

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**EVALUACION DE LA INCIDENCIA DE LA  
TEMPERATURA EN EL DESEMPEÑO DE LAS CARPETAS  
ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**ROBERTO ALEXANDER AGUIRRE RENDEROS**

**IRIS MARÍA ESTHER CALDERÓN CHÁVEZ**

**INGRID IRENE SALAZAR GIL**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2009

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR

:

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO

:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO

:

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR

:

MSc. ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO CIVIL**

**EVALUACION DE LA INCIDENCIA DE LA  
TEMPERATURA EN EL DESEMPEÑO DE LAS CARPETAS  
ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR**

Presentado por:

**ROBERTO ALEXANDER AGUIRRE RENDEROS**

**IRIS MARÍA ESTHER CALDERÓN CHÁVEZ**

**INGRID IRENE SALAZAR GIL**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. CARLOS MATA TRIGUEROS

San Salvador, Septiembre de 2009

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

**ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES**

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA**

**ING. CARLOS MATA TRIGUEROS**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todopoderoso que nos ha llevado por todo este caminar guiándonos con su Espíritu de sabiduría y fortaleza para poder cumplir cada una de las metas de nuestras vidas.

A la Universidad de El Salvador, que nos dio la oportunidad de tener una educación integral que nos formó como profesionales de bien para nuestra sociedad.

Al Laboratorio de Suelos y Materiales: “Miguel Ángel Guzmán Urbina” de la Universidad de El Salvador, que nos facilitó las instalaciones, equipo y ayuda de personal para el desarrollo de la parte experimental del ensayo del trabajo de graduación especialmente al Ing. José Miguel Landaverde y al Téc. Carlos Edgardo Morataya

A Asfaltos de Centroamérica ASFALCA, liderados por nuestro querido asesor el Ing. Carlos Mata Trigueros que nos brindó valiosos aportes a nuestra investigación, así como también los materiales utilizados en la parte experimental.

A nuestros asesores el Ing. Dilber Sánchez y el Ing. Mauricio Valencia por su apoyo, colaboración y disponibilidad para lograr llevar a cabo este trabajo de graduación.

A la Ing. Tania Torres de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad por su valiosa colaboración en el análisis estadístico para la interpretación de los resultados obtenidos del ensayo.

Además agradecemos también a los diferentes profesionales que con su inestimable colaboración enriquecieron este trabajo brindándonos su apoyo para la elaboración de este trabajo de graduación, especialmente a:

Sr. Carlos Humberto Urías

Ing. Roberto O. Salazar Martínez

Ing. Carlos Humberto Moreno

Ing. Sugey Terezón

Ing. Luís Ramírez

## **DEDICATORIA**

### **A MI DIOS PADRE:**

Por haberme guiado en cada momento y por permitirme alcanzar este logro académico

### **A MIS PADRES:**

Roberto Edmundo Aguirre Zetino y Ana Gloria Renderos de Aguirre por su amor incondicional, por su apoyo, sus consejos, su disciplina y todo sacrificio que realizaron para forjarme. Los amo y agradezco al Señor por sus vidas.

### **A MI HERMANA:**

Gloria Patricia Aguirre, por estar siempre conmigo en todo momento, y por que la gracia del Señor siempre ha estado en su vidas mostrándome su amor y apoyo en todo.

### **A MIS COMPAÑERAS DE TESIS:**

Ingrid e Iris, gracias por su amistad sincera y por escogerme en este trabajo, que si bien encontramos muchas dificultades en el camino, con empeño y esmero logramos finalizarla.

### **A MIS AMIGOS:**

A todos mis amigos, por haberme dado animo y apoyo para concluir esta etapa en mi vida.

**ROBERTO AGUIRRE**

## **DEDICATORIA**

### **A MI DIOS:**

Que con su amor infinito y su eterno perdón me ha guiado y me ha levantado en cada una de las pruebas de mi vida y que por su paciencia y misericordia me han permitido alcanzar esta anhelada meta.

### **A LA SANTISIMA VIRGEN MARIA:**

Que por su divina intercesión con su hijo amado Jesús me permitió alcanzar este importante triunfo y por haberme tomado de su mano en cada dificultad de mi vida.

### **A MIS PADRES:**

Armando Calderón y Ana Esther Chávez, por su amor incondicional, por sus consejos y por dar su vida completa por el bienestar de mi familia y por ser ejemplo de unidad, amor, sacrificio y humildad, gracias por su entrega desinteresada, le doy gracias a Dios porque me regaló a tan maravillosos padres.

### **A MIS HERMANAS:**

Amanda y Diana, por ser un gran apoyo a lo largo de toda mi vida y por ser ejemplo de amabilidad, paciencia y amor para mi vida, gracias por todas las etapas que hemos compartido, este triunfo también es de ustedes.

**A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:**

Ingrid y Roberto, gracias por todo su compañerismo y cariño a lo largo de nuestra carrera universitaria, y por ser ejemplo para mí en este trabajo de graduación de tolerancia, respeto, alegría y dedicación. Gracias por su amistad sincera.

**A MIS AMIGOS Y DEMAS FAMILIARES:**

Por haberme permitido formar parte de sus vidas, por toda la paciencia, amor, confianza y amistad que me han brindado siempre y más ahora en la realización de este trabajo.

**A MIS ASESORES DE TESIS:**

Por su colaboración e interés en que pudiéramos terminar satisfactoriamente este trabajo, por sus valiosos aportes, ayuda y confianza brindada en cada una de las etapas de este trabajo.

**IRIS MARIA CALDERON**

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS:**

Por brindarme la fuerza y fortaleza en todo momento para permitir que alcance mis objetivos y metas propuestas.

### **A MIS PADRES:**

Roberto Oswaldo Salazar Martínez y Sonia Aurora Gil Majano, que han sido para mí un ejemplo a seguir, gracias por su apoyo y amor a lo largo de toda mi vida, gracias a eso he podido realizarme en mi carrera y alcanzar esta meta.

### **A MI HERMANO:**

José Orlando Caballero Gil por ser mi amigo más cercano y un apoyo en todo momento.

### **A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:**

Iris y Roberto, les agradezco su amistad y confianza conmigo y por la dedicación y empeño que le brindaron a este trabajo de graduación.

### **A MIS ASESORES DE TESIS:**

Por el valioso tiempo y colaboración prestado en cada una de las partes de este trabajo, gracias por su interés y ayuda.

**INGRID SALAZAR**

## INDICE

	Pág.
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>i</b>
<b>CAPITULO I: GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.3.1. GENERAL .....	3
1.3.2. ESPECIFICOS .....	4
1.4. ALCANCES .....	6
1.5. LIMITACIONES.....	6
1.6. JUSTIFICACION.....	7
<b>CAPITULO II: MEZCLAS ASFALTICAS .....</b>	<b>8</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	8
2.2 ASFALTO .....	9
2.2.1 HISTORIA DEL ASFALTO .....	9
2.2.2 ORIGEN DEL ASFALTO.....	12
2.2.3 PRINCIPALES FUENTES DEL ASFALTO .....	13
2.2.3.1 Asfaltos naturales .....	13
2.2.3.2 Asfaltos destilados del petróleo.....	15
2.2.4 ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS .....	18
2.2.4.1 Polímeros utilizados con asfaltos .....	20
2.2.4.2 Compatibilidad de los Polímeros .....	25
2.2.5 PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO .....	26
2.2.5.1 Adhesión y Cohesión.....	26
2.2.5.2 Susceptibilidad Térmica .....	27
2.2.5.3 Durabilidad .....	30

2.2.6	PROPIEDADES QUIMICAS DEL ASFALTO .....	30
2.2.6.1	Composición química teórica del asfalto .....	32
2.2.7	DAÑO EN EL ASFALTO .....	37
	Oxidación del Asfalto .....	37
2.2.8	OTRAS PROPIEDADES DETERMINADAS A TRAVES DE ENSAYOS PRACTICADOS AL ASFALTO .....	37
2.2.8.1	Envejecimiento en película delgada (ASTM D 1754-97) .....	37
2.2.8.2	Ductilidad (ASTM D113-07) .....	39
2.2.8.3	Viscosidad (ASTM D2170-95) .....	40
2.2.8.4	Penetración (ASTM D5-06) .....	40
2.2.8.5	Solubilidad (ASTM D 131) .....	41
2.2.8.6	Punto de Inflamación (ASTM D92-05).....	42
2.2.8.7	Peso Específico (ASTM D 70-86).....	42
2.3	IMPORTANCIA DEL AGREGADO EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA.....	43
2.3.1	CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	46
2.3.1.1	Agregados naturales .....	46
2.3.1.2	Agregados procesados .....	47
2.3.1.3	Agregados Sintéticos .....	48
2.3.2	PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE .....	49
2.3.2.1	Graduación .....	51
2.3.2.2	Tamaño Máximo de la partícula.....	51
2.3.2.3	Tamaño Máximo del Agregado.....	51
2.3.2.4	Tamaño Máximo Nominal del Agregado.....	52
2.3.2.5	Textura Superficial .....	52
2.3.2.6	Limpieza .....	53
2.3.2.7	Capacidad de Absorción.....	54
2.3.2.8	Dureza.....	54

2.3.2.9	Afinidad por el Asfalto .....	54
2.3.2.10	Forma de la partícula .....	55
2.4	DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA .....	56
2.4.1	EMPLEO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIAS.....	56
2.4.2	FUNCIONALIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LOS PAVIMENTOS.....	57
2.4.3	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CAPAS DE RODADURA.....	60
2.4.4	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CAPAS INFERIORES. ....	61
2.4.5	CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. ....	61
2.5	PRINCIPALES DETERIOROS DE LAS CARPETAS ASFÁLTICAS EN EL SALVADOR .....	65
2.5.1	AHUELLAMIENTO .....	67
2.5.1.1	Definición y Descripción del Ahuellamiento .....	67
2.5.1.2	Propiedades del Agregado Relacionadas al Ahuellamiento.....	69
2.5.1.3	Parámetros de Dosificación.....	70
2.5.2	FISURAMIENTO.....	72

**CAPITULO III: EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA MEDIANTE EL METODO UCL .....** **75**

3.1.	DEFINICION DEL METODO UCL .....	75
3.2.	DESCRIPCION GENERAL DEL METODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACION DE LIGANTES (UCL).....	76
3.3.	APLICACIÓN DEL METODO UCL .....	77
3.4.	PROPIEDADES EVALUADAS POR EL METODO UCL.....	80
3.4.1.	COHESIÓN .....	80
3.4.2.	SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA.....	81
3.4.3.	ADHESIVIDAD .....	81
3.4.4.	DURABILIDAD.....	82
3.5.	PROCEDIMIENTO DEL METODO UCL.....	83
3.6.	REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS .....	91

3.6.1.	ENSAYO DE COHESION.....	91
3.6.2.	ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD TERMICA .....	96
3.6.3.	ENSAYO DE ADHESIVIDAD.....	129
3.6.4.	ENSAYO DE DURABILIDAD .....	153

**CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**;  
Error! Marcador no definido.

4.1.	CONCLUSIONES.....	169
4.2.	RECOMENDACIONES .....	173

**BIBLIOGRAFIA..... 174**

**ANEXOS..... 177**

## INTRODUCCION

La buena calidad de una carretera, en condiciones de servicio, es el resultado de un adecuado diseño estructural de la obra, seguido por la buena calidad en los procesos constructivos y en la correcta selección y empleo de los materiales que conformarán la obra; por lo que se pensaría que una carretera que siga y cumpla con estos tres parámetros debería de brindar un adecuado servicio en el período para el cual se diseñó y construyó, más sin embargo existen carreteras que a pesar de cumplir con estos parámetros, tienden a presentar deterioros que van acortando su vida útil; este fenómeno puede tener su raíz en el hecho que actualmente la caracterización del cemento asfáltico se ha realizado a partir de sus propiedades mecánicas, reológicas y químicas, y no tanto de sus propiedades ligantes dentro de la mezcla asfáltica de servicio, los resultados de los análisis de estos ensayos han sido el instrumento de selección de los asfaltos en función de los requerimientos de la mezcla.

En esta investigación se estudia las propiedades de cuatro de los cementos asfálticos más empleados en El Salvador y la susceptibilidad térmica, adhesividad, cohesión y envejecimiento de estos asfaltos como parte de las propiedades principales del asfalto dentro de una mezcla asfáltica, teniendo en cuenta las condiciones a que puede estar sometida. Por lo tanto, se evaluará si el cemento asfáltico posee buenas propiedades dentro de la mezcla, y no como un elemento independiente de esta.

Los cuatro cementos asfálticos que se estudiarán son, el AC-20 y AC-30 producido por RASSA y los asfaltos modificados Tipo I-D y Tipo III-D, el estudio se basa en “El Método

Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL), desarrollado en enfocar la caracterización de los cementos asfálticos desde el punto de vista de su utilización en las carreteras; solamente se han tenido en cuenta aquellas propiedades que se encuentran relacionadas directamente con el comportamiento de la mezcla en la vía, es decir se valora el comportamiento de los cementos asfálticos como parte integral de la mezcla, mediante la evaluación de sus propiedades fundamentales a través del ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste.

Esta investigación nos permitirá predecir cómo se comportará el asfalto en cuestión, bajo específicas condiciones de servicio y por ende poder seleccionar el tipo de cemento asfáltico que mejor responderá a las condiciones a las cuales estará sometido el asfalto como parte de la capa de rodadura de una carretera en particular.

El siguiente trabajo se desarrollará en cuatro capítulos, el capítulo uno contiene las generalidades que nos introducirán al tema, los antecedentes, el planteamiento del problema, los objetivos a cumplirse en nuestro trabajo, los alcances y limitaciones y la justificación por la cual escogimos este tema de investigación. El capítulo dos nos da un amplio entendimiento de cada uno de los conceptos teóricos que nos servirán para comprender nuestra investigación, como son el asfalto, los agregados y las mezclas asfálticas. El capítulo tres es el desarrollo y la presentación de las tablas y gráficos obtenidos en la parte experimental de nuestro estudio. Finalmente el capítulo cuatro nos lleva a las conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados que nuestro estudio experimental nos permitió obtener.

# **CAPITULO I: GENERALIDADES**

## **1.1. ANTECEDENTES**

En los últimos 30 años, los avances tecnológicos han puesto a disposición de la construcción de pavimentos flexibles, una gama de cementos asfálticos, que resultan de cambios en los procesos de destilación del petróleo crudo y de procesos de modificación de cementos asfálticos convencionales con diferentes productos modificadores. Sin embargo, a pesar de los muchos estudios realizados en el área de mezclas asfálticas, todavía se cae en el error de no tomar en cuenta las temperaturas que se experimentan en las carpetas asfálticas de las diferentes vías que dependen las condiciones ambientales de cada lugar, a la hora de seleccionar el asfalto que mejor respuesta mecánica tendrá en la mezcla componente de esa carpeta asfáltica; siendo la temperatura de servicio de la carpeta asfáltica un factor sumamente importante en el grado de desempeño de la misma.

Hasta la fecha, se han realizado muy pocos estudios sobre la influencia de la temperatura de trabajo de las carpetas asfálticas en el desempeño de las mismas, de estos se pueden mencionar, la investigación con el tema: ANALISIS COMPARATIVO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS CEMENTOS ASFALTICOS AC 60/70, PMB Tipo III-E y PMB Tipo I-D EN EL CONCRETO ASFALTICO BAJO LAS CONDICIONES DEL BYPASS DE USULUTAN realizado por ASFALTOS DE CENTROAMERICA SA DE CV en febrero de 2002, donde se analizan y comparan los tres asfaltos mencionados en el

título para evaluar cual brindará mejor desempeño para las condiciones de temperatura del bypass de Usulután.

