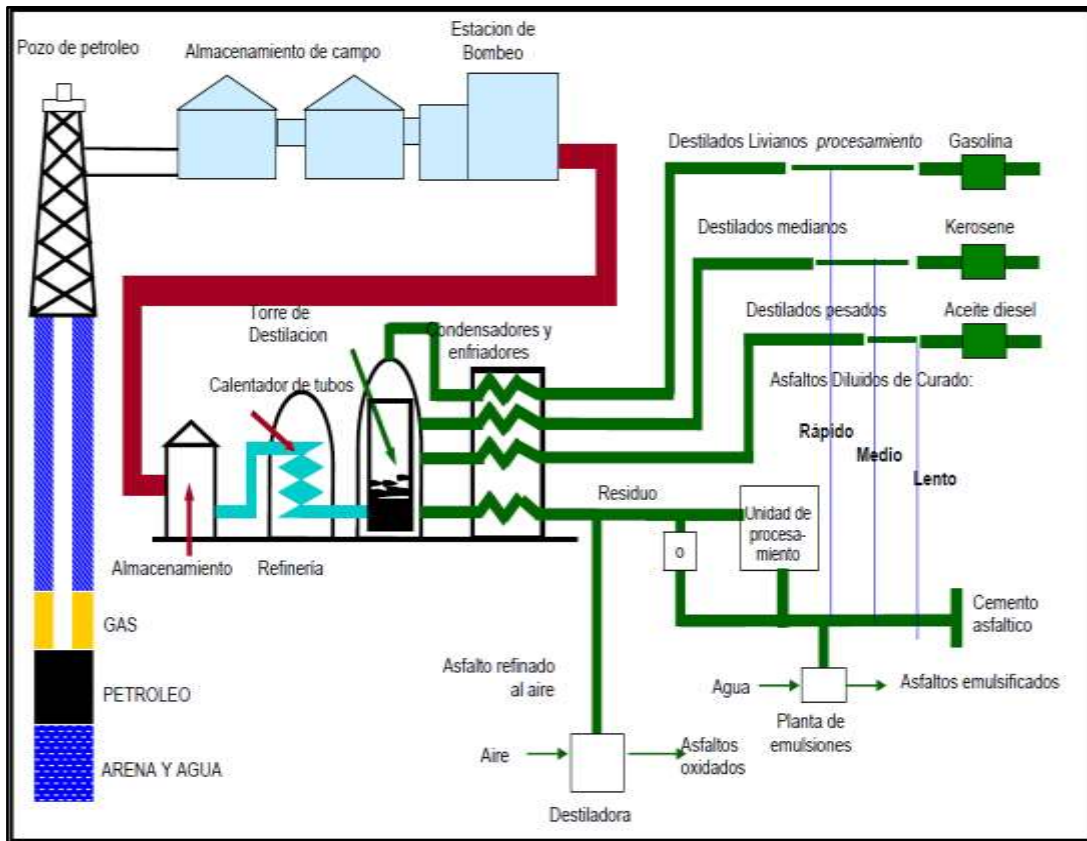
FUENTE: Principios de la Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente. MS-22, Asphalt Institute

Si el cemento asfáltico se combina con algún solvente se obtienen los asfaltos diluidos o cutbacks. Así, si el asfalto se combina con gasolina será asfalto de curado rápido (Rapid Cured, RC), si se combina con kerosene será de curado medio (Medium Cured, MC) y con diesel del curado lento (Slow Cured, SC).

Si el cemento asfáltico se combina con agua y un agente emulsificante se obtienen los asfaltos emulsificados.

Tanto en el caso de asfaltos diluidos como de asfaltos emulsificados, el objetivo es darle trabajabilidad al cemento asfáltico. Puesto que en esta condición los asfaltos pueden trabajarse a temperaturas que van de 60° a 20°C, respectivamente. Luego de la colocación de la mezcla el solvente o el agua se evaporará y quedará el asfalto solo. Por lo tanto es importante conocer el comportamiento mecánico del cemento asfáltico.

FIGURA N° 2. 9. Diagrama de flujo para asfalto de petróleo



FUENTE: Manual del Asfalto, Instituto del asfalto, 1962.

2.5. COMPOSICIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO

El cemento asfáltico es considerado un sistema coloidal complejo, de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre fase continua y dispersa. Las primeras experiencias para descubrir su estructura, fueron desarrolladas por Nellensteyn en 1924, cuyo modelo fue mejorado más tarde por Pfeiffery Saal en 1940, en base a limitados procedimientos analíticos.

Existen varias clasificaciones para los grupos de constituyentes que componen el cemento asfáltico. Una de las más usadas es la que separa el asfalto en:

2.5.1. ASFALTENOS:

Son compuestos de alto peso molecular, principalmente de naturaleza aromática con pocas ramificaciones, se encuentran en sus cadenas de cantidad apreciables elementos como oxígeno, azufre y nitrógeno. Los asfáltenos le dan la característica de dureza al asfalto y se encuentran disueltos en los maltenos.

2.5.2. MALTENOS:

Estos están compuestos por resinas y aceites.

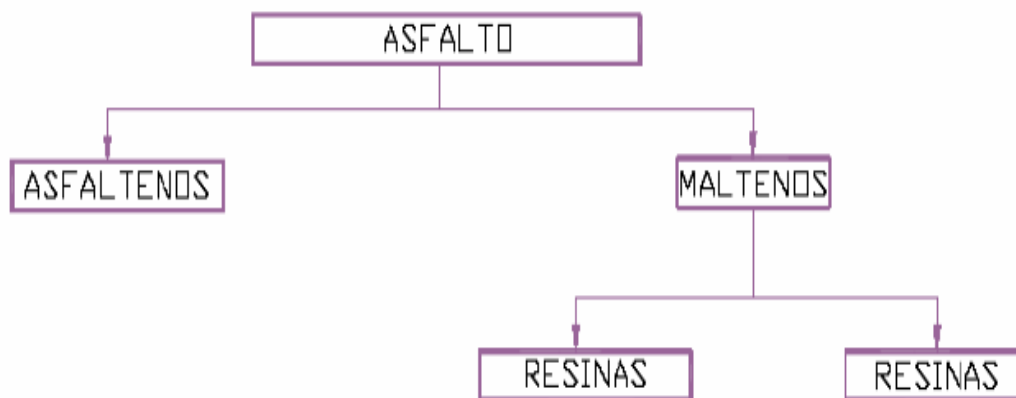
Resinas: Son moléculas de menor peso molecular, que tienen un mayor número de ramificaciones en las cadenas. También se observa la presencia de azufre y nitrógeno en sus cadenas, pero en menor frecuencia.

Aceites: Moléculas de peso molecular mucho menor, sus cadenas son menos ramificadas y con pocos anillos.

Podemos decir que los maltenos están ligados con las propiedades elásticas de los asfaltos.

Observamos que al pasar de los asfáltenos a los aceites, existe una disminución gradual de componentes aromáticos y un aumento en el carácter parafínico.

FIGURA N° 2. 10. Composición del Asfalto.



FUENTE: Manual del Asfalto, Instituto del asfalto, 1962.

En forma general, la presencia de parafina influye en las propiedades reológicas del asfalto.

La estructura cristalina de la parafina sólida ocasiona un endurecimiento mayor en el asfalto; a temperaturas más elevadas la parafina se licua, lo que ocasiona una variación sensible en las viscosidades del asfalto.

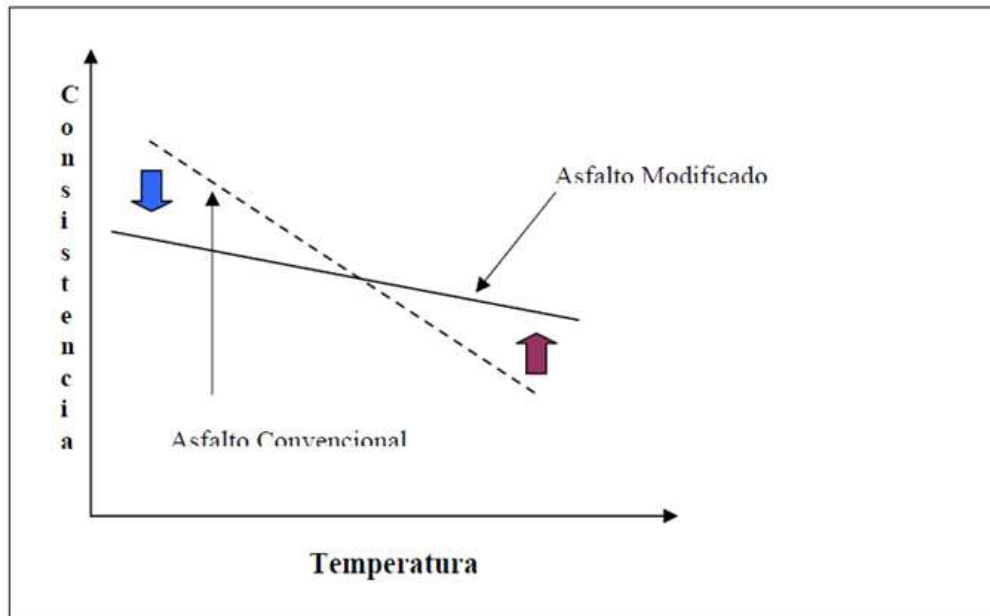
La parafina disminuye la adhesividad de los asfaltos en los agregados y una elevada cantidad de ella, puede provocar un envejecimiento prematuro del ligante, influyendo sobre la duración y tiempo de vida útil del pavimento.

2.6. TIPOS DE CEMENTOS ASFÁLTICOS PARA LA INVESTIGACIÓN.

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una gama amplia de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo en la actualidad los grandes volúmenes de tráfico sobre los criterios de diseño vehicular aunado al exceso de carga, así como el incremento en la presión de inflado de las llantas y condiciones climáticas, hacen que utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras actualmente no satisfagan sus expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino reflejándose en deformaciones y figuraciones dentro de una carpeta asfáltica, sin embargo estos problemas son causados además por la selección de materiales en los diseños, mal proceso de construcción, mantenimiento y por la baja calidad del ligante y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

A altas temperaturas y bajo cargas sostenidas, el asfalto se comporta como un líquido viscoso, es una mezcla plástica la cual provoca ahuellamiento. A bajas temperaturas y bajo cargas rápidas se vuelve frágil, ocasionando grietas transversales y agrietamiento térmico.

FIGURA N° 2. 11. Comportamiento Asfalto Convencional vs. Asfalto Modificado



FUENTE: Introducción a la Reología de los Asfaltos Modificados. Conferencia dictada por: Ing. German Garzón Costa Rica, 2004.

La mayor parte de los asfaltos producidos son utilizados en trabajos de pavimentación, destinándose una producción menor para aplicaciones industriales, como impermeabilizante, aislantes, etc.

Los cementos asfálticos se pueden clasificar en dos grupos, cementos asfálticos convencionales y cementos asfálticos modificados con polímeros para pavimentos, de acuerdo a la aplicación en este trabajo de investigación, solo se describirán los cementos asfálticos convencionales a continuación:

2.6.1. CEMENTOS ASFÁLTICOS CONVENCIONALES 85/100

El cemento asfáltico es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Es el material obtenido

por refinación de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos.

Estos cementos asfálticos son preparados especialmente para el uso en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material para su aplicación en trabajos de pavimentación, pues aparte de sus propiedades aglomerantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la mayoría de los ácidos, sales y álcalis.

Los cementos asfálticos convencionales clasificados por una penetración del rango 85/100 son aquellos que son aplicables a zonas de clima templado, por lo cual es el cemento asfáltico ideal para la ciudad de Tarija.

Por lo tanto, para obtener un mejor análisis de la ductilidad de estos cementos asfálticos, se consiguió 3 muestras diferentes con esta clasificación, denominados Betupen Plus 85/100, Betunel CAP 85/100 y Greca CAP 85/100, siendo los tres cementos mencionados de procedencia brasilera.

En primer lugar, se mostrará a continuación las especificaciones técnicas del cemento asfáltico convencional Betupen Plus:

TABLA N° 2. 1. Especificaciones para Cemento Asfáltico Betupen Plus

PRODUCTO: BETUPEN PLUS 85/100			
ENSAYO	MÉTODO	UNID.	ESPECIFICACIÓN
Penetración	AASHTO T 49	0,1 mm	85 - 100
Punto de ablandamiento	AASHTO T 53	°C	---
Punto de inflamación	AASHTO T 48	°C	232 mín.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	cm	100 mín.
Viscosidad Brookfield 135°C, Spindlec21	AASHTO T 316	cP	---
RTFOT, 163°C, 85min			
Variación en masa	AASHTO T 240	% masa	1,0 máx.
% de penetración original	AASHTO T 49	%	50 mín.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	%	75 mín.

FUENTE: Elaboración propia

A continuación, se muestra las especificaciones técnicas del cemento asfáltico convencional Greca:

TABLA N° 2. 2. Especificaciones para Cemento Asfáltico Greca

PRODUCTO: GRECA CAP 85/100			
ENSAYO	MÉTODO	UNID.	ESPECIFICACIÓN
Penetración	AASHTO T 49	0,1 mm	85 - 100
Punto de ablandamiento	AASHTO T 53	°C	---
Punto de inflamación	AASHTO T 48	°C	232 min.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	cm	100 min.
Viscosidad Brookfield 135°C, Spindlec21	AASHTO T 316	cP	---
RTFOT, 163°C, 85min			
Variación en masa	AASHTO T 240	% masa	1,0 máx.
% de penetración original	AASHTO T 49	%	50 min.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	%	75 min.

FUENTE: Elaboración propia

Como última tabla, se muestra las especificaciones técnicas del cemento asfáltico convencional Betunel:

TABLA N° 2. 3. Especificaciones para Cemento Asfáltico Betunel

PRODUCTO: BETUNEL CAP 85/100			
ENSAYO	MÉTODO	UNID.	ESPECIFICACIÓN
Penetración	AASHTO T 49	0,1 mm	85 - 100
Punto de ablandamiento	AASHTO T 53	°C	---
Punto de inflamación	AASHTO T 48	°C	232 min.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	cm	100 min.
Viscosidad Brookfield 135°C, Spindlec21	AASHTO T 316	cP	---
RTFOT, 163°C, 85min			
Variación en masa	AASHTO T 240	% masa	1,0 máx.
% de penetración original	AASHTO T 49	%	50 min.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	%	75 min.

FUENTE: Elaboración propia

2.6.2. CEMENTOS ASFÁLTICOS CONVENCIONALES 60/70

Un cemento asfáltico convencional 60/70 es aquel que somete a un proceso de oxidación muy breve en una torre para este fin, con el objeto de lograr ajustar su penetración entre 60mm y 70mm.

Este cemento asfáltico convencional es uno de los cementos asfálticos más utilizados en las obras viales ubicadas por zonas cálidas, como por ejemplo, en la ciudad de Bermejo del departamento de Tarija.

El cemento asfáltico convencional 60/70 que se utilizará en la presente investigación fue otorgado por el Servicio Departamental de Caminos (SEDECA), extraído de la planta de asfaltos ubicada en la comunidad de San José de Charaja.

TABLA N° 2. 4. Especificaciones para Cemento Asfáltico Convencional 60/70

PRODUCTO: C.A. CONVENCIONAL 60/70			
ENSAYO	MÉTODO	UNID.	ESPECIFICACIÓN
Penetración (100g, 5s, 25°C, 1/10mm)	AASHTO T 49	0,1 mm	60-70
Punto de ablandamiento	AASHTO T 53	°C	---
Punto de inflamación	AASHTO T 48	°C	232 min.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	cm	100 min.
Viscosidad Brookfield 135°C, Spindlec21	AASHTO T 316	cP	---
RTFOT, 163°C, 85min			
Variación en masa	AASHTO T 240	% masa	1,0 máx.
% de penetración original	AASHTO T 49	%	50 min.
Ductilidad, 25°C, 5cm/min.	AASHTO T 51	%	50 min.

FUENTE: Elaboración propia

2.7. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS DE PAVIMENTACIÓN

Los pavimentos pueden clasificarse en rígidos o flexibles. Generalmente el diseñador se decide por implementar el sistema Flexible debido a que presenta algunas ventajas sobre el sistema rígido como:

- ✓ Bajo costo inicial
- ✓ No requiere de juntas por lo que es más cómodo el tránsito por la carretera
- ✓ Puede ser reciclado, etc.

Por lo que es el más utilizado en nuestro medio y como se ha mencionado anteriormente, por la naturaleza misma de éste, siempre ha sido objeto de estudio las técnicas de mantenimiento para mejorar su estado físico, estructural y funcional a lo largo de toda su vida útil.

Los cementos asfálticos generalmente se dividen bajo dos diferentes sistemas, cada uno abarca diferentes grados con distintos rangos de consistencia.

2.7.1. CLASIFICACIÓN POR PENETRACIÓN

Se aplica la norma ASTM D- 946 (Clasificación Estándar por Grado de Penetración para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación).

Esta abarca los siguientes grados de penetración:

- ✓ 40 - 50
- ✓ 60 - 70
- ✓ 85 - 100
- ✓ 120 - 150
- ✓ 200 - 300

Este método se efectúa dejando penetrar una aguja dentro de una muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que penetra la aguja en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetro (0.1 mm). Un grado 200- 300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas de 200 a 300 décimas

de milímetro. Esta es una indicación de un asfalto “blando”, un grado 40- 50 es indicación de un asfalto “duro”.

2.7.2. CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD

Se aplica la norma ASTM D- 3381 (Clasificación Estándar por Grado de Viscosidad para Cementos Asfálticos Utilizados en Pavimentación) clasifica los asfaltos en base a su viscosidad absoluta a 60°C. El poise (P) es la unidad normal de medida.

Dependiendo de esta, los asfaltos se clasifican en:

- ✓ **AC- 5 (500 ± 100):** utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para riego de impregnación, riego de liga, en estabilizaciones y en mezclas asfálticas en caliente.
- ✓ **AC- 10 (1000 ± 200):** utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para carpetas y morteros de mezcla en frío.
- ✓ **AC- 20 (2000 ± 400):** utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones asfálticas usadas en morteros y carpetas de mezclas en frío.
- ✓ **AC- 30 (3000 ± 600):** utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones para carpetas y mezclas en frío.

En la Provincia Cercado del Departamento de Tarija se utiliza el sistema de clasificación por Penetración, siendo el asfalto más utilizado el 85/100.

TABLA N° 2. 5. Equivalencias entre grados de asfalto para pavimentos

ASFALTO PARA PAVIMENTO	
Grados de Penetración	Grados AC (Asphalt Cement)
40 - 50	AC – 40
60 - 70	AC – 20
85 - 100	AC – 10
120 - 150	AC – 5

200 - 300	AC – 2.5
------------------	-----------------

Fuente: Elaboración propia

2.8. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

2.8.1. DURABILIDAD

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto debido a que el comportamiento del pavimento es afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

La durabilidad indica que tanto permanecen en un cemento asfáltico sus características cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

2.8.2. ADHESIÓN

La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Es una fuerza de fricción que se desarrolla en el interfaz de dos cuerpos de diferente material y se opone al movimiento relativo de los cuerpos.

La literatura técnica define el término adhesividad como la capacidad de un ligante para permanecer fijo a un mineral, recubriéndolo sin ningún riesgo de desplazamiento aun en presencia de agua o tráfico.

2.8.3. COHESIÓN

La cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmes las partículas del agregado en el pavimento terminado. Se refiere a las interacciones que existen entre las moléculas conforme a su naturaleza. Generalmente, la clasificación es hecha de acuerdo a la polaridad de las moléculas que están interaccionando, o sobre la base de la naturaleza de las moléculas, entiéndase, de los elementos que la conforman.

2.8.4. SUSCEPTIBILIDAD A LA TEMPERATURA

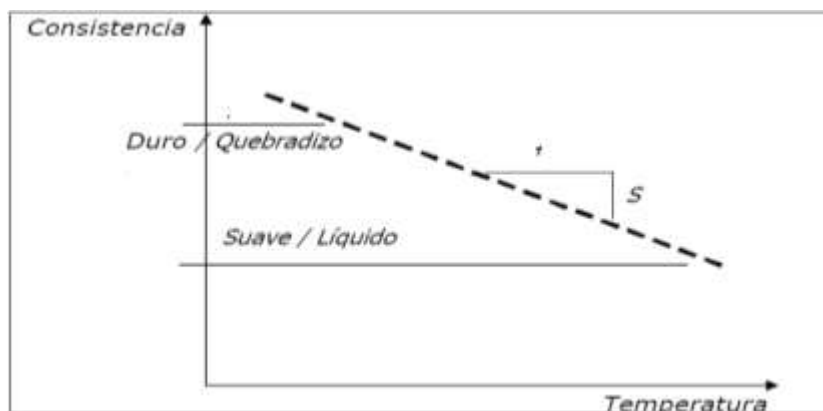
El asfalto es un material termoplástico, se vuelve más viscoso (duro) a medida que su temperatura disminuye y menos viscoso (blando) conforme su temperatura aumenta. Esta característica es conocida como susceptibilidad a la temperatura.

La susceptibilidad térmica varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si estos tienen el mismo grado de consistencia.

Su importancia radica en que el asfalto debe tener suficiente fluidez a temperaturas altas para que pueda cubrir las partículas del agregado durante el mezclado y así permitir que estas se desplacen unas con respecto de otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperatura ambiente normal para mantener unidas las partículas del agregado.

FIGURA N° 2. 12. Comportamiento del asfalto (Consistencia vs. Temperatura)



FUENTE: Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente. Asphalt Institute

La figura 2.12. muestra como el asfalto cambia de consistencia conforme cambia de temperatura, a este cambio se le conoce como susceptibilidad térmica y es la pendiente de la recta (S).

2.8.5. PENETRACIÓN

La medida de la penetración en asfaltos sirve para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos donde el componente principal es el asfalto. La penetración se define como la distancia, expresada en milímetro (mm) hasta la cual

una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

La penetración de un producto bituminoso disminuye cuando la densidad del mismo aumenta. Con la penetración se puede establecer si el material es líquido, semisólido o sólido.

En general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los más rígidos.

2.8.6. DENSIDAD

Es la proporción de la masa de cualquier volumen de material a la masa de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. La densidad es determinada generalmente usando el método del picnómetro. Los resultados para el cemento asfáltico, como para el agua, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. Esto se debe a que este varía con la expansión y la contracción del cemento asfáltico a diferentes temperaturas.

La determinación de la densidad de los cementos asfálticos es de mucha importancia como un medio para hacer correcciones de volumen cuando éstos se miden a temperaturas altas.

2.8.7. DUCTILIDAD

El asfalto empleado en la construcción de pavimentos debe poseer un comportamiento dúctil. Los conceptos básicos de esta propiedad de los materiales se resumen a continuación.

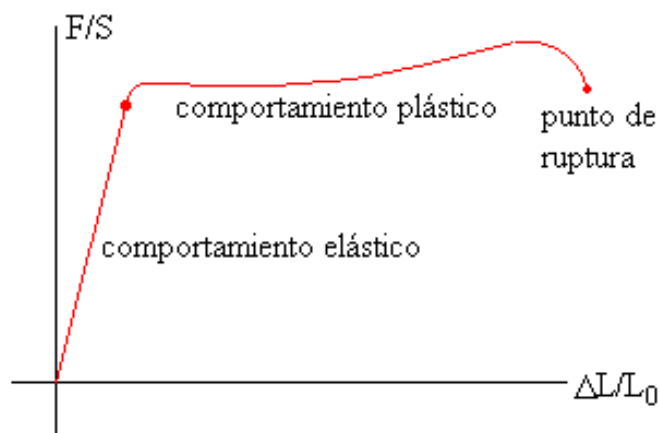
La ductilidad es una propiedad inherente a los materiales y hace referencia a la facultad de poder deformarse (estirarse) sin romperse, bajo la acción de una fuerza, permitiendo obtener alambres o hilos. Sin embargo cualquier material que presente esta propiedad se denomina dúctil. Este proceso se explica porque los átomos del material se disponen de manera tal que es posible que se deslicen unos sobre otros.

En el ámbito de la ingeniería se entiende por material dúctil aquel que sufre grandes deformaciones antes de romperse, siendo el opuesto al material frágil, que se rompe bajo deformación, de manera repentina.

La ductilidad de un material bituminoso, es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita por la normativa vigente, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5%.

En un ensayo de tracción, los materiales dúctiles presentan una fase de fluencia caracterizada por una gran deformación sin incremento de la carga, como lo muestra la figura 2.13:

FIGURA N° 2. 13. Esfuerzo deformación



No debe confundirse dúctil con blando, ya que la ductilidad es una propiedad que se manifiesta una vez que el material está soportando una fuerza y como se menciona anteriormente, hace referencia a la capacidad que tiene el material de deformarse sin romperse, de manera tal, que mientras el valor de la carga sea pequeño, la deformación también lo será, pero alcanzado cierto punto el material cede, deformándose en mucha mayor medida de lo que lo había hecho hasta entonces pero sin llegar a romperse. Por

otro lado, lo blando o duro que sea un material, es una medida de la resistencia del material a ser penetrado.

Desde un punto de vista tecnológico, al margen de consideraciones económicas, el empleo de materiales dúctiles presenta considerables ventajas, ya que presentan deformaciones notorias antes de romperse proporcionando un margen de seguridad adicional, ya que en el momento de presentarse una falla en el material este dará “aviso” y se podrán tomar los respectivos correctivos a tiempo, antes que se presente el colapso, ya que después será necesario que la fuerza aplicada siga aumentando para que se provoque la rotura; caso contrario, con lo que se puede apreciar en un material frágil.

MEDIDA DE LA DUCTILIDAD

El concepto de ductilidad es cualitativo, pues es una propiedad subjetiva del material. En general, las medidas de ductilidad son de interés en tres formas:

- ✓ Para indicar hasta cuanto el material puede ser deformado sin fracturarse en los diferentes procesos de conformación, tales como laminación o extrusión.
- ✓ Indican al diseñador de modo general la habilidad del material para fluir plásticamente antes de provocarse la fractura.
- ✓ Sirve como un indicador de cambio en los niveles de impurezas o condiciones del material.

Las medidas convencionales de ductilidad, obtenidas del ensayo a tracción, son las deformaciones a la cual se produce la fractura y la reducción del área del elemento a ensayar una vez producida la rotura, esta última no aplicable al ensayo de tracción para asfaltos pues para este caso la reducción del área sería del ciento por ciento, pues como se puede observar en la figura, al momento de la rotura, la sección de la probeta en la que se produce la falla (cuerpo) se transforma en un hilo que apenas si tiene sección transversal .

FIGURA N° 2. 14. Ensayo a tracción para asfaltos mediante ductilímetro.



Un cemento asfáltico con una medida de ductilidad elevada si bien presenta buenas propiedades ligantes, por otra parte hace que la mezcla sea susceptible a los cambios de temperatura, presentando deformaciones excesivas que acarrearán fallas futuras en la estructura de pavimento producidas por el frenado de los vehículos y en general por las acciones del tránsito a las que se vaya ver sometida durante su vida. En contraste, un asfalto con una ductilidad baja proporciona rigidez a la mezcla, pero debido a la falta de adherencia de este, la mezcla se torna quebradiza y susceptible a la presencia de fracturas del tipo “piel de cocodrilo” u otras.

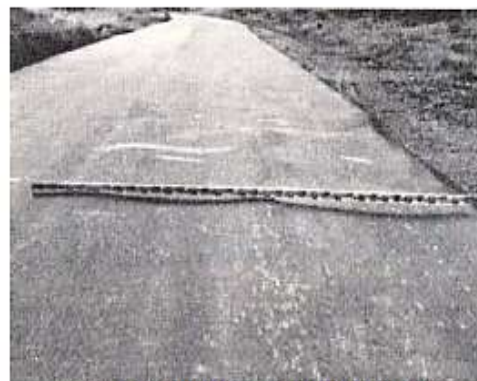
FIGURA N° 2. 15. Fallas típicas producidas por el empleo de asfaltos con elevada ductilidad



(Abultamientos)



(Fisuras parabólicas "Lengüetas")



(Asentamientos longitudinales)

FIGURA N° 2. 16. Fallas típicas producidas por el uso de asfaltos poco dúctiles.



(Fisuras longitudinales)



(Fisuras en Bloque)



(Fisuras transversales)



(Piel de cocodrilo)

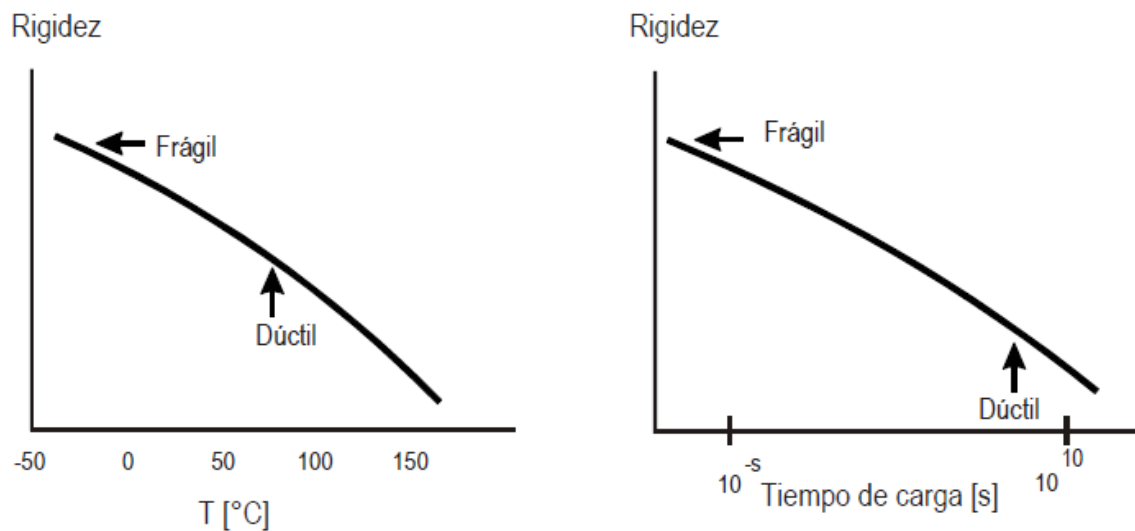
La medida de ductilidad en asfalto consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un líquido de densidad similar, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en centímetros que se estira la probeta hasta el instante de la rotura. Normalmente, el ensayo se realiza con una velocidad de tracción de 50 ± 2.5 mm por minuto y la temperatura de $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 1.0^{\circ}\text{F}$); aunque puede realizarse en otras condiciones de temperatura, debiendo concretarse en este caso la velocidad correspondiente.

La distancia en centímetros que se han separado las pinzas desde su posición inicial hasta que se produce la rotura en un ensayo normal, es del valor de la ductilidad de una probeta de cemento asfáltico convencional.

2.9. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO

La naturaleza del asfalto es viscoelástica, esto quiere decir que su comportamiento depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. El asfalto a altas temperaturas tiene menor rigidez, típico durante la temperatura de mezcla (135°C). A medida que la temperatura desciende el asfalto se vuelve más rígido. A temperaturas muy bajas el asfalto puede agrietarse porque se vuelve frágil y quebradizo.

FIGURA N° 2. 17. Comportamiento del Asfalto



Un comportamiento análogo se observa cuando se grafica el tiempo de aplicación de la carga (velocidad) y la rigidez. Cuando las cargas aplicadas son rápidas el asfalto tiene mayor rigidez y cuando las cargas son lentas hay menor rigidez y mayor deformación.

2.9.1. COMPORTAMIENTO A ALTAS TEMPERATURAS

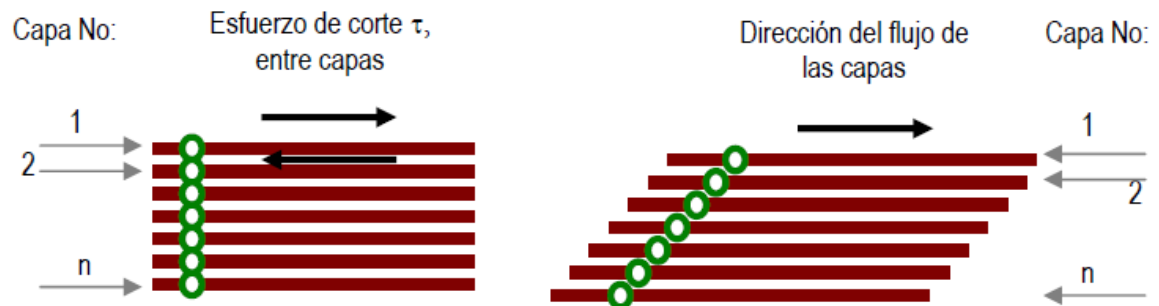
En climas cálidos o sometido a cargas de tráfico lentas (intersecciones, tramos en pendiente), el cemento asfáltico se comporta como un líquido viscoso, dejando que el

agregado soporte las cargas cíclicas. Con esta condición la estructura granular de la mezcla asfáltica cumple un papel muy importante. El asfalto solo es el aglutinante.

Por definición, la viscosidad es la característica física del material que describe la resistencia de los líquidos a fluir. Si el flujo del cemento asfáltico en caliente es lento puede ser observado microscópicamente como capas adyacentes de moléculas deslizándose unas sobre otras. La resistencia o fricción entre capas se relaciona a la velocidad relativa de deslizamiento.

La viscosidad es una característica que ayuda a diferenciar a los líquidos y se define como el esfuerzo de corte entre la velocidad de deformación por corte. La figura 2.18 muestra un juego de cartas que tienen una línea vertical marcada a un lado. Cuando se aplica el corte en el punto superior, las cartas tratan de deslizarse una sobre la otra y los puntos marcados en las cartas empiezan a separarse. La velocidad al corte es la velocidad a la cual estos puntos se separan.

FIGURA N° 2. 18. Características del Flujo de Líquidos



Los fluidos Newtonianos tienen una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad relativa. El aire, agua y asfalto caliente (a temperaturas mayores que 60°C) son comúnmente fluidos Newtonianos. A temperaturas moderadas, la viscosidad del asfalto decrece cuando la velocidad relativa se incrementa.

Los líquidos viscosos como el asfalto caliente algunas veces son llamado plásticos porque una vez que empiezan a fluir no retornan a su posición original. El *rutting* o ahuellamiento es la acumulación de deformaciones plásticas no recuperables.

FIGURA N° 2. 19. Ahuellamiento o deformación permanente o rutting



2.9.2. COMPORTAMIENTO A BAJAS TEMPERATURAS

En climas fríos o bajo aplicaciones de carga rápida, el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico. Los sólidos elásticos son como ligas porque cuando cesa la carga que los deforma, regresan a su posición original.

Si el material se esfuerza más allá de su capacidad, el sólido elástico puede romperse. El agrietamiento por bajas temperaturas algunas veces ocurre en los pavimentos cuando están sometidos a climas fríos. En estos casos, las cargas aplicadas producen esfuerzos internos que se acumulan en el pavimento asfáltico que tenderá a contraerse mientras su movimiento es restringido por las capas inferiores.

FIGURA N° 2. 20. Agrietamiento por bajas temperaturas



2.9.3. COMPORTAMIENTO A TEMPERATURAS INTERMEDIAS

En estos climas el asfalto muestra características de líquido viscoso y sólido elástico. A estas temperaturas, el asfalto es un excelente material adhesivo usado en pavimentación.

Cuando se calienta el asfalto actúa como un lubricante, permitiendo mezclarse con el agregado, cubrirlo y compactarse formando una superficie lisa y densa. Tan pronto como se enfría, el asfalto actúa manteniendo juntos los agregados en la matriz sólida. En esta etapa el comportamiento del asfalto es viscoelástico, es decir, tiene características elásticas y viscosas, dependiendo de la temperatura y velocidad de aplicación de carga.

2.9.4. COMPORTAMIENTO DEL LIGANTE ENVEJECIDO

Como el cemento asfáltico está compuesto por hidrocarburos (combinación de hidrógeno y carbono) y nitrógeno, oxígeno y otros elementos. El asfalto cuando se disuelve en heptano se descompone en asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos le proporcionan al asfalto el color y rigidez. Los maltenos son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar y pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas le otorgan las cualidades adhesivas al asfalto, mientras que los aceites son el medio de transporte de asfaltenos y resinas.

Durante la reacción con el oxígeno del medio ambiente, esto ocurre principalmente cuando el asfalto tiene elevadas temperaturas o cuando una película delgada de asfalto recubre la partícula, Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos y los aceites en resinas, ocasionando así un incremento en la rigidez del asfalto. Esta reacción se denomina oxidación. La oxidación cambia la estructura y composición de las moléculas de asfalto haciéndolo más frágil o quebradizo.

La inapropiada compactación puede generar oxidación o endurecimiento prematuro. En estos casos, los inadecuados niveles de compactación tienen altos porcentajes de

vacíos de aire interconectados, que permiten que más aire o el agua penetren en la mezcla acelerando la oxidación.

2.10. ESPECIFICACIONES DE LA NORMATIVA SOBRE CEMENTOS ASFÁLTICOS CONVENCIONALES

2.10.1. NORMATIVA VIGENTE (ABC)

El año 2008 la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras), publica cinco manuales para diseño y construcción de pavimentos en Bolivia, en los cuales indica todos los ensayos para control de pavimentos y asfaltos, basados en dos Normas de aplicación a nivel mundial; AASHTO y ASTM.