En la Universidad Politécnica de Cataluña se ha desarrollado un método para la evaluación de asfaltos en función del desempeño de la mezcla asfáltica, este es el Método UCL (Método Universal de Caracterización de Ligantes), en el cual nos basaremos para hacer el estudio del presente trabajo de graduación. El método UCL usa el ensayo CANTABRO de pérdida por desgaste, permite evaluar los cementos asfálticos a partir de las cualidades cohesivas que el ligante proporciona a la mezcla, evaluando la susceptibilidad térmica, la adherencia agregado-cemento asfáltico ante la acción de agua, la resistencia al envejecimiento y las características del filler. De esta manera, el método pretende evaluar las propiedades de distintos cementos asfálticos, facilitando una selección en función de su comportamiento y de las características mecánicas que aporta a una mezcla patrón.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En El Salvador, no se brinda el interés necesario a la incidencia que tiene la temperatura sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas. Y si a esto agregamos que la elección del asfalto para el diseño de una mezcla se basa en procedimientos de clasificación de asfaltos a partir de ensayos físicos determinados en laboratorio y otros procesos experimentales que solo pueden garantizar que la carpeta asfáltica soporte la carga de diseño, nos vemos en el problema de no poder garantizar un buen desempeño de la carpeta asfáltica ante condiciones de altas temperaturas, elevadas cargas vehiculares y bajas

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

Por lo que es de gran importancia, el desarrollo de un estudio que ayude a comprender y facilitar la tarea de seleccionar un asfalto como componente ligante en un pavimento, no desde el punto de vista de sus características de clasificación, si no, en función del buen desempeño que este le otorgue a la mezcla para resistir eficientemente las solicitudes reales de servicio incluyendo la temperatura de trabajo.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. GENERAL**

Realizar una caracterización de asfaltos desde el punto de vista del desempeño que tenga, como constituyente en una mezcla asfáltica, ante las condiciones reales de servicio, evaluándolos a partir de las cualidades cohesivas que el ligante proporciona, la susceptibilidad térmica, la adherencia del agregado con el cemento asfáltico ante la acción del agua, la resistencia al envejecimiento y el ahuellamiento.

### 1.3.2. ESPECIFICOS

- Evaluar las cualidades cohesivas que un cemento asfáltico proporciona a la mezcla elaborando probetas de cada una de las mezclas asfálticas a estudiar para luego ser ensayadas en la máquina de los ángeles (ensayo de desgaste), sin carga abrasiva, evaluando la cohesión como una relación de la pérdida por desgaste sufrida en las probetas.
- Estimar el impacto de la susceptibilidad térmica del asfalto sobre la resistencia de la mezcla, elaborando probetas de cada una de las mezclas asfálticas a estudiar, sometiéndolas luego a diferentes temperaturas en un mismo período de tiempo, para ser ensayadas en la máquina de los ángeles y cuantificar la incidencia de los diferentes grados de temperatura sobre los porcentajes de desgaste sufridas por la probetas.
- Sumergir en agua, probetas elaboradas de cada una de las mezclas asfálticas a estudiar, a diferentes temperaturas y períodos de tiempo, para luego ensayarlas en la máquina de los ángeles, y evaluar así la adherencia del asfalto con los agregados en la mezcla como una medida de la resistencia al desprendimiento bajo la acción del agua en las probetas tras cuantificar las pérdidas por desgaste resultante del ensayo.

- Elaborar probetas de cada una de las mezclas asfálticas a estudiar y someterlas, durante diferentes períodos de tiempo, a temperaturas promedio que representan en el mezclado del asfalto y el servicio en el pavimento y así medir la influencia, en la resistencia al envejecimiento de la mezcla, de los diferentes lapsos de tiempo sometidos, a través de los porcentajes de pérdidas arrojados después de someter estas probetas a la máquina de los ángeles.
- Elaborar curvas de estado de los diferentes ensayos realizados a las probetas de las mezclas asfálticas a estudiar, y así cuantificar las tendencias de respuesta, de desempeño del asfalto en la mezcla, de cada una de los asfaltos evaluados.
- Obtener en base a los resultados arrojados de los ensayos aplicados a las mezclas evaluadas, los rangos de temperatura de servicio en los cuales es viable emplear dicha mezcla como constituyente de un pavimento.
- Conocer en base a los rangos de temperatura del lugar de colocación de la mezcla, que tipo de asfalto brindará una mejor cohesión, adhesión y durabilidad al pavimento, alargando así el período de intervención a los trabajos de mantenimiento en la vía.

#### **1.4. ALCANCES**

Evaluar y comparar las características funcionales de los cementos asfálticos AC-20, AC-30, Asfalto Modificado Tipo I-D y Asfalto Modificado Tipo III-D según la guía de Especificaciones de Asfalto Modificado con Polímeros de AASHTO, mediante los diferentes ensayos Cántabro de pérdida por desgaste para seleccionar que tipo de cemento asfáltico ofrece una mejor respuesta ante las sollicitaciones de temperatura específicas de un proyecto.

#### **1.5. LIMITACIONES**

Los Asfaltos a evaluar únicamente serán: los Asfaltos Convencionales AC-20 y AC-30 y los Asfaltos Modificados Tipo I-D y III-D según la guía de Especificaciones de Asfalto Modificado con Polímeros de AASHTO; debido a que, en lo que respecta a los convencionales son la de mayor empleo en el la construcción de pavimentos asfálticos en el país, y en cuanto a los modificados por que son los que se adaptan a las condiciones climáticas propias de El Salvador.

Para la elaboración de las probetas se escogerá un solo diseño de granulometría en base al método Marshall, teniendo como única variable en las probetas de concreto asfáltico, el cemento asfáltico que es el componente a evaluar.

## **1.6. JUSTIFICACION**

Esta investigación se realiza debido a que en la construcción de pavimentos se encuentra que en la mayoría de los casos aunque se tenga un buen diseño de estructura de pavimento, un buen diseño de mezcla asfáltica y una adecuada ejecución del proceso constructivo, se sigue teniendo un deterioro prematuro de la carpeta asfáltica debido a la poca importancia que se le da al efecto que el ligante le proporciona a la mezcla asfáltica, disminuyendo el buen desempeño de esta. Esto ocasiona que en repetidas ocasiones sea necesaria la intervención para reparar, o reconstruir partes de la carpeta asfáltica debido a los daños que se van presentando antes del tiempo previsto. Lo que conlleva a efectos negativos para los usuarios dado que genera embotellamientos vehiculares innecesarios sin mencionar el costo que representa para la ejecución de estas labores de reparación.

A continuación se presenta una aplicación del método UCL (Método Universal de Caracterización de Ligantes) para la evaluación de mezclas asfálticas en caliente, por ser un método de caracterización de cementos asfálticos desde el punto de vista de su utilización en carreteras, valorizando la trabazón, cohesión, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla asfáltica y susceptibilidad térmica. Este método no tiene norma equivalente en ASTM ni en AASHTO.

## **2. CAPITULO II: MEZCLAS ASFALTICAS**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

La estructura de un pavimento flexible está compuesta por Sub-rasante, Sub-base, Base y Capa de rodadura; para nuestro caso, la sección de interés es la capa de rodadura, ésta está conformada por una mezcla asfáltica, que es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como mezcla terminada para un determinado uso. La mezcla asfáltica debe ser durable, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, etc. Debe ser resistente a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad. Una mezcla debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno. Cada una de estas y otras propiedades son deseables en las mezclas asfálticas.

Estas mezclas asfálticas pueden ser confeccionadas en plantas y con los equipos apropiados para esta labor. Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento.

Pero Antes de continuar hablando sobre la mezcla asfáltica, es esencial conocer sobre los componentes que la conforman, los agregados pétreos y el asfalto, aunque puede contener otros elementos como lo describiremos más adelante.

## **2.2 ASFALTO**

El asfalto es un material viscoso, pegajoso de color negro, usado como aglomerante cementante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas. También es utilizado como impermeabilizante. Su consistencia es entre sólido y semisólido a temperaturas ambientales. El uso moderno del asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a finales del siglo XIX, y creció rápidamente con el surgimiento de la industria automotriz.

Desde entonces la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos y hoy en día los equipos y los procedimientos usados para construir estructuras de pavimentos asfálticos son mucho más desarrollados y eficientes. Este capítulo trata sobre el asfalto, desde sus antecedentes históricos hasta su composición, propiedades y características.

### **2.2.1 HISTORIA DEL ASFALTO**

Existen grandes depósitos de crudo de petróleo en la Tierra y por miles de años estos han correspondido a láminas superficiales de asfalto natural que ha sido utilizado como un impermeabilizante y/o agente ligante. Así fue como se comenzaron a utilizar productos

naturales que se obtenían de la superficie del suelo, dando paso a la llegada del carbón, alquitrán y luego el asfalto manufacturado a partir del crudo de petróleo. A principios del siglo XIX el uso del asfalto estaba limitado por su escasa disponibilidad, no obstante a mediados del mismo, la roca asfáltica participaba en la pavimentación de calles en Europa y después de 1870, en EEUU. El aporte intensivo del asfalto en obras viales ocurrió a principios del siglo XX debido a dos acontecimientos casi simultáneos: la aparición del automotor con rodado neumático, que sustituyó a la llanta maciza de caucho ideada en 1869, y la explotación masiva del petróleo cuya industrialización lo convirtió en productor principal de asfaltos.

En el primer paso, el automóvil tuvo todo a su favor con el público que reclamó buenos caminos para mayor seguridad y confort. El transporte carretero comercial creó la dependencia "camión-camino" exigiendo amplias carreteras para más y mejores vehículos. En el segundo caso, el petróleo produjo importantes volúmenes de asfaltos aptos para un directo uso vial (cementos asfálticos) y asfaltos diluidos (cut-back). Las emulsiones bituminosas de tipo aniónico aparecieron por entonces (1905) como paliativo del polvo, mientras que las catiónicas lo hicieron entre 1951 y 1957 en Europa y EEUU respectivamente. En América Latina las aniónicas comenzaron a producirse a mediados de la década del '30 y las catiónicas a fines del '60. Tanta actividad volcada al campo vial hizo que se hablara de la "era del automóvil y la construcción de carreteras". Los primeros trabajos asfálticos en calles y caminos fueron hechos con procesos sencillos para distribuir tanto el ligante como los agregados (a mano), apareciendo luego lanzas con pico regador y bomba manual.

El ritmo de las obras viales y la necesidad de mejorar los trabajos y reducir costos hizo progresar la operación vial.

Los métodos manuales se mecanizaron apareciendo: regadores de asfalto a presión, distribuidores de piedra, aplanadoras vibrantes, rodillos con neumáticos de presión controlada, etc. La producción de las mezclas asfálticas en el sitio cambiaron de niveladoras y rastras por motoniveladoras y plantas móviles o fijas. Las primeras mezclas asfálticas en caliente irrumpieron en el mercado alrededor de 1870 con plantas intermitentes (pastones) de simple concepción. Hacia 1900 se había mejorado su diseño incluyendo tolvas de agregado, elevadores de materiales fríos y calientes, secadores rotativos, tanques para acopiar asfalto, mezcladoras que permitían cargar vagones a camiones. Entre 1930 y 1940 se incorporan cintas transportadoras, colectores de polvo y otros aditamentos. En las décadas del 50 y 60 se desarrollan plantas de mayor capacidad. Hacia 1970 se introducen sistemas computarizados para dosificación y controles de elaboración, polvo y ruido. Todo este proceso mantuvo la operatoria fundamental: secado-cribado-proporcionado-mezclado.

En 1910 existían en EEUU pequeñas plantas de producción de mezclas asfálticas en caliente, de mezclado en tambor que en 1930 fueron reemplazadas por las de mezclador continuo, de mayor producción. En 1960 el procedimiento de secado y mezclado en tambor fue rescatado y actualmente estas plantas (tambor mezclador) producen mezclas de gran calidad y compiten además en el reciclado de pavimentos. Los silos para acopio de mezcla asfáltica en caliente forman parte de las plantas de tambor mezclador, también suelen encontrarse estos silos en instalaciones discontinuas para independizar las operaciones de

carga de los camiones, o silos de gran capacidad, dotados de revestimiento aislante, permiten al acopio de mezcla caliente durante varios días conservando su trabajabilidad.

La terminadora o pavimentadora asfáltica, fue introducida por Barber Greene en 1937, después de siete años de experimentación, luego producidas por otras compañías con algunas variantes, pero manteniendo el esquema operativo original. En el campo de nuevos materiales ingresaron los aditivos: polímeros, fibras, agregados livianos, betunes sintéticos incoloros y mejoradores de adherencia. Los trabajos asfálticos se diversificaron: lechadas bituminosas, microaglomerados, carpetas de reducido espesor, mezclas drenantes, mezclas o lechadas en color para pisos o como seguridad vial.

### **2.2.2 ORIGEN DEL ASFALTO**

El asfalto es un material bituminoso, constituido principalmente por asfaltenos, resinas, aromáticos y saturados, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad. Es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida al calentarse.

### **2.2.3 PRINCIPALES FUENTES DEL ASFALTO**

Dos son las principales fuentes

- Asfaltos naturales: depósitos geológicos de lago, asfaltos en roca y arena.
- Asfaltos destilados del petróleo: derivados de la destilación de crudos.

#### **2.2.3.1 Asfaltos naturales**

Los asfaltos naturales, se han producido a partir del petróleo, pero por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles, dejando las asfálticas solamente.

El petróleo, al subir a la superficie terrestre a través de las grietas, queda bajo la acción de agentes atmosféricos como el viento y el sol, debido a esto, se produce una separación de los gases y los aceites más ligeros, luego de esta “refinación natural” queda un residuo de mayor viscosidad, dando origen a yacimientos naturales en los cuales se puede encontrar asfalto en forma pura o contaminado con materias extrañas, tales como sustancias minerales, agua y otros.

Estos yacimientos pueden encontrarse como escurrimientos superficiales en depresiones terrestres, dando origen a los lagos de asfalto, como los de las islas Trinidad y Bermudas. En la Isla Trinidad cerca de la costa de Venezuela, existe un lago de asfalto, que es uno de los más grandes yacimientos de la tierra, en el que se encuentran asfalto en forma natural y nativa. Ver Figura 2-1.



Figura 2-1. Lago de Trinidad en Sucre, Venezuela.

También aparece impregnando los poros de algunas rocas, denominándose rocas asfálticas. Así también se encuentran mezclados con elementos minerales, como pueden ser arenas y arcillas en cantidades variables, debiendo someterse a posteriores procesos de purificación, para luego poder ser utilizadas en pavimentación. En la actualidad, no es muy utilizado este tipo de asfalto por cuanto adolece de uniformidad y pureza. En la Tabla 2-1 se puede apreciar unos ejemplos de locaciones de fuentes de asfalto.

<b>ORIGEN NATURAL</b>	<b>UBICACIÓN</b>
ASFALTOS DE LAGO	LAGO DE BREA ISLA DE TRINIDAD
	LAGO ASFALTITES O MAR MUERTO PALESTINA
	LAGO BERMUDEZ VENEZUELA
ROCAS ASFALTICAS	GILSONITA UTAH, USA
ARENAS ASFALTICAS	SYNCRUDE FORT McMURRAY ALBERTA, CANADA
	POZOS DE LA BREA, LOS ANGELES CALIFORNIA, USA

TABLA 2-1 Fuentes Asfálticas Naturales

A pesar de la fácil explotación y excelente calidad del asfalto natural, no suele explotarse desde hace mucho tiempo ya que, al obtenerse en las refinerías petroleras como subproducto sólido en el craqueo o fragmentación que se produce en las torres de destilación, resulta mucho más económica su obtención de este modo.

### **2.2.3.2 Asfaltos destilados del petróleo**

Los asfaltos más utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados del petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90% de la producción total de asfaltos.

El asfalto de petróleo moderno, tiene las mismas características de durabilidad que el asfalto natural, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños.

El petróleo crudo extraído de los pozos, es sometido a un proceso de destilación en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y keroseno de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas. En el proceso conocido con el nombre de destilación fraccionada, son separados unos de otros estos hidrocarburos y se utilizan para una diversidad de propósitos. La destilación fraccionada se basa en el hecho de que cada uno de los componentes posee una temperatura de ebullición determinada, la cual al ser alcanzada se transforma en vapor, separándose de los demás; a continuación la sustancia vaporizada se convierte en líquida por enfriamiento. Pues bien, por destilación fraccionada se obtienen entre otros los siguientes productos: gases, éter de petróleo,

gasolina, kerosene, gas-oil, aceite combustible, aceites lubricantes, vaselina y parafina.

Como residuo de la destilación queda el asfalto. Ver Figura 2-2 y 2-3.

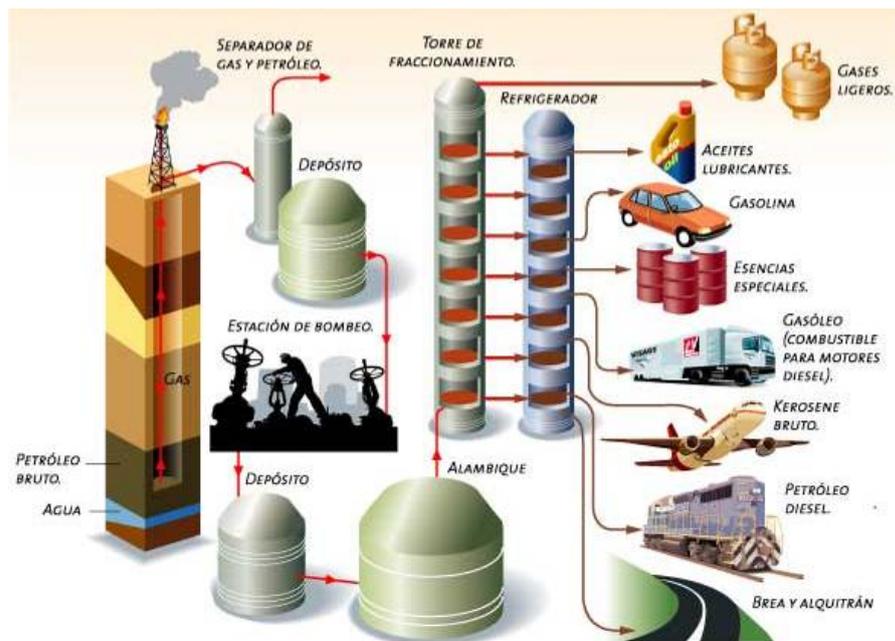


Figura 2-2. Proceso de destilación del petróleo

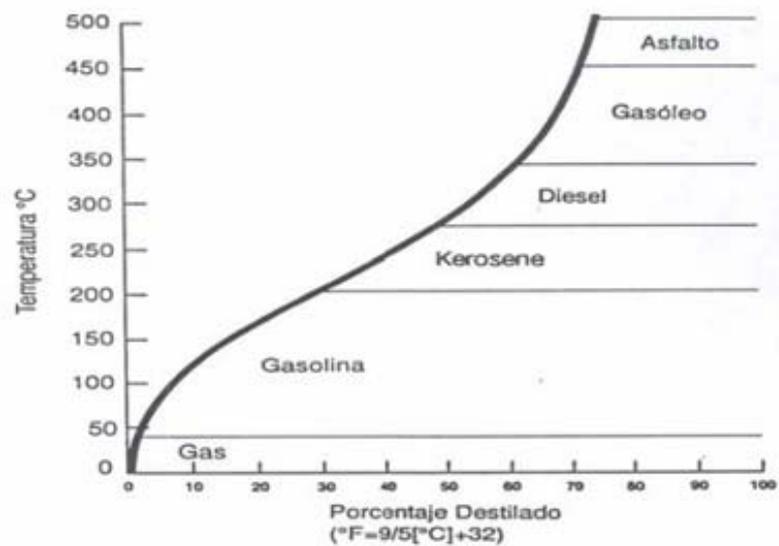


Figura 2-3. Destilación de Crudo de Petróleo (Típica)

El contenido de asfalto del petróleo varía según su procedencia, según el origen del petróleo, por lo que los petróleos se clasifican en base a este contenido. La composición de la base puede ser:

- Petróleos Crudos de Base Asfáltica o Nafténica; los cuales tienen excelentes características como ligante y buena resistencia a la meteorización siendo en definitiva los que presentan mejores condiciones.
- Petróleos Crudos de Base Parafínica: Estos crudos contienen gran cantidad de parafinas, no contienen asfalto en cantidades apreciables y la cantidad que contienen no suele permitir su aprovechamiento directamente.
- Petróleos Crudos de Base Mixta: Estos crudos contienen una proporción sustancial de materia parafínica y asfáltica, junto con cierta proporción de hidrocarburos aromáticos.

El asfalto procedente de ciertos crudos ricos en parafina no es apto para fines viales, por cuanto precipita a temperaturas bajas, formando una segunda fase discontinua, lo que da como resultado propiedades indeseables, tal como la pérdida de ductilidad. Con los crudos asfálticos esto no sucede, dada su composición.

En general, la presencia de parafina influye negativamente en las propiedades reológicas del asfalto, pues su estructura cristalina sólida, a bajas temperaturas, ocasiona un endurecimiento mayor en el asfalto; a temperaturas más elevadas la parafina se licúa, lo que

ocasiona una variación sensible en la viscosidad del asfalto. La parafina disminuye la adhesividad de los asfaltos con 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.

#### **2.2.4 ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS**

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas. En la Figura 2-4 se puede apreciar la colocación en obra de una mezcla asfáltica modificada.



Figura 2-4. Proceso de colocación de asfalto modificado, mezcla asfáltica en caliente.  
Calles de El Puerto de Acajutla.

Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el ligante sobre todo el conjunto. Generalmente, las propiedades de las mezclas con granulometría continua dependen del enclavamiento o trabazón de los agregados, mientras que las preparadas con altos contenidos de mortero asfáltico dependen más de la rigidez de la proporción de ligante, polvo mineral y arena.

A altas temperaturas de servicio, puede que el ligante llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento). El riesgo de aparición de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados. De manera generalizada y sin tener en cuenta otros factores que pueden influir, se puede disminuir la probabilidad de aparición de estas deformaciones aumentando la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.

Por otro lado a temperaturas de servicios bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico. Disminuyendo la dureza del asfalto, se minimizará el riesgo de fallo por fragilidad.

Entonces, debido a lo dicho precedentemente a la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de la mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezclas se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde se mejora el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

#### **2.2.4.1 Polímeros utilizados con asfaltos**

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos o miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas

simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termofijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas, etc. En la Tabla 2-2 se pueden observar algunos polímeros utilizados para modificar asfaltos.

TIPO DE MODIFICADOR	EJEMPLO
ELASTÓMEROS	NATURAL
	SBS
	SBR
	EPDM
	PBD
PLASTÓMEROS	EVA
	EMA
	PE
	PP
	POLIESTIRENO

Tabla 2-2 Polímeros utilizados con asfaltos

a) Elastómeros: al estirarlos estos vuelven a su posición original, es decir, son elásticos. Dentro de estos tenemos:

- Natural: caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales
- SBS: (estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos, ya que este es el

que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica debido a su durabilidad y elasticidad.

- SBR: Cauchos sintéticos del 25% de Estireno y 75% de butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico.
- EPDM: (polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.
- PBD: (polibutadieno) elastómero sintético o caucho, adecuado para las aplicaciones que requieren exposición a bajas temperaturas.

b) Plastómeros: al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad. Dentro de estos tenemos:

- EVA: (etileno-acetato de vinilo), confiere una gran resistencia al calor y al aceite.
- EMA: Etileno-acrilato de metilo
- PE: (polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
- PP: (Polipropileno) parecido al caucho, buen elastómero, brinda resistencia.

- PS: (Poliestireno) posee elasticidad, buena resistencia mecánica, térmica y baja densidad.

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y la otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella.

Esta micromorfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas, ver Gráfico 2-1.

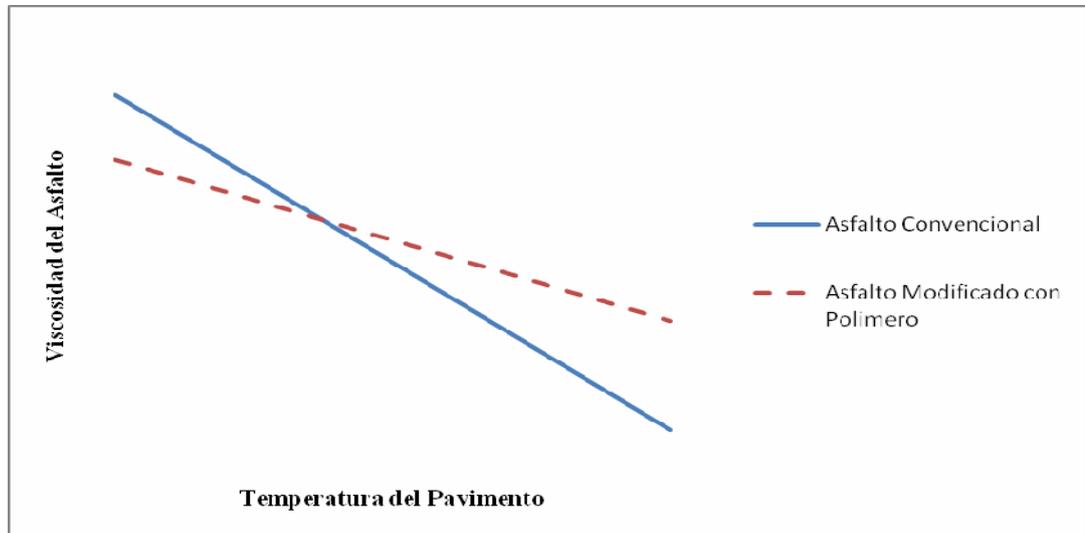


Gráfico 2-1 Efecto del Asfalto modificado con polímeros sobre la rigidez y la temperatura

Otras propiedades que el asfalto modificado mejora respecto del asfalto convencional son:

- Mayor intervalo de plasticidad
- Mayor cohesión
- Mejora de la respuesta elástica
- Mayor resistencia a la acción del agua
- Mayor resistencia al envejecimiento

#### **2.2.4.2 Compatibilidad de los Polímeros**

Para que los asfaltos con polímeros consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base dado que es necesario que los polímeros sean compatibles con el material asfáltico; considerando el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje. Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades donde por encima de esta el polímero solo actúa como un filler; y por debajo de esta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia. El contenido de aromáticos es el principal influyente en la facilidad que tiene un asfalto para “admitir” polímeros modificadores. Sin embargo existen aditivos correctores para incrementar la compatibilidad, lo que implica un incremento en el costo de la elaboración de la mezcla asfáltica.

Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, usando técnicas convencionales de preparación. Estos sistemas convencionales de preparación de asfaltos modificados con polímeros son grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad. El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado.

### **2.2.5 PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO**

Antes que el intercambio de crudo en el mercado fuera algo corriente, las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevo a que las fuentes de asfalto tuvieran propiedades consistentes. Al integrarse el cambio del abastecimiento de crudo de las refinerías se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas.

De estas variaciones, salió la necesidad de poderse evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento en términos de conocidas formas de esfuerzo. Aún así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos.

#### **2.2.5.1 Adhesión y Cohesión**

El tema de la adherencia entre el ligante y el agregado es complejo, interviniendo en su estudio un número considerable de variables. La adhesividad se define como la capacidad de un ligante para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente las partículas de agregado en el pavimento terminado.

La falta de adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico, ha sido tema de numerosos análisis tendientes a solucionar o disminuir los deterioros originados en los pavimentos

como consecuencia de este fenómeno. La misma genera la formación de desprendimientos, los que afectan negativamente a la estructura, ya sea, a nivel de superficie de rodadura o favoreciendo el ingreso de los agentes agresivos a las carpetas inferiores del paquete estructural.

A los fines de analizar la adherencia agregado - ligante, existen innumerables métodos en la gran mayoría de ellos la evaluación se efectúa a partir de una valoración visual del desprendimiento también denominado “stripping”. Esta valoración se lleva a cabo luego de poner en contacto a la mezcla asfáltica (ó una determinada fracción de la misma) con agua bajo condiciones y tiempo determinadas conforme a cada uno de los métodos particulares.

Esto nos lleva a buscar una forma de valorar el fenómeno a través de otro tipo de ensayos o metodologías que, en principio, pongan en evidencia uno de los principales problemas a los cuales conduce una inadecuada adherencia entre agregado y ligante, al menos desde el punto de vista estructural, que consiste en la pérdida de cohesión interna con la posterior disminución de la capacidad portante de las mismas, tal el caso del ensayo de módulo.

#### **2.2.5.2 Susceptibilidad Térmica**

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (mayor viscosidad) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menor viscosidad) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo

grado de consistencia. El Gráfico 2-2, ilustra este punto, muestra la susceptibilidad a la temperatura de dos asfaltos (Asfalto A y Asfalto B) que tienen el mismo grado de penetración pero que provienen de crudos de diferente origen. Obsérvese que a 25°C la viscosidad de los dos asfaltos es la misma. Sin embargo, a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes. Esto se debe a que los dos asfaltos tienen diferente susceptibilidad a la temperatura. Lo mismo puede ocurrir con dos asfaltos con el mismo grado de viscosidad pero provenientes de crudos de diferente origen. El Gráfico 2-3, por ejemplo, muestra que el Asfalto C y el Asfalto D tienen la misma viscosidad a una temperatura de 60°C. Sin embargo, a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes. La conclusión es que, sin importar el sistema de clasificación utilizado, puede haber asfaltos derivados de crudos diferentes con diferente susceptibilidad a la temperatura. Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera. Puede observarse que a temperaturas mayores de 25°C, las cuales abarcan todas las temperaturas de construcción, el Asfalto A es menos viscoso (más fluido) que el Asfalto B. Como resultado, la temperatura necesaria para que el Asfalto A sea lo suficientemente fluido y pueda cubrir apropiadamente las partículas de agregado en la mezcla es menor que la temperatura necesaria para obtener los mismos resultados con el Asfalto B. Lo mismo ocurre con las temperaturas de compactación. Puede ser necesario compactar una mezcla con el Asfalto A usando una temperatura menor que la requerida por una mezcla que contiene el Asfalto B.