2.10.2. NORMA AASHTO (AMERICAN ASOCIATION OF STANDARDS HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS)

El gobierno de Estados Unidos, desde los años 20 realizó una serie de pruebas a escala 1:1, para determinar fórmulas empíricas que permitieran diseñar pavimentos flexibles y rígidos de buenas condiciones de durabilidad y Resistencia.

La prueba de pavimentación que en su momento se conoció como AASHO, por sus siglas en inglés y debido a que en aquel entonces no estaba integrado el departamento de transporte de E.U. a esta organización. Fue concebida y promovida gracias a la organización que ahora conocemos como AASHTO (“American Association of State Highway and Transportation Officials”) para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas y bajo el efecto del medio ambiente. Fue formulada por el consejo de investigación de carreteras de la academia nacional de ciencias – consejo nacional para la investigación, la planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto comenzó en 1956 muy cerca de Ottawa, Illinois. EL tráfico controlado de la prueba se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960, o sea, durante más de dos años.

2.10.3. ENSAYOS DE ASFALTOS SEGÚN AASHTO

Durante años los expertos de la AASHTO sobre la base de los ensayos ya existentes de la ASTM (American Society for Testing and Materials), los fueron utilizando y les asignaron un código específico, paralelamente al código ya asignado por la ASTM, completándolos con Especificaciones detalladas y específicas.

ENSAYOS DE ASFALTOS SEGÚN ASTM

Fue fundado el 16 de mayo de 1898, como American Section of the International Association for Testing Materials por iniciativa de Charles Benjamin Dudley, entonces responsable del Control Calidad de Pennsylvania Railroad, quien tuvo la iniciativa de hacer que los hasta entonces rivales ferrocarriles y las fundiciones de acero coordinaran sus controles de calidad.

En 1961 ASTM fue redefinida como American Society for Testing and Materials, habiendo sido ampliado también su objetivo. A partir de ese momento la cobertura de la ASTM, además de cubrir los tradicionales materiales de construcción, pasó a ocuparse de los materiales y equipos más variados, como las muestras metalográficas, cascos para motociclistas, equipos deportivos, etc.

En el 2001 la ASTM asume su nombre actual: ASTM International como testimonio del interés que actualmente han alcanzado las técnicas de normalización.

Tal es así que en los acápites correspondientes y durante el desarrollo del presente trabajo se enunciarán los ensayos de los cementos asfálticos, detallándolos por su nombre, seguido del código AASHTO, ASTM y ABC, por ejemplo:

Ensayo de Ductilidad de asfaltos ASTM D-113, AASHTO T-51, A0.105.

TABLA N° 2. 6. Normas AASHTO, ASTM y ABC aplicables a Cementos Asfálticos Convencionales.

ENSAYO	AASHTO	ASTM	ABC
Viscosidad	T - 201	D - 2170	A0.108
Penetración	T - 49	D - 5	A0.103
Punto de Inflamación	T - 48	D - 92	A0.106
Ductilidad	T - 51	D - 113	A0.105
Peso Específico	T - 228	D - 70	A0.102
Punto de Ablandamiento	T - 53	D - 3695	A0.110

Fuente: Elaboración propia

2.11. OTRAS INVESTIGACIONES INNOVADORAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DUCTILIDAD DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS.

En el año 2006 se realizó un trabajo de investigación con el título **“MODIFICACIÓN DEL ENSAYO DE DUCTILIDAD PARA ASFALTOS EN PRO DE UN MEJORAMIENTO EN EL ANÁLISIS DE RESULTADOS”**, en la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, ubicada en la Ciudad de Bucaramanga, Colombia.

Los autores de este proyecto de grado, Andrés Felipe Meléndez Suarez y José Fernando Ortiz Salinas, desarrollaron este trabajo debido a la pérdida de importancia del ensayo de ductilidad, pues se ha visto rezagado por nuevos ensayos, como es el caso del ensayo de recuperación elástica que hasta el momento es materia de estudio. Esta carencia de valor del ensayo de ductilidad se debe a la poca información que suministran los resultados como está planteado en la normatividad existente. Interesa modificar dicho

ensayo de manera tal que su repetitividad sea notable. Para tal fin se propone cambios en la temperatura de ensayo, forma de la probeta, tiempos de enfriado y reposo del asfalto, además de realizar pruebas con asfalto modificado para corroborar los resultados obtenidos.

Este estudio, buscó la manera de reducir los valores de ductilidad de los asfaltos, para lo cual, es necesario tener presente las variables más evidentes para dicho propósito.

Se tendrá en cuenta, la temperatura, ya que los pavimentos asfálticos presentan diferentes tipos de fallas ocasionados por este agente. Para observar el efecto de este factor, se realizaron ensayos de ductilidad en asfaltos, utilizando temperaturas por debajo a la especificada en la prueba normalizada.

PRUEBAS MODIFICANDO LAS PROBETAS

Se propusieron tres tipos de probeta (figuras 2.22, 2.23 y 2.24), en las cuales solo se varió la forma de las piezas laterales, ya que es ahí, en el cuerpo de la probeta donde se concentran la mayoría de los esfuerzos y deformaciones a las que se ve sometido el material a lo largo de la prueba, mientras que las secciones correspondientes a las mordazas no presentan variaciones representativas en el transcurso del ensayo por lo que se decidió mantener la forma y no realizar ningún cambio, ya que se puede suponer que el material está “empotrado” en ellas, es decir, que su movimiento está totalmente restringido.

FIGURA N° 2. 21. Dimensiones de probeta original

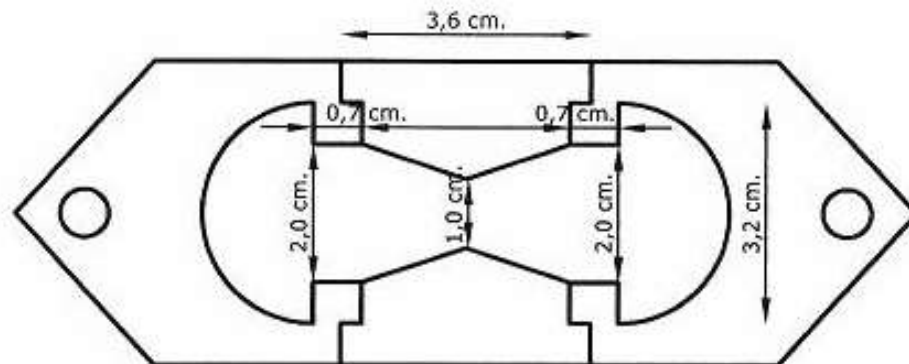


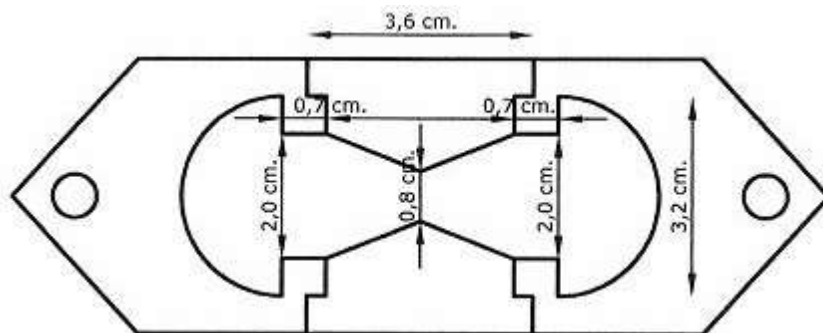
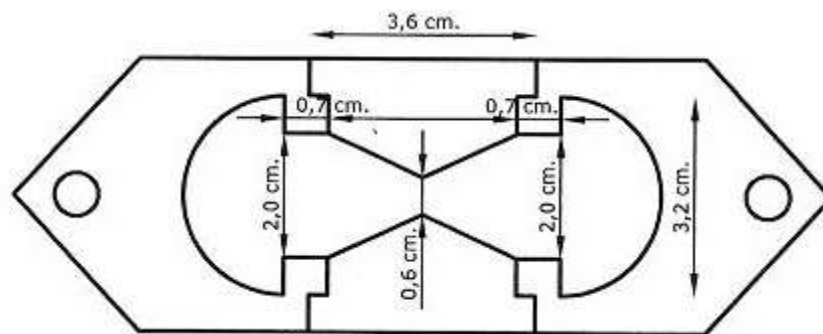
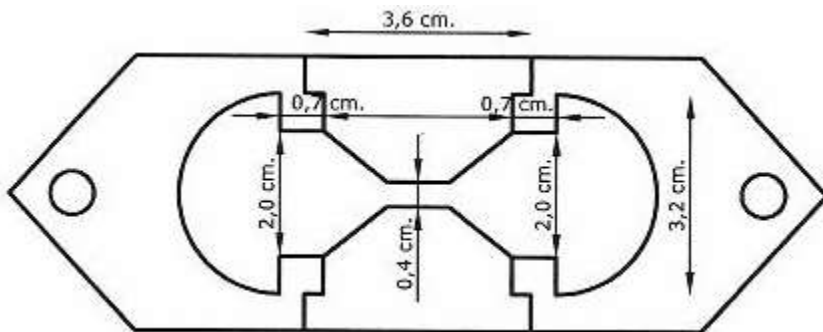
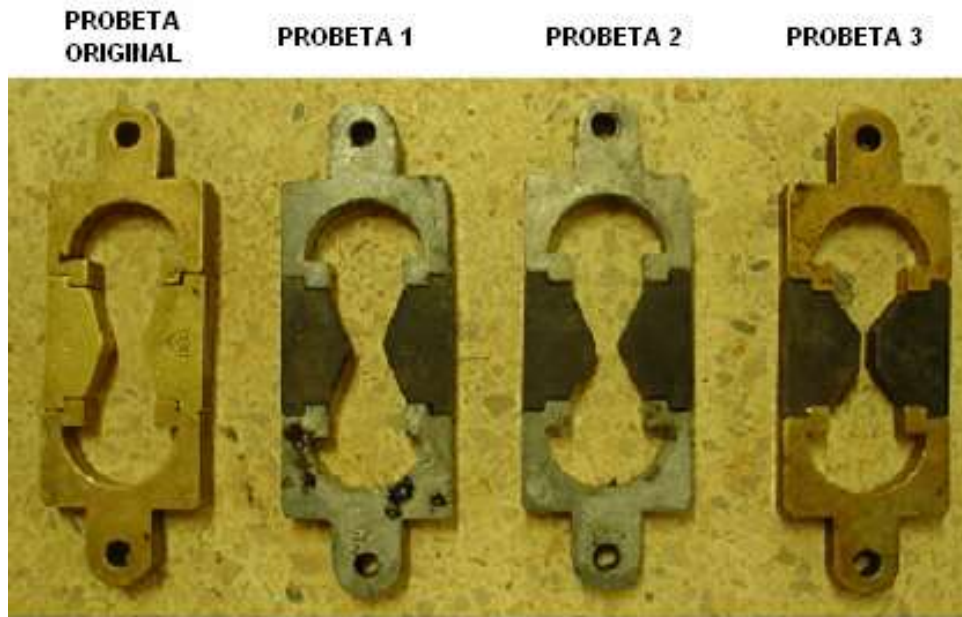
FIGURA N° 2. 22. Probeta 1 propuesta**FIGURA N° 2. 23. Probeta 2 propuesta****FIGURA N° 2. 24. Probeta 3 propuesta**

FIGURA N° 2. 25. Probeta original y Probetas propuestas

Con estas nuevas probetas se realizaron pruebas a diez grados centígrados (10°C), no se consideraron las pruebas a cinco grados centígrados, puesto que a esta temperatura la variabilidad en la primera prueba fue mayor.

Estas pruebas se realizaron con un asfalto modificado del tipo MASTIC mezclado en una proporción 20-80 en peso (20% cemento Pórtland – 80% asfalto 80-100) y otra con proporción 40-60 (40% cemento Pórtland – 60% asfalto 60-70), también se realizaron, ensayos con asfalto de penetración 13, para determinar su comportamiento en las condiciones propuestas.

Por otra parte, la geometría de la probeta se modificó, buscando optimizar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a bajas temperaturas.

Finalmente se evaluaron diferentes tipos de materiales para determinar la repetitividad y capacidad de discriminación que presenta el ensayo.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LA DUCTILIDAD MEDIANTE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN LAS PROPIEDADES DE CEMENTOS ASFÁLTICOS CONVENCIONALES

3.1. ANTECEDENTES

Para la presente investigación se ha propuesto analizar los siguientes cementos asfálticos convencionales de distinta procedencia, las cuales se enunciarán a continuación:

3.1.1. CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

Este es un cemento asfáltico convencional que está clasificado por su penetración 85/100, valor que será verificado en el ensayo correspondiente.

La procedencia de este cemento asfáltico es de la distribuidora Stratura Asfaltos S.A. del país limítrofe de Brasil y fue proporcionado de la planta de asfalto de la Asociación Accidental Vial Copacabana, ubicada en la comunidad de El Molino de la Provincia de Méndez del Departamento de Tarija.

3.1.2. CEMENTO ASFÁLTICO GRECA CAP 85/100

Este cemento asfáltico convencional está clasificado por su penetración de 85/100, valor que será verificado en el ensayo correspondiente.

La procedencia de este cemento asfáltico es de la distribuidora Greca Asfaltos del país limítrofe de Brasil y fue obtenido de la planta de asfalto de la Empresa Constructora Camino S.R.L. ubicada en la ciudad de Santa Cruz.

3.1.3. CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL CAP 85/100

Este cemento asfáltico convencional está clasificado por su penetración de 85/100, valor que será verificado en el ensayo correspondiente.

La procedencia de este cemento asfáltico es la distribuidora Betunel Indústria e Comércio Ltda del país limítrofe de Brasil y fue proporcionado de la posta municipal (Área Técnica) del Gobierno Municipal de la Provincia Cercado, que se encuentra en el barrio Guadalquivir de la Provincia Cercado del Departamento de Tarija.

3.1.4. CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

Este cemento asfáltico convencional está clasificado por su penetración de 60/70, la cual se demostrará en los ensayos más adelante.

El origen de este cemento asfáltico es de la distribuidora Stratura Asfaltos S.A. del país limítrofe de Brasil y fue proporcionado por el Servicio Departamental de Caminos (SEDECA), y retirado de la planta de asfaltos ubicada en la comunidad de San José de Charaja.

3.1.5. REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CEMENTOS ASFÁLTICOS

Para obtención de datos y resultados de los diversos ensayos de laboratorio, se requiere el uso del laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, y de la asistencia de los auxiliares técnicos para la optimización de los valores obtenidos por mi persona, siendo alumno de proyecto de grado 2 de la Mención Vías de Comunicación de la Carrera de Ingeniería Civil.

3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO REQUERIDOS PARA LA INVESTIGACIÓN

La Determinación de las diversas pruebas a los cementos asfálticos es importante para definir las características que debe cumplir un cemento asfáltico de calidad; esto se obtendrá al comparar los resultados con las normas vigentes.

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN LA NORMATIVA ABC

3.2.1.1. PENETRACIÓN

Los resultados de la penetración de los distintos cementos asfálticos, se obtuvieron mediante la realización del ensayo de Penetración, según la Normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras descrita en el Anexo I:

3.2.1.1.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PENETRACIONES A 25°C SEGÚN ABC

TABLA N° 3. 1. Penetraciones de los cementos asfálticos

Temperatura (°C)	Penetraciones de los Cementos Asfálticos			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
25	86,0	94,0	91,0	70,0
25	88,0	96,0	89,5	68,5
25	85,5	93,5	90,5	70,0
25	89,0	94,0	88,0	66,5
25	91,0	94,5	90,0	68,5
25	87,0	99,0	88,5	63,0
25	86,5	97,5	86,5	66,5

25	88,0	94,0	89,0	60,5
25	86,0	98,0	91,5	64,0
25	85,5	93,5	88,0	63,5
25	86,0	94,0	89,0	64,0
25	85,5	95,0	89,5	66,0
Promedio	87,00	95,25	89,25	65,92

FUENTE: Elaboración propia

3.2.1.2. DUCTILIDAD

Los resultados alcanzados de las ductilidades de todos los cementos asfálticos convencionales, se obtuvieron mediante la realización del ensayo de Ductilidad, según la Normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras descrita en el Anexo I:

3.2.1.2.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS DUCTILIDADES A 25°C SEGÚN ABC

TABLA N° 3. 2. Ductilidad de los cementos asfálticos convencionales

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
25	118,3	110,1	109,7	109,7
25	102,9	118,5	116,1	119,1
25	111,1	113,9	105,6	121,3
25	109,8	136,5	109,8	113,6

25	120,2	117,6	113,6	123,9
25	111,5	113,4	110,2	122,4
25	116,7	108,8	113,4	117,5
25	108,5	119,6	107,1	127,7
25	125,2	109,5	111,8	120,6
25	118,5	117,7	109,6	120,7
25	115,9	111,3	112,9	117,8
25	112,3	120,5	110,5	122,3
Promedio	114,24	116,45	110,86	119,72

FUENTE: Elaboración propia

3.2.1.3. DENSIDAD

Los resultados de la densidad de los distintos cementos asfálticos, se obtuvieron mediante la realización del ensayo de Densidad, según la Normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras descrita en el Anexo I.

3.2.1.3.1. DENSIDADES OBTENIDAS A TEMPERATURA AMBIENTE (22°C) SEGÚN ABC

TABLA N° 3. 3. Densidad de los cementos asfálticos

Temperatura (°C)	Densidad de los Cementos Asfálticos (Kg/m ³)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
22	999,40	1001,62	1000,92	1004,58

FUENTE: Elaboración propia

3.2.1.4. PUNTO DE INFLAMACIÓN

Los valores logrados de los puntos de inflamación de los distintos cementos asfálticos, se obtuvieron mediante la realización del ensayo Punto de Inflamación mediante la Copa Abierta de Cleveland, según la Normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras descripta a continuación:

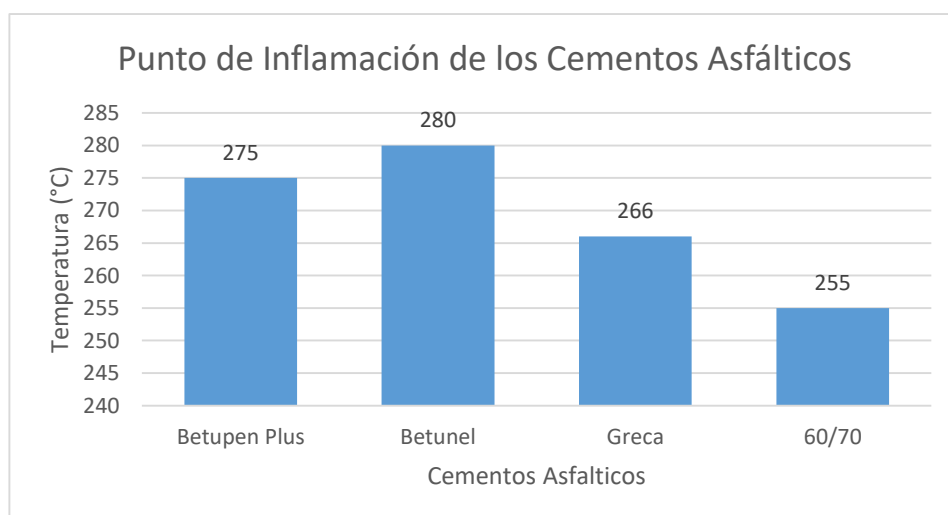
3.2.1.4.1. PUNTOS DE INFLAMACIÓN OBTENIDOS DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN ABC

TABLA N° 3. 4. Puntos de inflamación de los cementos asfálticos

Punto de Inflamación	
Cemento Asfáltico	Temperatura (°C)
Betupen Plus	275
Betunel	280
Greca	266
Convencional 60/70	255

FUENTE: Elaboración propia

FIGURA N° 3. 1. Puntos de inflamación de los cementos asfálticos



FUENTE: Elaboración propia

3.2.1.5. PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Los resultados obtenidos de los puntos de ablandamiento de los cementos asfálticos, se consiguieron mediante la realización del ensayo Punto de Ablandamiento con el aparato de Anillo y Bola, según la Normativa de la Administradora Boliviana de Carreteras descrita a continuación:

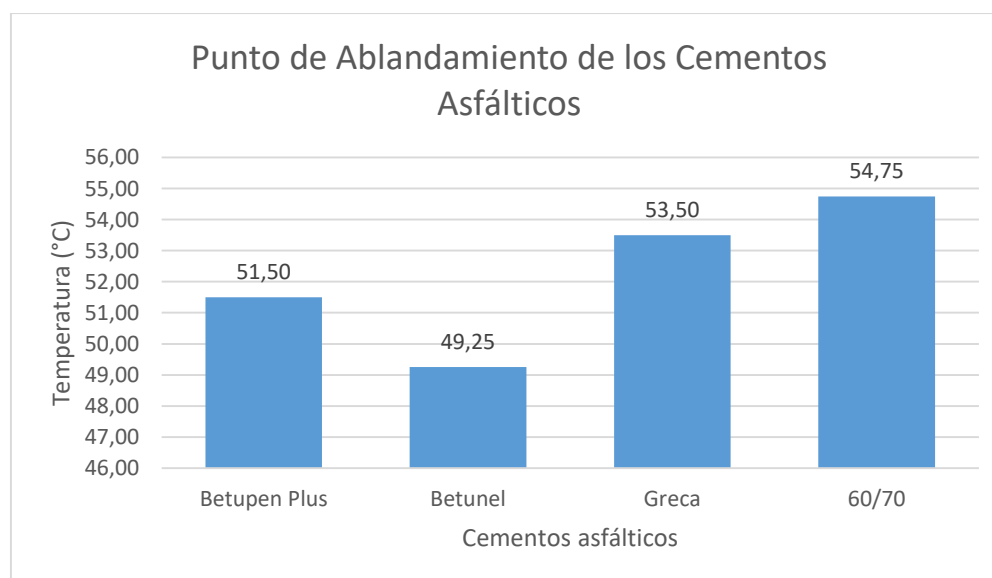
3.2.1.5.2. PUNTOS DE ABLANDAMIENTO OBTENIDOS SEGÚN ABC

TABLA N° 3. 5. Puntos de ablandamiento de los cementos asfálticos

Punto de Ablandamiento	
Cemento Asfáltico	Temperatura (°C)
Betupen Plus	51,50
Betunel	49,25
Greca	53,50
Convencional 60/70	54,75

FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA N° 3. 2. Puntos de ablandamiento de los cementos asfálticos



FUENTE: Elaboración propia

3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS CON VARIACIÓN DE TEMPERATURAS

3.3.1. DUCTILIDAD DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Con la variación de la temperatura en el ensayo de ductilidad, se pretende ver la incidencia de esta variable en el comportamiento de cada cemento asfáltico convencional, por ende, se obtuvieron los valores de las ductilidades a nueve diferentes temperaturas, en el rango de 10°C a 30°C, con sus respectivos promedios en centímetros. Seguido a las tablas de resultados se mostrará la respectiva figura con su dispersión de puntos.

3.3.1.1. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

A continuación se expone la tabla de resultados de los valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betupen Plus obtenidos mediante el ductilímetro del laboratorio de asfaltos.

TABLA N° 3. 6. Valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betupen Plus obtenidos en laboratorio

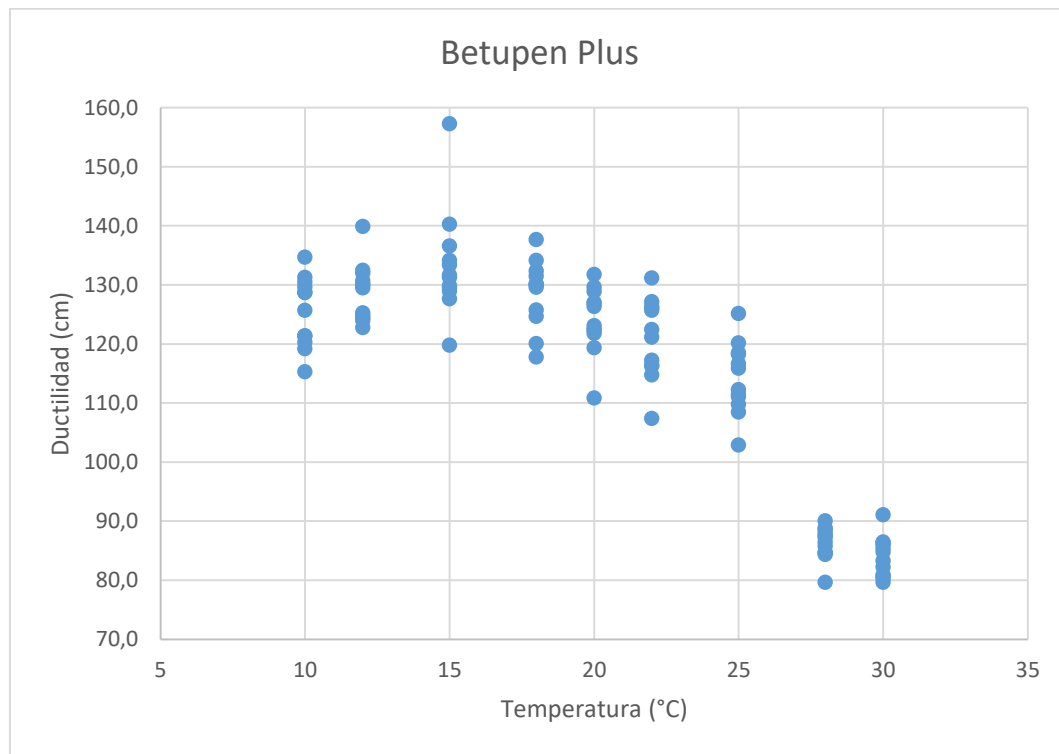
Cemento Asfáltico Betupen Plus 85/100					
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)				
	Mediciones				Promedio
10	121,4	128,8	134,7	121,4	125,58
	115,3	120,3	119,2	131,3	
	128,7	125,7	130,5	129,7	
12	130,1	130,7	139,9	129,5	128,84
	122,8	132,0	132,5	130,1	
	124,0	124,8	124,4	125,3	
15	131,3	136,6	157,3	129,9	133,39
	129,0	129,5	119,8	134,2	
	127,7	131,7	133,4	140,3	

18	130,1	132,4	129,6	130,1	128,59
	117,8	130,1	134,2	124,7	
	136,7	125,8	120,1	131,5	
20	122,5	127,0	126,9	110,90	124,23
	126,4	122,4	119,4	123,10	
	131,8	121,8	129,7	128,90	
22	107,4	116,4	121,2	127,20	121,03
	125,7	117,3	131,2	122,50	
	116,3	126,1	114,8	126,30	
25	118,3	109,8	116,7	118,5	114,24
	102,9	120,2	108,5	115,9	
	111,1	111,5	125,2	112,3	
28	87,6	86,5	88,1	88,6	86,37
	84,4	84,7	79,7	88,9	
	84,7	85,8	87,3	90,1	
30	83,3	80,7	79,7	80,3	83,97
	86,2	84,8	80,9	85,5	
	91,1	82,3	86,5	86,3	

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado del ensayo en el ductilímetro para el cemento asfáltico Betupen Plus, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 3. Dispersión de puntos del cemento asfáltico Betupen Plus en función a la variación de la temperatura



FUENTE: Elaboración propia

3.3.1.2. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO GRECA

A continuación se expone la tabla de resultados de los valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Greca obtenidos mediante el ductilímetro del laboratorio de asfaltos.

TABLA N° 3. 7. Valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico greca obtenidos en laboratorio

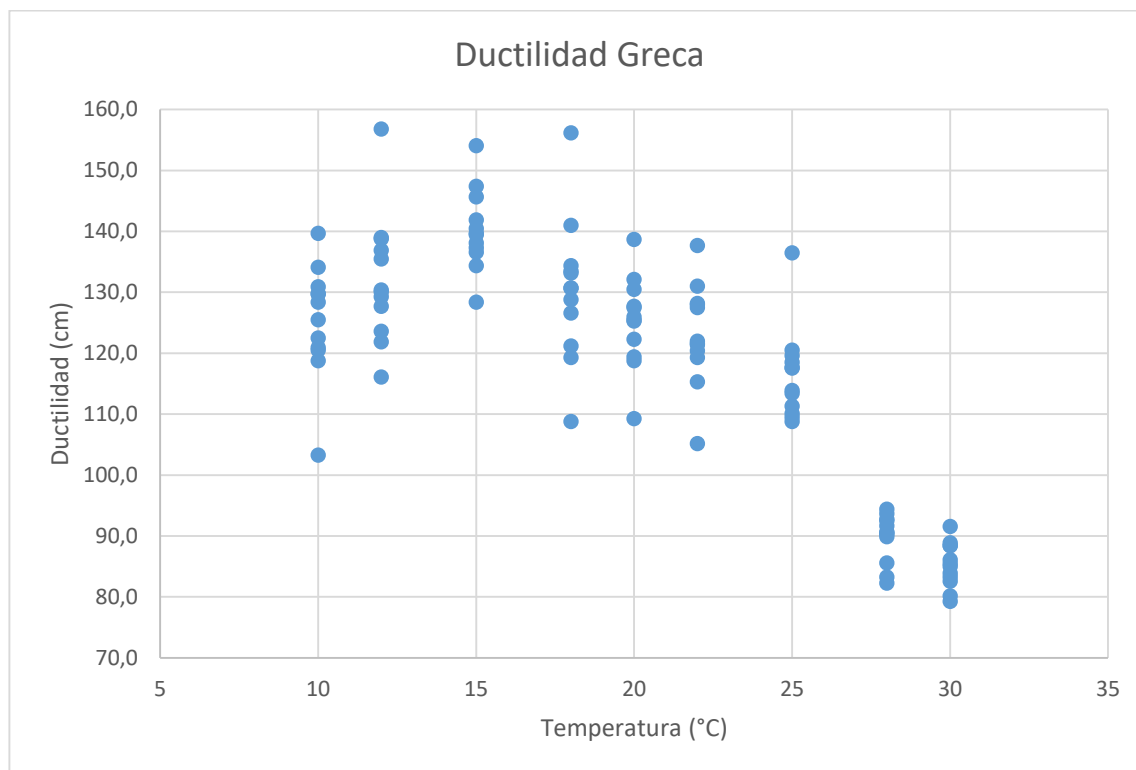
Cemento Asfáltico Greca 85/100					
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)				
	Mediciones				Promedio
10	118,8	120,5	122,5	128,4	

	134,1	120,9	98,2	125,5	124,92
	129,7	129,8	139,7	130,9	
12	139,0	130,1	116,1	135,5	132,18
	123,6	138,8	136,9	130,4	
	121,9	129,3	156,8	127,7	
15	141,9	138,1	134,4	136,6	140,30
	128,4	147,4	154,1	140,5	
	145,7	139,7	137,3	139,5	
18	128,8	141	156,2	130,7	130,37
	133,5	134,4	119,3	108,8	
	126,6	133,2	121,2	130,7	
20	122,3	119,4	132,1	118,80	125,25
	127,5	130,5	109,3	125,30	
	125,4	127,7	138,7	126,00	
22	121,4	105,2	120,4	119,30	123,13
	122,0	128,2	121,6	131,00	
	115,3	137,7	128,0	127,50	
25	136,5	110,1	108,8	117,7	116,45
	117,6	118,5	119,6	111,3	
	113,4	113,9	109,5	120,5	
28	89,9	93,7	82,3	92,5	89,81
	85,6	90,5	90,3	90,7	
	91,7	83,3	94,4	92,8	
30	82,6	86,1	88,9	83,3	85,27
	91,6	80,2	83,9	79,3	
	85,0	88,4	88,4	85,5	

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado del ensayo en el ductilímetro para el cemento asfáltico Greca, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 4. Dispersión de puntos del cemento asfáltico greca en función a la variación de la temperatura



FUENTE: Elaboración propia

3.3.1.3. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

A continuación se expone la tabla de resultados de los valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betunel obtenidos mediante el ductilímetro del laboratorio de asfaltos.

TABLA N° 3. 8. Valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betunel obtenidos en laboratorio.

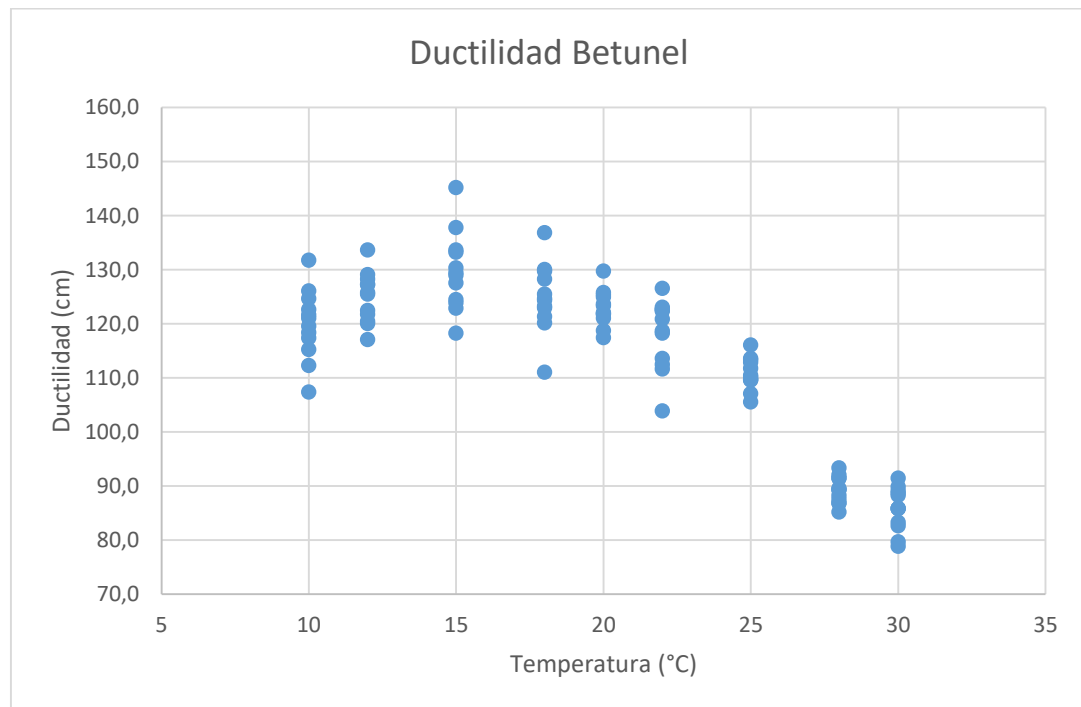
Cemento Asfáltico Betunel 85/100		
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)	
	Mediciones	Promedio

10	117,4	121,7	115,3	121,1	119,88
	107,4	112,3	131,8	124,7	
	122,7	118,4	119,6	126,1	
12	120,5	128,3	129,1	121,8	124,92
	127,3	122,5	125,5	127,3	
	125,8	117,1	120,1	133,7	
15	133,7	137,8	145,2	129,0	129,68
	129,5	130,4	118,3	127,6	
	123,9	122,9	124,5	133,3	
18	136,9	124,7	124,4	125,5	124,89
	111,1	123,0	120,2	130,1	
	123,3	121,4	129,8	128,3	
20	123,7	125,8	121,8	125,4	123,03
	122,1	118,8	125,0	123,4	
	129,8	121,1	117,5	121,9	
22	112,5	111,7	103,9	122,7	118,09
	122,7	118,3	123,1	118,7	
	113,6	122,4	126,6	120,9	
25	109,7	109,8	113,4	109,6	110,86
	116,1	113,6	107,1	112,9	
	105,6	110,2	111,8	110,5	
28	91,5	88,3	86,9	89,6	89,31
	86,9	85,2	93,4	91,5	
	89,3	92,1	89,4	87,6	
30	83,3	79,7	88,7	85,9	85,82
	82,7	89,1	91,5	88,3	
	85,9	85,9	78,9	89,9	

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado del ensayo en el ductilímetro para el cemento asfáltico Betunel, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 5. Dispersión de puntos del cemento asfáltico Betunel plus en función a la variación de la temperatura.



FUENTE: Elaboración propia

3.3.1.3. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

A continuación se expone la tabla de resultados de los valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico convencional 60/70 obtenidos mediante el ductilímetro del laboratorio de asfaltos.