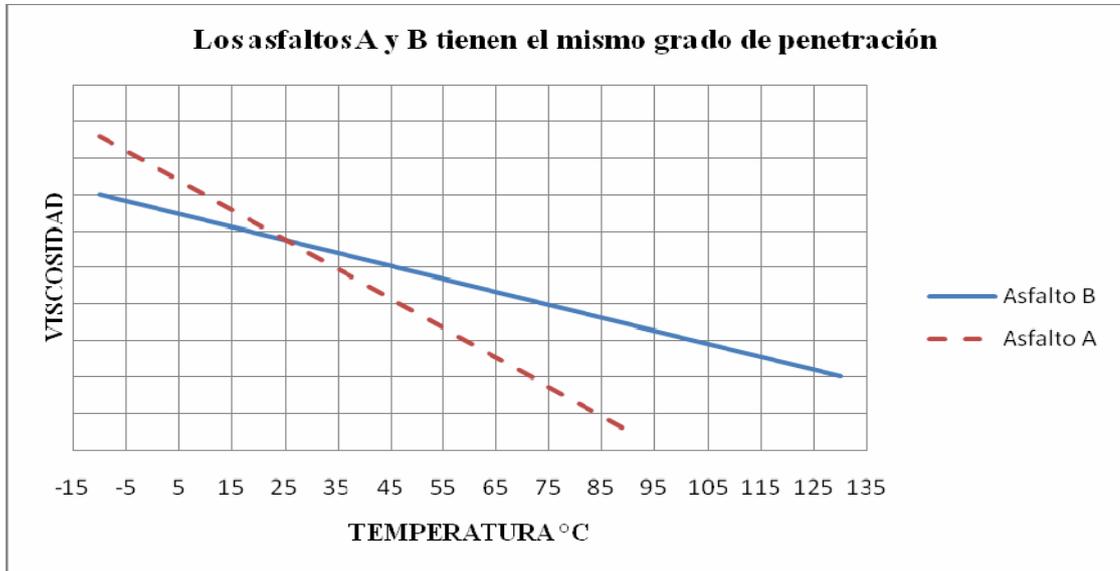


Gráfico 2-2. Variación de viscosidad con la temperatura de dos asfaltos graduados por penetración

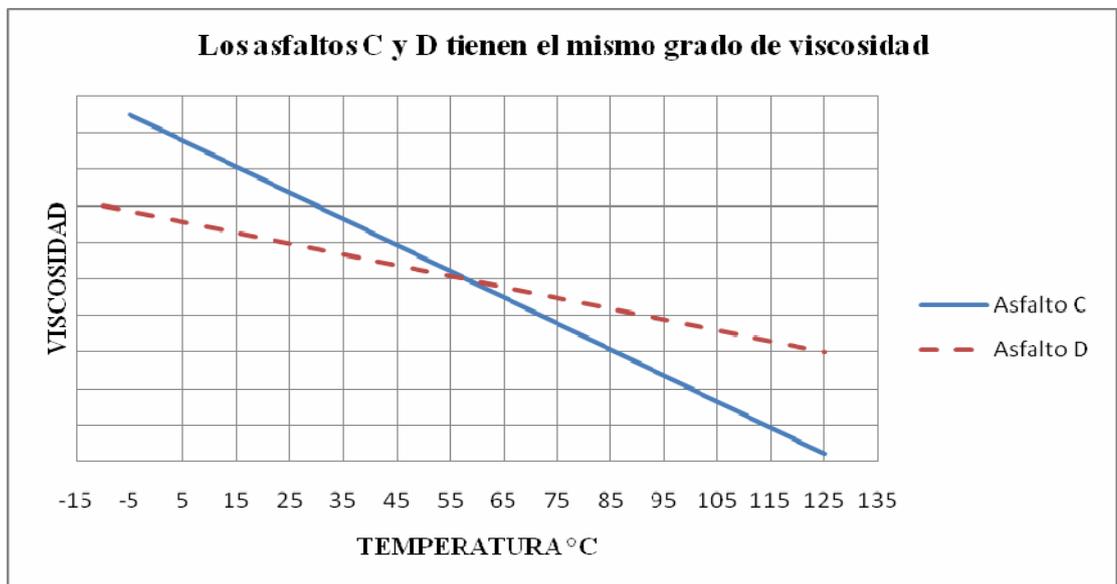


Gráfico 2-3. Variación de viscosidad con la temperatura de dos asfaltos graduados por viscosidad.

### **2.2.5.3 Durabilidad**

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 se debe a que el comportamiento del pavimento está 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. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto. Estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). Ambas incluyen el calentamiento de películas delgadas de asfalto.

Debe entenderse que es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

### **2.2.6 PROPIEDADES QUIMICAS DEL ASFALTO**

Es de mucha utilidad un amplio conocimiento de la constitución y composición química de los asfaltos, para el control de sus propiedades físicas y así obtener un mejor

funcionamiento en la pavimentación. Al igual que el petróleo crudo, el asfalto, es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. La mayoría de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Al eliminar los hidrocarburos más ligeros de un crudo, los más pesados no pueden mantenerse en disolución y se van uniendo por absorción a las partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen dependiendo de la destilación que se les dé. Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante o fase continua. Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados (asfáltenos) están rodeados por moléculas de hidrocarburos más ligeros (resinas), sin que exista una separación entre ellas, sino una transición, finalmente, ocupando el espacio restante los aceites. Un concepto más amplio sobre la constitución es que el asfalto consta de tres componentes mayoritarios. El primero se describe como una mezcla de asfáltenos que son moléculas complejas de alto peso molecular, insoluble en hidrocarburos parafínicos y soluble en compuestos aromáticos como el benceno. El segundo componente descrito es una mezcla de resinas y el tercero aceite mineral. Estos tres constituyen un sistema coloidal. Los asfáltenos cargan con la responsabilidad de las características estructurales y de dureza de los asfaltos, las resinas le proporcionan sus propiedades aglutinantes y los aceites la consistencia adecuada para hacerlos trabajables. Los asfaltos contienen fracciones bituminosas insolubles en parafinas. Cerca del 90 al 95%

del peso del asfalto está compuesto por carbono e hidrógeno, o lo que se había denominado como hidrocarburos.

#### **2.2.6.1 Composición química teórica del asfalto**

El asfalto es de naturaleza coloidal con una compleja mezcla química de moléculas, en la que predominan hidrocarburos naturales, con una menor cantidad de estructuras heterocíclicas y grupos funcionales con contenidos de azufre, nitrógenos y oxígeno, el asfalto también contienen trazas cuantitativas de metales. Los componentes de más alto peso molecular constituyen la fase dispersa (micelas) y los componentes de bajo peso molecular constituyen la fase continua (intermicelar). El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases: una discontinua formada por los asfaltenos y una continua que rodea a los asfaltenos, denominada maltenos. Las resinas contenidas en los maltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar a los de otra manera insolubles asfaltenos. Los maltenos y asfaltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites (saturados), ver Figura 2-5.

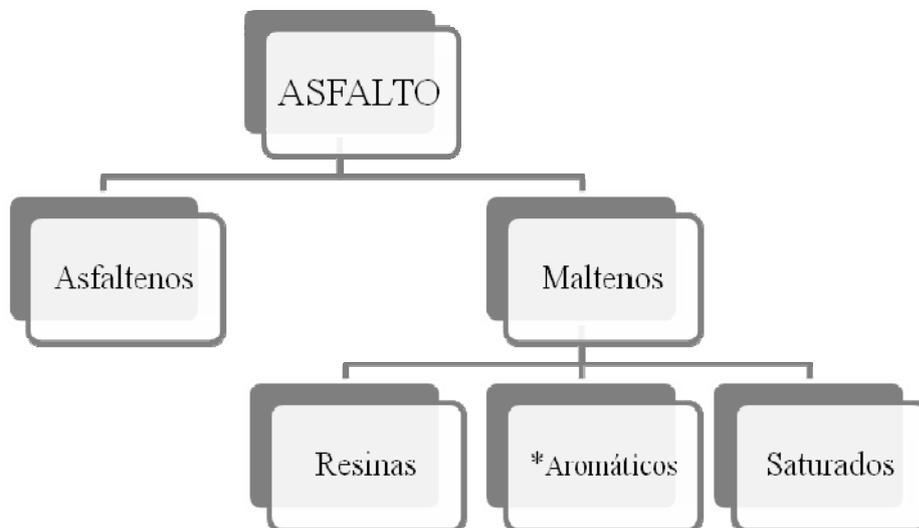


Figura 2-5 Composición del Asfalto.

\*El porcentaje de aromáticos en esta fracción define la compatibilidad entre los polímeros y la base asfáltica.

- a) **Asfaltenos.** Los asfaltenos son una familia de compuestos químicos orgánicos, resultan de la destilación fraccionada del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.

Los asfaltenos son estadísticamente compuestos similares de cadenas largas, muchos de ellos aromáticos y con polaridad relativamente alta, los asfaltenos son insolubles en los maltenos. Tienen alto peso molecular, son inertes y tienen valor como componentes tanto en el asfalto como en combustibles. Se encuentran en sus cadenas en cantidad apreciable elementos como oxígeno, azufre y nitrógeno.

Los asfaltenos le dan las características de dureza al asfalto y se encuentran disueltos en los Maltenos, es decir que no son solubles en los aceites, pero las resinas los mantienen en suspensión formando un sistema coloidal.

Los asfaltenos y los maltenos juntos forman una solución coloidal conocida como asfalto.

- b) **Maltenos.** Los maltenos son la fracción soluble en hidrocarburos (compuestos orgánicos formados únicamente por carbono e hidrógeno) saturados de bajo punto de ebullición. Están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas

Generalmente existe mayor proporción de maltenos que de asfaltenos en los asfaltos. Los maltenos están ligados a las propiedades elásticas del asfalto. El mayor contenido de maltenos es el que le da la calidad a un asfalto, esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos. Su contenido se asocia a las propiedades mecánicas mostradas por el asfalto.

Entre estas propiedades solubilizantes de los componentes de peso molecular más bajo del sistema se incluye, la elasticidad y la variación de la viscosidad con la velocidad de deslizamiento.

Su naturaleza química mantiene a los asfaltenos en “solución coloidal”.

El contenido de aromáticos influye en la facilidad que tiene un asfalto para “admitir” polímeros modificadores.

Los maltenos se subdividen en:

- Resinas: Las resinas son moléculas de bajo peso molecular, que tienen un mayor número de ramificaciones en sus cadenas, observándose con menos frecuencia la presencia de azufre y nitrógeno. Son sólidos o semisólidos de color negro, solubles en heptano, igual que los asfaltenos su composición es de hidrogeno y carbono, con contenidos pequeños de oxígeno.
- Aromáticos: son líquidos viscosos de color negruzco, están compuestos por cicloalcanos de bajo peso molecular, en el asfalto representan la mayor proporción como medio de dispersión para los asfaltenos peptizados. Estos constituyen de un 40% - 65 % del total del asfalto.
- Saturados: son aceites viscosos de coloración amarillenta, comprenden una cadena lateral o ramificada de hidrocarburos asfálticos, junto con radicales cíclicos y algunos aromáticos. En los aceites existe una disminución gradual de compuestos aromáticos y un aumento en el carácter parafínico.

Describiendo la estructura del coloide, las resinas circundan en forma inmediata a los asfaltenos y los aceites rodean a ese compuesto. Dado que es difícil determinar las diferentes proporciones de hidrocarburos presentes en el asfalto, se usa la relación entre el número de átomos de carbono y el número de átomos de hidrógeno (relación C/H) para caracterizar la composición química de las fracciones del asfalto. La relación da una indicación del grado de saturación de la mezcla de hidrocarburos y se puede correlacionar con las propiedades de los diferentes asfaltos. (Ver Figura 2-6)

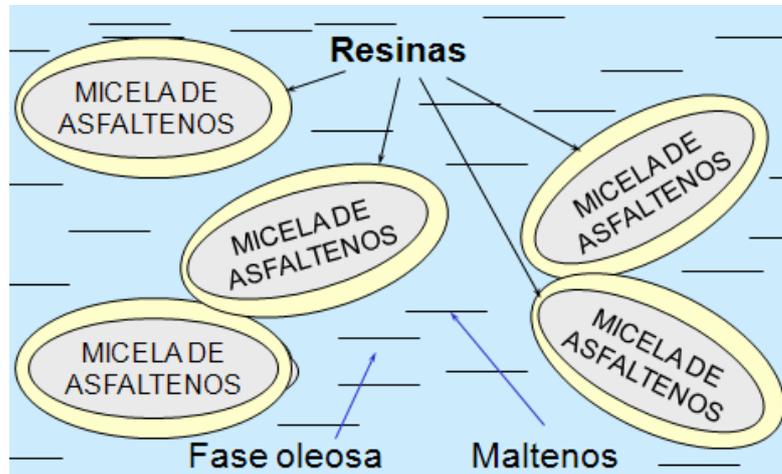


Figura 2-6. Estructura coloidal del Asfalto.

Según el grado de aromaticidad de los maltenos y la naturaleza de la concentración de los asfaltenos, se pueden formar tres tipos de estructuras:

- Asfalto tipo sol, en los cuales las micelas del asfalto se mueven libremente entre sí. Estos asfaltos tienen alta ductilidad, gran susceptibilidad a los cambios de temperatura.
- Asfalto tipo gel, en el cual las micelas, por atracción mutua, forman una estructura en toda la masa bituminosa. Estos asfaltos tienen baja ductilidad, baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.
- Asfalto entre sol y gel, asfalto llamado mediano debido a que tiene una estructura intermedia entre sol y gel.

## **2.2.7 DAÑO EN EL ASFALTO**

### **Oxidación del Asfalto**

Es un proceso químico que altera la composición química del asfalto. El asfalto está constituido por una fina dispersión coloidal de asfaltenos y maltenos. Los maltenos actúan como la fase continua que dispersa a los asfaltenos. Las propiedades físicas de los asfaltos obtenidos por destilación permiten a los mismos ser dúctiles, maleables y reológicamente aptos para su utilización como materias primas para elaborar productos para el mercado vial. Al "soplar" oxígeno sobre una masa de asfalto en caliente se produce una mayor cantidad de asfaltenos en detrimento de los maltenos, ocasionando así de esta manera una mayor fragilidad, mayor resistencia a las altas temperatura y una variación de las condiciones reológicas iniciales.

## **2.2.8 OTRAS PROPIEDADES DETERMINADAS A TRAVES DE ENSAYOS PRACTICADOS AL ASFALTO**

### **2.2.8.1 Envejecimiento en película delgada (ASTM D 1754-97)**

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas, como la temperatura de construcción, y en películas delgadas de asfalto que cubre las partículas de agregado.

Debido a que el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado, hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo mas corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado, ver Gráfico 2-4.

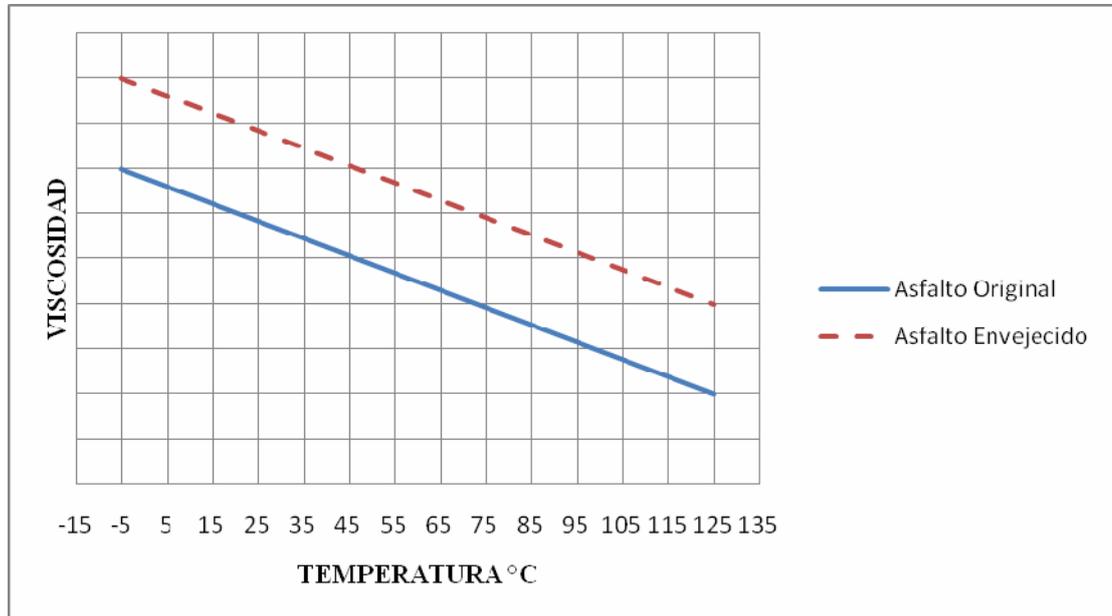


Gráfico 2-4. Endurecimiento de asfalto después de haber sido expuesto a altas temperaturas.

### 2.2.8.2 Ductilidad (ASTM D113-07)

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

Los ensayos comúnmente utilizados para determinar las características de los cementos convencionales (sin modificar), son los de punto de ablandamiento (ASTM D36-06), penetración, ductilidad, punto de inflamación, viscosidad, envejecimiento en película delgada.

### **2.2.8.3 Viscosidad (ASTM D2170-95)**

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60 °C y 135 °C. La viscosidad a 60 °C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que esta siendo diseñado. Con el ensayo de viscosidad se puede determinar la temperatura de mezcla y de compactación hasta la cual se debe llevar el asfalto para conformar la mezcla.

### **2.2.8.4 Penetración (ASTM D5-06)**

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba esta incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean usados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25 °C. Este es un ensayo aplicable tanto a cementos asfálticos sólidos como a residuos de destilación de asfaltos líquidos, en donde se determina la consistencia del producto bituminoso. Los asfaltos presentan a temperaturas moderadas, viscosidades muy altas que no pueden cuantificarse con equipos convencionales, para esta prueba utilizamos el penetrómetro (Figura 2-7), esta prueba busca determinar la dureza del asfalto a diferentes temperaturas.



Fig. 2-7 Penetrómetro

#### **2.2.8.5 Solubilidad (ASTM D 131)**

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

#### **2.2.8.6 Punto de Inflamación (ASTM D92-05)**

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

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

#### **2.2.8.7 Peso Específico (ASTM D 70-86)**

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, normalmente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado.

El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen. El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado.

### **2.3 IMPORTANCIA DEL AGREGADO EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA**

Agregado, es un material granular duro de composición mineralógica, usado para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados y el asfalto; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los agregados que serán utilizados para elaborar una

mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica. Una pequeña variación en el porcentaje de un determinado tamaño de agregado ó en las propiedades de éste puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla elaborada por lo tanto es necesario llevar un control eficiente de los agregados que se están usando en la planta de producción de mezcla lo cual puede comprender:

- Control de calidad del agregado que se produce en la planta trituradora.
- Acopio de agregados.
- Alimentación de agregados.

El control de la calidad del agregado usado es un factor crítico en el comportamiento de una carpeta de concreto asfáltico, sin embargo, además de la calidad se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, estos criterios incluyen el costo, la disponibilidad del agregado, su origen y además deberá cumplir con ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad.

Entre los conceptos más usados relacionados a los agregados se encuentran:

- Agregado Grueso: Agregado que pasa el tamiz de 3” y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

- Agregado Fino: Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y queda retenido en el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200).
- Polvo Mineral: La porción de agregado fino que pasa el tamiz No. 200.
- Relleno Minera: Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200).
- Agregado de Graduación Gruesa: Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.
- Agregado de Graduación Fina: Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.
- Agregado Densamente Graduado: Agregado con una distribución de tamaños de partícula tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas, expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.
- Agregado de Graduación Abierta: Agregado que contiene poco o ningún llenante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.
- Agregado Bien Graduada: Agregado cuya graduación va desde el tamaño máximo hasta el de un llenante mineral con el objeto de obtener una mezcla bituminosa con un contenido de vacíos controlado y alta estabilidad.

### **2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS**

Los agregados usados en pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.

#### **2.3.1.1 Agregados naturales**

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que tamiz No. 4. La arena se define como partículas de un tamaño menor que tamiz No. 4 pero mayor que el tamiz No. 200. Las partículas de tamaño menor que 75  $\mu\text{m}$  (tamiz No. 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

### **2.3.1.2 Agregados procesados**

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas mas apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que son extraídas de canteras y que deben ser reducidas en tamaño en las plantas trituradoras antes de ser usados en la pavimentación. De la calidad de las rocas que se explotan en las canteras dependerá la calidad de los agregados procesados y dispuestos para ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

La roca es triturada por tres razones:

- Para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa,
- Para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y
- Para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

En la cantera, antes de trasladar las rocas en su tamaño adecuado a la trituradora, es controlada visualmente la calidad de la roca que se está extrayendo ya que puede darse el caso que las rocas no sean apropiadas para producir agregado de buena calidad que cumpla con todos los requisitos que se establecen para agregado de mezclas asfálticas o cualquier otro uso. El propósito de la trituración de las rocas es principalmente reducirlas a un tamaño

que sea manejable, el tamaño de la roca que es llevada a la trituradora es aproximadamente del tamaño de la roca que se utiliza para hacer los muros de contención, también los cambios en la textura superficial y apariencia en dureza son muy importantes a la hora de enviar la roca a la trituradora.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partículas. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con las especificaciones establecidas de granulometría. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

### **2.3.1.3 Agregados Sintéticos**

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno, una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o al triturarla una vez que se ha enfriado.

Básicamente cualquier agregado que sirve para mezcla asfáltica es bueno para concreto, pero no todo el agregado bueno para concreto sirve para mezcla asfáltica. Los requerimientos que debe cumplir el agregado para mezcla asfáltica son más altos. Las mezclas asfálticas de granulometrías abiertas no utilizan finos, pero una mezcla densa requiere una curva granulométrica que tenga una distribución de todos los tamaños.

### **2.3.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

En una mezcla asfáltica en caliente densamente graduada, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento de la carpeta de rodadura. Debido a su naturaleza los agregados pueden presentar distintas características e influir de manera diferente en el comportamiento de la Mezcla Asfáltica. En la Figura 2-8 se muestra un resumen de las propiedades de los agregados para mezclas asfálticas en caliente. Los diferentes tipos de agregados en cuanto a forma, fuente, tamaño o combinaciones deben cumplir los requerimientos de las especificaciones de la mezcla que van a constituir. Estos materiales pueden tener diferentes propiedades que podrían cambiar las características de construcción de la mezcla. El tipo de trituración usada para procesar el agregado puede afectar la forma de partícula, la cual en últimas circunstancias puede influir en los vacíos del agregado mineral y en el grado de fricción entre ellas. Se prefieren las partículas que se

acerquen a la forma cúbica, para las mezclas. La mezcla escogida, así como el diseño de la estructura del agregado, se puede manejar de diferente manera a través de la planta.

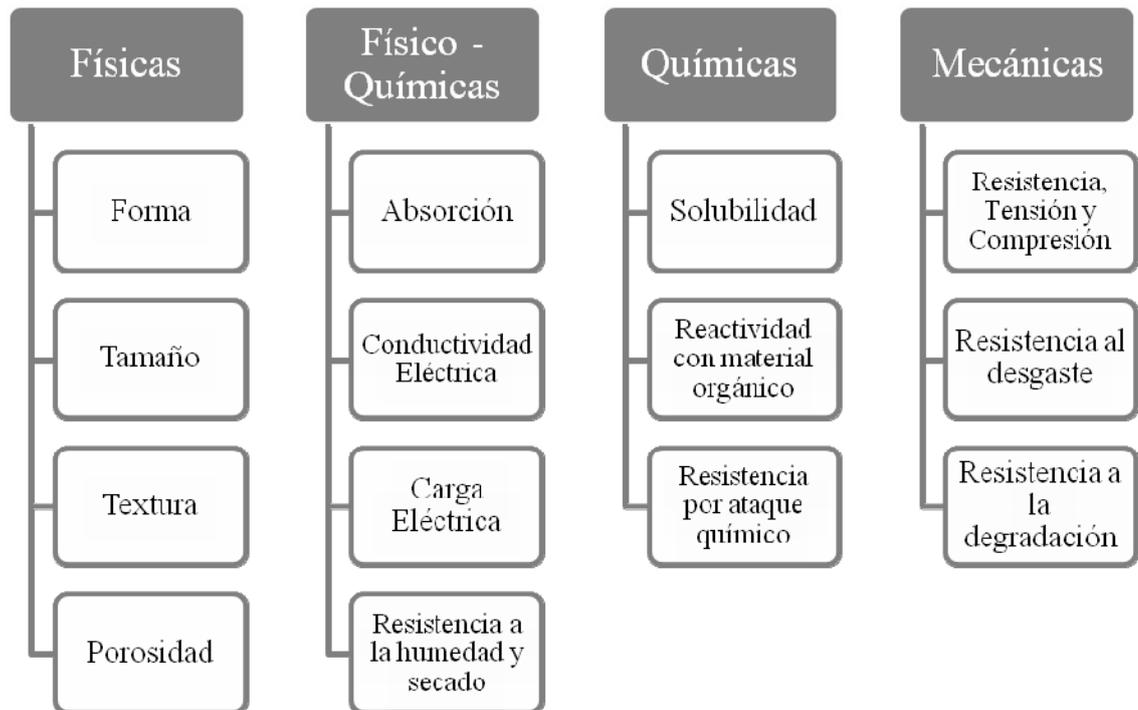


Figura 2-8. Propiedades en los agregados

Las propiedades más relevantes a considerar para un agregado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad, son las siguientes: Graduación y Tamaño Máximo de Partícula, Textura Superficial, Limpieza, Capacidad de absorción, Dureza, Afinidad con el Asfalto y Forma de la Partícula.

### **2.3.2.1 Graduación**

Todas las especificaciones de mezcla asfáltica en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de distribución de diferentes tamaños y que cada tamaño de partículas estén presentes en ciertos porcentajes mayores o menores en una serie de tamices. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

### **2.3.2.2 Tamaño Máximo de la partícula**

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas para designar tamaños máximos de las partículas.

### **2.3.2.3 Tamaño Máximo del Agregado**

Es designado como el tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.

#### **2.3.2.4 Tamaño Máximo Nominal del Agregado**

Es designado como el tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices. Para ilustrar las diferencias entre las dos designaciones, considere el siguiente ejemplo: Se efectúa un tamizado de una muestra de agregado que va a ser usada en una mezcla de pavimentación. El tamiz de 19 mm ( $\frac{3}{4}$ " retiene 4% de todas las partículas de agregado. El tamiz de 12.5 mm ( $\frac{1}{2}$ " ), inmediatamente por debajo del tamiz de 19 mm, retiene un total de 18% de todas las partículas de agregado. En este caso, el tamaño máximo nominal es 19 mm ( $\frac{3}{4}$ " ), y el tamaño máximo es 25 mm (1"). Una mezcla de pavimentación se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal. Por lo tanto, en el ejemplo anterior la mezcla se denominaría "mezcla de 25 mm ( $\frac{1}{2}$ ") de acuerdo al tamaño máximo del agregado, mientras que se denominaría "mezcla de 19 mm ( $\frac{3}{4}$ ") de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado.

#### **2.3.2.5 Textura Superficial**

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie de la carpeta de rodadura. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez

proporciona un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula. No existe un método directo para evaluar la textura superficial; es tan solo, una característica, como la forma de la partícula, que esta reflejada en la resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

#### **2.3.2.6 Limpieza**

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento. La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200).

### **2.3.2.7 Capacidad de Absorción**

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina la porosidad. La capacidad de un agregado de absorber agua ó asfalto es un elemento importante de información; si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades más grandes de asfalto que un agregado menos poroso.

### **2.3.2.8 Dureza**

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación, compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de, la superficie, deben de tener mayor resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que en las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

### **2.3.2.9 Afinidad por el Asfalto**

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas y las rocas traqueanas tienen alta afinidad con el asfalto y

son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies. Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente este tipo de agregado, tiende a separarse de las partículas de asfalto cuando son expuestos al agua.

#### **2.3.2.10 Forma de la partícula**

Las exigencias de forma de la partícula varían ligeramente para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas redondas, planas, alargadas y en forma de lascas, ya que este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas. La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida. Las partículas irregulares y angulares benefician al esqueleto mineral debido al rozamiento interno que se genera entre las partículas, esto contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entra en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos. El empleo de agregados triturados trae consigo el aumento de la angulosidad de las partículas.

## **2.4 DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA**

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de agregados y asfalto, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se colocan y se compactan.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

### **2.4.1 EMPLEO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIAS.**

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las bases negras de carreteras para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de carreteras, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento

cómoda, segura a los usuarios, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de una carretera:

La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.

La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores de le denomina pavimento.

#### **2.4.2 FUNCIONALIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LOS PAVIMENTOS**

Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales del vía residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

- La adherencia del neumático al firme.
- Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- El desgaste de los neumáticos.
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- La comodidad y estabilidad en marcha.
- Las cargas dinámicas del tráfico.
- La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
- El envejecimiento de los vehículos.
- Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento.

Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada pavimento.

En una mezcla asfáltica hay que optimizar las propiedades siguientes:

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.
- Regularidad.
- Permeabilidad adecuada.

### **2.4.3 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CAPAS DE RODADURA.**

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias.

Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario.

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a que están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

#### **2.4.4 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CAPAS INFERIORES.**

Las capas de espesor apreciable de una vía tienen una misión estructural fundamental para absorber la mayor parte de las sollicitaciones del tráfico, de forma que éstas lleguen convenientemente disminuidas a las capas inferiores, explanada o cimiento de la carretera.

La tendencia española tradicional para el diseño de las mezclas de las capas gruesas de base ha sido la de elegir granulometrías recomendadas por en el Instituto del Asfalto, con muchos huecos. Estas mezclas son netamente abiertas con un esqueleto mineral, en cuyo rozamiento interno radica la función resistente. Estas mezclas se podían considerar inspiradas en las antiguas bases de piedra partida o Macadam tratadas por penetración con asfalto.

#### **2.4.5 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

a) Por Fracciones de agregado

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más cemento asfáltico.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

- Concreto asfáltico: Agregado grueso, agregado fino, polvo mineral y cemento asfáltico.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más cemento asfáltico.

b) Por la Temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en Caliente: El concreto asfáltico mezclado en planta y compactado en caliente, se compone de una mezcla de agregados graduados y asfalto, fabricado a una temperatura aproximada de 150°C colocada y compactada en caliente a una temperatura de 140°C. Las plantas para la producción de mezclas en caliente se construyen de tal manera que, después de secar y calentar los agregados, los separa en diferentes grupos de tamaños, los recombina en las proporciones adecuadas, los mezcla con la cantidad debida de asfalto caliente y finalmente los entrega a los vehículos transportadores, que a su vez la colocan en la máquina pavimentadora para que esta la deposite sobre la vía con un espesor uniforme, después se compacta mediante rodillos mientras la temperatura se conserva dentro de los rangos de especificación.
- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos interconectados entre si. Permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20 %.

d) Por el Tamaño máximo del agregado

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

e) Por la Estructura del agregado

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f) Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado en el uso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado en el huso granulométrico.

## **2.5 PRINCIPALES DETERIOROS DE LAS CARPETAS ASFÁLTICAS EN EL SALVADOR**

Los defectos que presenta un pavimento y que disminuyen la comodidad del usuario o la vida de servicio de esa estructura, frecuentemente corresponden a defectos constructivos y difícilmente pueden clasificarse como deterioros.

Sin embargo, atendiendo al hecho de que habrán de ser corregidos mediante labores de mantenimiento o conservación, como es el caso de juntas mal acabadas, se han incluido en literatura de pavimentos asfálticos como deterioros. Adicionalmente puede decirse que tales defectos pueden sufrir un deterioro gradual con el paso de los vehículos y convertirse así en verdaderos deterioros del pavimento.

En la literatura especializada de pavimentos, los fines didácticos perseguidos orientan el ordenamiento de los deterioros atendiendo a sus causas y origen, más que a las labores para su corrección.

Los deterioros dentro de las tres grandes categorías se agrupan a su vez en las subcategorías:

**a) Deterioros de la superficie**

- Desprendimientos
- Alisamientos
- Exposición de agregados

**b) Deterioros de la estructura**

- Deformaciones
- Agrietamientos

**c) Deterioros por defectos constructivos**

- Grietas longitudinales

Sin embargo son dos los tipos de deterioros de mayor interés para nuestro estudio, por ser los relacionados directamente con las altas temperaturas presentadas sobre las carpetas asfálticas:

- Ahuellamiento
- Fisuramiento

## **2.5.1 AHUELLAMIENTO**

### **2.5.1.1 Definición y Descripción del Ahuellamiento**

El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, que consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Se produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento, y altas temperaturas de servicio.

El ahuellamiento pertenece a la categoría de deformaciones en deterioro de la estructura y puede tener su origen en deformaciones de la mezcla asfáltica de superficie, o en deformaciones en capas subyacentes:

- Ahuellamiento en la capa asfáltica. El efecto se presenta en los primeros 7 a 10 cm de mezcla más cercanos a la superficie. La mezcla asfáltica bajo esta profundidad se encuentra aislada térmicamente y además está sometida a esfuerzos menores que las capas superiores. Este tipo de ahuellamiento es independiente del diseño estructural del pavimento.