TABLA N° 3. 9. Valores de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico convencional 60/70 obtenidos en laboratorio

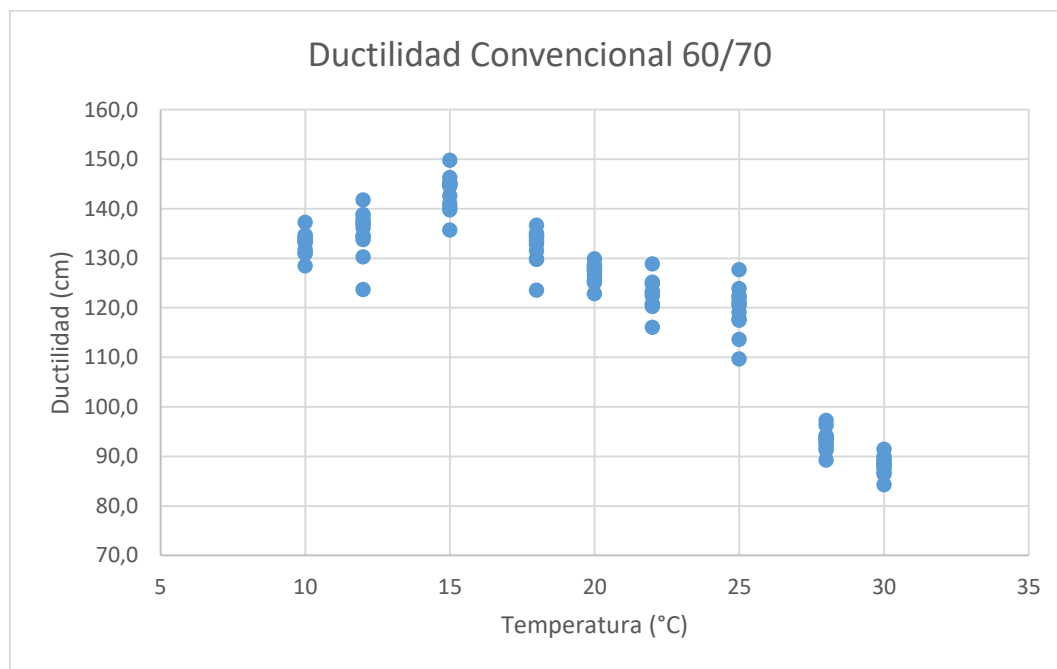
Cemento Asfáltico Convencional 60/70		
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)	
	Mediciones	Promedio

10	133,3	134,3	133,4	131,0	133,12
	134,5	131,4	131,8	128,5	
	137,3	133,9	134,7	133,3	
12	138,8	141,8	134,5	137,0	135,34
	123,7	137,1	133,8	130,3	
	137,7	136,2	134,5	138,7	
15	146,3	145,1	145,2	135,7	143,38
	144,7	144,7	141,1	140,4	
	149,8	142,6	139,8	145,1	
18	133,7	134,4	134,6	123,6	132,53
	132,8	131,5	135,1	129,9	
	136,7	134,8	129,8	133,4	
20	129,9	125,3	127,5	126,6	126,78
	123,1	127,7	128,7	122,9	
	128,4	127,5	125,7	128,1	
22	125,0	122,5	128,9	123,1	122,79
	122,7	123,3	120,8	124,9	
	116,1	120,7	120,3	125,2	
25	109,7	113,6	117,5	120,7	119,72
	119,1	123,9	127,7	117,8	
	121,3	122,4	120,6	122,3	
28	93,7	94,1	92,7	94,2	93,34
	97,3	93,5	93,4	91,3	
	89,3	91,8	96,3	92,5	
30	84,3	90,0	88,7	87,7	88,25
	88,2	88,5	91,5	88,3	
	86,8	86,4	89,6	89,0	

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado del ensayo en el ductilímetro para el cemento asfáltico convencional 60/70, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 6. Dispersión de puntos del cemento asfáltico convencional 60/70 en función a la variación de la temperatura



FUENTE: Elaboración propia

En resumen, se puede observar que la figura del cemento asfáltico convencional 60/70 es la que posee una dispersión menor, ya que se puede apreciar que sus rangos de puntos entre cada valor de temperatura es menor que los demás cementos asfálticos. A su vez, se aprecia que los cementos asfálticos Betupen Plus, Greca y Betunel son los que tienen una mayor dispersión de puntos entre cada valor de temperatura que el cemento asfáltico 60/70, siendo el cemento asfáltico Greca el que ostenta la mayor dispersión de puntos.

3.3.2. PENETRACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Con la variación de la temperatura en el ensayo de penetración, se pretende ver la incidencia de esta variable en el comportamiento de cada cemento asfáltico, por ende, se obtuvieron los valores de las penetraciones a nueve diferentes temperaturas, en el rango de 10°C a 30°C, con sus respectivos promedios en milímetros.

3.3.2.1. PENETRACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

TABLA N° 3. 10. Valores de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betupen Plus obtenidos en laboratorio

Cemento Asfáltico Betupen Plus 85/100				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			
	Mediciones			Promedio
10	26,0	27,5	23,5	25,63
	27,0	27,0	22,5	
	23,5	26,5	22,0	
	26,5	26,5	29,0	
12	33,0	31,0	30,0	31,33
	30,5	33,0	28,5	
	29,5	33,0	29,0	
	31,5	32,5	34,5	
15	37,5	38,0	36,0	36,21
	35,5	36,0	33,0	
	33,5	35,0	43,0	
	38,5	35,5	33,0	
18	56,5	56,5	55,0	56,71
	56,0	56,0	62,0	
	56,5	55,0	61,0	
	58,0	56,0	52,0	
20	73,0	71,5	76,0	73,38
	76,0	71,0	69,0	
	75,0	75,0	69,0	
	72,5	75,5	77,0	
22	79,8	75,5	77,5	77,62
	80,0	75,0	82,5	
	77,7	76,0	73,0	
	76,9	77,0	80,5	
25	86,0	86,5	86,0	

	88,0	88,0	85,5	87,00
	85,5	86,0	89,0	
	87,0	85,5	91,0	
28	157,6	160,5	158,5	158,87
	160,1	158,4	155,5	
	161,0	157,5	156,0	
	159,3	158,0	164,0	
30	203,0	201,5	200,5	201,63
	200,5	201,0	203,5	
	201,5	202,5	204,5	
	201,0	200,5	199,5	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.2.2. PENETRACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO GRECA

TABLA N° 3. 11. Valores de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico greca obtenidos en laboratorio

Cemento Asfáltico Greca 85/100				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			
	Mediciones			
10	28,5	29,5	29,5	29,75
	29,0	31,0	32,5	
	30,0	30,0	28,0	
	29,0	28,5	31,5	
12	37,5	36,0	35,5	36,63
	36,5	37,0	38,5	
	35,5	37,0	34,5	
	37,0	36,5	38,0	
15	44,0	45,0	45,0	45,08
	44,5	45,5	43,5	

	46,0	46,0	47,5	
	46,5	45,5	42,0	
18	69,0	70,0	73,5	71,25
	72,0	71,5	68,0	
	70,5	73,5	68,5	
	69,5	73,0	76,0	
20	87,5	89,0	88,5	88,46
	87,5	88,5	90,5	
	89,0	88,0	86,0	
	89,5	87,5	90,0	
22	90,5	92,5	90,0	91,17
	89,5	92,5	94,0	
	89,5	91,5	93,5	
	89,5	92,5	88,5	
25	94,0	94,5	95,0	95,25
	96,0	94,0	99,0	
	93,5	93,5	97,5	
	94,0	94,0	98,0	
28	152,1	153,0	151,5	151,00
	148,3	149,7	152,0	
	149,9	151,5	158,0	
	149,3	150,0	146,7	
30	186,0	184,0	185,5	184,46
	184,0	186,5	190,0	
	184,5	182,5	181,5	
	185,0	184,0	180,0	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.2.3. PENETRACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

TABLA N° 3. 12. Valores de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betunel obtenidos en laboratorio

Cemento Asfáltico Betunel 85/100				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			
	Mediciones			Promedio
10	27,5	27,5	28,5	28,33
	27,0	29,5	26,5	
	29,0	29,0	30,5	
	27,0	27,0	31,0	
12	32,5	31,5	30,0	30,92
	30,5	32,5	29,5	
	29,5	31,5	34,5	
	30,0	30,5	28,5	
15	39,0	37,5	38,5	38,50
	39,5	38,0	37,5	
	39,0	37,5	41,0	
	39,5	38,0	37,0	
18	62,0	60,0	60,5	60,42
	58,0	58,5	67,5	
	62,5	61,5	56,5	
	60,5	60,0	57,5	
20	76,5	79,5	79,0	77,04
	77,0	78,5	78,5	
	75,5	77,0	70,0	
	75,5	77,5	80,0	
22	83,0	80,5	81,5	80,54
	80,0	78,0	84,5	
	81,0	82,0	75,5	
	81,5	82,5	76,5	
25	89,5	88,5	89,5	

	90,5	89,0	91,0	89,25
	88,0	88,0	86,5	
	90,0	89,0	91,5	
28	155,5	159,5	156,0	157,28
	156,5	158,0	157,0	
	156,0	159,0	161,5	
	159,3	155,5	153,5	
30	205,5	206,0	207,0	204,50
	202,0	206,5	200,5	
	207,0	206,5	201,5	
	203,5	207,0	201,0	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.2.4. PENETRACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

TABLA N° 3. 13. Valores de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico convencional 60/70 obtenidos en laboratorio

Cemento Asfáltico Convencional 60/70				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			Promedio
	Mediciones			
10	13,5	12,5	13,5	14,13
	13,0	13,5	11,5	
	15,5	14,0	18,0	
	14,5	12,5	17,5	
12	14,5	18,5	16,5	17,13
	19,5	14,5	21,5	
	16,0	14,5	12,5	
	19,0	17,5	21,0	
15	23,5	24,5	24,0	23,50
	22,0	22,5	26,5	
	22,0	23,5	20,5	

	24,0	23,0	26,0	
18	37,5	34,5	37,0	35,71
	34,5	37,5	36,0	
	34,0	36,0	38,0	
	35,5	36,5	31,5	
20	44,0	44,0	43,0	43,29
	44,5	43,5	42,5	
	44,0	43,0	40,0	
	42,5	42,5	46,0	
22	53,0	52,4	54,5	53,85
	51,9	52,1	54,0	
	55,8	56,0	59,5	
	51,5	55,0	50,5	
25	68,5	66,5	66,0	65,92
	66,5	64,0	70,0	
	68,5	63,5	70,0	
	63,0	64,0	60,5	
28	96,5	99,0	97,5	98,17
	99,5	100,5	101,0	
	96,5	97,0	102,5	
	97,0	98,0	93,0	
30	120,0	120,0	122,0	121,38
	122,0	123,0	125,0	
	119,5	120,5	118,0	
	120,0	121,5	125,0	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.3. DENSIDAD DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Con la variación de la temperatura en el ensayo de densidad, se pretende ver la incidencia de esta variable en el comportamiento de cada cemento asfáltico, por ende, se obtuvieron los valores de las densidades a nueve diferentes temperaturas, en el rango de 10°C a 30°C, con sus respectivos promedios en centímetros.

3.3.3.1. DENSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

TABLA N° 3. 14. Valores de la densidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betupen Plus obtenidos en laboratorio

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)			
	Mediciones			Promedio
10	1003.82	1004.08	1004.12	1007.52
	1003.92	1020.84	1003.75	
	1004.14	1027.51	1004.57	
	1005.02	1003.92	1004.52	
12	1003.85	1020.53	1038.44	1008.20
	1003.32	1004.63	1003.86	
	1003.35	1004.40	1003.51	
	1004.32	1003.51	1004.67	
15	1004.75	1004.70	1010.93	1005.81
	1003.72	1003.10	1004.39	
	1011.29	1004.35	1003.37	
	1004.59	1003.41	1011.13	
18	1001.89	1001.01	1001.89	1001.78
	1001.74	1001.52	1001.84	
	1001.98	1001.52	1002.33	
	1001.51	1002.29	1001.87	
20	1001.37	1000.91	1000.00	1000.99
	1001.83	1001.37	1000.48	
	1000.91	1000.90	1000.45	
	1001.91	1000.88	1000.91	
22	1000.30	1001.18	1000.96	1001.01
	1000.46	1000.75	1001.83	
	1000.80	1000.91	1000.76	
	1002.65	1000.73	1000.76	
25	999.04	1000.21	998.83	999.17
	999.50	998.30	999.95	

	999.01	999.06	999.19	
	998.60	999.70	998.60	
28	999.09	998.34	998.95	998.88
	999.53	998.51	1000.00	
	998.64	998.90	998.14	
	999.39	1000.00	997.02	
30	997.96	998.66	998.18	998.03
	997.71	998.18	997.87	
	998.21	998.58	998.08	
	997.85	997.08	997.96	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.3.2. DENSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

TABLA N° 3. 15. Valores de la densidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betunel obtenidos en laboratorio

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)			Promedio
	Mediciones			
10	1004,59	1017,68	1005,98	1007,04
	1005,08	1006,00	1000,00	
	1005,60	1005,77	1005,53	
	1006,47	1017,20	1004,59	
12	1004,15	1026,45	991,31	1009,01
	1053,60	1004,59	1003,66	
	1004,37	1003,58	1004,11	
	1004,10	1004,67	1003,58	
15	1003,51	987,76	1003,63	998,18
	1002,91	1004,03	987,81	
	1002,49	1003,72	1003,20	
	1003,35	1002,64	973,12	
18	1016,72	1002,87	1002,73	1003,68
	1003,18	1002,18	997,21	
	1003,35	1002,28	1003,23	

	1003,80	1003,36	1003,19	
20	1001,81	1001,82	1002,27	1002,21
	1001,81	1002,45	1002,26	
	1001,83	1001,82	1002,27	
	1005,04	1001,82	1001,35	
22	1000,91	1000,78	1000,48	1000,99
	1000,89	1001,47	1000,97	
	1001,03	1001,22	1001,02	
	1001,30	1000,91	1000,91	
25	999,85	1000,32	999,86	999,98
	999,86	1000,00	1000,00	
	1000,00	999,86	999,86	
	999,87	999,56	1000,76	
28	999,56	999,51	999,57	999,65
	999,52	999,57	1000,00	
	999,54	1000,00	999,52	
	1000,00	999,53	999,51	
30	998,70	999,08	998,57	998,93
	999,02	998,71	999,08	
	999,12	998,55	998,68	
	999,04	999,54	999,08	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.3.3. DENSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO GRECA

TABLA N° 3. 16. Valores de la densidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico greca obtenidos en laboratorio

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)			Promedio
	Mediciones			
10	1006.27	1007.44	1007.33	1008.36
	1007.78	1007.01	1007.78	
	1018.24	1018.19	1006.37	
	1007.41	999.55	1006.95	
12	1006.94	1005.47	1006.98	1005.73
	1005.06	1006.80	1006.05	
	1001.99	1006.34	1006.69	

	1005.42	1010.64	1000.42	
15	1005.79	1011.54	1005.51	1006.68
	1004.90	1004.14	1004.18	
	1006.06	1004.24	1005.52	
	1006.05	1018.02	1004.25	
18	1004.91	1006.69	1006.64	1003.94
	1002.79	1002.40	1003.21	
	1002.97	1004.92	1004.11	
	1000.42	1003.96	1004.21	
20	1001.40	1002.88	1000.97	1003.39
	1002.41	1001.41	1008.92	
	1002.36	1007.63	1007.79	
	1000.86	1001.44	1002.62	
22	1002.21	1002.70	1002.71	1003.43
	1001.33	1002.22	1002.22	
	1009.47	1001.32	1001.44	
	1012.83	1001.88	1000.87	
25	999.15	1001.74	1008.28	1002.50
	1000.88	1002.23	1001.76	
	1000.49	1010.02	1000.44	
	1001.31	1001.38	1002.27	
28	1000.47	1001.76	1000.43	1001.11
	1000.43	1003.45	1001.76	
	1000.44	1001.39	1001.81	
	1000.44	1000.91	1000.00	
30	1000.43	1000.45	1000.00	1000.45
	1000.44	1000.45	1000.45	
	1000.48	1000.00	1000.44	
	1001.32	1000.46	1000.44	

FUENTE: Elaboración propia

3.3.3.4. DENSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

TABLA N° 3. 17. Valores de la densidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico 60/70 obtenidos en laboratorio

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)			Promedio
	Mediciones			
10	1018.79	1012.14	1005.98	1011.98
	1010.54	1011.73	1012.66	
	1010.39	1011.31	1010.09	
	1017.13	1012.48	1010.48	
12	1010.23	1010.59	1001.46	1010.41
	1017.08	1008.76	1010.77	
	1020.52	1009.13	1008.41	
	1009.34	1010.46	1008.18	
15	1008.19	1009.10	1009.80	1008.27
	1007.86	1009.84	1009.48	
	1007.76	1009.79	1001.72	
	1013.96	1007.90	1003.85	
18	1008.05	1009.31	1009.92	1008.04
	1000.43	1008.36	1003.80	
	1008.19	1009.45	1009.10	
	1013.28	1008.15	1008.41	
20	1006.04	1010.36	1007.68	1006.24
	1007.24	1002.71	1007.10	
	1006.27	1007.87	1005.06	
	1001.50	1007.25	1005.81	
22	1004.59	1003.79	1010.97	1005.73
	1000.95	1005.80	1005.71	
	1005.44	1004.59	1005.27	
	1010.96	1004.83	1005.90	
25	1002.13	1003.52	1003.01	1002.80
	1002.76	1002.00	1001.48	

	1001.01	1008.80	1003.18	
	1001.86	1003.32	1000.50	
28	1000.90	1005.35	1000.54	1001.78
	1000.48	1001.56	1005.00	
	1000.92	1000.50	1001.06	
	1001.44	1001.65	1001.96	
30	1002.24	1000.00	1000.53	1000.53
	1000.00	1001.59	1000.48	
	1000.00	1000.54	1000.00	
	1000.52	1000.93	999.52	

FUENTE: Elaboración propia

3.4. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

Con esta investigación se pretende analizar el comportamiento de la ductilidad en función a la variación de la temperatura, mediante la aplicación de estadística y ecuaciones con la mayor correlación que reflejen el comportamiento de la ductilidad para los cementos asfálticos descriptos en antecedentes del presente capítulo.

3.4.1. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE LA DUCTILIDAD PARA DIFERENTES TEMPERATURAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ESTADÍSTICA

Para la optimización de datos se procedió a realizar una discretización de los mismos, la cual se lleva a cabo con una desviación estándar y la aplicación de los rangos máximos y mínimos para desechar los datos más dispersos en la gráfica de dispersión.

3.4.1.1. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 10°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional, con el objeto de determinar en función a valores

estadísticos cuales presentan mayor dispersión respecto a la moda, media para que después sean discretizados o eliminados con el propósito de reflejar un mejor comportamiento de las ductilidades en función a la variación de la temperatura, tal como se muestra en la tabla N° 3.18. a continuación:

TABLA N° 3. 18. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 10°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
10	121,4	118,8	117,4	133,3
10	115,3	134,1	107,4	134,5
10	128,7	129,7	122,7	137,3
10	128,8	120,5	121,7	134,3
10	120,3	120,9	112,3	131,0
10	125,7	129,8	118,4	133,9
10	134,7	122,5	115,3	133,4
10	119,2	103,3	131,8	131,8
10	130,5	139,7	119,6	134,7
10	121,4	128,4	121,1	131,0
10	131,3	125,5	124,7	128,5
10	129,7	130,9	126,1	133,3
Promedio	125,58	125,34	119,88	133,08
Desviación Estándar	5,93	9,25	6,46	2,26
Rangos	131,51	134,60	126,34	135,33
	119,66	116,09	113,41	130,82

FUENTE: Elaboración propia

En esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Greca con un valor de 9.25 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico

convencional 60/70 con un valor de 2.26, teniendo una diferencia entre el mayor y el menor de 6.99, la cual a su vez es mayor que las otras dos desviaciones de los cementos asfálticos restantes.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 75% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 83.33%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 75% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 83.33% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 10°C.

TABLA N° 3. 19. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 10°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
10	121,4	118,8	117,4	133,3
10	128,7	134,1	122,7	134,5
10	128,8	129,7	121,7	134,3
10	120,3	120,5	118,4	131,0
10	125,7	120,9	115,3	133,9
10	130,5	129,8	119,6	133,4
10	121,4	122,5	121,1	131,8
10	131,3	128,4	124,7	134,7
10	129,7	125,5	126,1	131,0
10		130,9		133,3
Promedio	126,42	126,11	120,78	133,12

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.2. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 12°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 12°C.

TABLA N° 3. 20. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 12°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
12	130,1	139,0	120,5	138,8
12	122,8	123,6	127,3	123,7
12	124,0	121,9	125,8	137,7
12	130,7	130,1	128,3	141,8
12	132,0	138,8	122,5	137,1
12	124,8	129,3	117,1	136,2
12	139,9	116,1	129,1	134,5
12	132,5	136,9	125,5	133,8
12	124,4	156,8	120,1	134,5
12	129,5	135,5	121,8	137,0
12	130,1	130,4	127,3	130,3
12	125,3	127,7	133,7	138,7
Promedio	128,84	132,18	124,92	135,34
Desviación Estándar	4,87	10,46	4,65	4,69
Rangos	133,72	142,63	129,57	140,03
	123,97	121,72	120,27	130,65

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Greca con un valor de 10.46 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico Betunel con un valor de 4.65, teniendo una diferencia entre el mayor y menor de 5.81, la cual a su vez es mayor que las otras dos desviaciones de los cementos asfálticos restantes. En este caso, los cementos asfálticos Betupen Plus, Betunel y el convencional 60/70 tienen una desviación estándar similar con valores de 4.87, 4.65 y 4.69 respectivamente.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 83.33% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 83.33%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 83.33% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 75% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 12°C.

TABLA N° 3. 21. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 12°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
12	130,1	139,0	120,5	138,8
12	124,0	123,6	127,3	137,7
12	130,7	121,9	125,8	137,1
12	132,0	130,1	128,3	136,2
12	124,8	138,8	122,5	134,5
12	132,5	129,3	129,1	133,8
12	124,4	136,9	125,5	134,5
12	129,5	135,5	121,8	137,0
12	130,1	130,4	127,3	138,7

12	125,3	127,7		
Promedio	128,34	131,32	125,34	136,48

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.3. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 15°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 15°C.

TABLA N° 3. 22. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 15°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
15	131,3	138,1	133,7	146,3
15	129,0	147,4	129,5	144,7
15	127,7	139,7	123,9	149,8
15	136,6	141,9	137,8	145,1
15	129,5	128,4	130,4	144,7
15	131,7	145,7	122,9	142,6
15	157,3	134,4	145,2	145,2
15	119,8	154,1	124,5	141,1
15	133,4	137,3	118,3	139,8
15	129,9	136,6	129,0	135,7
15	134,2	140,5	127,6	140,4
15	140,3	139,5	133,3	145,1
Promedio	133,39	140,30	129,68	143,37
Desviación Estándar	9,05	6,59	7,24	3,68
Rangos	142,44	146,89	136,92	147,05

	124,34	133,71	122,43	139,69
--	---------------	---------------	---------------	---------------

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Betupen Plus con un valor de 9.05 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico convencional 60/70 con un valor de 3.68, teniendo una diferencia entre el mayor y menor de 5.37, la cual a su vez es menor que las otras dos desviaciones de los cementos asfálticos restantes.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 83.33% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 75%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 75% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 83.33% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 15°C.

TABLA N° 3. 23. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 15°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
15	131,3	138,1	133,7	146,3
15	129,0	139,7	129,5	144,7
15	127,7	141,9	123,9	145,1
15	136,6	145,7	124,5	144,7
15	129,5	134,4	130,4	142,6
15	131,7	137,3	122,9	145,2
15	133,4	136,6	129,0	141,1
15	129,9	140,5	127,6	139,8

15	134,2	139,5	133,3	140,4
15	140,3			145,1
Promedio	132,36	139,30	128,31	143,50

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.4. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 18°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 18°C.

TABLA N° 3. 24. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 18°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
18	130,1	128,8	136,9	133,7
18	117,8	133,5	111,1	132,8
18	137,7	126,6	123,3	136,7
18	132,4	141,0	124,7	134,4
18	130,1	134,4	123,0	131,5
18	125,8	133,2	121,4	134,8
18	129,6	156,2	124,4	134,6
18	134,2	119,3	120,2	135,1
18	120,1	121,2	129,8	129,8
18	130,1	130,7	125,5	123,6
18	124,7	108,8	130,1	129,9
18	131,5	130,7	128,3	133,4
Promedio	128,68	130,37	124,89	132,53
Desviación Estándar	5,69	11,69	6,31	3,49

Rangos	134,37	142,06	131,20	136,02
	122,98	118,68	118,58	129,03

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Greca con un valor de 11.69 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico convencional 60/70 con un valor de 3.49, teniendo una diferencia entre el mayor y menor de 8.20, la cual a su vez es mayor que las otras dos desviaciones de los cementos asfálticos restantes.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 75% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 83.33%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 83.33% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 83.33% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 18°C.

TABLA N° 3. 25. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 18°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
18	130,1	128,8	123,3	133,7
18	132,4	133,5	124,7	132,8
18	130,1	126,6	123,0	134,4
18	125,8	141,0	121,4	131,5
18	129,6	134,4	124,4	134,8
18	134,2	133,2	120,2	134,6
18	130,1	130,7	129,8	135,1

18	124,7	119,3	125,5	129,8
18	131,5	121,2	130,1	129,9
18		130,7	128,3	133,4
Promedio	129,83	129,94	125,07	133,00

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.5. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 20°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 20°C.

TABLA N° 3. 26. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 20°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
20	122,5	119,4	123,7	129,9
20	126,4	130,5	122,1	125,1
20	131,8	127,7	129,8	128,4
20	127,0	122,3	125,8	125,3
20	122,4	127,5	118,8	127,7
20	121,8	125,4	121,1	127,5
20	126,9	132,1	121,8	127,5
20	119,4	109,3	125,0	128,7
20	129,7	138,7	117,5	125,7
20	110,9	118,8	125,4	126,6
20	123,1	125,3	123,4	122,9
20	128,9	126,0	121,9	128,1
Promedio	124,23	125,25	123,03	126,95

Desviación Estándar	5,58	7,42	3,30	1,92
Rangos	129,82	132,67	126,32	128,87
	118,65	117,83	119,73	125,03

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Greca con un valor de 7.42 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico convencional 60/70 con un valor de 1.92, teniendo una diferencia entre el mayor y menor de 5.50, la cual a su vez es mayor que el cemento asfáltico Betunel y similar al cemento asfáltico Betupen Plus con un valor de 5.58.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 83.33% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 83.33%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 75% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 83.33% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 20°C.

TABLA N° 3. 27. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 20°c

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
20	122,5	119,4	123,7	128,1
20	126,4	130,5	122,1	125,1
20	127,0	127,7	125,8	128,4
20	122,4	122,3	121,1	125,3
20	121,8	127,5	121,8	127,7

20	126,9	125,4	125,0	127,5
20	119,4	132,1	125,4	127,5
20	129,7	118,8	123,4	128,7
20	123,1	125,3	121,9	125,7
20	128,9	126,0		126,6
Promedio	124,81	125,50	123,36	127,06

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.6. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 22°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 22°C.

TABLA N° 3. 28. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 22°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
22	107,4	121,4	112,5	125,0
22	125,7	122,0	122,7	122,7
22	116,3	115,3	113,6	116,1
22	116,4	105,2	111,7	122,5
22	117,3	128,2	118,3	123,3
22	126,1	137,7	122,4	120,7
22	121,2	120,4	103,9	128,9
22	131,2	121,6	123,1	120,8
22	114,8	128,0	126,6	120,3
22	127,2	119,3	122,7	123,1
22	122,5	131,0	118,7	124,9
22	126,3	127,5	120,9	125,2

Promedio	121,03	123,13	118,09	122,79
Desviación Estándar	6,75	8,28	6,47	3,19
Rangos	127,78	131,41	124,56	125,99
	114,28	114,85	111,62	119,60

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Greca con un valor de 8.28 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico convencional 60/70 con un valor de 3.19, teniendo una diferencia entre el mayor y menor de 5.09, la cual a su vez es menor que las otras dos desviaciones de los cementos asfálticos restantes.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que los cuatros cementos asfálticos de la tabla, Betupen Plus, Greca, Betunel y el convencional 60/70 tienen un 83.33% de los valores de ductilidad dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 22°C.

TABLA N° 3. 29. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 22°c

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
22	125,7	121,4	112,5	125,0
22	116,3	122,0	122,7	122,7
22	116,4	115,3	113,6	122,5
22	117,3	128,2	111,7	123,3
22	126,1	120,4	118,3	120,7

22	121,2	121,6	122,4	120,8
22	114,8	128,0	123,1	120,3
22	127,2	119,3	122,7	123,1
22	122,5	127,5	118,7	124,9
22	126,3	131,0	120,9	125,2
Promedio	121,38	123,47	118,66	122,85

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.7. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 25°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 25°C.

TABLA N° 3. 30. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 25°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
25	118,3	110,1	109,7	109,7
25	102,9	118,5	116,1	119,1
25	111,1	113,9	105,6	121,3
25	109,8	136,5	109,8	113,6
25	120,2	117,6	113,6	123,9
25	111,5	113,4	110,2	122,4
25	116,7	108,8	113,4	117,5
25	108,5	119,6	107,1	127,7
25	125,2	109,5	111,8	120,6
25	118,5	117,7	109,6	120,7
25	115,9	111,3	112,9	117,8
25	112,3	120,5	110,5	122,3

Promedio	114,24	116,45	110,86	119,72
Desviación Estándar	6,04	7,54	2,91	4,73
Rangos	120,28	123,99	113,76	124,45
	108,20	108,91	107,95	114,99

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Greca con un valor de 7.54 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico Betunel con un valor de 2.91, teniendo una diferencia entre el mayor y el menor de 4.63.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 83.33% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 83.33%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 75% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 75% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 25°C.

TABLA N° 3. 31. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 25°c

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
25	118,3	110,1	109,7	119,1
25	111,1	118,5	109,8	121,3
25	109,8	113,9	113,6	123,9
25	120,2	117,6	110,2	122,4
25	111,5	113,4	113,4	117,5
25	116,7	119,6	111,8	120,6

25	108,5	109,5	109,6	120,7
25	118,5	117,7	112,9	117,8
25	115,9	111,3	110,5	122,3
25	112,3	120,5		
Promedio	114,28	115,21	111,28	120,62

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.8. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 28°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 28°C.

TABLA N° 3. 32. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 28°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
28	87,6	93,7	91,5	93,7
28	84,4	90,5	86,9	97,3
28	84,7	83,3	89,3	89,3
28	86,5	89,9	88,3	94,1
28	84,7	85,6	85,2	93,5
28	85,8	91,7	92,1	91,8
28	88,1	82,3	86,9	92,7
28	79,7	90,3	93,4	93,4
28	87,3	94,4	89,4	96,3
28	88,6	92,5	89,6	94,2
28	88,9	90,7	91,5	91,3
28	90,1	92,8	87,6	92,5
Promedio	86,37	89,81	89,31	93,34

Desviación Estándar	2,78	3,98	2,46	2,13
Rangos	89,15	93,79	91,77	95,47
	83,59	85,83	86,85	91,21

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Betunel con un valor de 3.98 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico convencional 60/70 con un valor de 2.13, teniendo una diferencia entre el mayor y menor de 1.85, la cual a su vez es menor que las otras dos desviaciones de los cementos asfálticos restantes.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 83.33% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 66.67%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 75% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 75% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 28°C.

TABLA N° 3. 33. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 28°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
28	87,6	93,7	91,5	93,7
28	84,4	90,5	86,9	94,1
28	84,7	89,9	89,3	93,5
28	86,5	91,7	88,3	91,8
28	84,7	90,3	86,9	92,7

28	85,8	92,5	89,4	93,4
28	88,1	90,7	89,6	94,2
28	87,3	92,8	91,5	91,3
28	88,6		87,6	92,5
28	88,9			
Promedio	86,66	91,51	89,00	93,02

FUENTE: Elaboración propia

3.4.1.9. DISCRETIZACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD CON LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA PARA UNA TEMPERATURA DE 30°C

Se aplicará la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico convencional. Los valores coloreados serán los datos que están dentro del rango resultante, por ende los valores sin color serán eliminados, como se puede observar en la siguiente tabla, donde la temperatura es de 30°C.

TABLA N° 3. 34. Aplicación de desviación estándar y rangos de variación a las ductilidades de los cementos asfálticos a 30°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
30	83,3	86,1	83,3	84,3
30	86,2	80,2	82,7	88,2
30	91,1	88,4	85,9	86,8
30	80,7	82,6	79,7	90,0
30	84,8	91,6	89,1	88,5
30	82,3	85,0	85,9	86,4
30	79,7	88,9	88,7	88,7
30	80,9	83,9	91,5	91,5
30	86,5	88,4	78,9	89,6
30	80,3	83,3	85,9	87,7
30	85,5	79,3	88,3	88,3
30	86,3	85,5	89,9	89,0

Promedio	83,97	85,27	85,82	88,25
Desviación Estandar	3,38	3,67	3,99	1,85
Rangos	87,35	88,93	89,81	90,10
	80,59	81,60	81,82	86,40

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se puede apreciar que las desviaciones estándar varían bastante entre los cementos asfálticos. La mayor desviación es la del cemento asfáltico Betunel con un valor de 3.99 mientras que la menor desviación es la del cemento asfáltico convencional 60/70 con un valor de 1.85, teniendo una diferencia entre el mayor y menor de 2.14, la cual a su vez es menor que las otras dos desviaciones de los cementos asfálticos restantes.

Al seleccionar los valores de la ductilidad dentro del rango calculado, se puede determinar que el cemento asfáltico Betupen Plus tiene un 75% de los valores dentro del rango, el cemento asfáltico Greca tiene un 75%, el cemento asfáltico Betunel tiene un 66.67% y el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene un 83.33% de los valores dentro del rango.

A continuación se muestra la siguiente tabla que refleja los valores de ductilidad considerados en función a datos estadísticos para el análisis de la variación de la ductilidad en función a la temperatura a una temperatura de 30°C.

TABLA N° 3. 35. Valores de ductilidad de los cementos asfálticos convencionales seleccionados dentro del rango de 30°C

Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Betupen Plus	Greca	Betunel	60/70
30	83,3	86,1	83,3	88,2
30	86,2	85,5	82,7	86,8
30	80,7	88,4	85,9	90,0
30	84,8	82,6	89,1	88,5

30	82,3	85,0	85,9	86,4
30	80,9	88,9	88,7	88,7
30	86,5	83,9	85,9	89,6
30	85,5	88,4	88,3	87,7
30	86,3	83,3		88,3
30				89,0
Promedio	84,06	85,79	86,23	88,32

FUENTE: Elaboración propia

3.4.2. RESUMEN DE DUCTILIDADES EN FUNCIÓN A LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA

3.4.2.1. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

Una vez obtenidos los valores resultantes de la aplicación estadística de la ductilidad de los cementos asfálticos convencionales, se muestra en la siguiente tabla los resultados de la depuración total del cemento asfáltico Betupen Plus, siendo 21 el número total de depuraciones en los valores de las ductilidades.

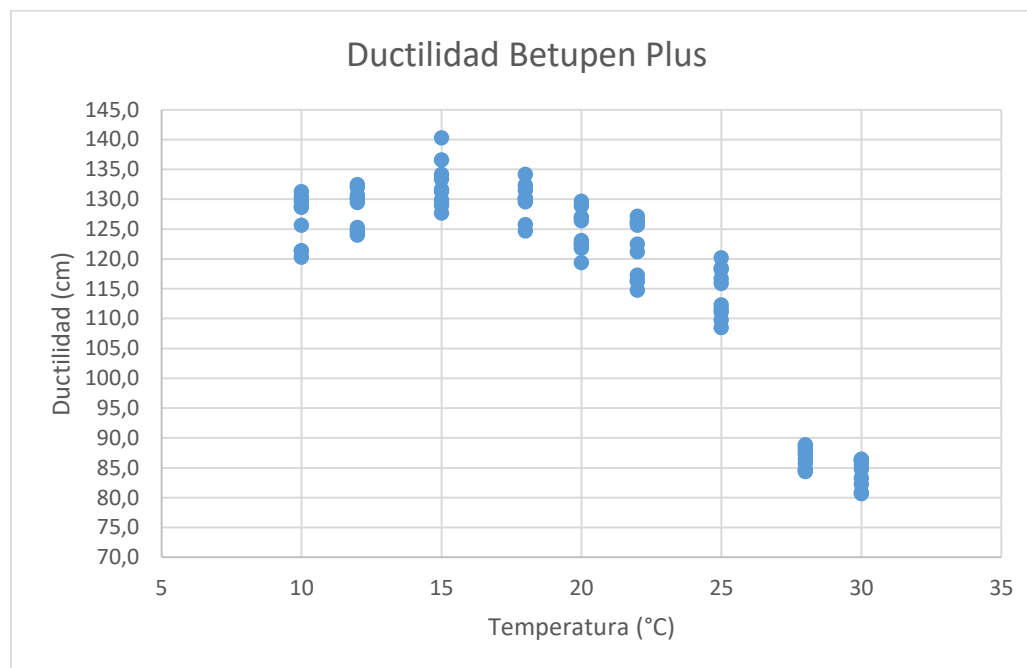
TABLA N° 3. 36. Valores de la ductilidad del cemento asfáltico Betupen plus en función a la variación de la temperatura

Cemento Asfáltico Betupen Plus 85/100				
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			Promedio
	Mediciones			
10	121,4	125,7	129,7	126,42
	128,8	130,5		
	120,3	121,4		
	128,7	131,3		
12	130,1	124,8	130,1	128,34
	124,0	132,5	125,3	
	130,7	124,4		
	132,0	129,5		
15	131,3	129,5	134,2	

	129,0	131,7	140,3	
	127,7	133,4		132,36
	136,6	129,9		
18	130,1	129,6	131,5	
	132,4	134,2		129,83
	130,1	130,1		
	125,8	124,7		
20	122,5	121,8	123,1	
	126,4	126,9	128,9	124,81
	127,0	119,4		
	122,4	129,7		
22	125,7	126,1	122,5	
	116,3	121,2	126,3	121,38
	116,4	114,8		
	117,3	127,2		
25	118,3	111,5	115,9	
	111,1	116,7	112,3	114,28
	109,8	108,5		
	120,2	118,5		
28	87,6	84,7	88,6	
	84,4	85,8	88,9	86,66
	84,7	88,1		
	86,5	87,3		
30	83,3	82,3	86,3	
	86,2	80,9		84,06
	80,7	86,5		
	84,8	85,5		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Betupen Plus, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 7. Dispersión de puntos de la ductilidad del cemento asfáltico Betupen plus

FUENTE: Elaboración propia

3.4.2.2. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO GRECA

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico convencional Greca, siendo el 22 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 37. Valores de la ductilidad del cemento asfáltico greca en función a la variación de la temperatura

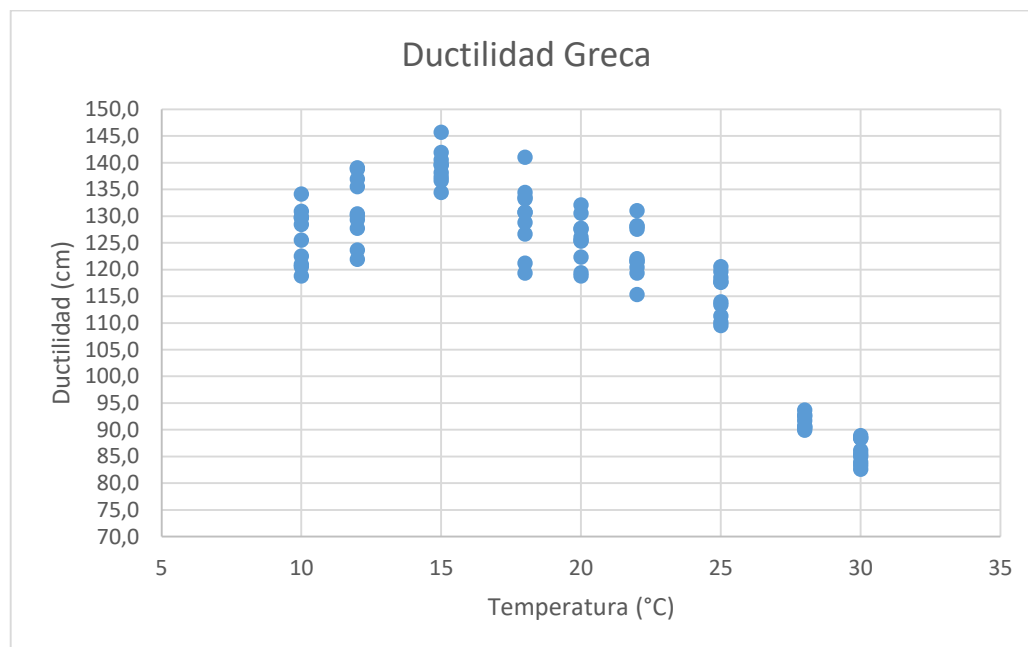
Cemento Asfáltico Greca 85/100				
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			Promedio
	Mediciones			
10	118,8	122,5	125,5	126,11
	120,5	128,4	130,9	
	134,1	120,9		
	129,7	129,8		
12	139,0	138,8	130,4	

	123,6	129,3	127,7	131,32
	121,9	136,9		
	130,1	135,5		
15	138,1	134,4	139,5	139,30
	139,7	137,3		
	141,9	136,6		
	145,7	140,5		
18	128,8	134,4	121,2	129,94
	133,5	133,2	130,7	
	126,6	130,7		
	141,0	119,3		
20	119,4	127,5	125,3	125,50
	130,5	125,4	126,0	
	127,7	132,1		
	122,3	118,8		
22	121,4	120,4	127,5	123,47
	122,0	121,6	131,0	
	115,3	128,0		
	128,2	119,3		
25	110,1	113,4	111,3	115,21
	118,5	119,6	120,5	
	113,9	109,5		
	117,6	117,7		
28	93,7	90,3		91,51
	90,5	92,5		
	89,9	90,7		
	91,7	92,8		
30	86,1	85,0	83,3	85,79
	85,5	88,9		
	88,4	83,9		
	82,6	88,4		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Greca, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 8. Dispersión de puntos de la ductilidad del cemento asfáltico greca



FUENTE: Elaboración propia

3.4.2.3. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico convencional Betunel, siendo el 25 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 38. Valores de la ductilidad del cemento asfáltico Betunel en función a la variación de la temperatura

Cemento Asfáltico Betunel 85/100				
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			
	Mediciones			Promedio
10	117,4	115,3	126,1	120,78
	121,7	119,6		

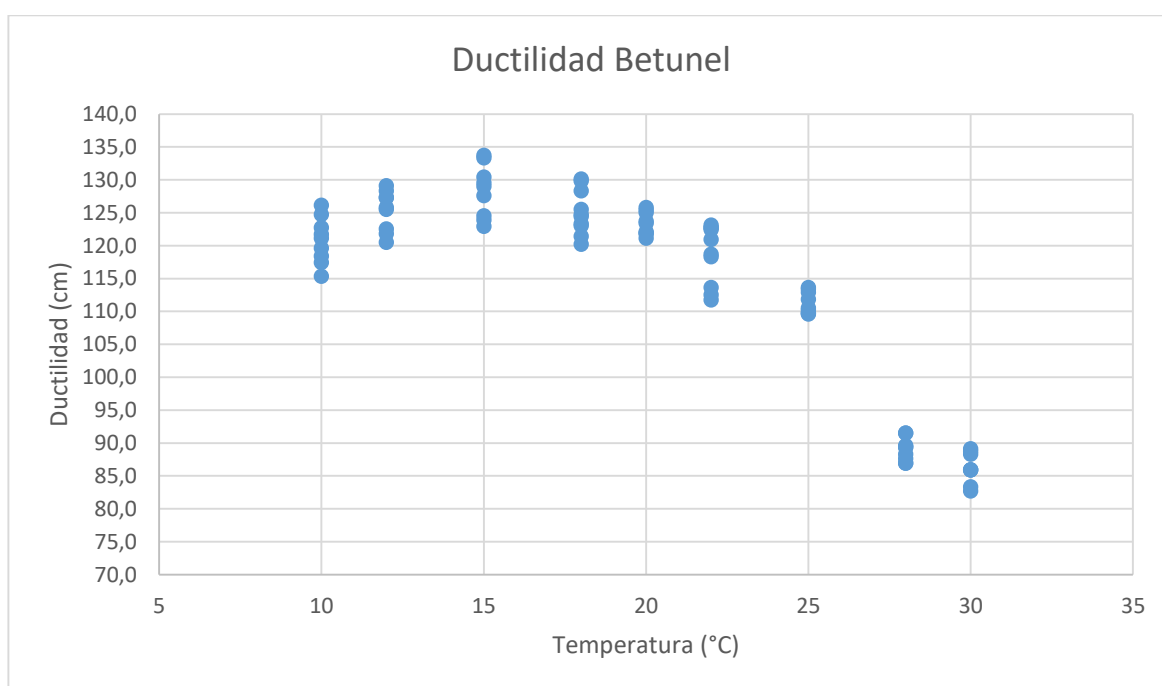
	118,4	124,7		
	122,7	121,1		
12	120,5	122,5	127,3	125,34
	127,3	129,1		
	125,8	125,5		
	128,3	121,8		
15	133,7	130,4	133,3	128,31
	129,5	122,9		
	123,9	129,0		
	124,5	127,6		
18	123,3	124,4	130,1	125,07
	124,7	120,2	128,3	
	123,0	129,8		
	121,4	125,5		
20	123,7	121,8	121,9	123,36
	122,1	125,0		
	125,8	125,4		
	121,1	123,4		
22	112,5	118,3	118,7	118,66
	122,7	122,4	120,9	
	113,6	123,1		
	111,7	122,7		
25	109,7	113,4	110,5	111,28
	109,8	111,8		
	113,6	109,6		
	110,2	112,9		
28	91,5	86,9	87,6	89,00
	86,9	89,4		
	89,3	89,6		
	88,3	91,5		
30	83,3	85,9		

	82,7	88,7		86,23
	85,9	85,9		
	89,1	88,3		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Betunel, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 9. Dispersión de puntos de la ductilidad del cemento asfáltico Betunel



FUENTE: Elaboración propia

3.4.2.4. DUCTILIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la ductilidad en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico convencional 60/70, siendo el 21 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 39. Valores de la ductilidad del cemento asfáltico convencional 60/70 en función a la variación de la temperatura

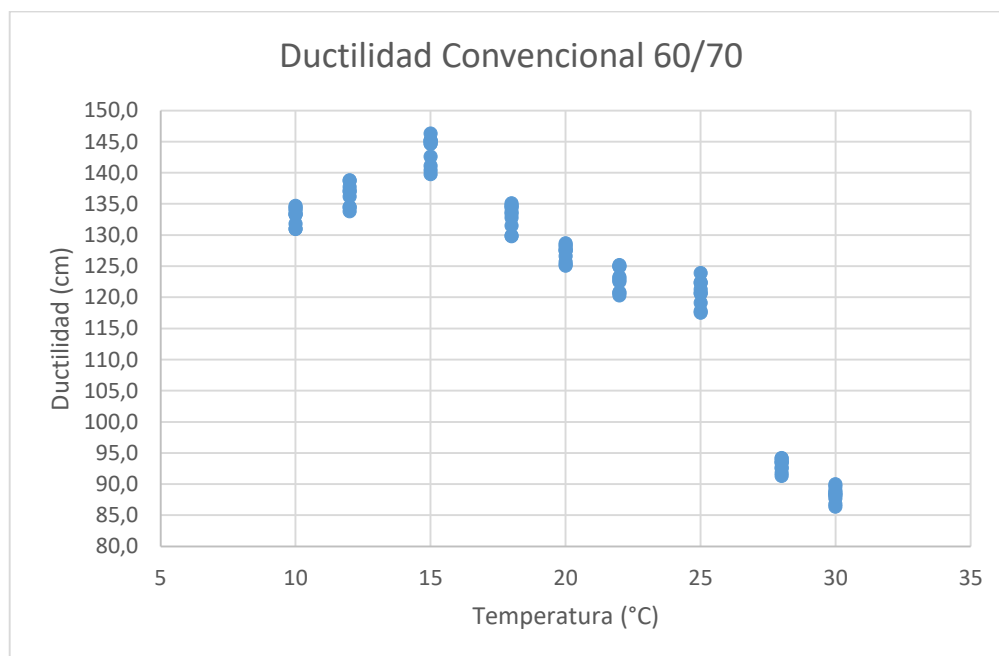
Cemento Asfáltico Convencional 60/70				
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)			Promedio
	Mediciones			
10	133,3	133,9	131,0	133,12
	134,5	133,4	133,3	
	134,3	131,8		
	131,0	134,7		
12	138,8	134,5	138,7	136,48
	137,7	133,8		
	137,1	134,5		
	136,2	137,0		
15	146,3	142,6	140,4	143,50
	144,7	145,2	145,1	
	145,1	141,1		
	144,7	139,8		
18	133,7	134,8	129,9	133,00
	132,8	134,6	133,4	
	134,4	135,1		
	131,5	129,8		
20	128,1	127,7	125,7	127,06
	125,1	127,5	126,6	
	128,4	127,5		
	125,3	128,7		
22	125,0	120,7	124,9	122,85
	122,7	120,8	125,2	
	122,5	120,3		
	123,3	123,1		
25	119,1	117,5	122,3	

	121,3	120,6		120,62
	123,9	120,7		
	122,4	117,8		
28	93,7	92,7	92,5	93,02
	94,1	93,4		
	93,5	94,2		
	91,8	91,3		
30	88,2	86,4	88,3	88,32
	86,8	88,7	89,0	
	90,0	89,6		
	88,5	87,7		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico convencional 60/70, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 10. Dispersión de puntos de la ductilidad del cemento asfáltico convencional 60/70.



FUENTE: Elaboración propia

3.4.3. RESUMEN DE PENETRACIONES EN FUNCIÓN A LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA

Se aplicó la desviación estándar para capturar los rangos máximos y mínimos de cada cemento asfáltico, con el objeto de determinar en función a valores estadísticos cuales presentan mayor dispersión respecto a la media para que después sean discretizados o eliminados con el propósito de reflejar un mejor comportamiento de las penetraciones en función a la variación de la temperatura, tal como se hizo con las ductilidades en el punto anterior. Toda la aplicación estadística se presentara en anexos y se mostrara la siguiente tabla N°3.40 con los valores discretizados de la penetración, siendo el 26 el número total de depuraciones en las ductilidades:

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betupen Plus, siendo el 26 el número total de depuraciones en las ductilidades:

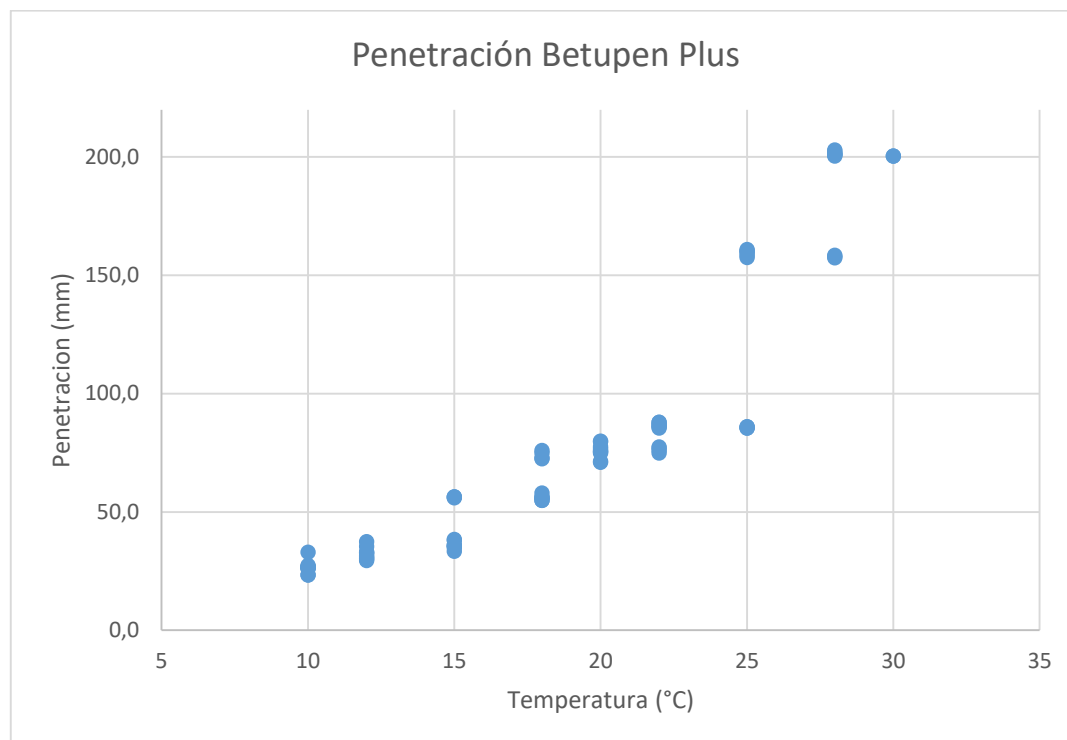
TABLA N° 3. 40. Valores de la penetración del cemento asfáltico Betupen Plus en función a la variación de la temperatura

Cemento Asfáltico Betupen Plus 85/100				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			Promedio
	Mediciones			
10	26,0	27,5	23,5	26,00
	27,0	27,0		
	23,5	26,5		
	26,5	26,5		
12	33,0	31,0	30,0	31,56
	30,5	33,0		
	29,5	33,0		
	31,5	32,5		
15	37,5	38,0	36,0	36,17
	35,5	36,0		
	33,5	35,0		

	38,5	35,5		
18	56,5	56,5	55,0	56,17
	56,0	56,0		
	56,5	55,0		
	58,0	56,0		
20	73,0	71,5	76,0	73,94
	76,0	71,0		
	75,0	75,0		
	72,5	75,5		
22	79,8	75,5	77,5	77,27
	80,0	75,0		
	77,7	76,0		
	76,9	77,0		
25	86,0	86,5	86,0	86,40
	88,0	88,0	85,5	
	85,5	86,0		
	87,0	85,5		
28	157,6	160,5	158,5	158,99
	160,1	158,4		
	161,0	157,5		
	159,3	158,0		
30	203,0	201,5	200,5	201,33
	200,5	201,0		
	201,5	202,5		
	201,0	200,5		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Betupen Plus, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 11. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico Betupen Plus

FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Greca, siendo el 26 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 41. Valores de la penetración del cemento asfáltico Greca en función a la variación de la temperatura

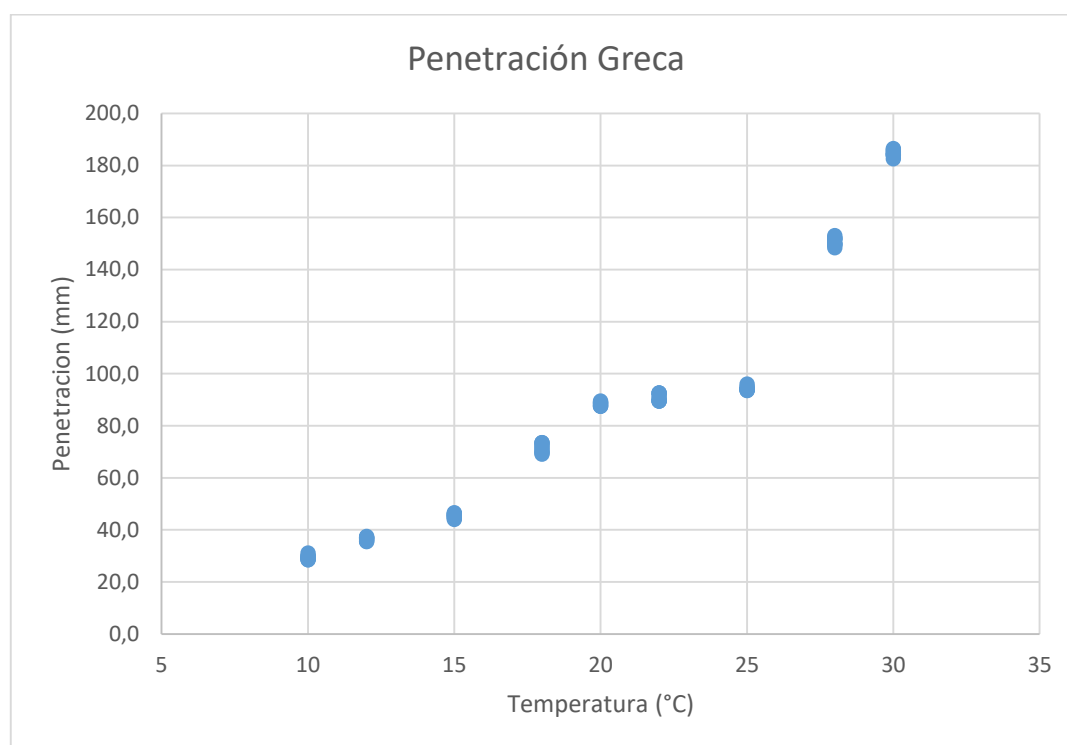
Cemento Asfáltico Greca 85/100				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			Promedio
	Mediciones			
10	28.5	29.5	29.5	29.44
	29.0	31.0		
	30.0	30.0		
	29.0	28.5		
12	37.5	36.0	35.5	

	36.5	37.0		36.50
	35.5	37.0		
	37.0	36.5		
15	44.0	45.0	45.0	45.33
	44.5	45.5		
	46.0	46.0		
	46.5	45.5		
18	69.0	70.0	73.5	71.39
	72.0	71.5		
	70.5	73.5		
	69.5	73.0		
20	87.5	89.0	88.5	88.33
	87.5	88.5		
	89.0	88.0		
	89.5	87.5		
22	90.5	92.5	90.0	90.89
	89.5	92.5		
	89.5	91.5		
	89.5	92.5		
25	94.0	94.5	95.0	94.28
	96.0	94.0		
	93.5	93.5		
	94.0	94.0		
28	152.1	153.0	151.5	150.73
	148.3	149.7	152.0	
	149.9	151.5		
	149.3	150.0		
30	186.0	184.0	185.5	184.67
	184.0	186.5		
	184.5	182.5		
	185.0	184.0		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Greca, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 12. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico Greca



FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betunel, siendo el 23 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 42. Valores de la penetración del cemento asfáltico Betunel en función a la variación de la temperatura

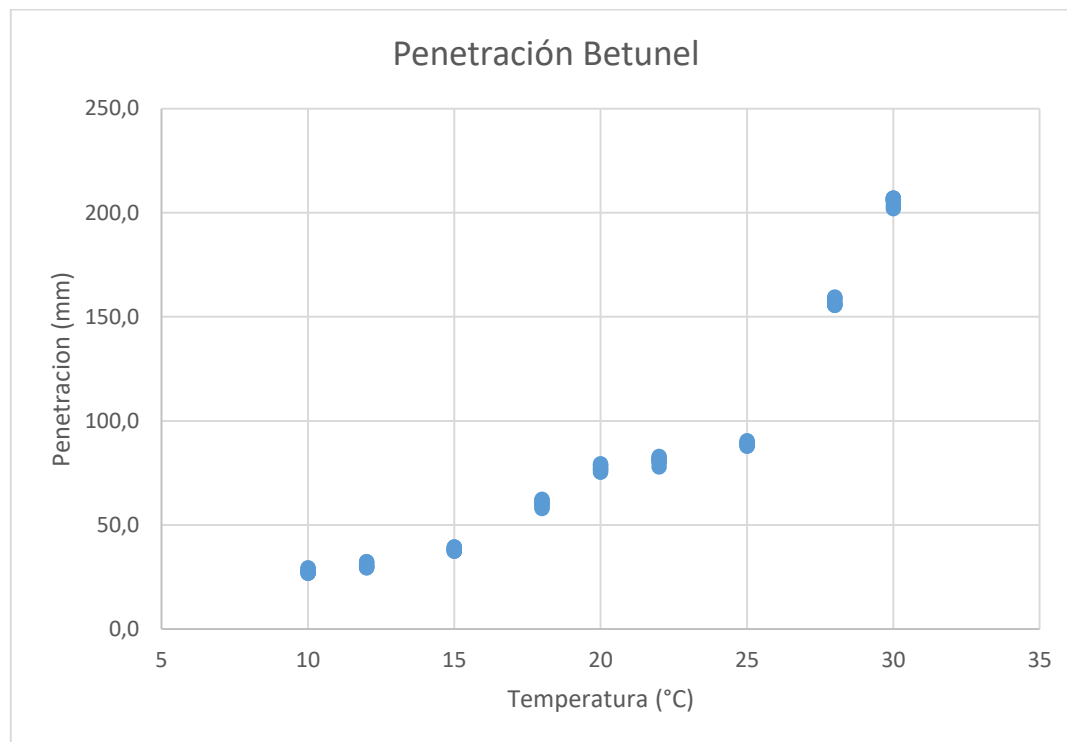
Cemento Asfáltico Betunel 85/100				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			
	Mediciones			Promedio
10	27.5	27.5	28.5	28.00
	27.0	29.5		
	29.0	29.0		
	27.0	27.0		
12	32.5	31.5	30.0	30.80
	30.5	32.5	29.5	
	29.5	31.5		
	30.0	30.5		
15	39.0	37.5	38.5	38.40
	39.5	38.0	37.5	
	39.0	37.5		
	39.5	38.0		
18	62.0	60.0	60.5	60.39
	58.0	58.5		
	62.5	61.5		
	60.5	60.0		
20	76.5	79.5	79.0	77.45
	77.0	78.5	78.5	
	75.5	77.0		
	75.5	77.5		
22	83.0	80.5	81.5	81.11
	80.0	78.0		
	81.0	82.0		
	81.5	82.5		
25	89.5	88.5	89.5	89.11
	90.5	89.0		

	88.0	88.0		
	90.0	89.0		
28	155.5	159.5	156.0	157.23
	156.5	158.0	157.0	
	156.0	159.0		
	159.3	155.5		
30	205.5	206.0	207.0	205.67
	202.0	206.5		
	207.0	206.5		
	203.5	207.0		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Betunel, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 13. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico Betunel



FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Convencional 60/70, siendo el 24 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 43. Valores de la penetración del cemento asfáltico convencional 60/70 en función a la variación de la temperatura

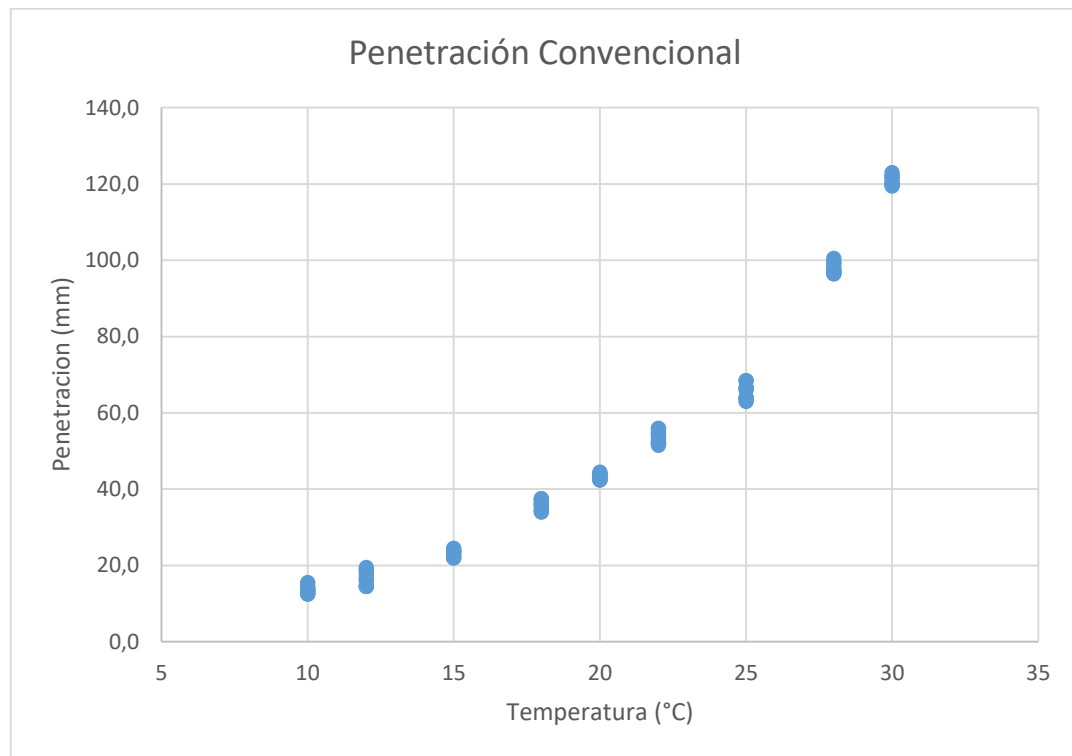
Cemento Asfáltico Convencional 60/70				
Temperatura (°C)	Penetración (mm)			Promedio
	Mediciones			
10	13.5	12.5	13.5	13.61
	13.0	13.5		
	15.5	14.0		
	14.5	12.5		
12	14.5	18.5	16.5	16.72
	19.5	14.5		
	16.0	14.5		
	19.0	17.5		
15	23.5	24.5	24.0	23.22
	22.0	22.5		
	22.0	23.5		
	24.0	23.0		
18	37.5	34.5	37.0	35.90
	34.5	37.5	36.0	
	34.0	36.0		
	35.5	36.5		
20	44.0	44.0	43.0	43.35
	44.5	43.5	42.5	
	44.0	43.0		
	42.5	42.5		
22	53.0	52.4	54.5	53.62
	51.9	52.1	54.0	
	55.8	56.0		

	51.5	55.0		
25	68.5	66.5	66.0	65.61
	66.5	64.0		
	68.5	63.5		
	63.0	64.0		
28	96.5	99.0	97.5	97.94
	99.5	100.5		
	96.5	97.0		
	97.0	98.0		
30	120.0	120.0	122.0	120.94
	122.0	123.0		
	119.5	120.5		
	120.0	121.5		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Convencional 60/70, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 14. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico convencional 60/70



FUENTE: Elaboración propia

3.4.4. RESUMEN DE DENSIDADES EN FUNCIÓN A LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE LA APLICACIÓN ESTADÍSTICA

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betupen Plus, siendo el 25 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 44. Valores de la densidad del cemento asfáltico Betupen Plus en función a la variación de la temperatura

Densidad del Cemento Asfáltico Betupen Plus				
Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)			
	Mediciones			Promedio
10	1004.30	1004.08	1004.57	1004.46
	1005.68	1003.92	1004.52	

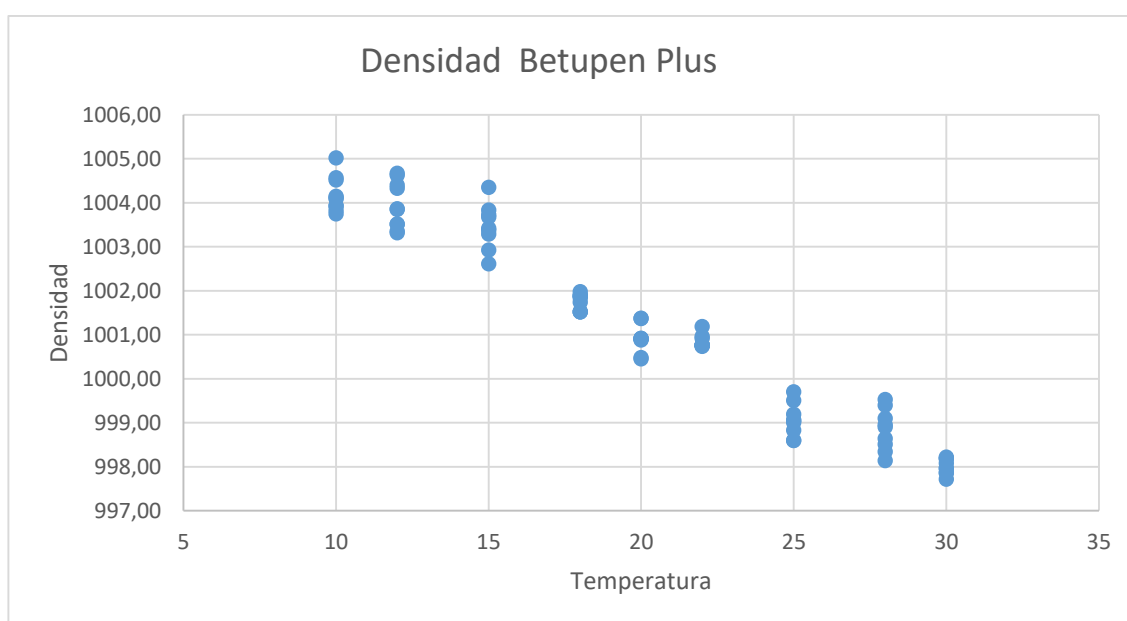
	1004.60	1004.12		
	1005.02	1003.75		
12	1002.88	1004.63	1003.51	1003.66
	1003.32	1004.40	1004.67	
	1003.35	1002.63		
	1004.32	1002.89		
15	1003.83	1002.61	1003.37	1003.46
	1003.72	1004.35		
	1003.67	1003.41		
	1003.28	1002.92		
18	1001.89	1001.52	1001.87	1001.75
	1001.74	1001.52		
	1001.98	1001.89		
	1001.51	1001.84		
20	1001.37	1000.90	1000.91	1000.91
	1000.91	1000.88		
	1000.91	1000.48		
	1001.37	1000.45		
22	1001.18	1000.96	1000.76	1000.84
	1000.75	1000.76		
	1000.91	1000.76		
	1000.73	1000.76		
25	999.04	999.06	998.60	999.06
	999.50	999.70		
	999.01	998.83		
	998.60	999.19		
28	999.09	998.34	998.14	998.83
	999.53	998.51		
	998.64	998.90		
	999.39	998.95		
30	997.96	998.18	997.96	

	997.71	998.18		998.00
	998.21	997.87		
	997.85	998.08		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Betupen Plus, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 15. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico Betupen Plus.



FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Betunel, siendo el 24 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 45. Valores de la penetración del cemento asfáltico Betunel en función a la variación de la temperatura

Densidad del Cemento Asfáltico Betunel		
Temperatura (°C)	Densidad ((kg/m ³))	
	Mediciones	Promedio

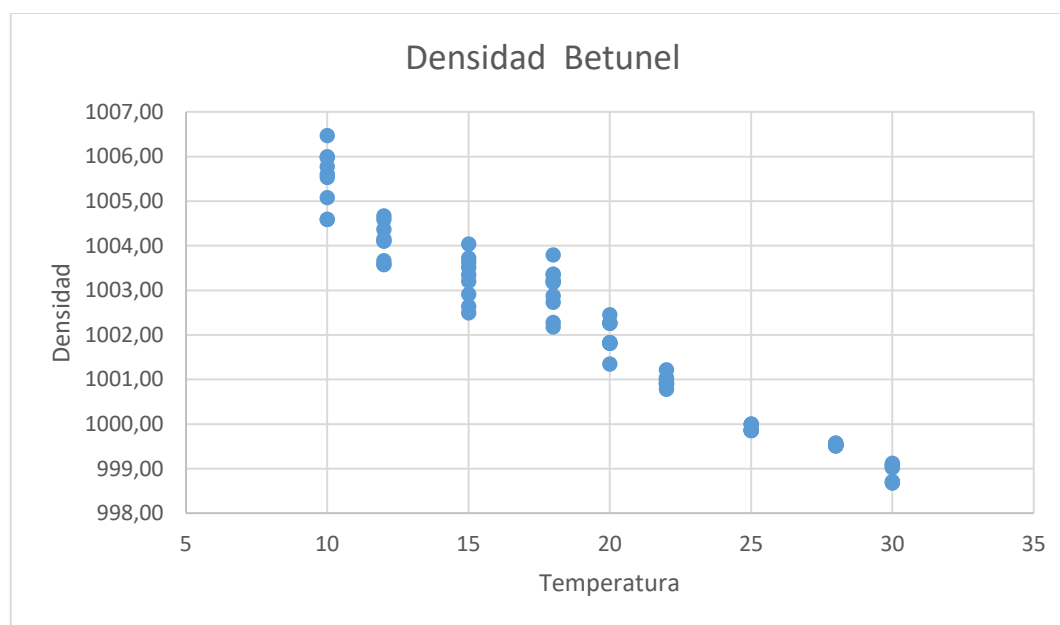
10	1004.6	1006.0	1004.6	1005.51
	1005.1	1005.8		
	1005.6	1006.0		
	1006.5	1005.5		
12	1004.1	1003.6	1003.6	1004.09
	1004.4	1004.7		
	1004.1	1003.7		
	1004.6	1004.1		
15	1003.5	1004.0	1003.2	1003.28
	1002.9	1003.7		
	1002.5	1002.6		
	1003.4	1003.6		
18	1003.2	1002.2	1003.2	1003.02
	1003.4	1002.3	1003.2	
	1003.8	1003.4		
	1002.9	1002.7		
20	1001.81	1002.45	1002.26	1001.96
	1001.81	1001.82	1002.27	
	1001.83	1001.82	1001.35	
	1001.82	1002.27		
22	1000.91	1000.91	1000.91	1001.05
	1000.89	1001.29		
	1001.30	1000.97		
	1001.22	1001.02		
25	999.85	1000.00	999.86	999.91
	999.86	999.86		
	1000.00	999.86		
	999.87	1000.00		
28	999.56	999.57	999.51	999.54
	999.52	999.53		
	999.54	999.57		

	999.51	999.52		
30	998.70	999.08	999.08	998.95
	999.02	998.71		
	999.12	999.08		
	999.04	998.68		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Betunel, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 16. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico Betunel.



FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Greca Plus, siendo el 24 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 46. Valores de la penetración del cemento asfáltico Greca en función a la variación de la temperatura

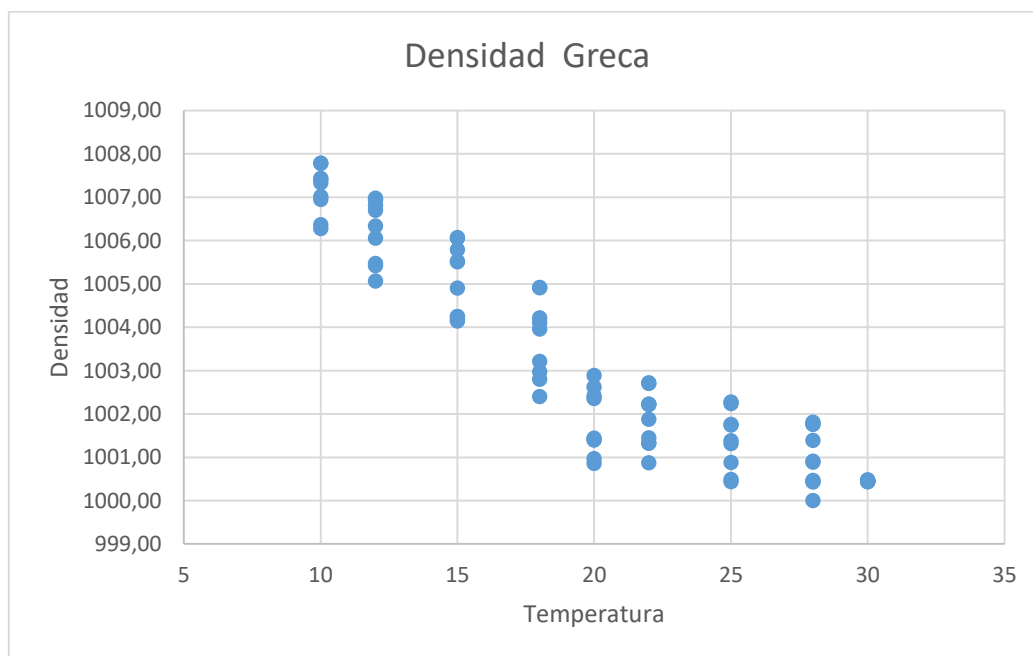
Densidad del Cemento Asfáltico Greca				
Temperatura (°C)	Densidad ((kg/m³))			Promedio
	Mediciones			
10	1006.3	1007.0	1006.9	1007.15
	1007.8	1007.3		
	1007.4	1007.8		
	1007.4	1006.4		
12	1006.9	1006.8	1006.7	1006.19
	1005.1	1006.3		
	1005.4	1007.0		
	1005.5	1006.1		
15	1005.8	1004.1	1005.5	1005.06
	1004.9	1004.2	1004.2	
	1006.1	1005.5		
	1006.1	1004.2		
18	1004.9	1004.9	1004.2	1003.72
	1002.8	1004.0		
	1003.0	1003.2		
	1002.4	1004.1		
20	1001.4	1002.9	1002.6	1001.82
	1002.4	1001.4		
	1002.4	1001.4		
	1000.9	1001.0		
22	1002.21	1001.32	1001.444	1001.89
	1001.33	1001.88	1000.874	
	1002.70	1002.71		
	1002.22	1002.22		
25	1000.88	1002.23	1002.27	

	1000.486	1001.38		
	1001.313	1001.76		1001.39
	1001.743	1000.44		
28	1000.467	1001.386	1001.809	1000.98
	1000.886	1000.91	1000	
	1000.443	1000.43		
	1001.756	1001.76		
30	1000.433	1000.45	1000.438	1000.45
	1000.443	1000.461		
	1000.481	1000.451		
	1000.453	1000.438		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Greca, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 17. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico Greca.



FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestran los valores resultantes de la aplicación estadística de la penetración en función a la variación de la temperatura del cemento asfáltico Convencional 60/ 70, siendo el 25 el número total de depuraciones en las ductilidades:

TABLA N° 3. 47. Valores de la penetración del cemento asfáltico convencional 60/70 en función a la variación de la temperatura

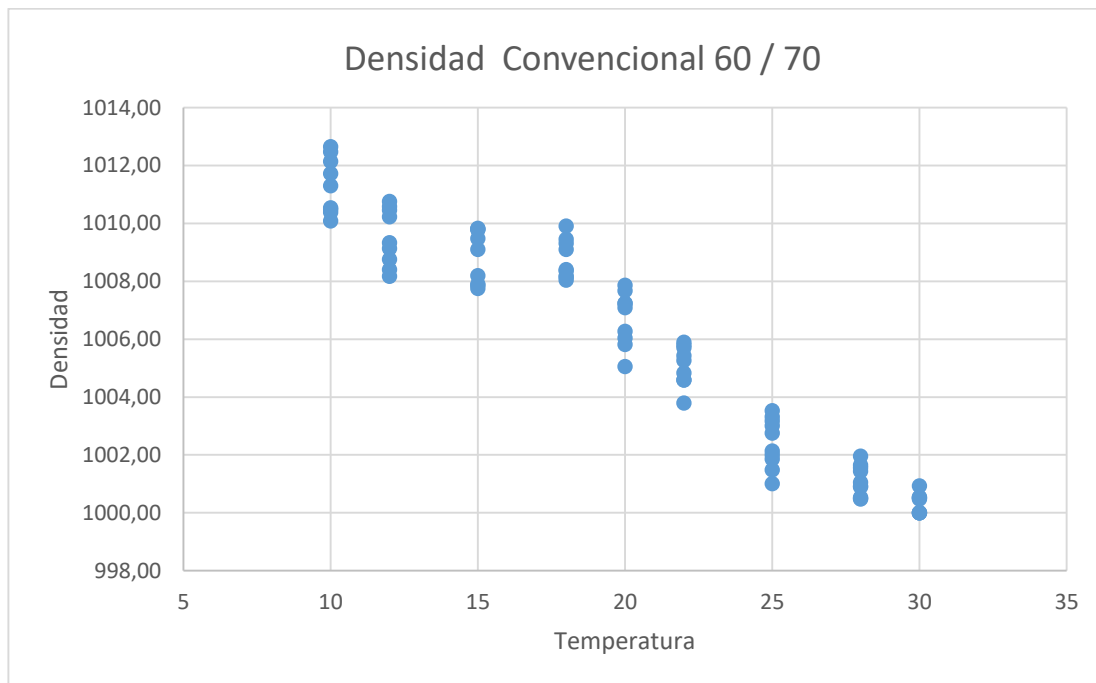
Densidad del Cemento Asfáltico 60/70				
Temperatura (°C)	Densidad ((kg/m³))			Promedio
	Mediciones			
10	1010.54	1011.31	1010.48	1011.31
	1010.39	1012.48		
	1012.14	1012.66		
	1011.73	1010.09		
12	1010.23	1009.13	1008.18	1009.54
	1009.34	1010.46		
	1010.59	1010.77		
	1008.76	1008.41		
15	1008.19	1009.84	1009.48	1008.86
	1007.86	1009.79		
	1007.76	1007.90		
	1009.10	1009.80		
18	1008.05	1009.45	1008.41	1008.77
	1008.19	1008.15		
	1009.31	1009.92		
	1008.36	1009.10		
20	1006.044	1007.25	1005.814	1006.70
	1007.235	1007.675		
	1006.27	1007.096		
	1007.867	1005.055		
22	1004.593	1004.593	1005.898	1005.10
	1005.438	1004.834		
	1003.794	1005.706		

	1005.796	1005.271		
25	1002.132	1003.525	1001.48	1002.43
	1002.761	1002.003	1003.18	
	1001.01	1003.322		
	1001.861	1003.012		
28	1000.90	1001.56	1001.06	1001.10
	1000.48	1000.50	1001.96	
	1000.92	1001.65		
	1001.44	1000.54		
30	1000.00	1000.54	1000.00	1000.33
	1000.00	1000.93		
	1000.52	1000.53		
	1000.00	1000.48		

FUENTE: Elaboración propia

Se generó una gráfica de dispersión de todos los puntos obtenidos como resultado de la depuración de datos mediante los rangos máximos y mínimos calculados para el cemento asfáltico Convencional 60/70, y se puede apreciar la misma a continuación:

FIGURA N° 3. 18. Dispersión de puntos de la penetración del cemento asfáltico convencional 60/70.



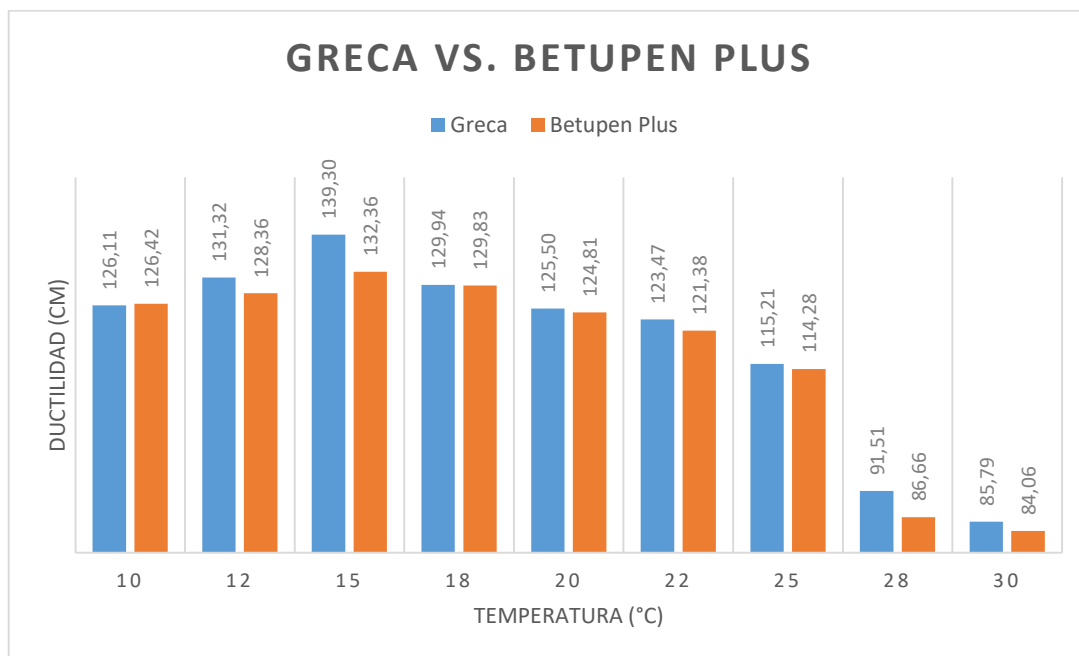
FUENTE: Elaboración propia

3.5. COMPARACIÓN DE DUCTILIDADES EN LAS DIFERENTES MUESTRAS DE CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

Con los valores obtenidos de las ductilidades de los cementos asfálticos convencionales que pasaron por el proceso de depuración mediante la aplicación estadística, se continuará con la elaboración de gráficos comparativos entre los cementos asfálticos para analizar el comportamiento de los mismos con mayor claridad.

3.5.1. CEMENTO ASFÁLTICO GRECA Y CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

Para poder tener un criterio de comparación que facilitará el análisis de los resultados obtenidos, se generó un gráfico de barras que detalla los valores obtenidos de las ductilidades de los cementos asfálticos Greca y Betupen Plus a cada temperatura ensayada, que se muestra en la figura N°3.19 a continuación:

FIGURA N° 3. 19. Comparación de cementos asfálticos Greca vs Betupen Plus

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la gráfica, se puede observar que los valores del cemento asfáltico Greca son mayores a los valores del cemento asfáltico Betupen Plus en las temperaturas adoptadas desde los 12°C hasta los 30°C, excluyendo los valores a los 10°C donde el cemento asfáltico Betupen Plus es mayor que el otro cemento mencionado.

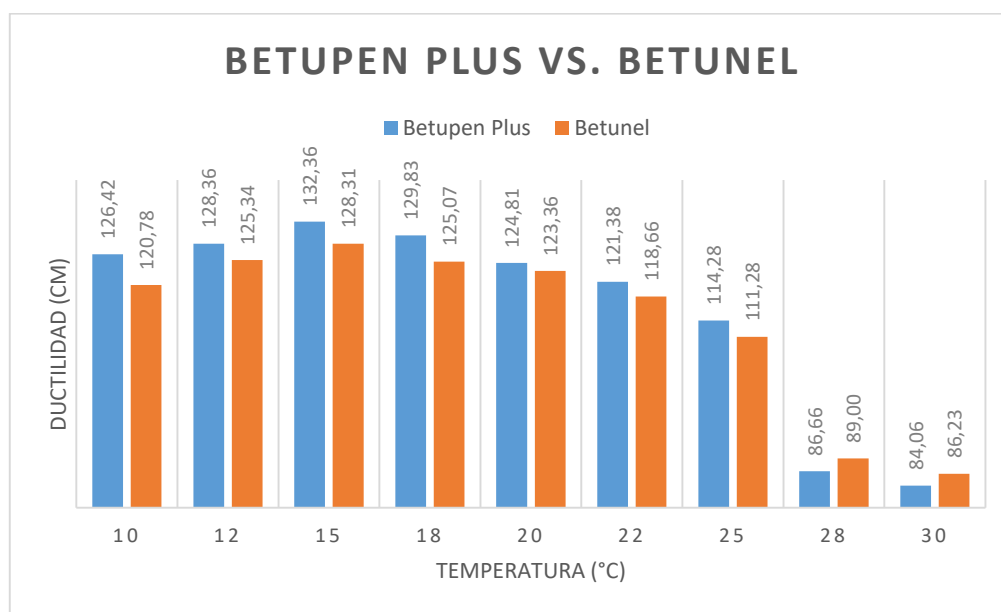
Se tiene en ambos casos que el mayor valor de la ductilidad está en los 15°C, siendo para Greca 139.50 centímetros y para Betupen Plus 132.36 centímetros, mientras que el menor valor de la ductilidad está a los 30°C, con 85.79 centímetros para Greca y 84.06 centímetros para Betupen Plus.

Se puede apreciar también, que la mayor variación entre las ductilidades de ambos cementos asfálticos es de 6.94 centímetros a una temperatura de 15°C y la menor diferencia es de 0.11 centímetros a los 18°C.

3.5.2. CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS Y CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

Para poder tener un criterio de comparación que facilitará el análisis de los resultados obtenidos, se generó un gráfico de barras que detalla los valores obtenidos de las ductilidades de los cementos asfálticos Betupen Plus y Betunel, a cada temperatura ensayada, como se muestra en la figura N° 3.20 a continuación:

FIGURA N° 3. 20. Comparación de cementos asfálticos Betupen Plus vs Betunel



FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la gráfica, se puede observar que los valores del cemento asfáltico Betupen Plus son mayores a los del cemento asfáltico Betunel, exceptuando los valores por encima de los 25°, ya que en los 28°C y 30°C el cemento asfáltico Betunel resulta con valores mayores de ductilidad.

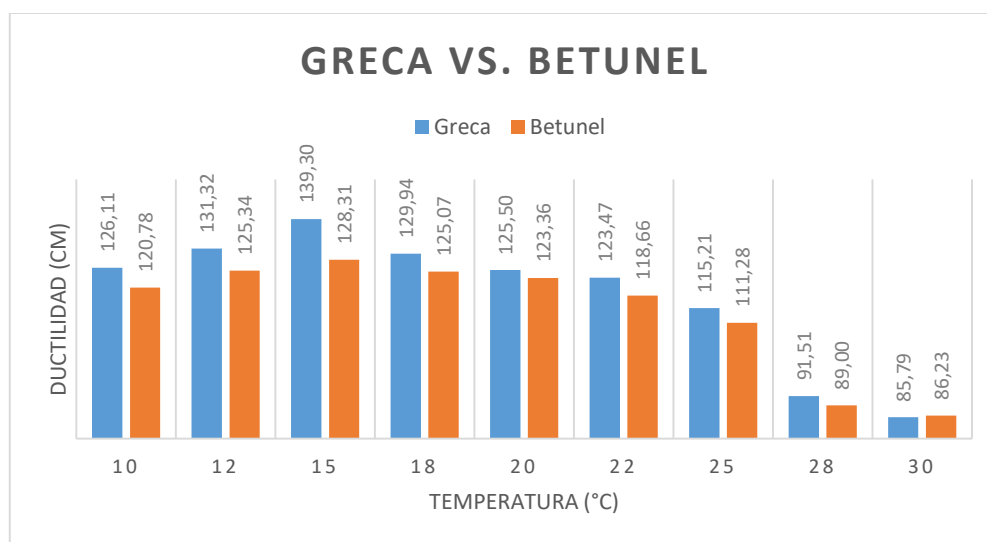
Se tiene en ambos casos que el mayor valor de la ductilidad está en los 15°C, siendo para Betupen Plus 132.36 centímetros y para Betunel 128.31 centímetros, mientras que el menor valor de la ductilidad está a los 30°C, con 84.06 centímetros para Betupen Plus y 86.23 centímetros para Betunel.

La mayor variación entre las ductilidades es de 5.64 centímetros a una temperatura de 10°C y la menor diferencia es de 1.45 centímetros a los 20°C.

3.5.3. CEMENTO ASFÁLTICO GRECA Y CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

Para poder tener un criterio de comparación que facilitará el análisis de los resultados obtenidos, se generó un gráfico de barras que detalla los valores obtenidos de las ductilidades de los cementos asfálticos Greca y Betunel, a cada temperatura ensayada, como se muestra en la figura N° 3.21 a continuación:

FIGURA N° 3. 21. Comparación de cementos asfálticos Greca vs Betunel



FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la gráfica, se puede observar que los valores de ductilidad del cemento asfáltico Greca son mayores a los del cemento asfáltico Betunel en casi todas las temperaturas, exceptuando los valores a los 30°C, ya que el cemento asfáltico Betunel resulta con un valor mayor de ductilidad.

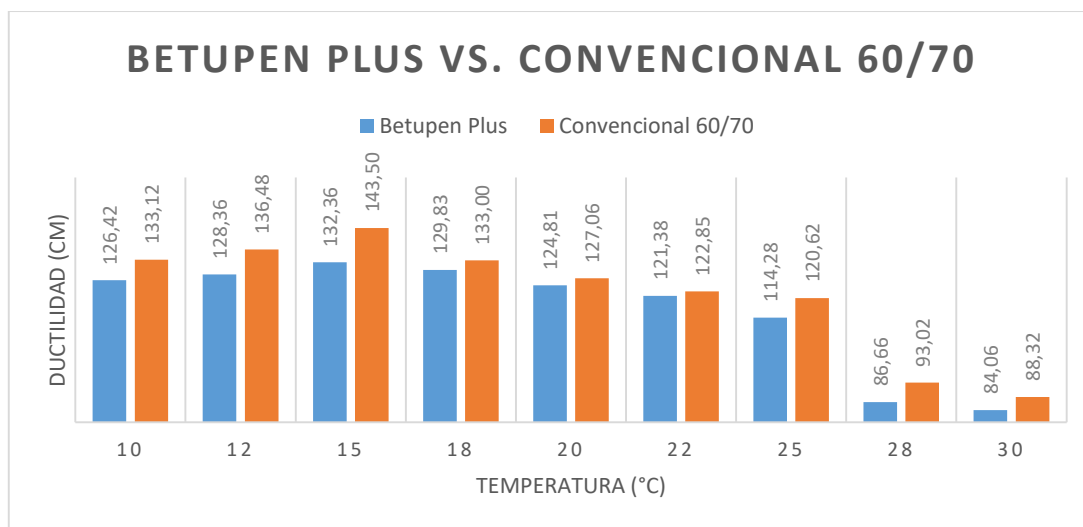
Se tiene en ambos casos que el mayor valor de la ductilidad está en los 15°C, siendo para Greca 139.30 centímetros y para Betunel 128.31 centímetros, mientras que el menor valor de la ductilidad está a los 30°C, con 85.79 centímetros para Greca y 86.23 centímetros para Betunel.

La mayor variación entre las ductilidades de ambos cementos asfálticos es de 10.99 centímetros a una temperatura de 15°C y la menor diferencia es de 0.44 centímetros a los 30°C.

3.5.4. CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS Y CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

Para poder tener un criterio de comparación que facilitará el análisis de los resultados obtenidos, se generó un gráfico de barras que detalla los valores obtenidos de las ductilidades de los cementos asfálticos Betupen Plus y el convencional 60/70, a cada temperatura ensayada, como se muestra en la figura N° 3.22 a continuación:

FIGURA N° 3. 22. Comparación de cementos asfálticos Betupen Plus vs Convencional 60/70



FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la gráfica, se puede observar que los valores de ductilidad del cemento asfáltico convencional 60/70 son mayores a los del cemento asfáltico Betupen Plus en todas las temperaturas adoptadas, desde los 10°C hasta los 30°C.

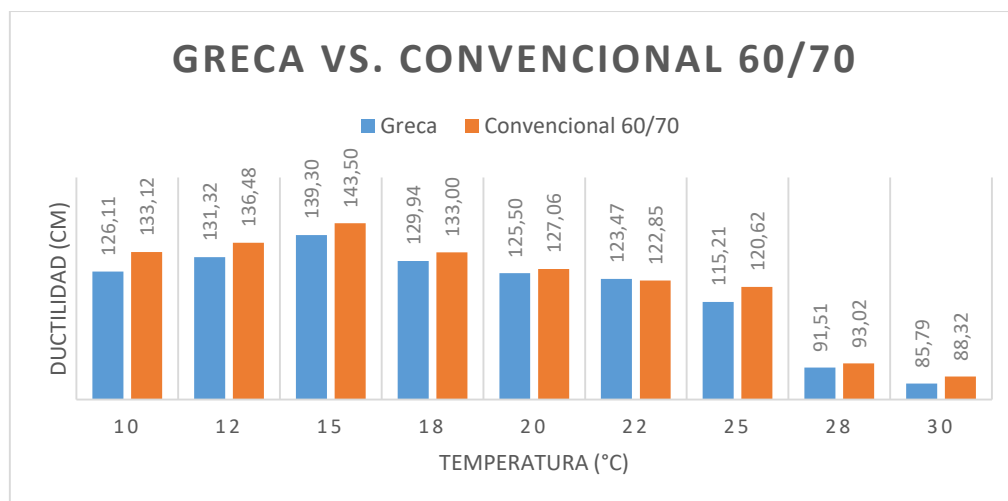
Se tiene en ambos casos que el mayor valor de la ductilidad está en los 15°C, siendo para el cemento asfáltico convencional 60/70 143.50 centímetros y para Betupen Plus 132.36 centímetros, mientras que el menor valor de la ductilidad se encuentra a los 30°C, con 88.32 centímetros para el cemento asfáltico convencional 60/70 y 84.06 centímetros para Betupen Plus.

Se puede apreciar también, que la mayor variación entre las ductilidades de ambos cementos asfálticos es de 11.14 centímetros a una temperatura de 15°C y la menor diferencia es de 1.47 centímetros a los 22°C.

3.5.5. CEMENTO ASFÁLTICO GRECA Y CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

Para poder tener un criterio de comparación que facilitará el análisis de los resultados obtenidos, se generó un gráfico de barras que detalla los valores obtenidos de las ductilidades de los cementos asfálticos Greca y el convencional 60/70, a cada temperatura ensayada, que se muestra en la figura N° 3.23 a continuación:

FIGURA N° 3. 23. Comparación de cementos asfálticos Greca vs Convencional 60/70



FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la gráfica, se puede observar que los valores de ductilidad del cemento asfáltico convencional 60/70 son mayores a los del cemento asfáltico Greca en todas las temperaturas adoptadas, desde los 10°C hasta los 30°C.

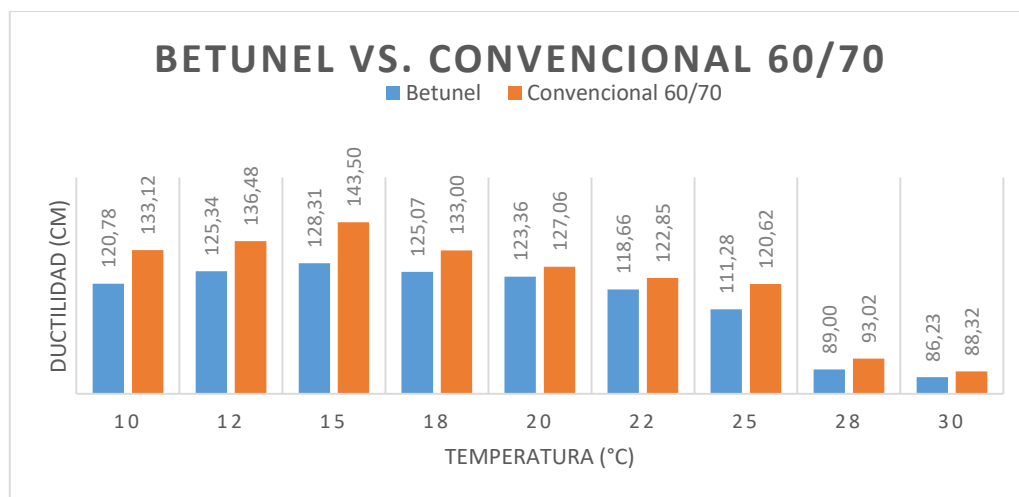
Se tiene en ambos casos que el mayor valor de la ductilidad está en los 15°C, siendo para el cemento asfáltico convencional 60/70 143.50 centímetros y para Greca 139.30 centímetros, mientras que el menor valor de la ductilidad se encuentra a los 30°C, con 88.32 centímetros para el cemento asfáltico convencional 60/70 y 85.79 centímetros para Greca.

Se puede apreciar que la mayor variación entre las ductilidades de ambos cementos asfálticos es de 7.0 centímetros a una temperatura de 10°C y la menor diferencia es de 0.62 centímetros a los 22°C.

3.5.6. CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL Y CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

Para poder tener un criterio de comparación que facilitará el análisis de los resultados obtenidos, se generó un gráfico de barras que detalla los valores obtenidos de las ductilidades de los cementos asfálticos Betunel y el convencional 60/70, a cada temperatura ensayada, que se muestra en la figura N° 3.24 a continuación:

FIGURA N° 3. 24. Comparación de cementos asfálticos Betunel vs Convencional 60/70



FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo con la gráfica, se puede observar que los valores de ductilidad del cemento asfáltico convencional 60/70 son mayores a los del cemento asfáltico Betunel en todas las temperaturas adoptadas, desde los 10°C hasta los 30°C.

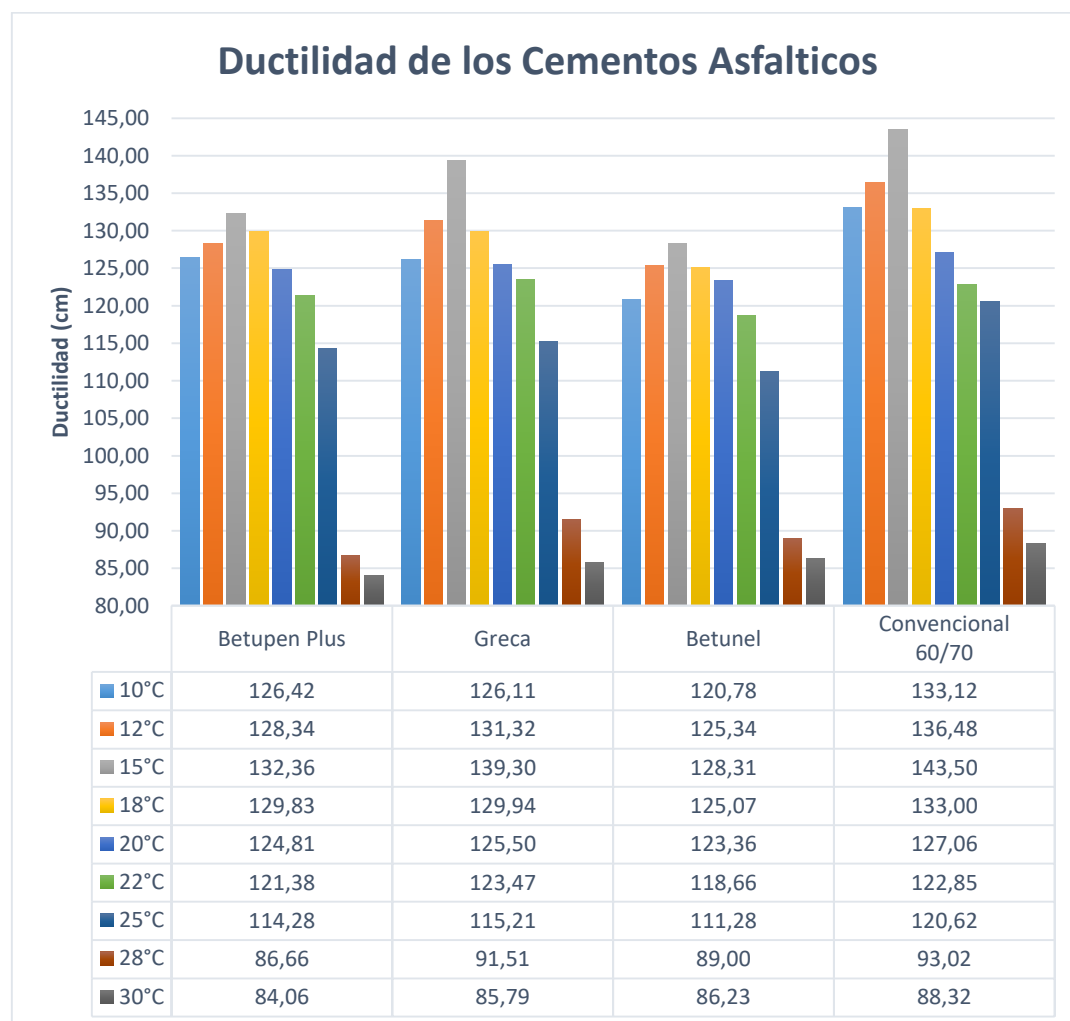
Se tiene en ambos casos que el mayor valor de la ductilidad está en los 15°C, siendo para el cemento asfáltico convencional 60/70 143.50 centímetros y para Betunel 128.31 centímetros, mientras que el menor valor de la ductilidad se encuentra a los 30°C, con 88.32 centímetros para el cemento asfáltico convencional 60/70 y 86.23 centímetros para Greca.

Se puede apreciar que la mayor variación entre las ductilidades de ambos cementos asfálticos es de 15.18 centímetros a una temperatura de 15°C y la menor diferencia es de 2.10 centímetros a los 30°C.

3.5.7. RESUMEN DE LAS DUCTILIDADES DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Por todo lo expuesto con anterioridad, se creó el siguiente gráfico de barras para comparar los valores de ductilidad de todos los cementos asfálticos convencionales utilizados en este trabajo de investigación, Betupen Plus 85/100, Greca 85/100, Betunel 85/100 y el convencional 60/70, con el fin de tener una visión más extensa del comportamiento de esta propiedad del cemento asfáltico.

FIGURA N° 3. 25.Comparación de la ductilidad de los cementos asfálticos en función a la temperatura



FUENTE: Elaboración propia

Partiendo de la temperatura de 25°C, que es la especificada según la normativa ABC, se procedió con la variación de temperatura con la cual se pudo analizar que a mayor temperatura los valores de la ductilidad disminuían y a menor temperatura la misma aumentaba.

Como se puede observar todas las gráficas tienen un comportamiento similar, donde la ductilidad máxima se expresa al variar la temperatura a los 15°C. A partir de los 15°C,

al disminuir la temperatura la ductilidad vuelve a reducir sus valores en todos los cementos asfálticos.

La ductilidad a los 28°C y 30°C no cumple con el mínimo de 100 centímetros que exige la normativa ABC.

El cemento asfáltico convencional 60/70 tiene los mayores valores en todas las temperaturas, pero sigue fallando al aumentar la temperatura a partir de los 25°C.

3.6. DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE DATOS EN MODELOS MATEMÁTICOS

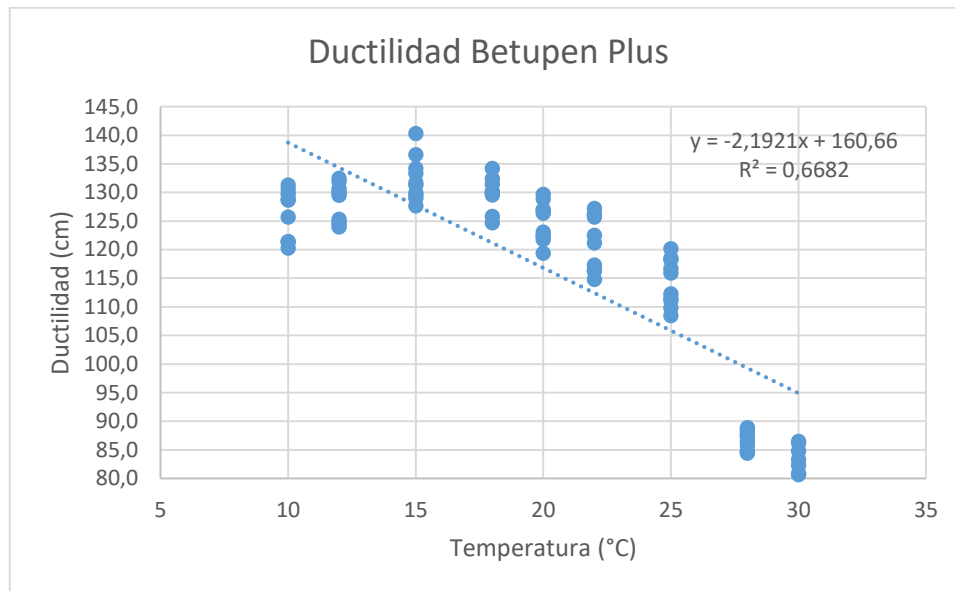
Para determinar las correlaciones de las gráficas expuestas con anterioridad, que contienen la dispersión de los valores discretizados de las ductilidades de los cementos asfálticos en función a la temperatura, se debe aplicar la línea de tendencia que se adecue a los puntos obtenidos y manifieste la mayor correlación posible.

3.6.1. CORRELACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD PARA EL CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

De la figura N° 3.3 obtenida, se procede a generar una línea de tendencia tipo lineal, exponencial y polinómica para determinar la ecuación con mayor correlación y así poder tener un mejor criterio para el análisis de sus parámetros, las cuales se demostrarán a continuación.

La siguiente figura muestra la variación de la ductilidad del mencionado cemento asfáltico convencional en función a la variación de la temperatura con una ecuación del tipo lineal y su respectiva correlación.

FIGURA N° 3. 26. Correlación del tipo lineal para el cemento asfáltico Betupen Plus



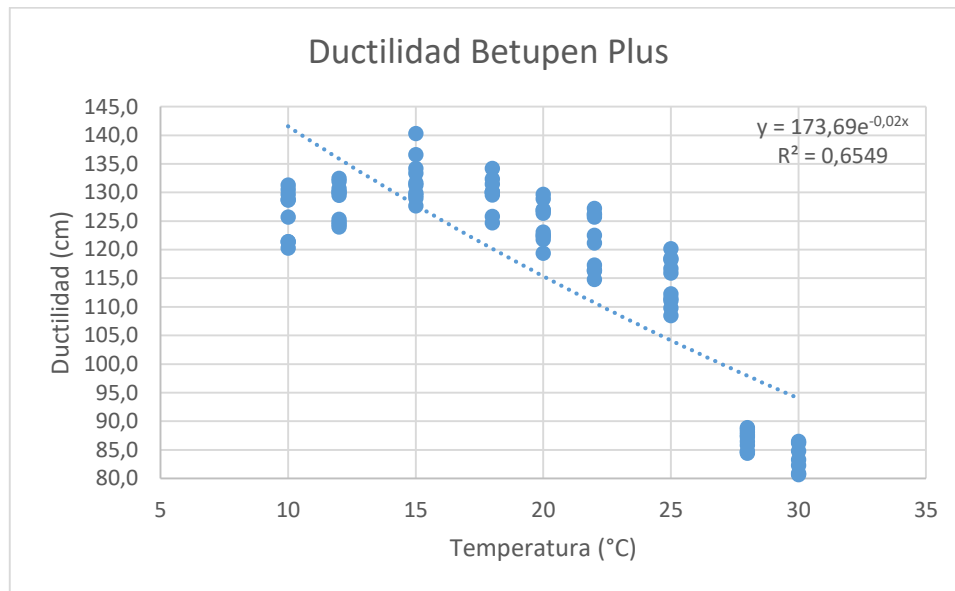
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.26 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo lineal descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2=0.6865$.

$$y = -2,2413x + 161,44 \quad \text{ECUACIÓN 3.1}$$

Con una correlación de 0.6865 no se puede considerar esta ecuación como aplicable para nuestro análisis ya que es un valor bajo, pretendiendo una correlación mayor a 0.90.

FIGURA N° 3. 27. Correlación del tipo exponencial para el cemento asfáltico Betupen Plus



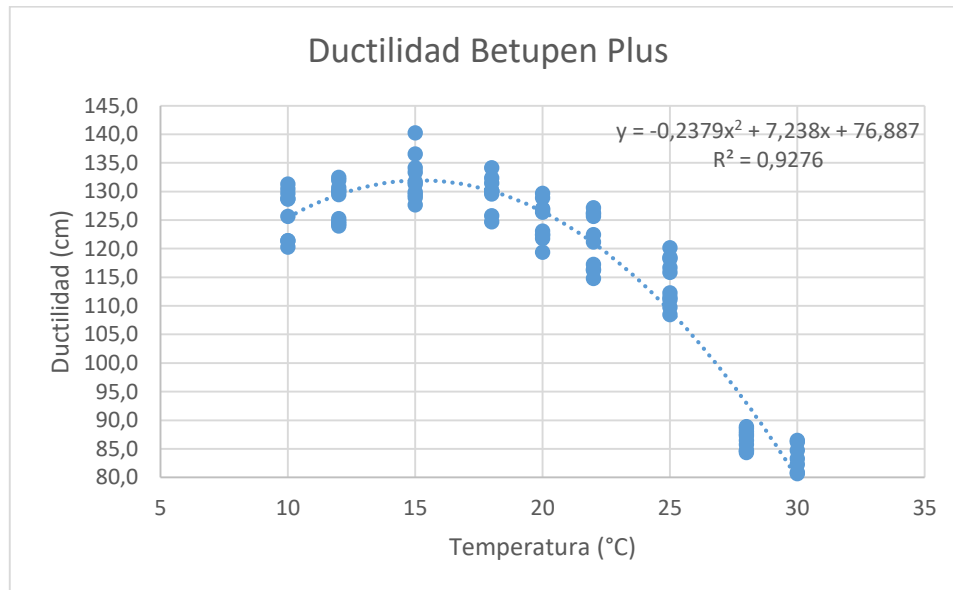
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.27 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo exponencial descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.6739$.

$$y = 175,05e^{-0,021x} \quad \text{ECUACIÓN 3.2}$$

Esta correlación obtenida de 0.6739, es menor que la correlación del tipo lineal que es 0.6865, por lo tanto no se puede considerar esta ecuación como aplicable para nuestro análisis ya que es un valor bajo, buscando una correlación adecuada con valores de R mayores a 0.90.