- Ahuellamiento producido en capas subyacentes. En este caso las causas pueden ser, principalmente, una mala compactación de las bases granulares o tensiones de trabajo mayores a las tensiones admisibles en la subrasante. Es decir, las causas en este caso son de tipo constructivo o de diseño estructural del pavimento.

El perfil transversal de la deformación es diferente en cada caso, ahuellamiento de la mezcla o de capas inferiores, y es relativamente fácil de distinguir. Por lo general, será conveniente adoptar la palabra ahuellamiento para referirse a la deformación plástica de la mezcla asfáltica y utilizar la palabra deformación para referirse a las deformaciones por tensiones de las capas subyacentes.

El ahuellamiento de la capa asfáltica ocurre por la acumulación de pequeñas deformaciones plásticas de la mezcla que ocurren cada vez que se aplica una carga sobre el pavimento. El asfalto, y por ende la mezcla, exhibe un comportamiento viscoelástico a temperaturas de servicio, por lo que las deformaciones que presenta ante cargas corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica. La componente elástica de la deformación se recupera, mientras que la componente plástica se acumula.

En condiciones normales de operación, las deformaciones producidas por el tránsito son despreciables, sin embargo existen factores que tienden a aumentar la tasa de deformación de la mezcla asfáltica y eventualmente producen ahuellamiento. Estos factores, que normalmente actúan en conjunto, están relacionados al clima y al tráfico:

- **Altas temperaturas.** El ahuellamiento generalmente se produce en verano, ya que las temperaturas altas aumentan la componente plástica de deformación del asfalto, por lo tanto aumentan las deformaciones remanentes. En ocasiones el ahuellamiento se puede producir en forma parcial en dos o tres veranos consecutivos.
- **Cargas pesadas.** Las cargas pesadas aumentan la magnitud de las deformaciones y por lo tanto aumentan la tasa de deformación de la mezcla.
- **Circulación a bajas velocidades.** El tráfico lento disminuye la rigidez del asfalto, por lo que aumenta la componente plástica de deformaciones, es decir, se produce un efecto equivalente a un aumento de la temperatura de servicio.

Por otra parte una mezcla asfáltica puede ser más o menos resistente a las deformaciones, en función de una serie de factores de diseño, como grado asfáltico, propiedades del agregado y parámetros de dosificación.

#### **2.5.1.2 Propiedades del Agregado Relacionadas al Ahuellamiento**

- **Granulometría.** Las mezclas tradicionales se producen en base a granulometrías continuas o densas. Estas mezclas, en condiciones extremas de servicio, pueden ser susceptibles de ahuellarse. Recientes investigaciones indican que para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento, debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, más resistentes y de mayor fricción interna. La cantidad de

agregado de menor tamaño debe ser tal que pueda ser colocado en el espacio que dejan los agregados más gruesos, sin interferir en su contacto interpartícula, y así sucesivamente con los tamaños más finos.

- Forma y Textura. Tanto la forma como la textura son propiedades que tienen que ver con el origen del agregado. Las partículas rodadas obtenidas de depósitos fluviales normalmente tienen una textura lisa y una forma redondeada, por lo que no son adecuadas para producir mezclas asfálticas, puesto que no proveen suficiente fricción interna para resistir las cargas. Las partículas que se obtienen en plantas de chancado tienen forma angulosa y textura rugosa, producto de la trituración mecánica. Estas partículas proveen grandes fricciones internas que las hacen adecuadas para producir mezclas asfálticas resistentes al ahuellamiento.

### **2.5.1.3 Parámetros de Dosificación.**

Numerosos informes de investigación, así como textos de estudio, concuerdan que el contenido de vacíos es, por sí solo, el parámetro de desempeño más importante de una mezcla asfáltica.

Existe acuerdo en que el rango adecuado de desempeño de una mezcla se consigue para contenidos de vacíos de 3 a 8%. Para contenidos de vacíos bajo 3%, la mezcla es muy propensa a exudar y/o ahuellarse. Por otro lado, para contenidos de vacíos superiores al 8%, la mezcla puede sufrir excesiva oxidación, agrietamiento prematuro y desintegración. Ver Gráfico 2-5.

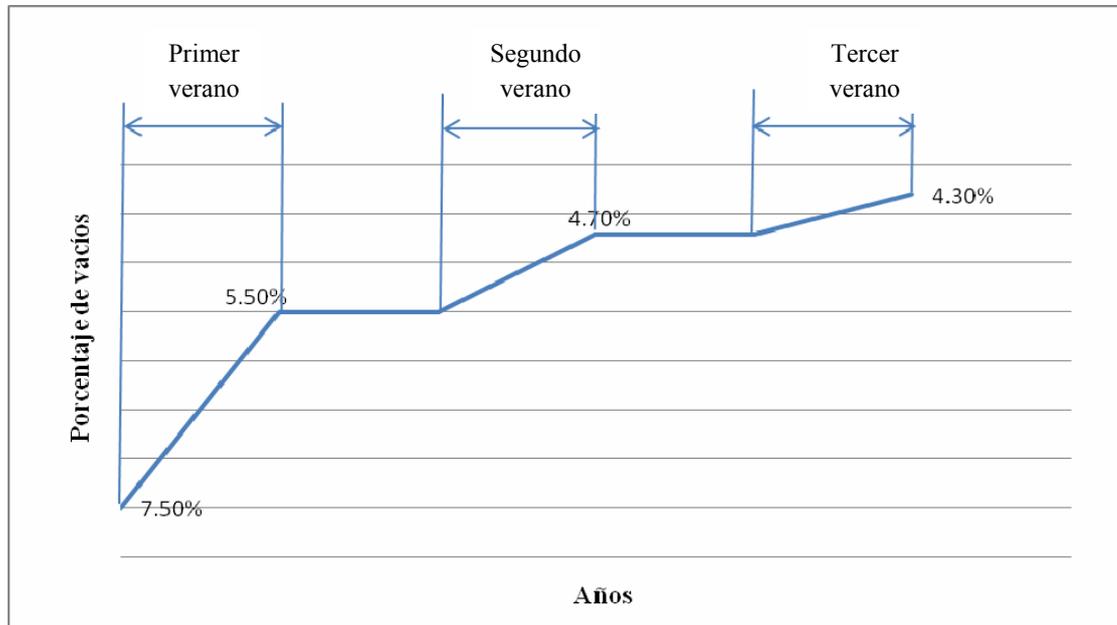


Gráfico 2-5. Variación de densidad y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica

Para determinar el contenido asfáltico óptimo, el criterio de diseño del método Marshall especifica un contenido de vacíos de 3 a 5%, estos valores se refieren a la condición de la mezcla tras dos a tres años de servicio, una vez que ha sido compactada por el tráfico.

Por lo tanto, para alcanzar esta condición en terreno, es necesario compactar la mezcla hasta un nivel de vacíos cercano al 8%, ya que el tráfico densificará la mezcla hasta su nivel final, en el rango de 3 a 5%. Una sobrecompactación de la mezcla, ya sea por error de diseño, exceso de compactación durante la colocación, o por un tráfico pesado no considerado durante el diseño, producirá una disminución en el contenido de vacíos que puede producir el ahuellamiento y/o la exudación de la mezcla.

Otros parámetros volumétricos relacionados con el ahuellamiento, que están relacionados al contenido de vacíos, son el VMA y contenido asfáltico.

El VMA, o contenido de vacíos del agregado mineral, es una propiedad que depende del agregado (forma y granulometría) y del contenido asfáltico. Valores de VMA muy bajos pueden indicar que en terreno el asfalto no tendrá suficiente espacio y que por lo tanto podría ahuellarse y/o exudar. Valores de VMA muy altos también se han asociado con el ahuellamiento, ya que se requerirá un mayor contenido asfáltico para cumplir las especificaciones de diseño.

Por otro lado, el contenido asfáltico está relacionado con el contenido de vacíos. La estabilidad Marshall, a pesar de no ser un parámetro relevante en el comportamiento de las mezclas frente al ahuellamiento, muestra cómo afecta el contenido asfáltico al comportamiento mecánico de las mezclas. Hasta cierto valor, la estabilidad aumenta con incrementos en el contenido asfáltico. A partir de dicho valor, la estabilidad de la mezcla disminuye con nuevos incrementos en el contenido asfáltico. Esto se debe al efecto lubricante que produce un exceso de asfalto, que reduce el contacto entre las partículas de agregado y por lo tanto disminuye la fricción interna de la mezcla.

### **2.5.2 FISURAMIENTO**

En la actualidad uno de los problemas con mayor incidencia en el deterioro de las vías asfaltadas, es la presencia de fisuras. Estas se presentan cuando los esfuerzos o deformaciones exceden ciertos valores límites ocasionados por el endurecimiento del

asfalto el cual incrementa la rigidez de la superficie asfáltica, se torna frágil y propenso a fisurar bajo esfuerzos de decrecimiento de la temperatura de la capa asfáltica. Este efecto no solo crea esfuerzos de tensión debido a la contracción térmica, sino también incrementa su rigidez, haciendo más variable a las fallas por tensión ocasionados por el tránsito. Estas fracturas en el pavimento constituyen el inicio del deterioro de la carpeta asfáltica, ya que a través de ellos se producen infiltración de aguas superficiales, lo que provoca deformaciones de la subestructura por una pérdida de resistencia al esfuerzo cortante del material conformante de la sub-base o subrasante.

De igual forma las fisuras en los pavimentos ocasionan la pérdida de continuidad, y con ella la redistribución de los esfuerzos en la carpeta asfáltica. Si la vía presenta esta irregularidad se puede decir que estructuralmente se encuentra fallada y sin capacidad de absorber los esfuerzos producto de las cargas móviles. Por lo tanto es necesario el tratamiento de fisuras y reforzamiento de la carpeta asfáltica con la finalidad de recuperar la capacidad de absorber los esfuerzos y proveerla de mayor tiempo de vida útil. -+

Otro problema que ocasionan las fisuras es la posibilidad, que a través de ellas, se introduzcan elementos extraños que provoquen el deterioro de las aristas de la fisura, en forma de fracturas y desprendimiento. Esto ocasiona una futura falla del pavimento. Por todas estas causas es necesario un tratamiento adecuado de las fisuras en las carpetas asfálticas que sirven de superficie de rodadura de las vías. Antes de iniciar el tratamiento es necesario realizar una evaluación a las fisuras presentes en la vía y definir si dichas fisuras corresponden a un problema estructural, como es el caso de la calidad en la carpeta asfáltica en la base y sub-base, ó sí las fisuras presentes se deben a problemas de adherencia, como

es el caso de las juntas de construcción o a cambios de temperatura u otros tipos de fisuras no estructurales. Para cada una de estos tipos de falla el tratamiento de las fisuras será diferente.

### **3. CAPITULO III: EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA MEDIANTE EL METODO UCL**

#### **3.1. DEFINICION DEL METODO UCL**

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL), desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los Doctores Pérez Jiménez y Miro Recasens, fue desarrollado para llevar a cabo la caracterización de los cementos asfálticos desde el punto de vista de su utilización en carreteras donde actúa en conjunto con el agregado. Esta evaluación está basada en la valorización de la cohesión, la susceptibilidad térmica, la adherencia agregado pétreo–cemento asfáltico y la durabilidad.

Estas propiedades son las que permiten evaluar el desempeño del ligante en conjunto con el agregado grueso y fino, requerido en el diseño de mezcla.

El método de ensayo que sirve de fundamento a esta prueba es la Norma Española NLT-352/86 “Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste” (Ver Anexo 1), que no tiene equivalencia dentro de las normas ASTM. Los resultados que brinda este método revela un panorama general acerca del comportamiento del concreto asfáltico (ligante y agregado) en cuanto a la trabazón existente (cohesión), la resistencia a la disgregación ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico así como el desprendimiento bajo los efectos del agua (adhesión),

los cambios que se manifiestan ante variaciones de temperatura (susceptibilidad térmica) y ante efectos de envejecimiento (durabilidad).

El método propone un proceso con el que resulta viable poder evaluar estas características, que mediante otros ensayos es difícil determinar dado que los ensayos tradicionales se aplican ya sea al ligante o al agregado por separado y no evalúan el comportamiento como conjunto.

### **3.2. DESCRIPCION GENERAL DEL METODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACION DE LIGANTES (UCL)**

El método UCL evalúa cuatro propiedades, como ya fue mencionado anteriormente, a cualquier tipo de concreto asfáltico (mezcla de agregado y ligante asfáltico) con el fin de facilitar la selección del cemento asfáltico (ligante) en función de su comportamiento con el agregado, para asignar el más adecuado a una vía de acuerdo con las condiciones a las cuales estará expuesto. Gracias a este método se puede conocer las características mecánicas que aporta cada tipo de cemento asfáltico (ligante), que en este caso serán cuatro; AC-20, AC-30, Asfalto Modificado Tipo I-D y Asfalto Modificado Tipo III-D. Por lo que al comparar los resultados de los ensayos, la diferencia de estos se deberá exclusivamente al aporte de cada cemento asfáltico. Por ello se puede concluir cual resulta más beneficioso en determinadas condiciones.

### **3.3. APLICACIÓN DEL METODO UCL**

La caracterización del cemento asfáltico se ha realizado hasta el presente a partir de ensayos físicos y químicos, utilizándose para tal fin una serie de ensayos de base empírica y científica con los que se obtiene una pauta de las propiedades del cemento asfáltico, pero que solo establecen de manera indirecta el comportamiento en servicio de éste como material componente de una mezcla asfáltica. Vale la pena aclarar que en nuestro país solo se llevan a cabo los ensayos físicos. Los ensayos comúnmente utilizados para determinar las características de los cementos convencionales (sin modificar), son los de punto de ablandamiento (ASTM D36-06), penetración (ASTM D5-06), ductilidad (ASTM D113-07), punto de inflamación (ASTM D92-05), viscosidad (ASTM D2170-95), envejecimiento en película delgada (ASTM D1754-97) y contenido de asfaltenos, maltenos, resinas y aromáticos. Los resultados y análisis de estos ensayos han sido el instrumento de selección de los asfaltos en función de los requerimientos de la mezcla en servicio.

Al realizar los ensayos mencionados anteriormente para la caracterización de los cementos asfálticos, ya sean convencionales o modificados, se puede incurrir en errores de apreciación dado que estos tienden a producir valores similares en los parámetros de referencia, no diferenciando el grado de comportamiento que pueden tener en las carreteras.

Debido a esto ha sido necesario adicionar otros ensayos para poner de manifiesto las propiedades elastoméricas que los polímeros le confieren a los cementos asfálticos modificados, como por ejemplo la recuperación elástica.

El método UCL evalúa 4 propiedades de un cemento asfáltico; cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y durabilidad como parte de una mezcla asfáltica. El método verifica si el cemento asfáltico posee buenas propiedades dentro de la mezcla, ya que se evalúa el cemento asfáltico en conjunto con el agregado.

El método se ha desarrollado enfocado a la caracterización de los cementos asfálticos desde el punto de vista de su utilización en las carreteras, tomando en cuenta las propiedades que se encuentren relacionadas con el comportamiento de la mezcla en la vía y valora el comportamiento de los cementos asfálticos como parte integral de la mezcla, mediante la evaluación de sus propiedades fundamentales a través del ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste. Es importante recalcar la relevancia de la temperatura en este aspecto dado que incide en el comportamiento de la mezcla asfáltica dado que es susceptible a los cambios de temperatura. La temperatura dentro de la mezcla asfáltica, a unos escasos centímetros de la superficie del pavimento, es superior a la temperatura ambiente por lo que puede ablandarse en determinado momento y ocasionar cambios en el pavimento que se aprecian por medio del ahuellamiento y el fisuramiento.