FIGURA N° 3. 28. Correlación del tipo polinómica para el cemento asfáltico Betupen Plus



FUENTE: Elaboración propia

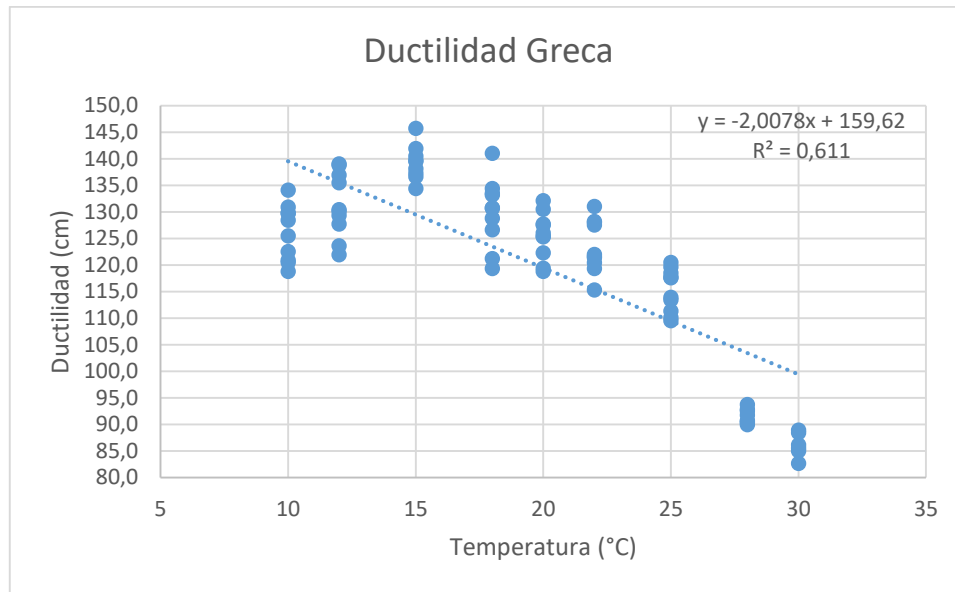
En la figura N° 3.28 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica descendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.9304$.

$$y = -0,2322x^2 + 7,04x + 78,432 \quad \text{ECUACIÓN 3.3}$$

A diferencia de las otras dos ecuaciones, lineal y exponencial, se puede observar que esta ecuación posee una correlación de 0.9304, la cual es adecuada para tener un criterio de análisis de la ductilidad del cemento asfáltico Betupen Plus, ya que presenta un grado de correlación mayor a las anteriores ecuaciones. Los puntos tienen una menor dispersión de la línea de tendencia polinómica, lo cual nos dará una mejor predicción de resultados de la medida de la ductilidad.

3.6.2. CORRELACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD PARA EL CEMENTO ASFÁLTICO GRECA

FIGURA N° 3. 29. Correlación del tipo lineal para el cemento asfáltico Greca



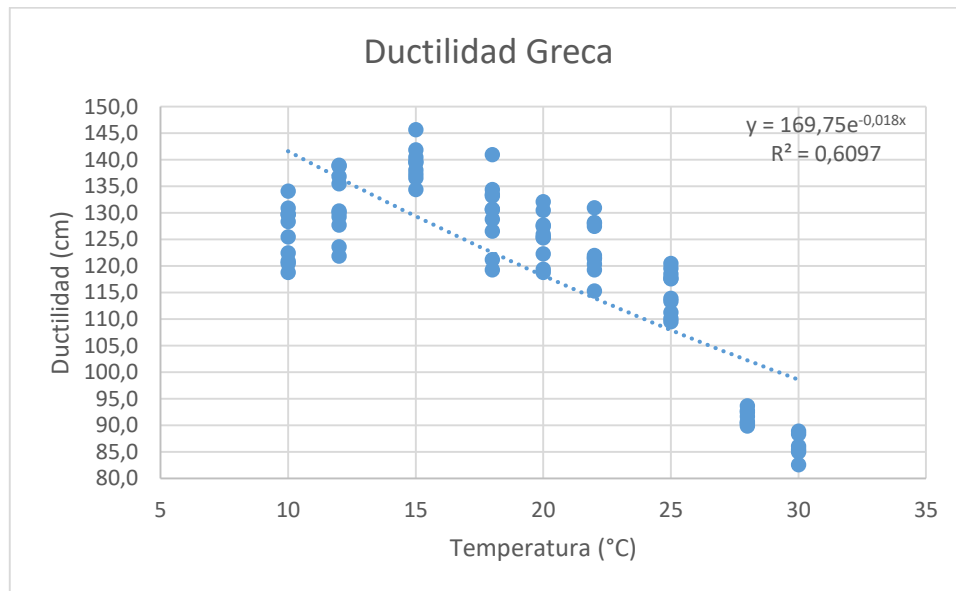
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.29 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo lineal descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.6458$.

$$y = -2,1288x + 161,52 \quad \text{ECUACIÓN 3.4}$$

Con una correlación de 0.6458 no se puede considerar esta ecuación como aplicable para nuestro análisis ya que es un valor bajo, buscando una correlación adecuada con valores de R mayores a 0.90.

FIGURA N° 3. 30. Correlación del tipo exponencial para el cemento asfáltico Greca



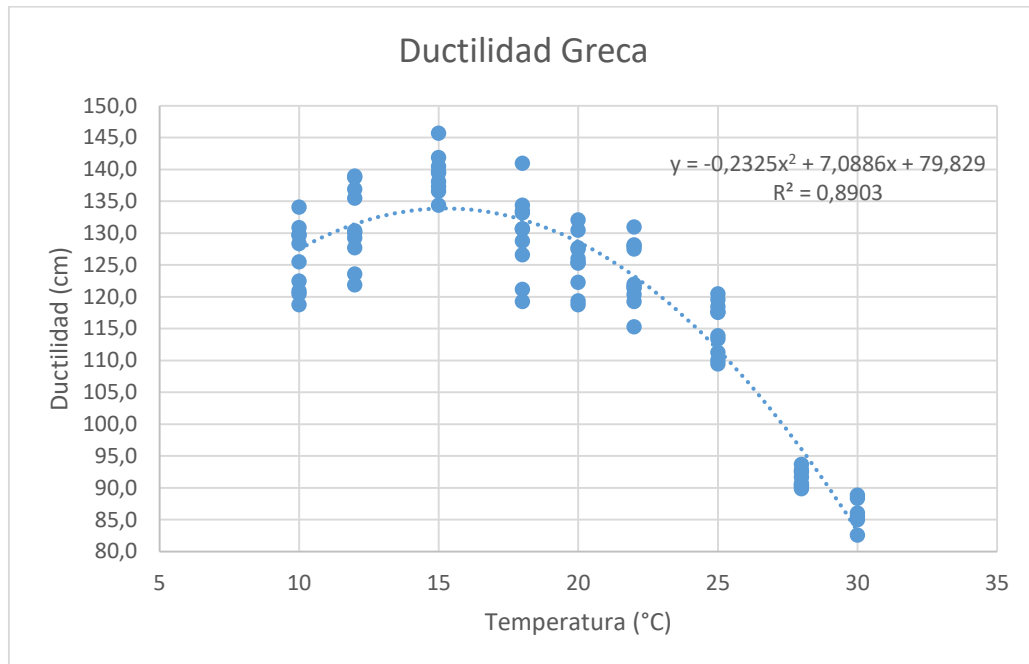
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.30 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo exponencial descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.644$.

$$y = 173,11e^{-0,019x} \quad \text{ECUACIÓN 3.5}$$

Esta correlación obtenida de 0.644, es menor que la correlación del tipo lineal que es 0.6458, por lo tanto no se puede considerar esta ecuación como aplicable para nuestro análisis ya que es un valor bajo, buscando una correlación adecuada con valores de R mayores a 0.90.

FIGURA N° 3.31. Correlación del tipo polinómica para el cemento asfáltico Greca



FUENTE: Elaboración propia

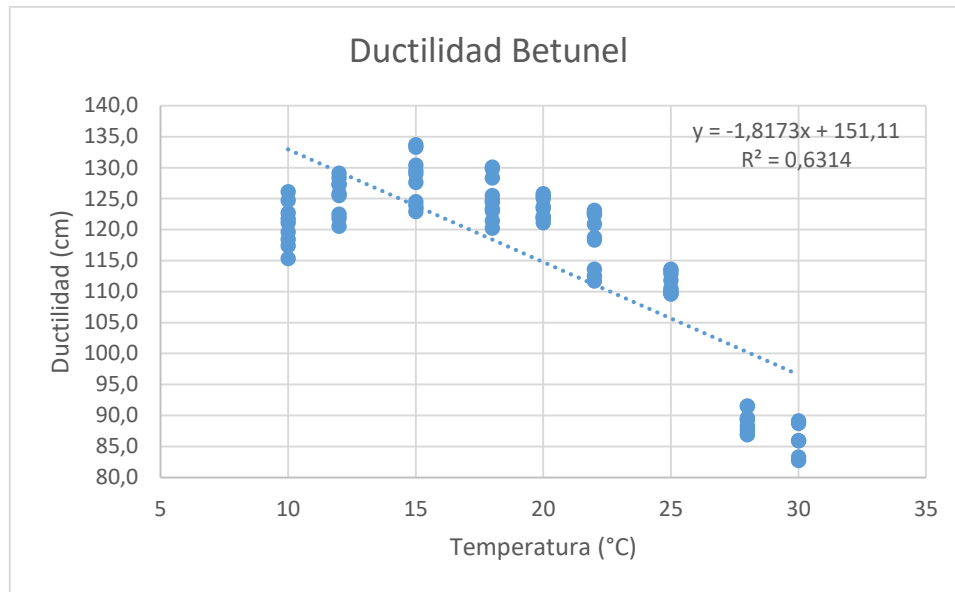
En la figura N° 3.31 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica descendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.9052$.

$$y = -0,2296x^2 + 6,9908x + 80,583 \quad \text{ECUACIÓN 3.6}$$

A diferencia de las otras dos ecuaciones, lineal y exponencial, se puede observar que esta ecuación posee una correlación de 0.9052, la cual es adecuada para tener un criterio de análisis de la ductilidad del cemento asfáltico Greca, ya que presenta un grado de correlación mayor a las anteriores ecuaciones. Los puntos tienen una menor dispersión de la línea de tendencia polinómica, lo cual nos dará una mejor predicción de resultados de la medida de la ductilidad.

3.6.3. CORRELACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD PARA EL CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

FIGURA N° 3. 32. Correlación del tipo lineal para el cemento asfáltico Betunel



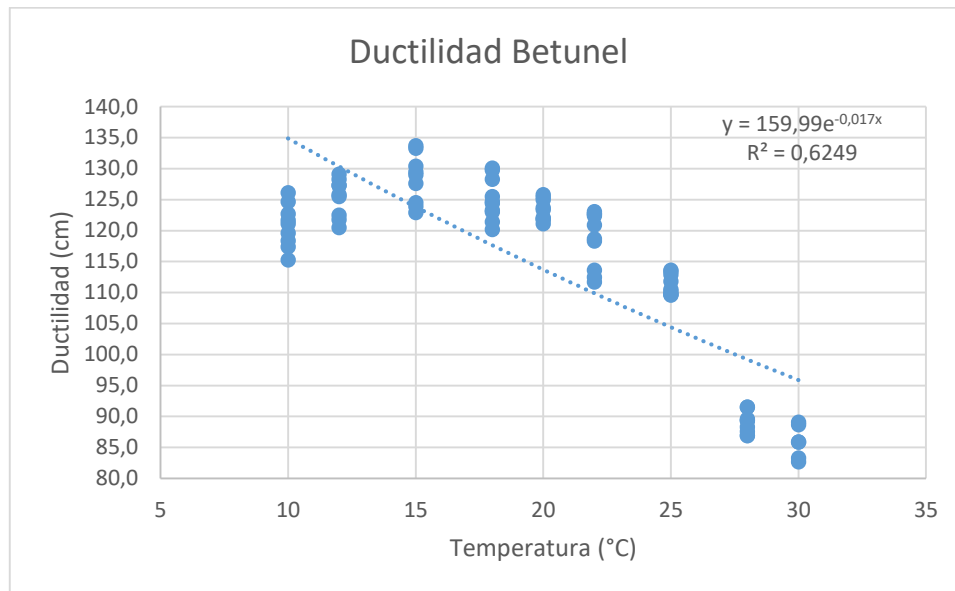
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.32 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo lineal descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.654$.

$$y = -1,8741x + 152,01 \quad \text{ECUACIÓN 3.7}$$

La correlación de 0.654 presenta un valor distante de una correlación adecuada, es decir, un valor igual o mayor a 0.90, por lo cual esta ecuación no representa de manera adecuada el comportamiento de los datos.

FIGURA N° 3. 33. Correlación del tipo exponencial para el cemento asfáltico Betunel



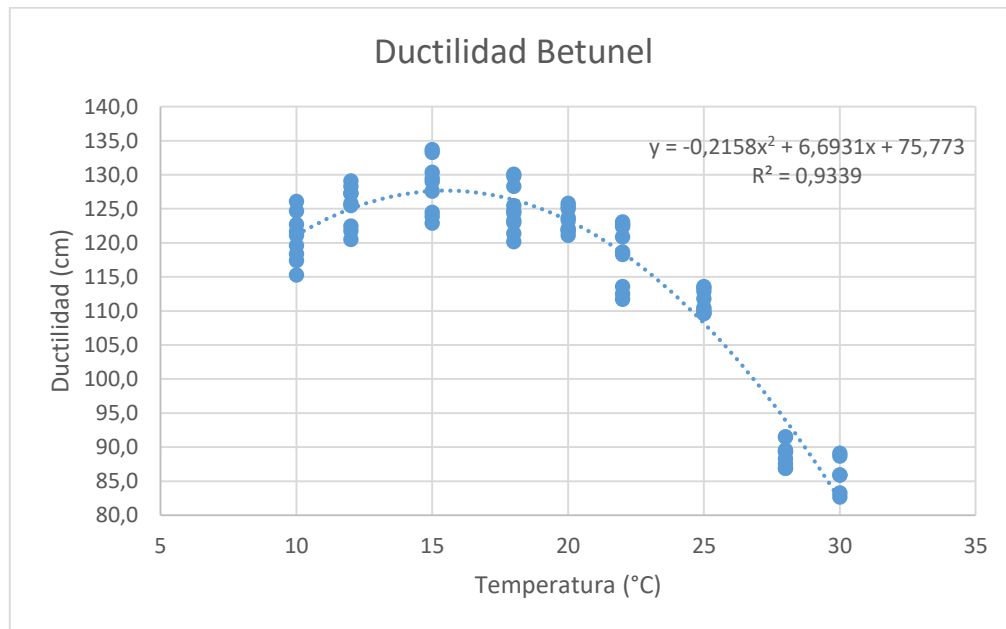
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.33 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo exponencial descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.648$.

$$y = 161,45e^{-0,018x} \quad \text{ECUACIÓN 3.8}$$

Esta correlación obtenida de 0.648, es menor que la correlación del tipo lineal que es 0.654, por lo tanto esta ecuación no representa de manera adecuada el comportamiento de los datos, por lo tanto no es aplicable, siendo el valor de una correlación adecuada a un R mayor o igual a 0.90.

FIGURA N° 3. 34. Correlación del tipo polinómica para el cemento asfáltico Betunel



FUENTE: Elaboración propia

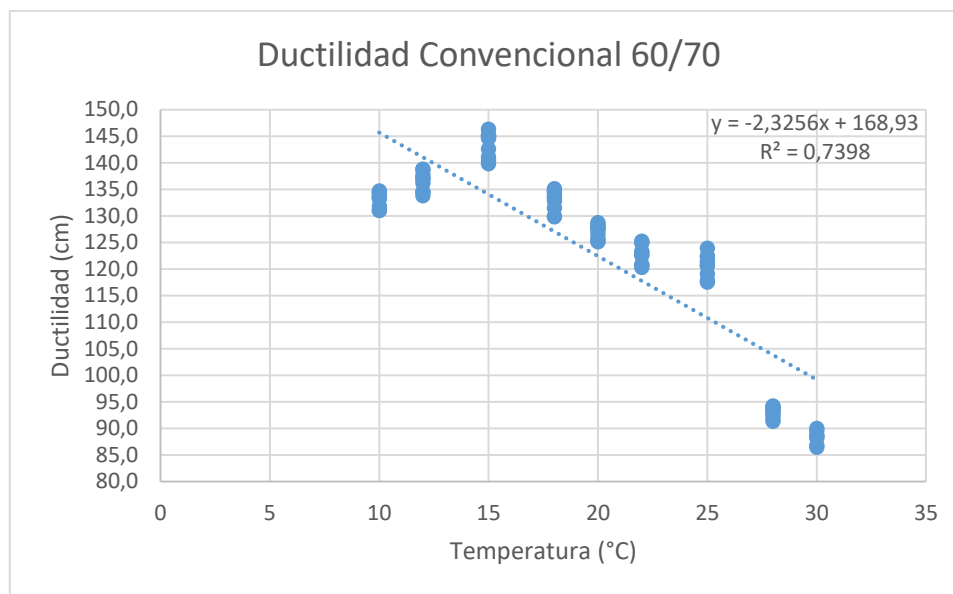
En la figura N° 3.34 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica descendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.9373$.

$$y = -0,2108x^2 + 6,5224x + 77,098 \quad \text{ECUACIÓN 3.9}$$

A diferencia de las otras dos ecuaciones, lineal y exponencial, se puede observar que esta ecuación posee una correlación de 0.9373, la cual que refleja un mejor comportamiento de los datos del cemento asfáltico Betunel, en función a la tendencia de la ecuación 3.9, donde los puntos tienen una menor dispersión de la línea de tendencia polinómica, lo cual nos dará una mejor predicción de resultados de la medida de la ductilidad.

3.6.4. CORRELACIÓN DE DATOS DE DUCTILIDAD PARA EL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

FIGURA N° 3. 35. Correlación del tipo lineal para cemento asfáltico convencional 60/70



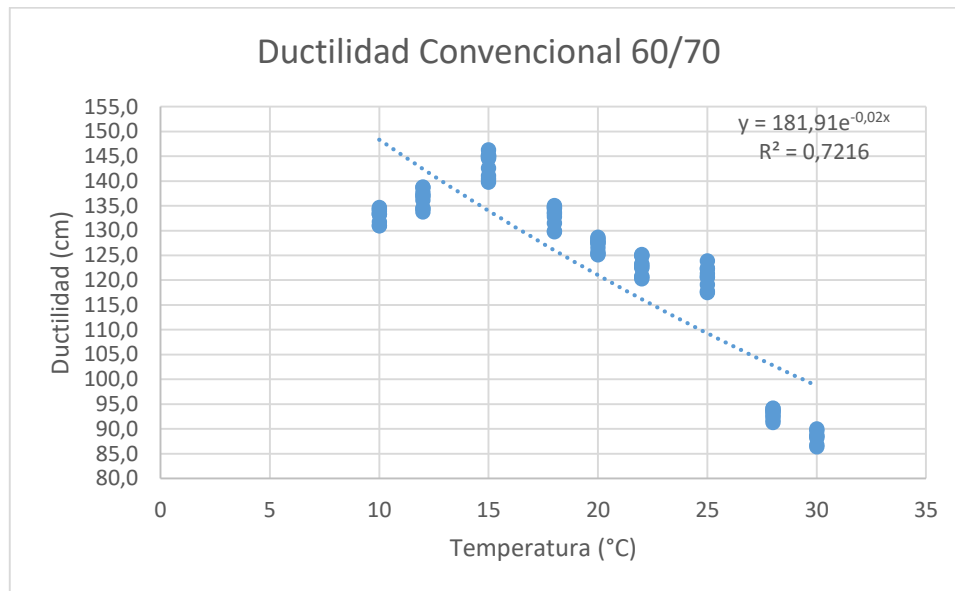
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.35 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo lineal descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2=0.7615$.

$$y = -2,4137x + 170,31 \quad \text{ECUACIÓN 3.10}$$

Con una correlación de 0.7615 no se puede considerar esta ecuación como aplicable para nuestro análisis ya que es un valor bajo, buscando una correlación adecuada con valores de R mayores a 0.90.

FIGURA N° 3.36. Correlación del tipo exponencial para cemento asfáltico convencional 60/70



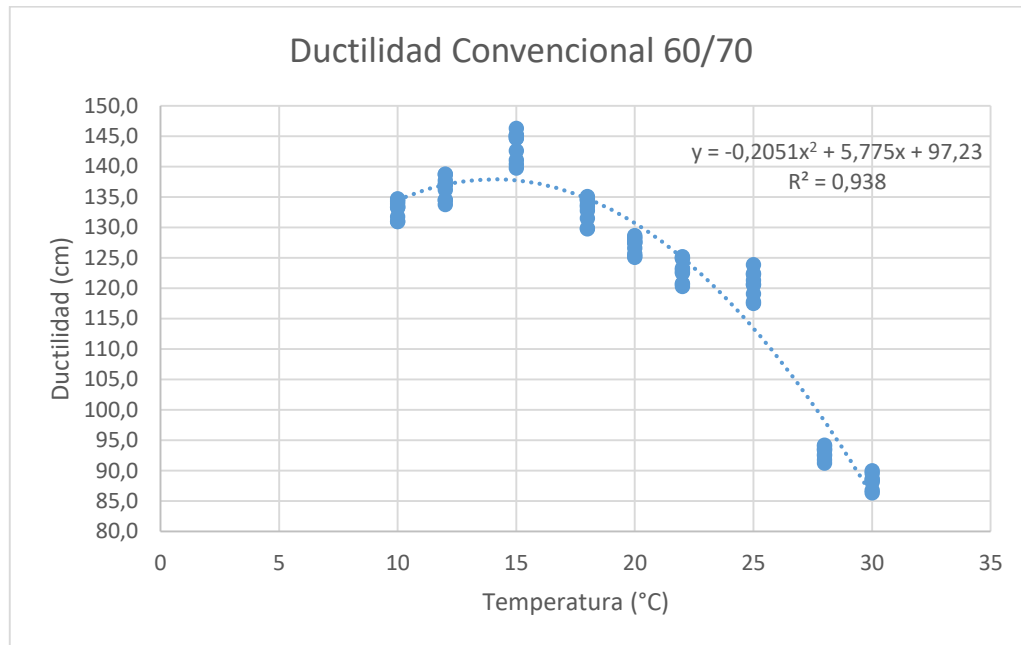
FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.36 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo exponencial descendente, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.7445$.

$$y = 184,51e^{-0,021x} \quad \text{ECUACIÓN 3.11}$$

Esta correlación obtenida de 0.7445, es menor que la correlación del tipo lineal que es 0.7615, por lo tanto no se puede considerar esta ecuación como aplicable para nuestro análisis ya que es un valor bajo, buscando una correlación adecuada con valores de R mayores a 0.90.

FIGURA N° 3. 37. Correlación del tipo polinómica para cemento asfáltico convencional 60/70



FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.37 se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica descendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.9453$.

$$y = -0,2018x^2 + 5,6642x + 98,087 \quad \text{ECUACIÓN 3.12}$$

A diferencia de las otras dos ecuaciones, lineal y exponencial, se puede observar que esta ecuación posee una correlación de 0.9453, la cual que refleja un mejor comportamiento de los datos del cemento asfáltico convencional 60/70, en función a la tendencia de la ecuación 3.9, donde los puntos tienen una menor dispersión de la línea de tendencia polinómica, lo cual nos dará una mejor predicción de resultados de la medida de la ductilidad.

3.6.5. DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN CON MAYOR CORRELACIÓN

Para la determinación de la ecuación con mayor correlación de la ductilidad para cada cemento asfáltico convencional, se agrupó todas las correlaciones obtenidas de las distintas ecuaciones tipo lineal, exponencial y polinómica en la siguiente tabla:

TABLA N° 3. 48. Correlaciones de la ductilidad de los cementos asfálticos

Cementos Asfálticos	Correlación			
	Lineal	Exponencial	Polinómica	Polinómica Media*
Betupen Plus	0,6865	0,6739	0,9304	0.9675
Greca	0,6458	0,6440	0,9052	0.9682
Betunel	0,6540	0,6480	0,9373	0.975
Convencional 60/70	0,7615	0,7445	0,9453	0.952

FUENTE: Elaboración propia

*La correlación Polinómica media es la correlación de la ecuación con los valores promedios de la ductilidad para cada temperatura ensayada.

Según la tabla N° 3.48 se puede observar que para la ductilidad de los todos cementos asfálticos ensayados la correlación polinómica es la que sobresale sobre la lineal y la exponencial, con valores mayores a 0.90, determinando de este modo que las ecuaciones polinómicas de orden 2 son la que cuentan con una mayor correlación y serán las utilizadas para el proceso de análisis.

Al aumentar el orden de la curva polinómica, el valor de la correlación también aumenta pero de manera mínima, por lo cual se puede considerar a las ecuaciones polinómicas de segundo orden, adecuadas para reflejar el comportamiento de la ductilidad de los cementos asfálticos convencionales en función a la temperatura.

Por lo tanto, las ecuaciones polinómicas que serán las utilizadas se presentan a continuación:

- $y = -0,2322x^2 + 7,04x + 78,432$ (ECUACIÓN 3.3 – Betupen Plus)
- $y = -0,2296x^2 + 6,9908x + 80,583$ (ECUACIÓN 3.6 – Greca)
- $y = -0,2108x^2 + 6,5224x + 77,098$ (ECUACIÓN 3.9 – Betunel)
- $y = -0,2018x^2 + 5,6642x + 98,087$ (ECUACIÓN 3.12 – Conv.60/70)

Para la presente investigación, se procedió a generar las líneas de tendencia polinómicas y sus correlaciones generadas con los valores medios de la ductilidad, son los mayores sobrepasando una correlación de 0.95, pero para este tipo de investigación es preferible generar las curvas y sus correlaciones con todo el conjunto de datos obtenidos mediante las pruebas de laboratorio.

Comparando estas cuatro correlaciones polinómicas de segundo orden, se aprecia que el cemento asfáltico convencional 60/70 tiene la mayor correlación con un valor de 0.9453 y el cemento asfáltico Greca la menor con un valor de 0.9052, siendo igualmente una correlación aceptable para el análisis.

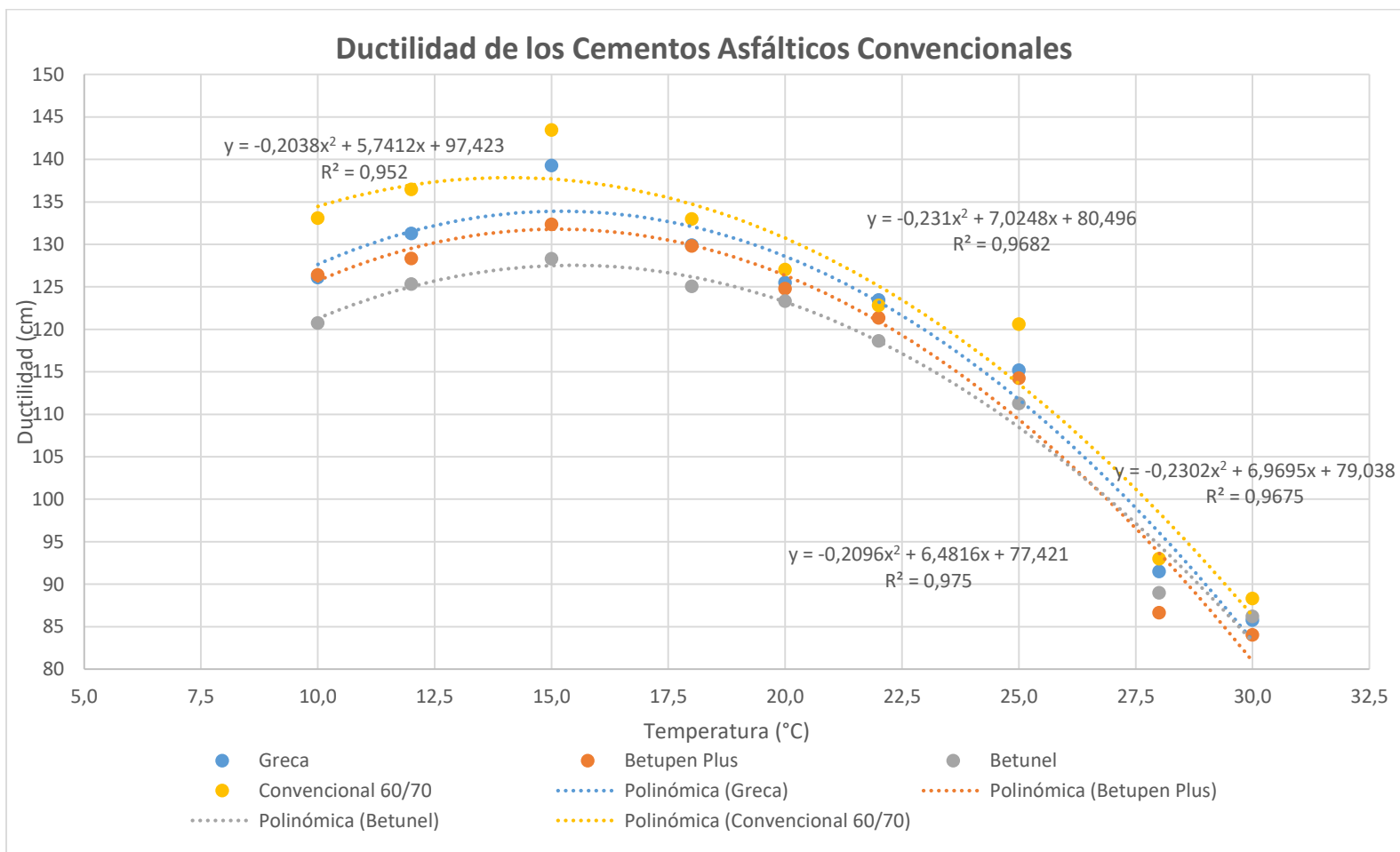
3.6.6. COMPARACIÓN DE DUCTILIDADES DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS CONVENCIONALES

Como ya se conoció antes, la correlación de los valores promedios de las ductilidades son mayores por la aplicación estadística y su depuración, tal como lo demuestra la tabla 3.48 de comparación de correlaciones, por ende se presenta una gráfica de comparación de las dispersiones con los valores promedios de la ductilidad con sus respectivas ecuaciones y correlaciones, que representan el comportamiento de la ductilidad en función a la variación de la temperatura.

La figura N° 3.38 muestra el comportamiento de la ductilidad de los cementos asfálticos con sus valores promedios de los datos obtenidos por la aplicación estadística, en la cual se puede observar que los valores de la ductilidad del cemento asfáltico convencional 60/70 son mayores, por tal razón, la línea de tendencia polinómica está por encima de las curvas de los demás cementos asfálticos.

Así también, se puede apreciar que los valores de la ductilidad del cemento asfáltico Betunel están por debajo de los demás pero encima de los 25°C de temperatura este cemento asfáltico tiende a aumentar sus valores con respecto a los cementos asfálticos Greca y Betupen Plus, atravesando sus curvas polinómicas exceptuando la curva del cemento asfáltico convencional 60/70.

FIGURA N° 3. 38. Comparación de correlaciones de ductilidades promedio de los cementos asfálticos



FUENTE: Elaboración propia

3.7. OTRAS CORRELACIONES

Para la realización de las correlaciones que se desean mostrar, se presentan las siguientes tablas con la media de los valores de las propiedades de los cuatro cementos asfálticos convencionales en función a la temperatura, transformados a una misma unidad:

TABLA N° 3. 49. Media de los valores de las propiedades del cemento asfáltico Betupen Plus

Betupen Plus 85/100			
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)	Penetración (cm)	Densidad (g/cm³)
10	126,42	2,60	1,0045
12	128,36	3,16	1,0037
15	132,36	3,62	1,0035
18	129,83	5,62	1,0018
20	124,81	7,39	1,0009
22	121,38	7,73	1,0008
25	114,28	8,64	0,9991
28	86,66	15,90	0,9988
30	84,06	20,13	0,9980

FUENTE: Elaboración propia

TABLA N° 3. 50. Media de los valores de las propiedades del cemento asfáltico Greca

Greca 85/100			
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)	Penetración (cm)	Densidad (g/cm³)
10	126,11	2,94	1,0071
12	131,32	3,65	1,0062
15	139,30	4,53	1,0051
18	129,94	7,14	1,0037

20	125,50	8,83	1,0018
22	123,47	9,09	1,0019
25	115,21	9,43	1,0014
28	91,51	15,07	1,0010
30	85,79	18,47	1,0004

FUENTE: Elaboración propia

TABLA N° 3. 51. Media de los valores de las propiedades del cemento asfáltico Betunel

Betunel 85/100			
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)	Penetración (cm)	Densidad (g/cm³)
10	120,78	2,80	1,0055
12	125,34	3,08	1,0041
15	128,31	3,84	1,0033
18	125,07	6,04	1,0030
20	123,36	7,75	1,0020
22	118,66	8,11	1,0010
25	111,28	8,91	0,9999
28	89,00	15,72	0,9995
30	86,23	20,57	0,9989

FUENTE: Elaboración propia

TABLA N° 3. 52. Media de los valores de las propiedades del cemento asfáltico convencional 60/70

Convencional 60/70			
Temperatura (°C)	Ductilidad (cm)	Penetración (cm)	Densidad (g/cm³)
10	133,12	1,36	1,0114
12	136,48	1,67	1,0093
15	143,50	2,32	1,0084
18	133,00	3,59	1,0076
20	127,06	4,34	1,0051
22	122,85	5,36	1,0046
25	120,62	6,56	1,0026
28	93,02	9,79	1,0011
30	88,32	12,09	1,0003

FUENTE: Elaboración propia

Para la comparación de las propiedades, ductilidad, penetración y densidad de los cementos asfálticos convencionales en función a la variación de la temperatura, se procede a generar ecuaciones con sus correspondientes correlaciones para cada cemento asfáltico con las tablas presentadas, donde se verá que cada figura tendrá nueve puntos, los cuales están en función a la temperatura y ordenados de menor a mayor, es decir que el primer punto (1) estará en función a 10°C y el último (9) a 30°C, como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA N° 3. 53. Orden de puntos para las figuras de comparaciones con la ductilidad de los cementos asfálticos en función a la temperatura

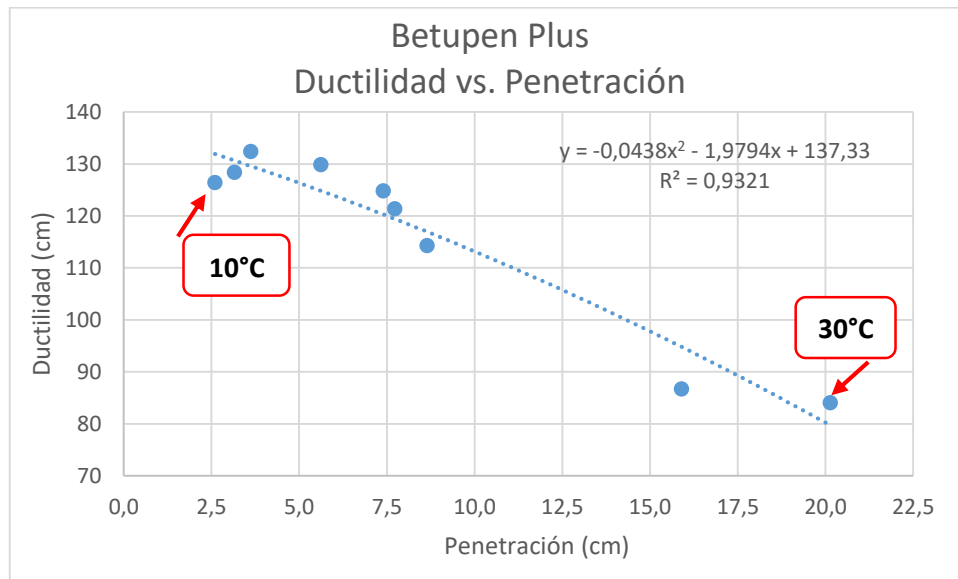
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30

FUENTE: Elaboración propia.

3.7.1. COMPARACIONES DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

3.7.1.1. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA PENETRACIÓN

FIGURA N° 3.39. Ductilidad vs Penetración del cemento asfáltico Betupen Plus



FUENTE: Elaboración propia

Como ya se describió en las correlaciones anteriores, la ductilidad se comporta de manera descendente a partir de los 15°C mientras que la penetración de manera ascendente, es decir, mientras se aumente la temperatura de los cementos asfálticos, mayor será la medida de la penetración.

En la figura N° 3.39 se puede notar que existe un quiebre en la continuidad de los resultados obtenidos a partir de los 25°C, temperatura de ensaye según la normativa ABC, a los 30°C. En el caso de la ductilidad, los valores obtenidos con temperaturas mayores a 25°C son despreciados ya que al aumentar la temperatura a 28°C y 30°C, el cemento asfáltico no logra elongarse hasta la longitud mínima de 100 centímetros que exige la normativa vigente, mientras que en la penetración, los valores obtenidos mayores a una temperatura de 25°C se proyectan en demasía, por lo cual se desprecian estos valores y solo se los toma en cuenta para un análisis en función de la temperatura.

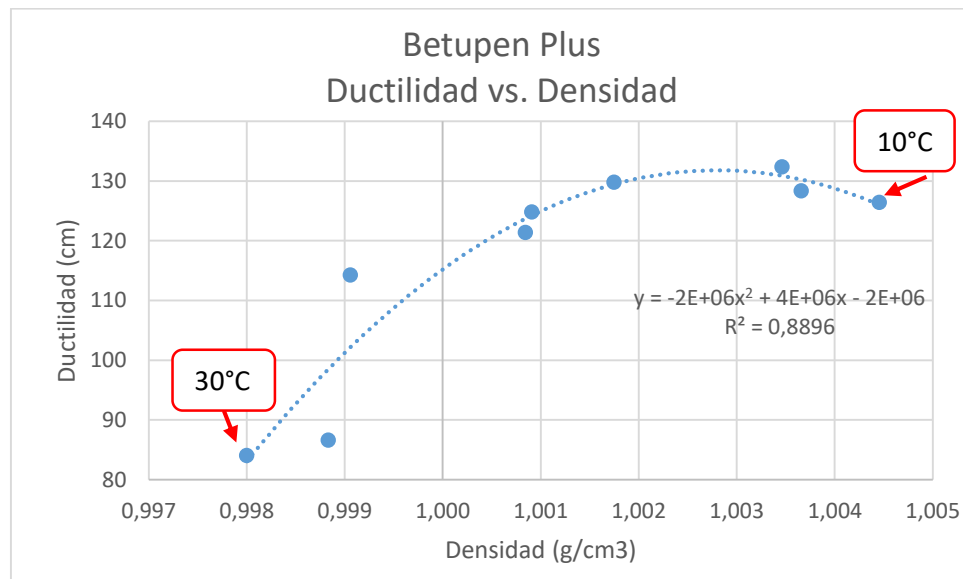
Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica descendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.9321$.

$$y = -0,0438x^2 - 1,9794x + 137,33 \quad \text{ECUACIÓN 3.13}$$

Teniendo un valor de ductilidad del cemento asfáltico Betupen Plus podremos pronosticar un valor de su penetración y viceversa, mediante la aplicación de la ecuación 3.13. Estos valores reflejan un mejor comportamiento de los datos del cemento asfáltico mencionado en función a la variación de temperatura.

3.7.1.2. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA DENSIDAD

FIGURA N° 3.40. Ductilidad vs Densidad del cemento asfáltico Betupen Plus



FUENTE: Elaboración propia

En la figura N° 3.40 también se puede apreciar que la ductilidad se comporta de manera descendente a partir de los 15°C, la cual sería en el punto 3, mientras que la densidad, a diferencia de la penetración, se comporta de manera ascendente a medida que disminuye la temperatura de los cementos asfálticos.

También se puede notar que la ductilidad tiene un comportamiento diferente al aumentar la temperatura desde los 25°C, donde sus valores disminuyen bastante a los 28°C y 30°C, razón por la cual son despreciados ya que la briqueta no logra alcanzar la longitud mínima de 100 centímetros que exige la normativa vigente, mientras que la densidad tiene un comportamiento continuo a través de la variación de la temperatura, es decir, que al aumentar la temperatura la densidad de los cementos asfálticos tiene valores menores, mientras que al disminuir la temperatura los valores de la densidad son mayores.

Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica ascendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.8896$, con respecto a las otras líneas de tendencia.

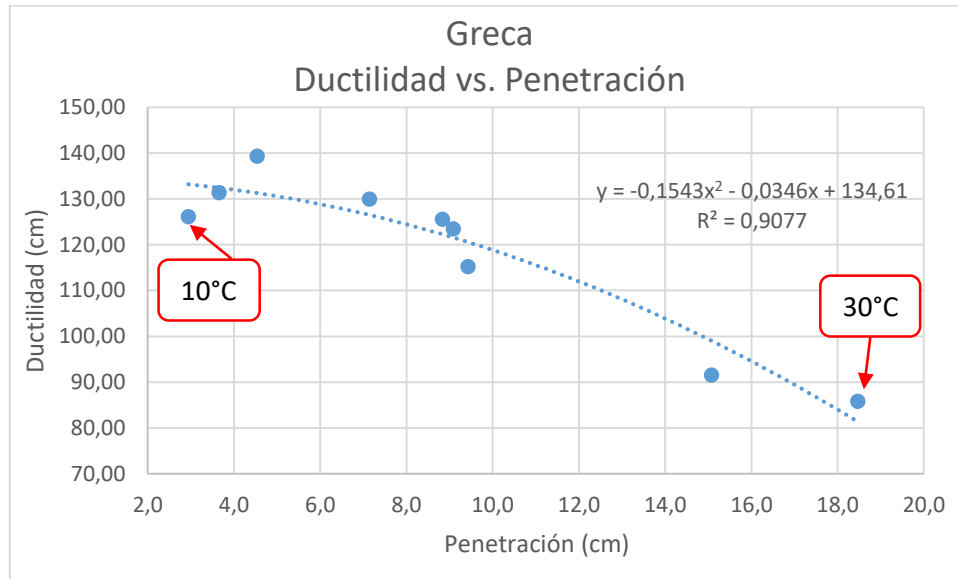
$$y = -2E+06x^2 + 4E+06x - 2E+06 \quad \text{ECUACIÓN 3.14}$$

La ecuación 3.14 se adecua a los resultados obtenidos, por lo que refleja un mejor comportamiento entre estas dos propiedades del cemento asfáltico Betupen Plus, por tal razón se podrá pronosticar valores de la ductilidad o de la densidad del cemento asfáltico mencionado en función de la temperatura.

3.7.2. COMPARACIONES DEL CEMENTO ASFÁLTICO GRECA

3.7.2.1. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA PENETRACIÓN

FIGURA N° 3.41. Ductilidad vs Penetración del cemento asfáltico Greca



FUENTE: Elaboración propia

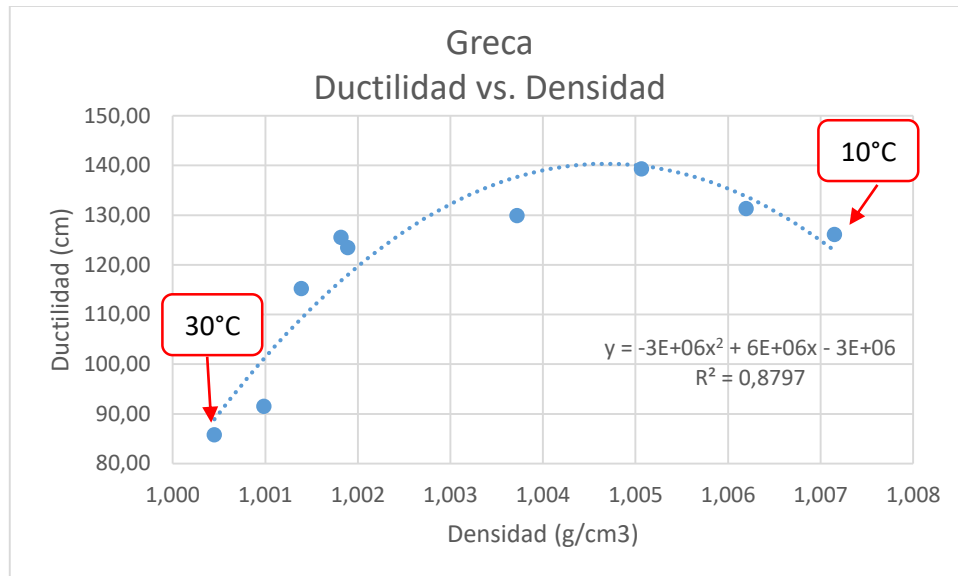
Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica ascendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.9077$, con respecto a las otras líneas de tendencia.

$$y = -0,1543x^2 - 0,0346x + 134,61 \quad \text{ECUACIÓN 3.15}$$

La ecuación 3.15 se adecua a los resultados obtenidos, por lo que refleja un mejor comportamiento entre estas dos propiedades del cemento asfáltico mencionado, por tal razón se podrá pronosticar valores de la ductilidad o de la densidad del cemento asfáltico Greca en función de la temperatura.

3.7.2.2. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA DENSIDAD

FIGURA N° 3.42. Ductilidad vs Densidad del cemento asfáltico Greca



FUENTE: Elaboración propia

Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica ascendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.8797$, con respecto a las otras líneas de tendencia.

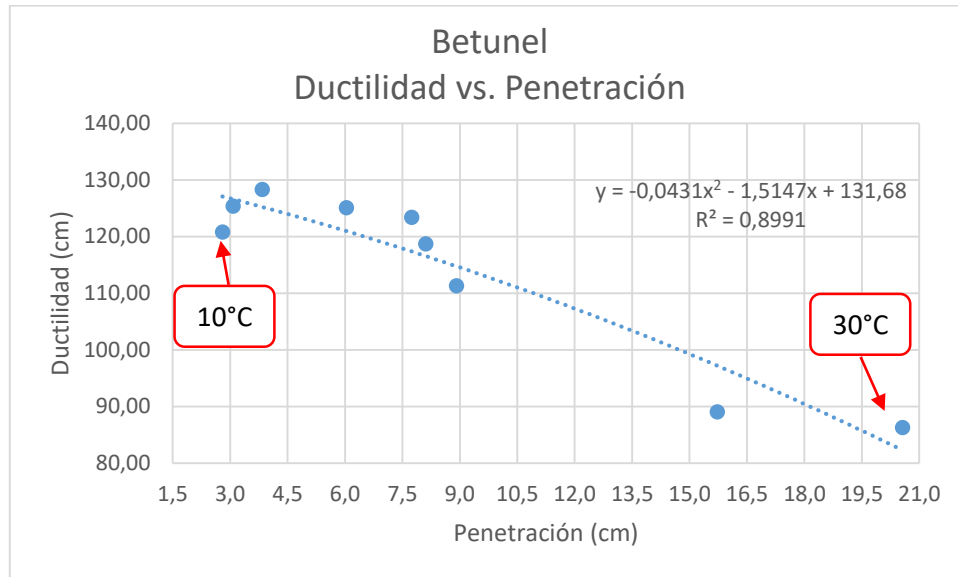
$$y = -3E+06x^2 + 6E+06x - 3E+06 \quad \text{ECUACIÓN 3.16}$$

La ecuación 3.16 se adecua a los resultados obtenidos, por lo que refleja un mejor comportamiento entre estas dos propiedades del cemento asfáltico mencionado, por tal razón se podrá pronosticar valores de la ductilidad o de la densidad del cemento asfáltico Greca en función de la temperatura.

3.7.3. COMPARACIONES DEL CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

3.7.3.1. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA PENETRACIÓN

FIGURA N° 3.43. Ductilidad vs Penetración del cemento asfáltico Betunel



FUENTE: Elaboración propia

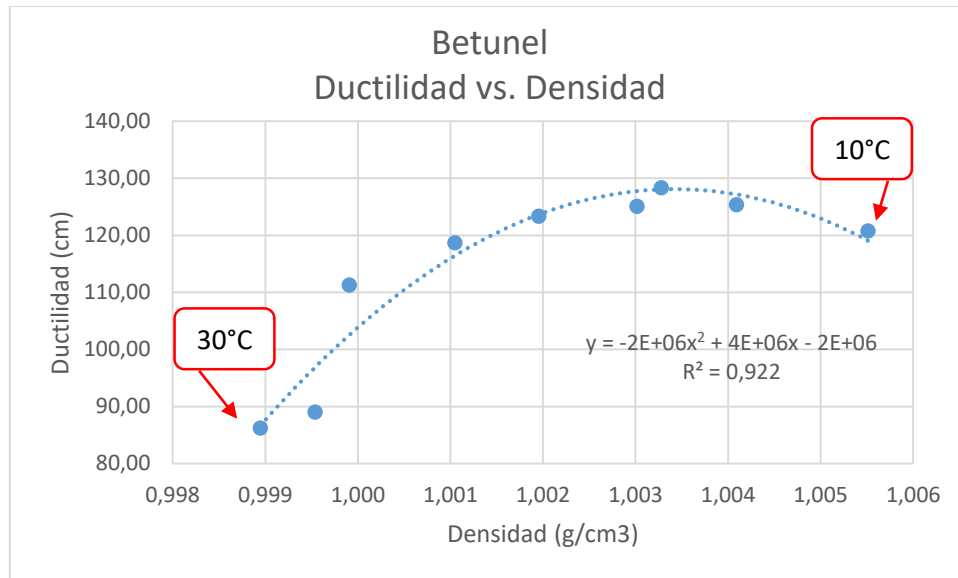
Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica ascendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.8991$, con respecto a las otras líneas de tendencia.

$$y = -0,0431x^2 - 1,5147x + 131,68 \quad \text{ECUACIÓN 3.17}$$

La ecuación 3.17 se adecua a los resultados obtenidos, por lo que refleja un mejor comportamiento entre estas dos propiedades del cemento asfáltico Betunel, por tal razón se podrá pronosticar valores de la ductilidad o de la penetración del cemento asfáltico mencionado en función de la temperatura.

3.7.3.2. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA DENSIDAD

FIGURA N° 3.44. Ductilidad vs Densidad del cemento asfáltico Betunel



FUENTE: Elaboración propia

Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica ascendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0,922$, con respecto a las otras líneas de tendencia.

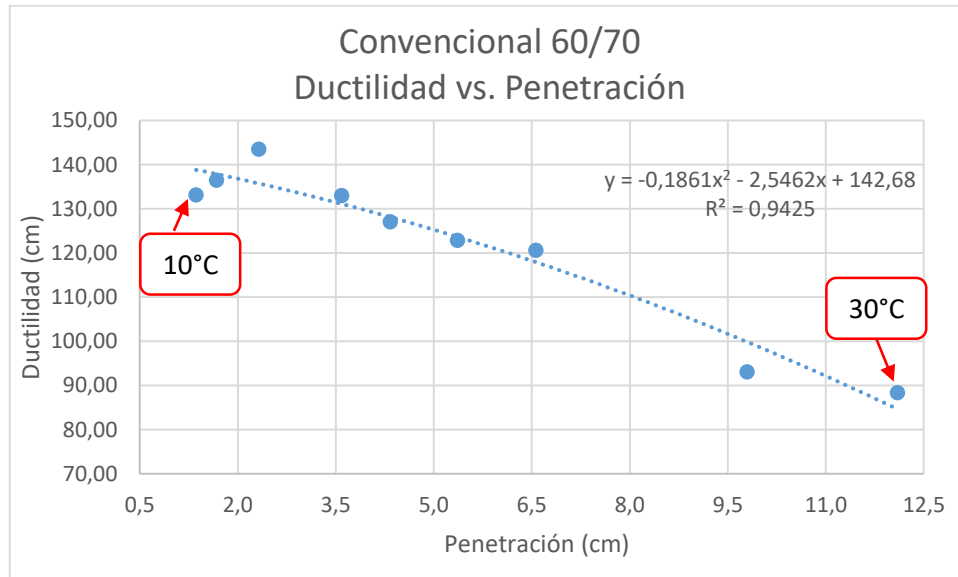
$$y = -2E+06x^2 + 4E+06x - 2E+06 \quad \text{ECUACIÓN 3.18}$$

La ecuación 3.18 se adecua a los resultados obtenidos, por lo que refleja un mejor comportamiento entre estas dos propiedades del cemento asfáltico Betunel, por tal razón se podrá pronosticar valores de la ductilidad o de la densidad del cemento asfáltico mencionado en función de la temperatura.

3.7.4. COMPARACIONES DEL CEMENTO ASFÁLTICO 60/70

3.7.4.1. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA PENETRACIÓN

FIGURA N° 3.45. Ductilidad vs Penetración del cemento asfáltico convencional 60/70



FUENTE: Elaboración propia

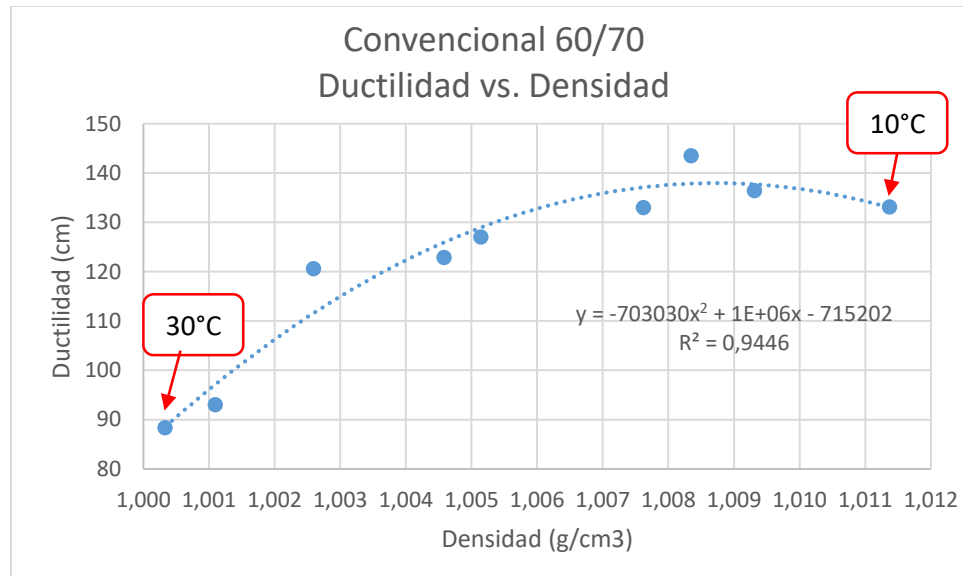
Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica ascendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0.9425$, con respecto a las otras líneas de tendencia.

$$y = -0,1861x^2 - 2,5462x + 142,68 \quad \text{ECUACIÓN 3.19}$$

La ecuación 3.19 se adecua a los resultados obtenidos, por lo que refleja un mejor comportamiento entre estas dos propiedades del cemento asfáltico convencional 60/70, por tal razón se podrá pronosticar valores de la ductilidad o de la penetración del cemento asfáltico mencionado en función de la temperatura.

3.7.4.2. COMPARACIÓN DE DUCTILIDAD CON LA DENSIDAD

FIGURA N° 3.46. Ductilidad vs Densidad del cemento asfáltico convencional 60/70



FUENTE: Elaboración propia

Con esta figura se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica ascendente de orden 2, la propia que ostenta una correlación de $R^2 = 0,9446$, con respecto a las otras líneas de tendencia.

$$y = -703030x^2 + 1E+06x - 715202 \quad \text{ECUACIÓN 3.20}$$

La ecuación 3.20 se adecua a los resultados obtenidos, por lo que refleja un mejor comportamiento entre estas dos propiedades del cemento asfáltico convencional 60/70, por tal razón se podrá pronosticar valores de la ductilidad o de la densidad del cemento asfáltico mencionado en función de la temperatura.

3.7.5. CORRELACIONES EN TRES DIMENSIONES

3.7.5.1. INTRODUCCIÓN

Para tener un análisis de la ductilidad y la variación de otras propiedades de los cementos asfálticos, se utilizará el programa ORIGINLAB, el cual tiene la función de generar gráficos en 3 dimensiones como volúmenes en 3D y también curvas de nivel. Con este programa se generarán gráficos con valores de los cementos asfálticos convencionales representados en los ejes X, Y y Z.

ORIGINLAB es un software de interfaz gráfica de usuario con hojas de cálculo. A diferencia de las hojas de cálculo populares como Excel, la hoja de cálculo de Origin está orientada a columnas. Cada columna tiene atributos asociados como nombre, unidades y otras etiquetas definibles por el usuario. En lugar de fórmula de celda, Origin utiliza la fórmula de columna para los cálculos.

3.7.5.2. PLANTEAMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE

Como este programa presenta variables en x y z, se asumirán estas variables con valores de Ductilidad, Temperatura, Penetración y Densidad, por lo cual se generará dos gráficas para cada cemento asfáltico, que proporcionarán dos representaciones gráficas en función a la ductilidad, que se detallan a continuación;

- Ductilidad, Temperatura y Penetración.
- Ductilidad, Temperatura y Densidad.

FIGURA N° 3. 47. Procesamiento de datos en el software ORIGINLAB

	A(Y)	B(Z)	C(X)
Long Name	Temperatura	Penetracion	Ductilidad
Units	°C	cm	cm
Comments			
1	10	2,6	121,4
2	10	2,7	128,8
3	10	2,35	120,3
4	10	2,65	128,7
5	10	2,75	125,7
6	10	2,7	130,5
7	10	2,65	121,4
8	10	2,65	131,3
9	10	2,35	129,7
10	10	2,6	128,5
11	12	3,3	130,1
12	12	3,05	124
13	12	2,95	130,7
14	12	3,15	132
15	12	3,1	124,8
16	12	3,3	132,5
17	12	3,3	124,4
18	12	3,25	129,5
19	12	3	130,1

FUENTE: Elaboración propia

GENERACIÓN DE LA MATRIZ

El proceso de datos en el programa ORIGINLAB consta de la conversión de la hoja de cálculo a una matriz que genera una triangulación para crear un plano X, Y y Z, donde colocaremos los valores de las variables estudiadas para obtener dos tipos de representaciones gráficas para cada cemento asfáltico, donde la primera será una carta de curvas de nivel y la segunda una figura de superficie de colores en tres dimensiones.

FIGURA N° 3. 48. Generación de matriz XYZ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7,38141	6,57237	5,73286	4,87469	4,00882	3,15035	2,3832	2,68091	2,67155	2,60234
2	8,02835	7,18833	6,31911	5,43978	4,56922	3,74987	3,18642	3,17385	3,23278	2,88242
3	8,78468	7,91907	7,03173	6,15888	5,33539	4,58462	3,91825	3,35228	3,43908	3,02953
4	9,65403	8,75859	7,84649	6,98009	6,23012	5,62199	5,0462	4,61464	4,56238	4,21534
5	10,64501	9,70614	8,73953	7,83267	7,12516	6,77066	6,63191	6,57246	6,2327	5,63688
6	11,77824	10,78288	9,72352	8,67652	7,84083	7,51489	7,55173	7,71518	7,35049	6,74696
7	13,0892	12,04132	10,8968	9,6187	8,41084	7,99028	8,01082	8,07857	7,93752	7,58989
8	14,63828	13,54906	12,46202	11,02682	9,40153	8,92997	8,94395	8,87591	8,68352	8,38946
9	16,76511	15,50949	14,66352	13,05828	11,56337	10,65485	10,2039	9,88675	9,57101	9,23111
10	20,15	19,82364	17,14387	15,10911	13,4971	12,34154	11,5635	10,99953	10,53129	10,10518

FUENTE: Elaboración propia

Teniendo los gráficos necesarios, cambiaremos de posición las variables en los ejes para ver el comportamiento de las mismas en el plano tridimensional de superficie y también en el plano donde se generan las curvas de nivel.

Seguido a esta breve introducción del procesamiento de datos, se mostrarán las gráficas generadas por el software ORIGINLAB:

GENERACIÓN DE GRAFICAS DE CARTAS DE CURVAS DE NIVEL Y SUPERFICIES EN TRES DIMENSIONES (3D)

Para la generación en primer lugar se deben tener las variables en función a la temperatura, las cuales se presentaron en los puntos 3.4.2, 3.4.3 y 3.4.4, para luego colocar los valores en el software mencionado.

CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

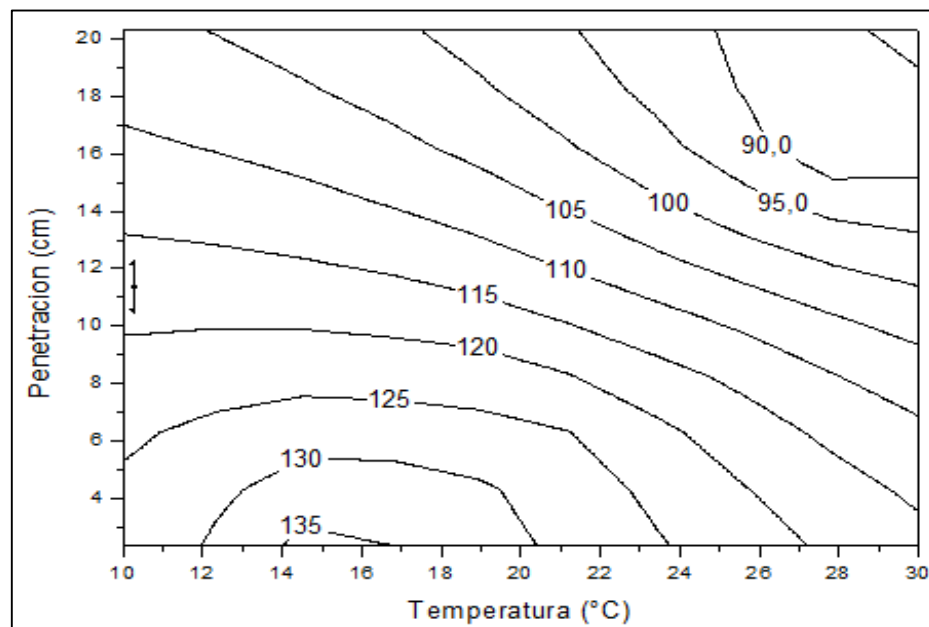
Se lleva a cabo el procesamiento de datos del cemento asfáltico Betupen Plus para obtener sus respectivas gráficas, y como primer paso se colocarán las siguientes variables con sus posiciones en el plano tridimensional:

- **Temperatura, Penetración y Ductilidad (X, Y, Z)**

Una forma útil de visualizar la variación de la ductilidad es mediante las curvas de nivel. Las curvas de nivel las componen los puntos XY (temperatura y penetración) que toman los puntos que tienen la misma altura. Las curvas de nivel nos van a representar en el plano una superficie tridimensional como es la gráfica de una función de dos variables y nos va a permitir ver las zonas de crecimiento, decrecimiento y los extremos de la función

Luego de colocar las variables en los ejes se procede a generar la gráfica de contorno, la cual diseña curvas de nivel, como se muestra a continuación:

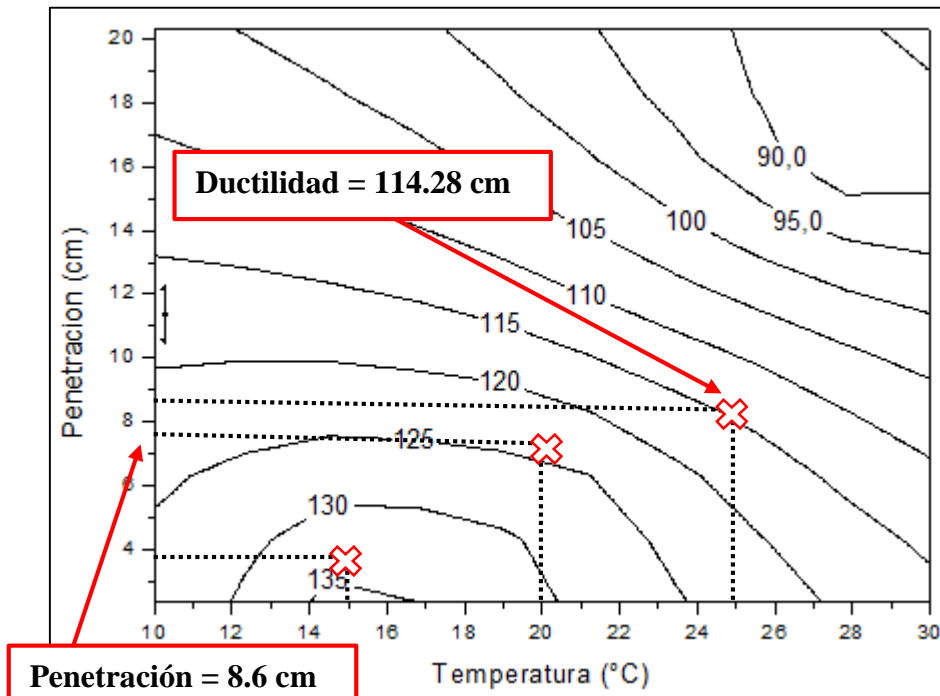
FIGURA N° 3. 49. Curvas de nivel ductilidad vs penetración vs temperatura



FUENTE: Elaboración propia

En esta gráfica se puede ver una relación de la ductilidad con la penetración en función a la temperatura de estos ensayos, en la cual se puede apreciar que las muestras de cemento asfáltico con una menor penetración, tienen un valor mas elevado de ductilidad, hasta el límite de los 15°C y mientras va aumentando la temperatura.

FIGURA N° 3. 50. Curvas de nivel comprobación de resultados ductilidad vs penetración vs temperatura



FUENTE: Elaboración propia

Teniendo los resultados de las variables, se dibujó líneas de puntos sobre las coordenadas XY, temperatura y penetración, para obtener un valor aproximado del eje Z, que en este caso es la ductilidad. En la intercepción de líneas se puede apreciar que los valores aproximados de las tres mediciones de la ductilidad realizadas sobre la figura 3.53, son similares a los valores de la tabla 3.53 del respectivo cemento asfáltico:

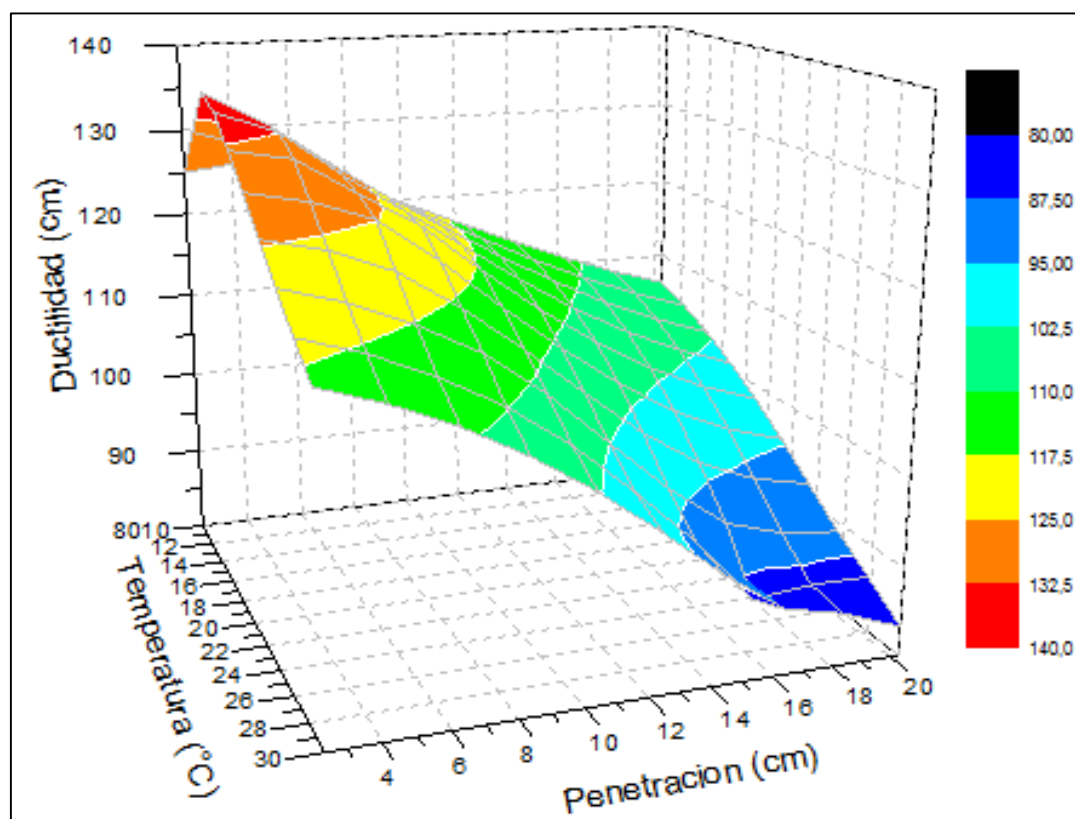
- Ductilidad de 132.36 cm y Penetración de 36.17 mm a una temperatura de 15°C.
- Ductilidad de 124.81 cm y Penetración de 73.94 mm a una temperatura de 20°C.
- Ductilidad de 114.28 cm y Penetración de 86.40 mm a una temperatura de 25°C.

Se puede observar que los valores de la ductilidad desde los 15°C, empiezan a tomar un comportamiento descendente, mientras la penetración va aumentando a medida que los valores de la temperatura incrementan.

Con todo lo expuesto, se puede proponer esta figura como un gráfico para poder determinar los valores de la ductilidad en función a la penetración y a la temperatura de ensayo, dependiendo de la forma de las curvas de nivel.

Seguido del análisis de las curvas de nivel, se presenta la siguiente figura de superficie de colores en 3D de las variables ya mencionadas:

FIGURA N° 3. 51. Superficie en 3D de las variables ductilidad, temperatura y penetración



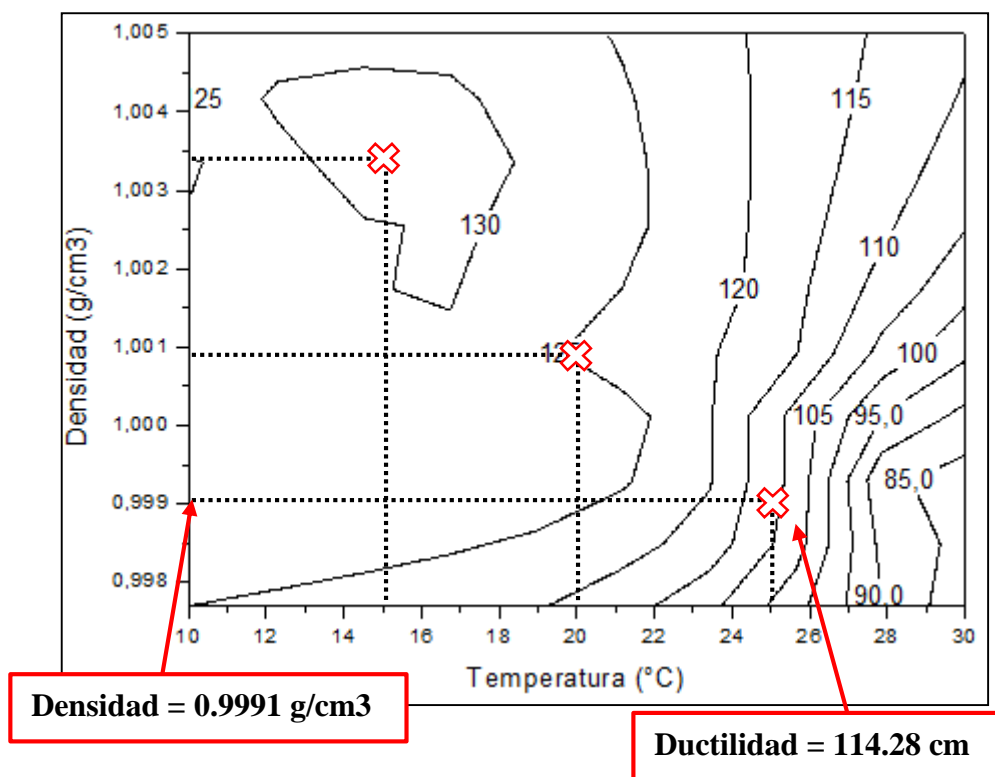
FUENTE: Elaboración propia

- **Temperatura, Densidad y Ductilidad (X, Y, Z)**

Las curvas de nivel las componen los puntos XY (temperatura y densidad) que toman los puntos que tienen la misma altura. Las curvas de nivel nos van a representar en el plano una superficie tridimensional como es la gráfica de una función de dos variables y nos va a permitir ver las zonas de crecimiento, decrecimiento y los extremos de la función

Luego de colocar las variables en los ejes se procede a generar la gráfica de contorno, la cual diseña curvas de nivel, como se muestra a continuación:

FIGURA N° 3. 52. Curvas de nivel ductilidad vs densidad vs temperatura



Teniendo los resultados de las variables, se dibujó líneas de puntos sobre las coordenadas XY, temperatura y densidad, para obtener un valor aproximado del eje Z, que en este caso es la ductilidad. En la intercepción de líneas se puede apreciar que los

valores aproximados de las tres mediciones de la ductilidad realizadas sobre la figura 3.52, son similares a los valores de la tabla 3.53 del respectivo cemento asfáltico:

- Ductilidad de 132.36 cm y Densidad de 1.0035 g/cm^3 a una temperatura de 15°C .
- Ductilidad de 124.81 cm y Densidad de 1.0009 g/cm^3 a una temperatura de 20°C .
- Ductilidad de 114.28 cm y Densidad de 0.9991 g/cm^3 a una temperatura de 25°C .