El método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL) se centra en las características funcionales que los cementos asfálticos han de aportar al comportamiento de las mezclas asfálticas. Es necesario aclarar que el método UCL, no es un método de diseño ni de clasificación de cemento asfáltico, sino como lo indica su nombre, caracteriza y analiza directamente su respuesta mecánica.

La importancia primordial del método Universal de Caracterización de Ligantes, radica en que debería servir como complemento a los métodos de diseño y caracterización, es decir, por ejemplo, al iniciar un proyecto de carreteras, aparte de realizar un competente diseño de la carpeta, se debe, antes de realizar el diseño, evaluar los asfaltos que se tiene a disposición para el proyecto mediante el método UCL, garantizando que el asfalto que se elija para el diseño de la carpeta asfáltica sea verdaderamente el que mejores propiedades aporte a la mezcla según los requerimiento de ese proyecto en particular. En la Tabla 3-1 se resumen las funciones y los beneficios del método UCL y el método de diseño Marshall.

Comparación Método UCL y Método Marshall		
Items	Marshall	UCL
Objetivo	Diseño de mezclas asfálticas	Caracterización de diferentes tipos de cementos asfálticos
Objeto de Estudio	Mezcla asfáltica	Cemento Asfáltico como componente de una mezcla asfáltica
Propósito	Obtención del porcentaje óptimo de asfalto para el diseño de una mezcla	Evaluar las propiedades de distintos cementos asfálticos, facilitando una elección del asfalto que mejores características mecánicas aporte a la mezcla.

Tabla 3-1. Comparación del los métodos UCL y Marshall.

La tabla anterior manifiesta que los métodos no compiten por ver cual es el mejor, son mas bien o deberían ser, métodos complementarios que garantizan obtener un adecuado diseño y la mejor selección del asfalto adecuado para dicho diseño en función de las características que aporte a la mezcla.

### **3.4. PROPIEDADES EVALUADAS POR EL METODO UCL**

De un cemento asfáltico, las cuatro propiedades fundamentales de interés que son evaluadas por el Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL) consisten en:

- Cohesión
- Susceptibilidad Térmica
- Adhesividad
- Durabilidad

#### **3.4.1. COHESIÓN**

Es la propiedad que permite mantener unidas todas las partículas del material pétreo proporcionando a la mezcla asfáltica una determinada cohesión que define su poder aglomerante y contribuye para resistir las sollicitaciones del tránsito sin que se produzcan grandes desplazamientos relativos entre dichas partículas.

El ensayo Cántabro evalúa la cohesión por medio de la determinación de las pérdidas por desgaste siendo claro que a mayor cohesión, menores serán las pérdidas.

### **3.4.2. SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA**

La susceptibilidad térmica es la propiedad que evalúa los cambios que experimentan las mezclas asfálticas debido a la temperatura. La cohesión mantiene unidas todas las partículas del material pétreo proporcionando a la mezcla asfáltica una determinada consistencia, este comportamiento mecánico tiende a variar debido a las diferentes temperaturas que la mezcla asfáltica experimenta en el campo, por ello la susceptibilidad térmica que presenta cada ligante asfáltico es importante para evaluar su desempeño. Ninguno de los métodos de ensayos convencionales evalúan esta propiedad, por lo que esta variación del comportamiento del cemento asfáltico con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del método UCL.

### **3.4.3. ADHESIVIDAD**

La adhesividad es la propiedad de que una dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares debido a que ejerce resistencia al desprendimiento de la película de cemento asfáltico en presencia del agua y puede variar a diferentes temperaturas.

Para conseguir una adecuada resistencia al desprendimiento de la mezcla asfáltica por acción del agua depende no sólo del cemento asfáltico sino también de los agregados pétreos; por lo tanto, es necesaria una buena adherencia entre la mezcla asfáltica y agregado pétreo. El método UCL permite evaluar esta propiedad al determinar el grado de desprendimiento que presentan los agregados pétreos tras permanecer un cierto tiempo

sumergidos en agua, el procedimiento del método determina la pérdida de cohesión de la probeta fabricada con el cemento asfáltico y el agregado pétreo. Es un procedimiento cuantitativo y de gran sensibilidad.

Las pérdidas por desgaste no depende únicamente de la adherencia agregado pétreo-cemento asfáltico, sino que influyen otras propiedades del cemento asfáltico: consistencia, fragilidad, viscosidad, etc. y de los agregados pétreos: forma, textura, dureza, etc. No obstante el cemento asfáltico debe ser capaz de envolver a los agregados pétreos, dando cohesión a la mezcla y resistir la acción de desprendimiento debido al agua. Por ello resulta complicada la aplicación del ensayo Cántabro de pérdida por desgaste a la valorización de adhesión mecánica del cemento asfáltico al agregado asfáltico. Pero donde si puede tener una aplicación adecuada es en la adhesividad del cemento asfáltico al agregado pétreo en presencia del agua.

#### **3.4.4. DURABILIDAD**

El método UCL evalúa el comportamiento que cualquier cemento asfáltico tiene frente a la acción de agentes atmosféricos (agua, aire, calor, rayos ultravioletas, etc.), lo cual es indicativo de la durabilidad que tendrá en las condiciones de trabajo. Existen cementos asfálticos con diferentes contenidos de asfaltenos y maltenos y siendo estos últimos los que se pierden debido a los procesos de envejecimiento, la durabilidad del cemento asfáltico dependerá de la rapidez con que se pierde los maltenos. A este proceso se le conoce como oxidación del cemento asfáltico, con el cual la penetración aumenta, el cemento asfáltico se

fragiliza perdiendo su capacidad de aceptar deformaciones y su capacidad de recuperación elástica dado que se vuelve muy rígido.

### **3.5. PROCEDIMIENTO DEL METODO UCL**

Este método evalúa directamente las propiedades funcionales del cemento asfáltico a partir de la determinación de la cohesión que éste proporciona a una mezcla patrón abierta (cohesión) y cómo esta propiedad varía con la temperatura (susceptibilidad térmica), la acción del agua sobre el desprendimiento de las partículas (adhesividad) y el envejecimiento (durabilidad). Es una tecnología sencilla, de fácil ejecución y que ofrece un novedoso mecanismo de selección de cementos asfálticos que permiten diferenciar y valorar el comportamiento de los cementos asfálticos de similares características y poner de manifiesto las diferencias de comportamiento de diversos cementos modificados entre sí y los convencionales.

Este método, por poderse aplicar a todo tipo de cementos asfálticos modificados o no, se le dio el nombre de universal. Consiste principalmente en comparar directamente las respuestas de los cementos asfálticos estudiados.

El método consiste en ensayar probetas con una mezcla patrón (Ver Anexo 2) y someterlas a las diferentes condiciones requeridas para cada ensayo. Estas probetas se fabrican basándose en el procedimiento de elaboración de probetas Marshall, que consiste en

colocar una porción de mezcla asfáltica (según diseño especificado) y compactarla dentro de un molde con 75 golpes en cada lado utilizando un martillo de 4" de diámetro, de 10 lbs de peso que se deja caer desde 12" de altura. El procedimiento se puede apreciar en las Figuras 3-1, 3-2 y 3-3.



Figura 3-1. Colocación de molde en compactador manual e inicio de compactación.



Figura 3-2. Finalización de compactación y retiro de probeta.



Figura 3-3. Probetas en moldes compactadas y probetas extraídas.

El diseño de mezcla de la mezcla patrón a utilizar se tomo de un diseño de mezcla densa para una carretera de primera clase de la red vial de El Salvador que forma parte de la CA1. El presente trabajo de graduación va a comparar los resultados de 4 diferentes tipos de asfalto por lo que las probetas tienen el mismo diseño de mezcla con la única variante que es el tipo de ligante.

Cada propiedad a evaluar tiene diferentes condiciones a las que hay que someter las probetas por lo que varía la cantidad de probetas a utilizar en cada ensayo, pero cada asfalto participa con igual cantidad de probetas en cada prueba, ver Tabla 3-2.

ENSAYO	Severidad de desgaste	AC-20 COLOR BLANCO (A)					AC-30 COLOR VERDE (B)					Modificado Tipo I COLOR ROSA (C)					Modificado Tipo III COLOR AMARILLO (D)				
COHESION	100 rev	3					3					3					3				
	200 rev	3					3					3					3				
	300 rev	3					3					3					3				
ADHESIVIDAD	Método	"A"		"B"			"A"		"B"			"A"		"B"			"A"		"B"		
	100 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	200 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	300 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SUSCEPTIBILIDAD TERMICA	Temp (C°)	35	45	55	65	75	35	45	55	65	75	35	45	55	65	75	35	45	55	65	75
	100 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	200 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	300 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
DURABILIDAD	Horas	1.5	3	6	12	24	1.5	3	6	12	24	1.5	3	6	12	24	1.5	3	6	12	24
	100 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	200 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	300 rev	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Tabla 3-2 Cantidad de Probetas por Ensayo

Cada probeta está compuesta por agregados pétreos de trituración y un porcentaje de cemento asfáltico según el diseño que hemos utilizado como mezcla patrón (Ver Anexo 2). Con esta mezcla, se procedió con la fabricación del moldeo de las probetas, basándonos en la fórmula de trabajo y de los procedimientos de control para la elaboración de las briquetas del ensayo Marshall, siguiendo la carta de viscosidad que fue proporcionada por el

fabricante (Ver Anexo 4) para la determinación de la temperatura de mezcla y de compactación.

Cada propiedad que es evaluada en este método pasa por una serie de condiciones previamente al ensayo en sí, estas condiciones están descritas en la Sección de 3.6 Realización de Pruebas. El método UCL consiste en cuantificar la pérdida de material de las probetas ensayadas, tomando el peso inicial de cada probeta, ensayándolas por desgaste en la máquina de Los Ángeles (sin cargas abrasivas), y tomando el peso nuevamente al finalizar la prueba para calcular la pérdida de material.

Durante este ensayo se van desprendiendo, por impacto, el material más superficial de la probeta, determinándose tras un número de revoluciones (100, 200 y 300), la pérdida de peso de la probeta referida, en tanto por ciento, al peso inicial:

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

De donde:

**P<sub>c</sub>**: Pérdida al Cántabro

**P<sub>i</sub>**: Peso inicial en gramos.

**P<sub>f</sub>**: Peso final en gramos.

Por lo que el equipo a utilizar para la aplicación del método UCL es el siguiente:

- Máquina de Los Ángeles, Ver Figura 3-4.

La máquina de los ángeles es un aparato constituido por un tambor cilíndrico hueco de acero de 500 mm de longitud y 700 mm de diámetro aproximadamente, con su eje horizontal fijado a un dispositivo exterior que puede transmitirle un movimiento de rotación alrededor del eje. La velocidad de este equipo debe cumplir con 33 revoluciones por minuto. El tambor tiene una abertura para la introducción del material de ensayo y de la carga abrasiva; dicha abertura está provista de una tapa que debe reunir las siguientes condiciones:

- Asegurar un cierre hermético que impida la pérdida del material y del polvo.
- Tener la forma de la pared interna del tambor.
- Dispositivo de sujeción que asegure al mismo tiempo la fijación rígida de la tapa al tambor y su remoción fácil.



Figura 3-4. Máquina de Los Ángeles

- Balanza, Ver Figura 3-5.

La balanza será utilizada previamente para tomar el peso inicial de la probeta ( $P_i$ ), antes de ensayar, y el peso final ( $P_f$ ), después de haber sido ensayada en la Máquina de Los Ángeles. La balanza a utilizar en estos ensayos deberá ser una balanza de 0,1 g de sensibilidad y capacidad superior a 2 kg.



Figura 3-5 Balanza de tres brazos

- Protección auditiva, Ver Figura 3-6.

Protección contra el ruido que genera la máquina de los ángeles cuando está en funcionamiento.



Figura 3-6. Protectores de Oídos

El ensayo Cántabro, por ser un ensayo experimental, no determina ningún parámetro fundamental de la mezcla, sino que brinda una idea clara de la capacidad del cemento asfáltico para mantener unidos los agregados pétreos de la mezcla. Se producen bajas pérdidas cuando estas uniones son dúctiles y tenaces, situación que ocurre en temperaturas medias, y altas pérdidas cuando el cemento asfáltico se torna frágil, en situaciones que ocurren por la baja temperatura o cuando se reblandece demasiado en las altas.

En la Figura 3-7 se muestran 36 probetas, que fueron pintadas de 4 colores diferentes para identificarlas por el tipo de asfalto del que están fabricadas, enumerándose para efectos de registro acompañados por una letra de acuerdo al tipo de asfalto. Esto facilita el reconocimiento de cada una de las probetas durante todo el proceso de realización del ensayo en la Máquina de Los Ángeles, cada uno de los colores se describen de la siguiente manera:

- Color Blanco (Letra A): Asfalto AC-20
- Color Verde (Letra B): Asfalto AC-30
- Color Rosado (Letra C): Asfalto Modificado Tipo I-D con polímetro SBS, Estireno-Butadieno-Estireno, Elastómero (ASTM D5976-00)
- Color Amarillo (Letra D): Asfalto Modificado Tipo III-D con polímero EVA, Etil-Vinil-Acetato, Plastómero (ASTM D-5841-00)



Figura 3-7. Probetas preparadas

### **3.6. REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS**

#### **3.6.1. ENSAYO DE COHESION**

Este ensayo requiere 9 probetas de cada tipo de asfalto a evaluar. 3 probetas que serán ensayadas a 100 revoluciones, 3 probetas que serán ensayadas a 200 revoluciones y 3 probetas que serán ensayadas a 300 revoluciones.

El único requerimiento que deben cumplir estas probetas, además de haber seguido el procedimiento de elaboración mediante el método de diseño Marshall, es dejar cada probeta durante 24 horas a temperatura ambiente ( $\pm 25^{\circ}\text{C}$ ) antes de ser ensayada.

Por la cantidad de asfaltos a evaluar, cuatro, este ensayo consistió en ensayar 36 probetas. Se prosigue con el paso de anotar el peso de cada probeta antes de introducirla a la máquina de Los Ángeles y tomarlo nuevamente al finalizar la prueba, proporcionando los siguientes resultados en la Tabla 3-3.

<b>ENSAYO COHESION</b>																	<b>PROBETAS ENUMERADAS DEL 1 AL 9</b>																
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida																		
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%																	
AC-20	100 rev	1 A	1,172.20	1,168.92	3.28	0.28%	2 A	1,181.00	1,177.10	3.90	0.33%	3 A	1,186.80	1,182.53	4.27	0.36%																	
	200 rev	4 A	1,178.40	1,174.39	4.01	0.34%	5 A	1,164.80	1,160.26	4.54	0.39%	6 A	1,194.60	1,189.58	5.02	0.42%																	
	300 rev	7 A	1,202.80	1,196.67	6.13	0.51%	8 A	1,193.10	1,186.42	6.68	0.56%	9 A	1,109.80	1,102.48	7.32	0.66%																	
AC-30	100 rev	1 B	1,195.50	1,192.51	2.99	0.25%	2 B	1,200.00	1,196.64	3.36	0.28%	3 B	1,179.80	1,175.55	4.25	0.36%																	
	200 rev	4 B	1,202.10	1,198.13	3.97	0.33%	5 B	1,193.00	1,188.82	4.18	0.35%	6 B	1,202.00	1,196.95	5.05	0.42%																	
	300 rev	7 B	1,194.00	1,188.51	5.49	0.46%	8 B	1,199.00	1,193.12	5.88	0.49%	9 B	1,202.00	1,195.15	6.85	0.57%																	
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	1 C	1,181.50	1,180.79	0.71	0.06%	2 C	1,186.60	1,185.41	1.19	0.10%	3 C	1,168.20	1,166.80	1.40	0.12%																	
	200 rev	4 C	1,178.40	1,176.51	1.89	0.16%	5 C	1,185.10	1,182.73	2.37	0.20%	6 C	1,191.10	1,187.76	3.34	0.28%																	
	300 rev	7 C	1,146.50	1,143.75	2.75	0.24%	8 C	1,191.90	1,188.56	3.34	0.28%	9 C	1,181.80	1,177.66	4.14	0.35%																	
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	1 D	1,158.80	1,157.64	1.16	0.10%	2 D	1,189.70	1,188.39	1.31	0.11%	3 D	1,202.40	1,200.60	1.80	0.15%																	
	200 rev	4 D	1,184.00	1,182.22	1.78	0.15%	5 D	1,174.30	1,172.19	2.11	0.18%	6 D	1,185.40	1,182.32	3.08	0.26%																	
	300 rev	7 D	1,151.70	1,148.13	3.57	0.31%	8 D	1,181.90	1,177.88	4.02	0.34%	9 D	1,179.50	1,174.55	4.95	0.42%																	

Tabla 3-3. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Cohesión

Con todos los resultados de los Porcentajes de Pérdida obtenidos mediante la Prueba de Desgaste, se elabora un resumen de los datos en la Tabla 3-4 con los promedios de los porcentajes de pérdida:

DESGASTE	CEMENTO ASFALTICO			
	AC-20	AC-30	TIPO I-D	TIPO III-D
100 revoluciones	0.32%	0.30%	0.09%	0.12%
200 revoluciones	0.38%	0.37%	0.21%	0.20%
300 revoluciones	0.58%	0.51%	0.29%	0.36%

Tabla 3-4 Cuadro resumen de promedios de porcentajes de pérdida para cada Asfalto

Una vez ordenados los resultados se procede a la elaboración de los gráficos que nos mostraran la tendencia de los resultados, exponiendo de esta manera el comportamiento de cada Asfalto ante las condiciones del Ensayo de Cohesión.