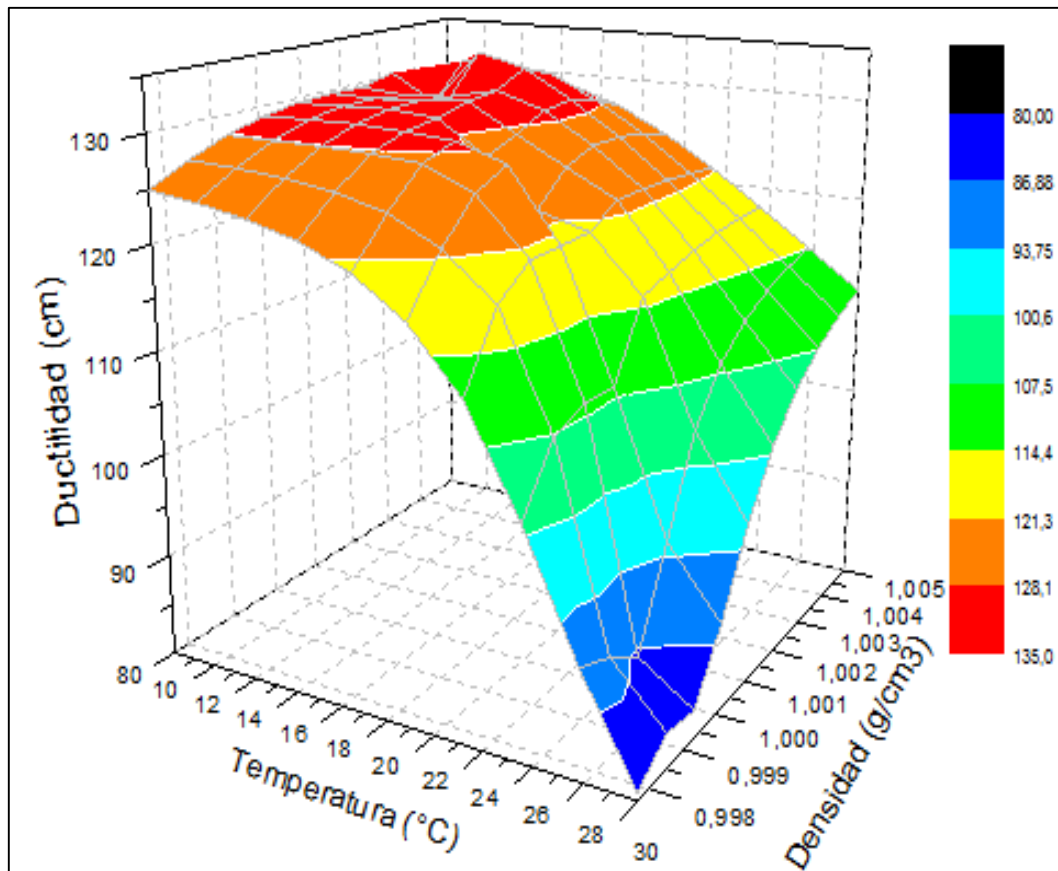
Con esta figura se puede observar la relación que tiene la densidad con la ductilidad, donde la curva de nivel se cierra y muestra su máxima expresión a los 15°C . Los valores de la ductilidad desde los 15°C , empiezan a tomar un comportamiento descendente, mientras la penetración va aumentando a medida que los valores de la temperatura incrementan. Al ser un cemento asfáltico denso que lanza valores de ductilidad elevados

Con todo lo expuesto, se puede proponer esta figura como un gráfico para poder determinar los valores de la ductilidad en función a la densidad y a la temperatura de ensayo, dependiendo de la forma de las curvas de nivel.

La ductilidad no presenta mucha incidencia en la densidad como en la penetración al tener un rango de valores muy corto de 0.998 a 1.005 g/cm^3 como se especifica en el eje Y.

Seguido del análisis de las curvas de nivel, se presenta la siguiente figura de superficie de colores en 3D de las variables ya mencionadas:

FIGURA N° 3. 53. Superficie en 3D de las variables ductilidad, temperatura y densidad



FUENTE: Elaboración propia

En la figura 3.53 se pueden ver las superficies en colores que representan los valores de la ductilidad que se proyectan en un plano para las cartas de curvas de nivel.

Se puede apreciar que desde la franja verde agua la ductilidad empieza a tener valores mayores a 100 centímetros y también que la franja roja es el valor pico de la ductilidad que se genera en los 15°C.

3.8. PROPUESTA DE ECUACIONES Y GRÁFICAS PARA LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE DUCTILIDAD, PENETRACIÓN Y DENSIDAD EN LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS CONVENCIONALES. (CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS)

Para la realización de la propuesta de ecuaciones y gráficas que se desean mostrar, se presenta la siguiente tabla con los valores finales de las propiedades para cada cemento asfáltico convencional, transformados a una misma unidad:

TABLA N° 3. 54. Resultados Finales de los Cementos Asfálticos Convencionales.

CEMENTO ASFALTICO BETUPEN PLUS 85/100									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	126,42	128,36	132,36	129,83	124,81	121,38	114,28	86,66	84,06
Penetración (cm)	2,60	3,16	3,62	5,62	7,39	7,73	8,64	15,90	20,13
Densidad (g/cm³)	1,0045	1,0037	1,0035	1,0018	1,0009	1,0008	0,9991	0,9988	0,9980
CEMENTO ASFALTICO GRECA CAP 85/100									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	126,11	131,32	139,30	129,94	125,50	123,47	115,21	91,51	85,79
Penetración (cm)	2,94	3,65	4,53	7,14	8,83	9,09	9,43	15,07	18,47
Densidad (g/cm³)	1,0071	1,0062	1,0051	1,0037	1,0018	1,0019	1,0014	1,0010	1,0004
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL CAP 85/100									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	120,78	125,34	128,31	125,07	123,36	118,66	111,28	89,00	86,23
Penetración (cm)	2,80	3,08	3,84	6,04	7,75	8,11	8,91	15,72	20,57
Densidad (g/cm³)	1,0055	1,0041	1,0033	1,0030	1,0020	1,0010	0,9999	0,9995	0,9989
CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL 60/70									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	133,12	136,48	143,50	133,00	127,06	122,85	120,62	93,02	88,32
Penetración (cm)	1,36	1,67	2,32	3,59	4,34	5,36	6,56	9,79	12,09
Densidad (g/cm³)	1,0114	1,0093	1,0084	1,0076	1,0051	1,0046	1,0026	1,0011	1,0003

FUENTE: Elaboración propia

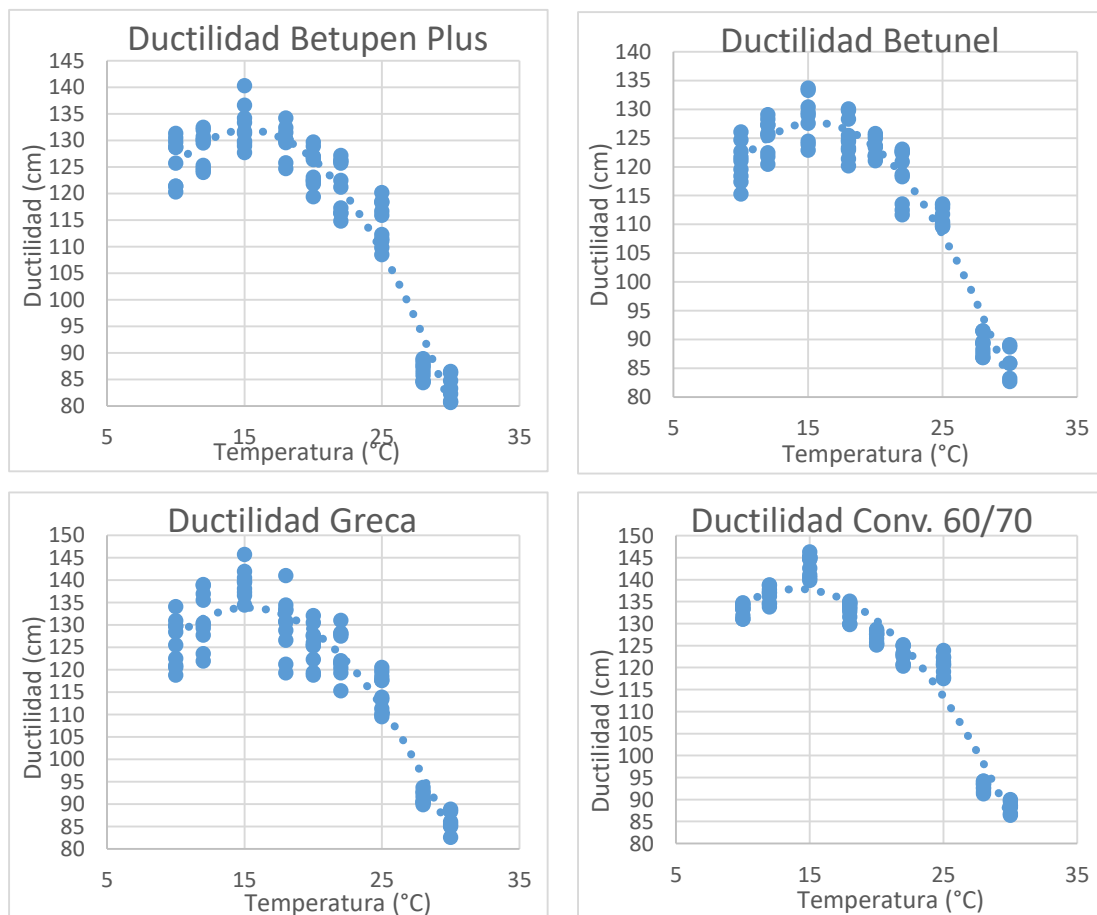
3.8.1. ECUACIONES DE LA DUCTILIDAD EN FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA.

TABLA N° 3. 55. Ecuaciones de la Ductilidad en función de la Temperatura.

CEMENTO ASFÁLTICO	ECUACIONES
BETUPEN PLUS	$y = -0,2322x^2 + 7,04x + 78,432$
GRECA	$y = -0,2296x^2 + 6,9908x + 80,583$
BETUNEL	$y = -0,2108x^2 + 6,5224x + 77,098$
CONVENCIONAL 60/70	$y = -0,2018x^2 + 5,6642x + 98,087$

FUENTE: Elaboración propia

FIGURA N° 3. 54. Resumen de las ductilidades en función de la temperatura



3.8.2. ECUACIONES DE LA DUCTILIDAD EN FUNCIÓN A LA PENETRACIÓN Y LA DENSIDAD MEDIANTE LA APLICACIÓN DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA.

Con los resultados obtenidos de las propiedades de ductilidad, penetración y densidad mediante la aplicación de la variación de temperatura, se generaron las siguientes ecuaciones con las cuales se podrá analizar el comportamiento de las mismas.

TABLA N° 3. 56. Ecuaciones para la predicción de penetración y densidad de los cementos asfálticos convencionales

CEMENTO ASFÁLTICO	PREDICCIÓN	ECUACIONES
BETUPEN PLUS	Ductilidad - Penetración	$y = -0,0438x^2 - 1,9794x + 137,33$
	Ductilidad - Densidad	$y = -2E+06x^2 + 4E+06x - 2E+06$
GRECA	Ductilidad - Penetración	$y = -0,1543x^2 - 0,0346x + 134,61$
	Ductilidad - Densidad	$y = -3E+06x^2 + 6E+06x - 3E+06$
BETUNEL	Ductilidad - Penetración	$y = -0,0431x^2 - 1,5147x + 131,68$
	Ductilidad - Densidad	$y = -2E+06x^2 + 4E+06x - 2E+06$
CONVENCIONAL 60/70	Ductilidad - Penetración	$y = -0,1861x^2 - 2,5462x + 142,68$
	Ductilidad - Densidad	$y = -703030x^2 + 1E+06x - 715202$

FUENTE: Elaboración propia

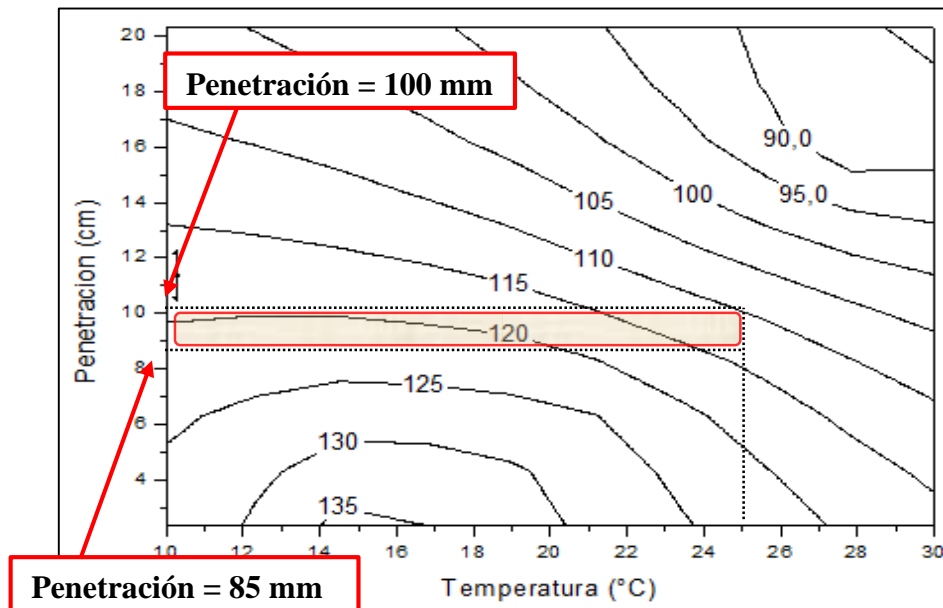
Teniendo un valor de ductilidad de un cemento asfáltico, por ejemplo Betupen Plus, podremos pronosticar un valor de su penetración y densidad y viceversa, mediante la aplicación de las ecuaciones propuestas en la tabla 3.56. Estos valores reflejan un mejor comportamiento de las propiedades de los cementos asfálticos mencionados en función a la variación de temperatura.

3.8.3. RANGOS DE TRABAJABILIDAD DE LA DUCTILIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA PENETRACIÓN 85/100.

3.8.3.1. CEMENTO ASFÁLTICO BETUPEN PLUS

Para generar un rango de trabajabilidad de los valores de la ductilidad, se procedió a crear un área de color rojo entre el rango de 85 a 100 milímetros de penetración y 25°C de temperatura que es la indicada por la normativa Boliviana ABC.

FIGURA N° 3. 55. Rango de trabajabilidad en curvas de nivel temperatura, penetración y ductilidad (XYZ)

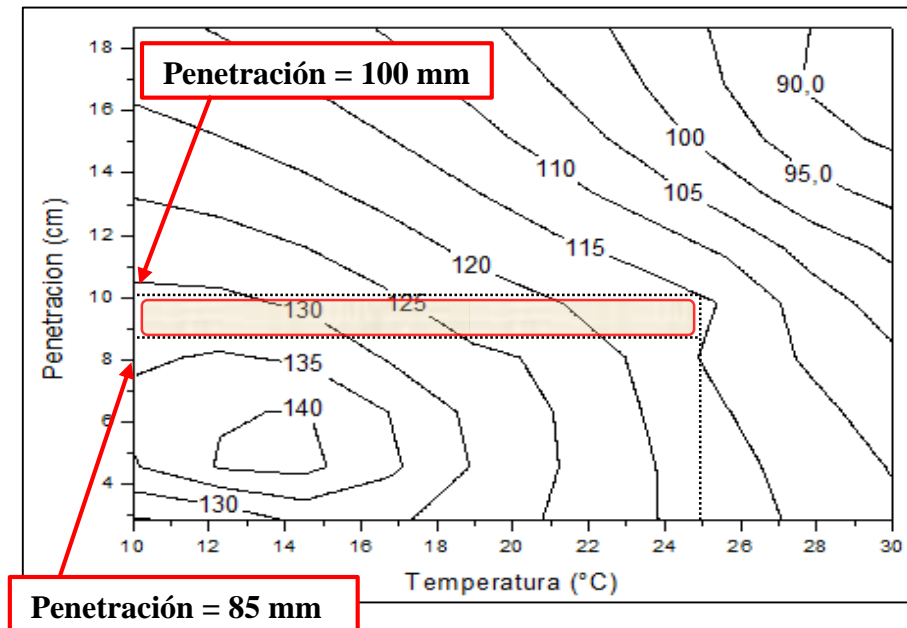


El cemento asfáltico convencional Betupen Plus ya viene clasificado con una penetración definida 85/100, es decir, un mínimo de 85 mm y un máximo de 100 mm. En la figura 3.55 se propone un rango de trabajo de la ductilidad a partir de las curvas de nivel generadas con el software OriginLab, donde se puede apreciar que los valores de la ductilidad dentro del rango marcado con rojo están entre los 110 y 123 centímetros aproximadamente. Este rango se asemeja a los valores obtenidos a los 25°C, mediante ensayos de laboratorio, los cuales van desde 108.5 hasta 120.2 centímetros de elongación.

3.8.3.2. CEMENTO ASFÁLTICO GRECA

Para generar un rango de trabajabilidad de los valores de la ductilidad, se procedió a crear un área de color rojo entre el rango de 85 a 100 milímetros de penetración y 25°C de temperatura que es la indicada por la normativa Boliviana ABC.

FIGURA N° 3. 56. Rango de trabajabilidad en curvas de nivel temperatura, penetración y ductilidad (XYZ)



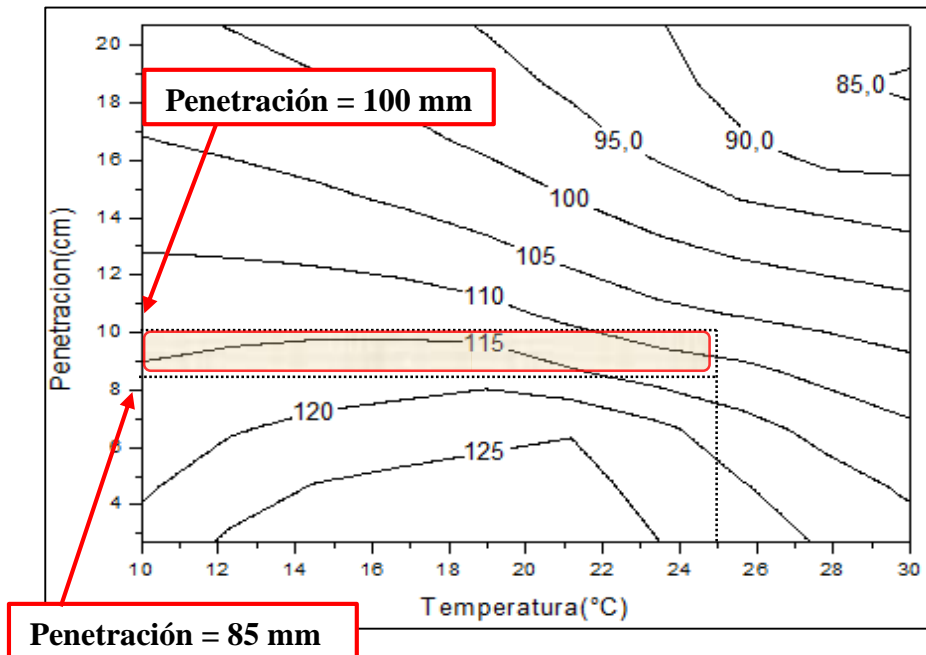
El cemento asfáltico convencional Greca ya viene clasificado con una penetración definida 85/100, es decir, un mínimo de 85 mm y un máximo de 100 mm.

En la figura 3.56 se propone un rango de trabajo de la ductilidad a partir de las curvas de nivel generadas con el software OriginLab, donde se puede apreciar que los valores de la ductilidad dentro del rango marcado con rojo están entre los 115 y 134 centímetros aproximadamente. Este rango se asemeja a los valores obtenidos a los 25°C, mediante ensayos de laboratorio, los cuales van desde 109.5 hasta 136.5 centímetros de elongación.

3.8.3.3. CEMENTO ASFÁLTICO BETUNEL

Para generar un rango de trabajabilidad de los valores de la ductilidad, se procedió a crear un área de color rojo entre el rango de 85 a 100 milímetros de penetración y 25°C de temperatura que es la indicada por la normativa Boliviana ABC.

FIGURA N° 3. 57. Rango de trabajabilidad en curvas de nivel temperatura, penetración y ductilidad (XYZ)



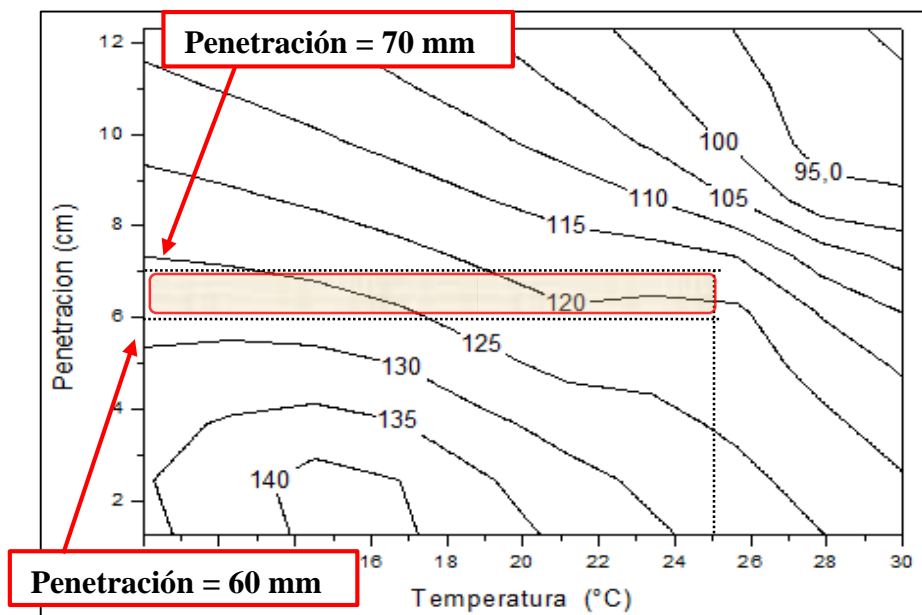
El cemento asfáltico convencional Betunel ya viene clasificado con una penetración definida 85/100, es decir, un mínimo de 85 mm y un máximo de 100 mm.

En la figura 3.57 se propone un rango de trabajo de la ductilidad a partir de las curvas de nivel generadas con el software OriginLab, donde se puede apreciar que los valores de la ductilidad dentro del rango marcado con rojo están entre los 106 y 119 centímetros aproximadamente. Este rango se asemeja a los valores obtenidos a los 25°C, mediante ensayos de laboratorio, los cuales van desde 105.6 hasta 116.1 centímetros de elongación.

3.8.3.4. CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL 60/70

Para generar un rango de trabajabilidad de los valores de la ductilidad, se procedió a crear un área de color rojo entre el rango de 85 a 100 milímetros de penetración y 25°C de temperatura que es la indicada por la normativa Boliviana ABC.

FIGURA N° 3. 58. Rango de trabajabilidad en curvas de nivel temperatura, penetración y ductilidad (XYZ)



El cemento asfáltico convencional 60/70 ya viene clasificado con una penetración definida 60/70, es decir, un mínimo de 60 mm y un máximo de 70 mm.

En la figura 3.58 se propone un rango de trabajo de la ductilidad a partir de las curvas de nivel generadas con el software OriginLab, donde se puede apreciar que los valores de la ductilidad dentro del rango marcado con rojo están entre los 116 y 128 centímetros aproximadamente. Este rango se asemeja a los valores obtenidos a los 25°C, mediante ensayos de laboratorio, los cuales van desde 117.5 hasta 127.7 centímetros de elongación.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

En función del estudio correspondiente del análisis de la ductilidad mediante la aplicación de la variación de la temperatura a las propiedades de penetración y densidad en cementos asfálticos convencionales, se obtuvieron las siguientes conclusiones que se expresan a continuación:

Se logró realizar los ensayos de ductilidad en función a la variación de la temperatura en los cementos asfálticos, Betupen Plus, Greca, Betunel y el convencional 60/70, y representar los resultados en gráficas de dispersión con todos los puntos resultantes de la aplicación estadística descriptiva.

Se pudo verificar que los valores obtenidos de ductilidad, penetración y densidad de los cementos asfálticos convencionales se encuentran dentro de las especificaciones de la normativa Boliviana ABC, con la caracterización de los mencionados asfaltos.

Con la aplicación de la estadística inferencial, mediante la prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov, se pudo verificar la hipótesis planteada de este trabajo de investigación la cual se cumple, donde con la aplicación de la variación de temperatura permite analizar la variación de la ductilidad en el comportamiento de las propiedades de penetración y densidad de los cuatro cementos asfálticos convencionales.

Se estableció un diagnóstico del comportamiento de la ductilidad, de cada cemento asfáltico convencional en función a la variación de la temperatura, expresando cada valor obtenido de diferente temperatura en gráficas de dispersión y generando líneas de tendencia polinómica de segundo orden de mayor correlación con sus respectivas ecuaciones, ya que se determinó que las correlaciones lineales y exponenciales no son adecuadas.

Las ecuaciones polinómicas se presentan a continuación:

TABLA N° 4. 1. Ecuaciones de la Ductilidad en función de la Temperatura.

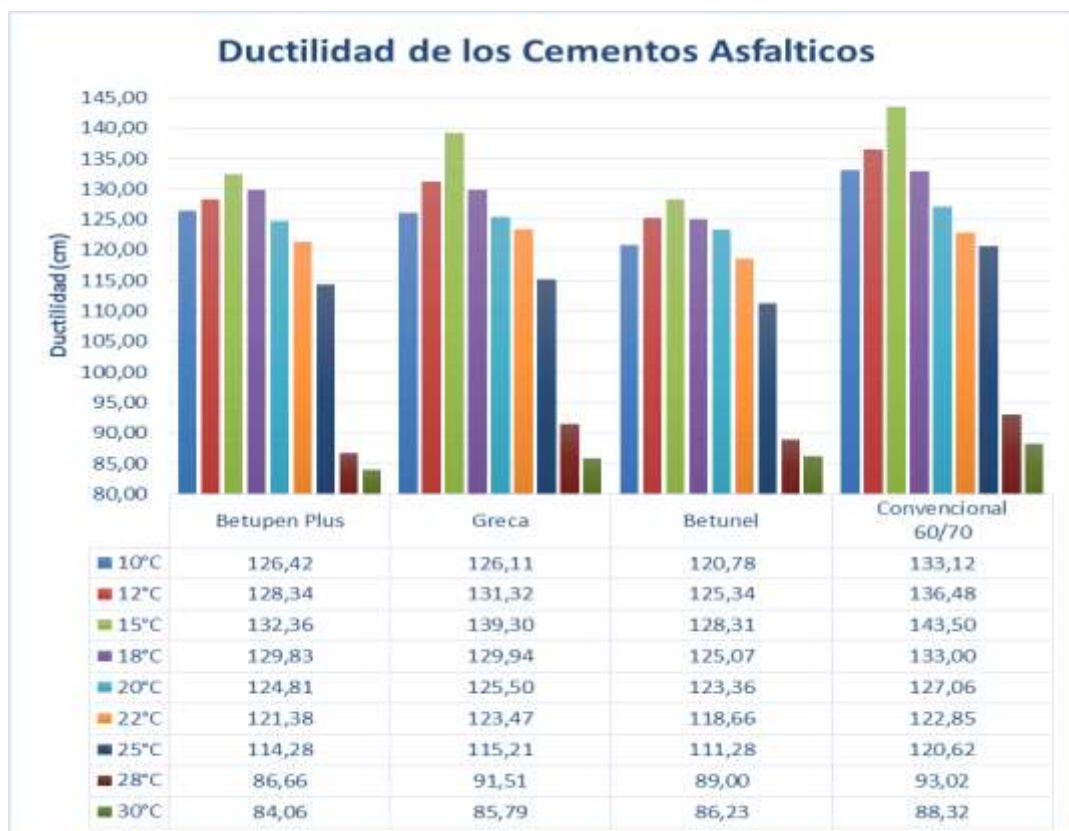
CEMENTO ASFÁLTICO	ECUACIONES
BETUPEN PLUS	$y = -0,2322x^2 + 7,04x + 78,432$
GRECA	$y = -0,2296x^2 + 6,9908x + 80,583$
BETUNEL	$y = -0,2108x^2 + 6,5224x + 77,098$
CONVENCIONAL 60/70	$y = -0,2018x^2 + 5,6642x + 98,087$

FUENTE: Elaboración propia

Con estas ecuaciones, obtenidas de las figuras 3.28, 3.31, 3.34 y 3.37, que reflejan el comportamiento de la ductilidad en función a la temperatura, se puede demostrar que la ductilidad va aumentando hasta obtener un valor pico a los 15°C, donde luego la ductilidad vuelve a disminuir al seguir disminuyendo la temperatura. También se pudo determinar que al subir la temperatura a 28°C y 30°C, los valores de la ductilidad no cumplen con la longitud mínima de 100 centímetros como exigen las especificaciones de la Administradora Boliviana de Carreteras.

En el punto 3.5 del presente trabajo de investigación, se pudo realizar las comparaciones de ductilidades en los diferentes cementos asfálticos convencionales, en el cual se estableció seis diagramas de barras de comparación entre todos los cementos asfálticos ensayados y la gráfica 4.1 de comparación que comprende a todos los cementos asfálticos convencionales, que es la figura 3.25 del punto 3.5.7, que se presenta a continuación:

FIGURA N° 4. 1. Comparación de la ductilidad de los cementos asfálticos convencionales en función a la temperatura



FUENTE: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 4.1, los cementos asfálticos tienen un comportamiento similar, donde la ductilidad máxima se expresa al variar la temperatura a los 15°C, teniendo valores mayores a 110 cm en todos los casos. A partir de los 15°C, al disminuir la temperatura la ductilidad vuelve a reducir sus valores en todos los cementos asfálticos.

La ductilidad a los 28°C y 30°C no cumple con el mínimo de 100 centímetros que exige la normativa ABC, ya que el cemento asfáltico a más de 25°C se torna poco manipulable y tiende a pandear mientras se estira.

El cemento asfáltico convencional 60/70 tiene los mayores valores en todas las temperaturas, pero sigue fallando al aumentar la temperatura a partir de los 25°C.

Se pudo analizar el comportamiento de la ductilidad en función a la variación de la temperatura en cementos asfálticos convencionales con respecto a la penetración y a la densidad, mediante las tablas 3.49, 3.50, 3.51 y 3.52 de los valores promedios de ductilidad, penetración y densidad de los cementos asfálticos convencionales en función a la variación de la temperatura, donde se puede apreciar que los valores de las propiedades se asemejan exceptuando los del cemento asfáltico convencional 60/70, ya que éste posee otra clasificación por penetración, y denotando un resumen en la siguiente tabla:

TABLA N° 4. 2. Resultados Finales de los valores medios de los Cementos Asfálticos Convencionales.

CEMENTO ASFALTICO BETUPEN PLUS 85/100									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	126,42	128,36	132,36	129,83	124,81	121,38	114,28	86,66	84,06
Penetración (cm)	2,60	3,16	3,62	5,62	7,39	7,73	8,64	15,90	20,13
Densidad (g/cm³)	1,0045	1,0037	1,0035	1,0018	1,0009	1,0008	0,9991	0,9988	0,9980
CEMENTO ASFALTICO GRECA CAP 85/100									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	126,11	131,32	139,30	129,94	125,50	123,47	115,21	91,51	85,79
Penetración (cm)	2,94	3,65	4,53	7,14	8,83	9,09	9,43	15,07	18,47
Densidad (g/cm³)	1,0071	1,0062	1,0051	1,0037	1,0018	1,0019	1,0014	1,0010	1,0004
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL CAP 85/100									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	120,78	125,34	128,31	125,07	123,36	118,66	111,28	89,00	86,23
Penetración (cm)	2,80	3,08	3,84	6,04	7,75	8,11	8,91	15,72	20,57
Densidad (g/cm³)	1,0055	1,0041	1,0033	1,0030	1,0020	1,0010	0,9999	0,9995	0,9989
CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL 60/70									
Temperatura (°C)	10	12	15	18	20	22	25	28	30
Ductilidad (cm)	133,12	136,48	143,50	133,00	127,06	122,85	120,62	93,02	88,32
Penetración (cm)	1,36	1,67	2,32	3,59	4,34	5,36	6,56	9,79	12,09
Densidad (g/cm³)	1,0114	1,0093	1,0084	1,0076	1,0051	1,0046	1,0026	1,0011	1,0003

FUENTE: Elaboración propia

Con esta tabla se dedujo que con la variación de la temperatura, los valores de las propiedades varían, ya sea aumentando o disminuyendo.

La penetración y la densidad de los cementos asfálticos tienen un comportamiento diferente con la aplicación de la variación de la temperatura como se muestra en la tabla 4.1 al aumentar la temperatura de los cementos asfálticos, los valores de la densidad aumentan, mientras que los valores de la penetración disminuyen.

Se establecieron las relaciones de la ductilidad vs penetración y la ductilidad vs densidad para cada cemento asfáltico, donde se generaron las respectivas líneas de tendencia con sus ecuaciones, con las cuales podremos pronosticar valores de la ductilidad, densidad o penetración en función a la temperatura y que se muestran a continuación, en la siguiente tabla:

TABLA N° 4. 3. Ecuaciones para la predicción de penetración y densidad de los cementos asfálticos convencionales

CEMENTO ASFÁLTICO	PREDICCIÓN	ECUACIONES
BETUPEN PLUS	Ductilidad - Penetración	$y = -0,0438x^2 - 1,9794x + 137,33$
	Ductilidad - Densidad	$y = -2E+06x^2 + 4E+06x - 2E+06$
GRECA	Ductilidad - Penetración	$y = -0,1543x^2 - 0,0346x + 134,61$
	Ductilidad - Densidad	$y = -3E+06x^2 + 6E+06x - 3E+06$
BETUNEL	Ductilidad - Penetración	$y = -0,0431x^2 - 1,5147x + 131,68$
	Ductilidad - Densidad	$y = -2E+06x^2 + 4E+06x - 2E+06$
CONVENCIONAL 60/70	Ductilidad - Penetración	$y = -0,1861x^2 - 2,5462x + 142,68$
	Ductilidad - Densidad	$y = -703030x^2 + 1E+06x - 715202$

FUENTE: Elaboración propia

Los valores de las ecuaciones reflejan un mejor comportamiento de los datos de los cementos asfálticos mencionados en función a la variación de temperatura.

Por último, para verificar los resultados obtenidos de las propiedades, se propuso la aplicación del software ORIGINLAB, el cual generó un plano tridimensional (Ductilidad vs Temperatura vs Penetración o Densidad) mediante las cartas de curvas de nivel, donde se apreció el comportamiento de las propiedades en función a la ductilidad y a la temperatura.

Al proponer las gráficas de contorno, se verificó que se puede obtener los valores de las propiedades ya mencionadas con una intercepción de puntos con los valores medios de los cementos asfálticos convencionales de la tabla 4.1.

La ductilidad no presenta mucha incidencia en la densidad como en la penetración, ya que la densidad tiene un rango de variación muy pequeño con respecto a la variación de la temperatura.

Los valores representados en las tablas descritas son similares a los generados por las intercepciones de líneas de puntos de las curvas de nivel, por ende, las cartas de curvas de nivel propuestas son de aplicación académica.

Se propuso rangos de trabajabilidad de la ductilidad en función de una temperatura de 25°C y de una penetración de 85/100 y de 60/70 para los cuatro cementos asfálticos convencionales, en las figuras de curvas de nivel generadas mediante el software OriginLab.

Con todo lo expuesto, se concluye que es preferible trabajar con las curvas de nivel ya que reflejan el comportamiento de las diferentes muestras de cementos asfálticos en las tres dimensiones.

4.2. RECOMENDACIONES

A continuación se señalan las siguientes recomendaciones para este trabajo de investigación:

Se puede realizar un mayor número de ensayos para dar confiabilidad a las pruebas de ductilidad, penetración y densidad, para que permitan reducir el coeficiente de variación, basados en un aumento en el valor de la media y poder generar una mejor representación gráfica con menor dispersión de puntos.

Se recomienda la utilización de agua destilada para la realización de los ensayos de ductilidad para tener un rango de valores obtenidos más corto, ya que el agua natural en los baños maría y principalmente en el ductilímetro puede modificar y descartar los ensayos por la creación de burbujas en la superficie de los cementos asfálticos.

La Universidad Autónoma Juan Misael Saracho debe continuar con el apoyo a trabajos que tengan dentro de su propuesta más investigaciones sobre los cementos asfálticos, ya que es un material muy importante en planificación y construcción de obras viales, y así obtener un conocimiento más amplio dentro de la pavimentación en carreteras.

Se recomienda la aplicación del software ORIGINLAB para el análisis de propiedades de los cementos asfálticos en función a la variación de la temperatura ya que mediante este programa se puede tener un análisis real del comportamiento de 3 variables y no así a 2 variables como estamos acostumbrados a trabajar, siendo la aplicación de este programa un análisis que refleja el comportamiento de manera más clara y consistente de cada variable a ser analizada.

Los ensayos de laboratorio deben ser realizados de manera minuciosa, con guantes y barbijo, ya que el cemento asfáltico es un material adhesivo fuerte, y se desea prevenir peligros a nuestra salud asociados con el contacto con la piel u ojos y/o inhalación de gases y vapores.