En el Gráfico 3-1 y 3-2 se puede observar que el Asfalto AC-20 es el que tiene mayores pérdidas, por lo tanto es el más débil. Y el Asfalto Modificado Tipo I-D, que es el que mejores resultados presenta dado que tiene menores pérdidas, tiene una diferencia inicial muy representativa con el AC-20. El AC-20 inicia con un desgaste 3 veces mayor al Modificado Tipo I-D a 100 revoluciones y mantiene una diferencia del doble del desgaste a las severidades de 200 y 300 revoluciones.

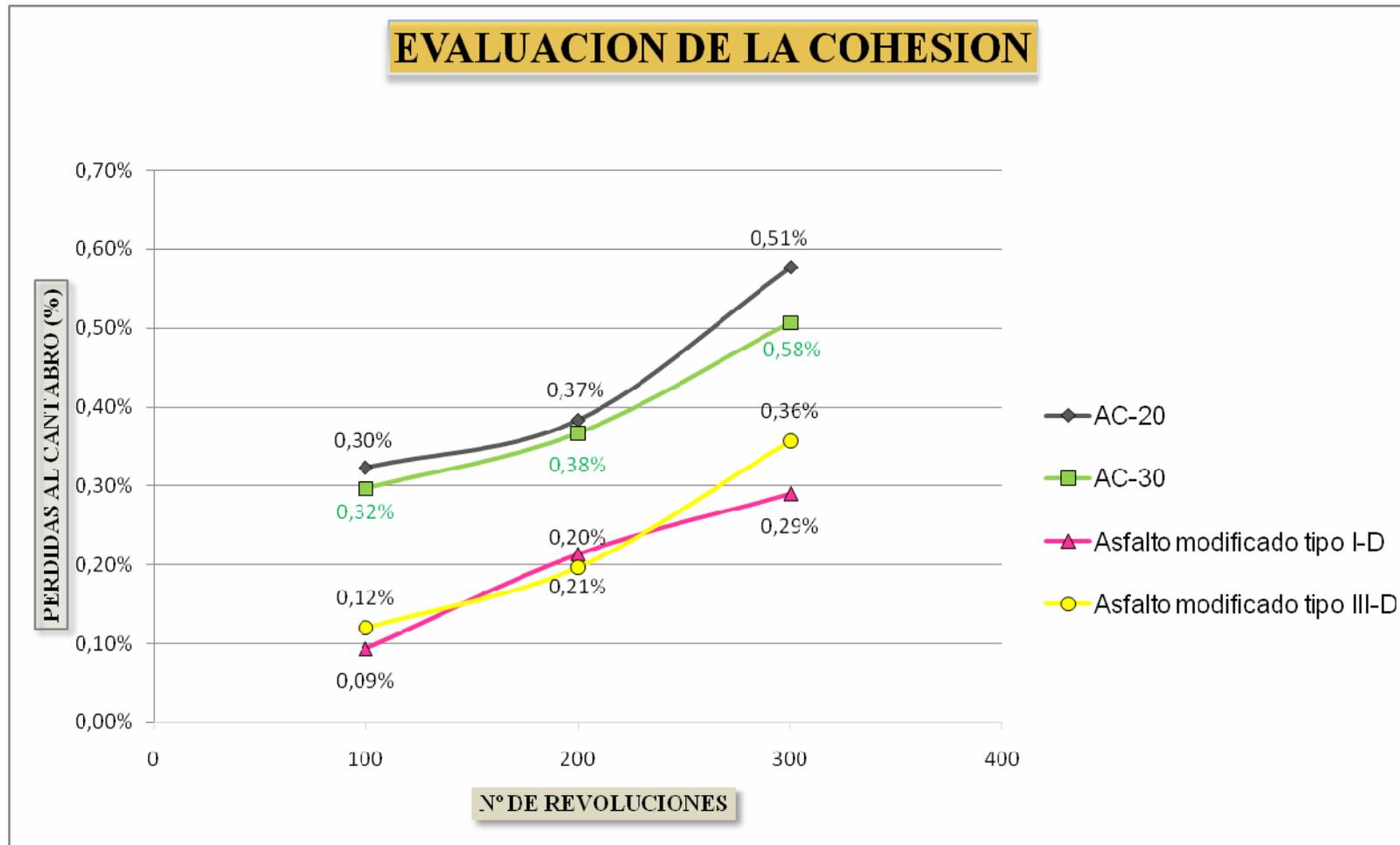


Gráfico 3-1. Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su cohesión a una temperatura de 25°C a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

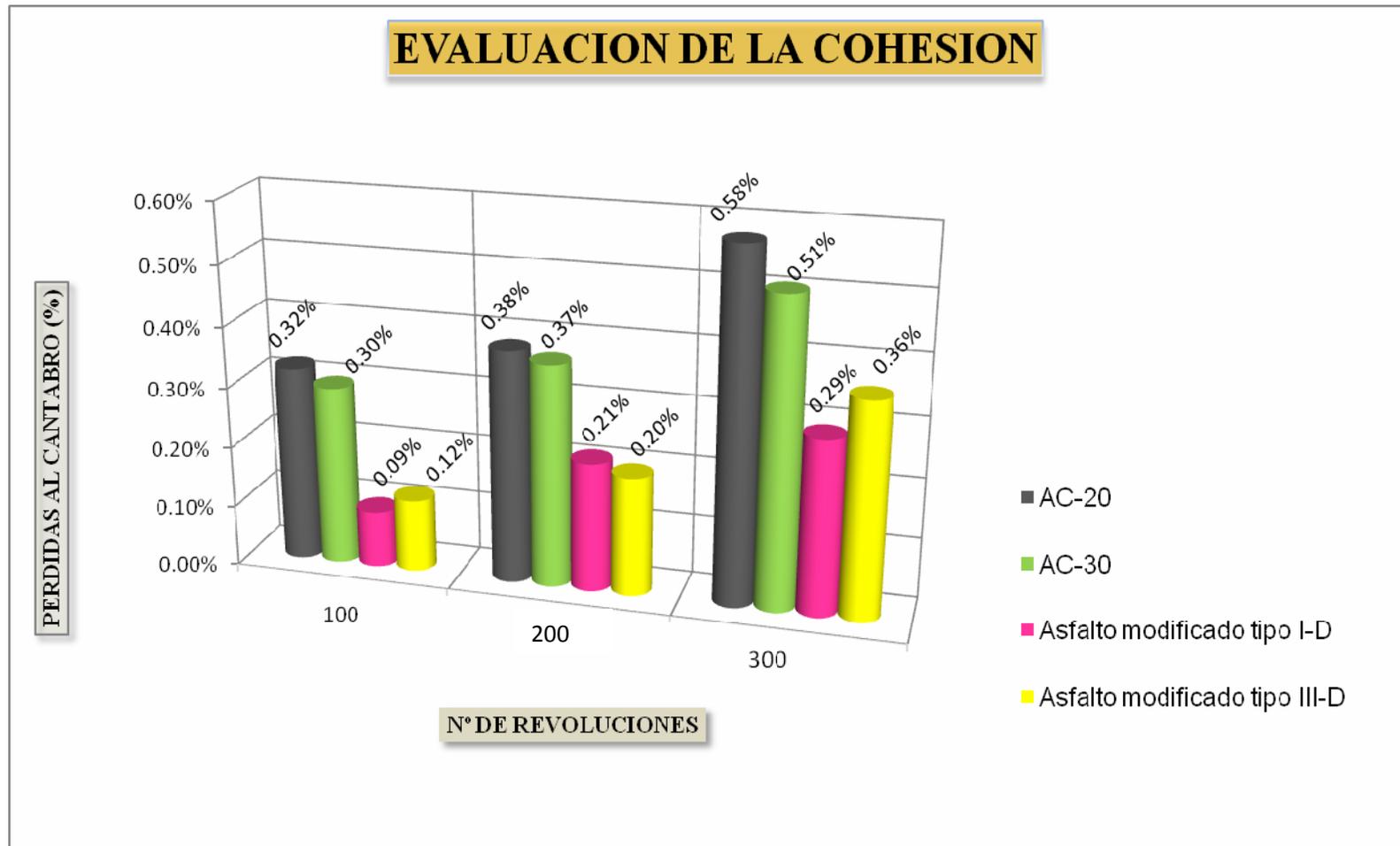


Gráfico 3-2. Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su cohesión a una temperatura de 25°C a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

Como se muestran en los dos gráficos, Diagrama de Dispersión y Diagrama de Barras, se nota que el asfalto AC-20 es el que genera la mayor cantidad de pérdida. No obstante esto no necesariamente lo descalifica dado que se está comparando cual de los cuatro asfaltos brinda mejores resultados.

En ambos gráficos podemos observar, en líneas generales, que es el Asfalto Tipo I-D el que menores pérdidas al desgaste ha mostrado, exponiendo ser el asfalto que mejor cohesión puede aportar a la mezcla.

### **3.6.2. ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD TERMICA**

Equipo:

- Horno, con capacidad de generar temperaturas hasta de 400°C. Ver Figura 3-8
- Termómetro de dial con un rango de medición de temperaturas de 150°C.



Figura 3-8 Horno calibrado a la temperatura de ensayo

Procedimiento:

Este ensayo requiere de un acondicionamiento previo a la prueba por desgaste en la máquina de Los Ángeles, que consiste en someter 9 probetas a una temperatura determinada (25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 60°C, 65°C y 75°C) para cada tipo de asfalto a evaluar. 3 probetas que serán ensayadas a 100 revoluciones, 3 probetas que serán ensayadas a 200 revoluciones y 3 probetas que serán ensayadas a 300 revoluciones. Dado que se deben someter 9 probetas a 6 temperaturas distintas, se requiere de 36 probetas para cada tipo de asfalto. Esto que suma una cantidad de 216 probetas solamente para este ensayo.

Este ensayo también incluye la evaluación a temperatura ambiente ( $\pm 25^\circ\text{C}$ ), estos datos serán tomados de la tabla de los valores del ensayo de Cohesión.

Las probetas deben introducirse a un horno, una vez regulada la temperatura del mismo, y dejarse por un periodo de 12 horas. Al extraer las probetas, estas deben permanecer por lo menos durante 24 horas a temperatura ambiente ( $\pm 25^\circ\text{C}$ ) antes de ser ensayada.

Se prosigue con el paso de anotar el peso de cada probeta antes de introducirla a la máquina de Los Ángeles y tomarlo nuevamente al finalizar la prueba, proporcionando los siguientes resultados recopilados en las Tablas 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9, 3-10 y 3-11.

<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA</b> 12hrs a 25°C																<b>PROBETAS ENUMERADAS DEL 1 AL 9</b>					
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida						
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%					
AC-20	100 rev	1 A	1,172.20	1,168.92	3.28	0.28%	2 A	1,181.00	1,176.98	4.02	0.34%	3 A	1,186.80	1,182.53	4.27	0.36%					
	200 rev	4 A	1,178.40	1,174.39	4.01	0.34%	5 A	1,164.80	1,160.14	4.66	0.40%	6 A	1,194.60	1,189.58	5.02	0.42%					
	300 rev	7 A	1,202.80	1,196.67	6.13	0.51%	8 A	1,193.10	1,186.90	6.20	0.52%	9 A	1,109.80	1,102.48	7.32	0.66%					
AC-30	100 rev	1 B	1,195.50	1,192.51	2.99	0.25%	2 B	1,200.00	1,196.76	3.24	0.27%	3 B	1,179.80	1,175.55	4.25	0.36%					
	200 rev	4 B	1,202.10	1,198.13	3.97	0.33%	5 B	1,193.00	1,188.82	4.18	0.35%	6 B	1,202.00	1,196.95	5.05	0.42%					
	300 rev	7 B	1,194.00	1,188.51	5.49	0.46%	8 B	1,199.00	1,193.36	5.64	0.47%	9 B	1,202.00	1,195.15	6.85	0.57%					
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	1 C	1,181.50	1,180.79	0.71	0.06%	2 C	1,186.60	1,185.65	0.95	0.08%	3 C	1,168.20	1,166.80	1.40	0.12%					
	200 rev	4 C	1,178.40	1,176.51	1.89	0.16%	5 C	1,185.10	1,183.09	2.01	0.17%	6 C	1,191.10	1,187.76	3.34	0.28%					
	300 rev	7 C	1,146.50	1,143.75	2.75	0.24%	8 C	1,191.90	1,187.85	4.05	0.34%	9 C	1,181.80	1,177.66	4.14	0.35%					
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	1 D	1,158.80	1,157.64	1.16	0.10%	2 D	1,189.70	1,188.03	1.67	0.14%	3 D	1,202.40	1,200.60	1.80	0.15%					
	200 rev	4 D	1,184.00	1,182.22	1.78	0.15%	5 D	1,174.30	1,172.42	1.88	0.16%	6 D	1,185.40	1,182.32	3.08	0.26%					
	300 rev	7 D	1,151.70	1,148.13	3.57	0.31%	8 D	1,181.90	1,177.17	4.73	0.40%	9 D	1,179.50	1,174.55	4.95	0.42%					

Tabla 3-5 Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Susceptibilidad Térmica para condición de 12hrs a 25°C.

<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA 12hrs a 35°C</b>																	<b>PROBETAS ENUMERADAS DEL 73 AL 81</b>																
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.		Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.		Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.		Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida															
						Masa (gr)	%					Masa (gr)	%					Masa (gr)	%														
AC-20	100 rev	73	A	1,098.90	1,095.60	3.30	0.30%	74	A	1,198.00	1,194.17	3.83	0.32%	75	A	1,195.70	1,190.92	4.78	0.40%														
	200 rev	76	A	1,179.10	1,174.86	4.24	0.36%	77	A	1,175.60	1,171.13	4.47	0.38%	78	A	1,179.90	1,174.47	5.43	0.46%														
	300 rev	79	A	1,181.30	1,175.04	6.26	0.53%	80	A	1,182.20	1,175.70	6.50	0.55%	81	A	1,183.60	1,176.14	7.46	0.63%														
AC-30	100 rev	73	B	1,185.20	1,182.00	3.20	0.27%	74	B	1,190.60	1,187.27	3.33	0.28%	75	B	1,172.50	1,168.16	4.34	0.37%														
	200 rev	76	B	1,191.90	1,187.73	4.17	0.35%	77	B	1,178.70	1,174.46	4.24	0.36%	78	B	1,178.50	1,173.20	5.30	0.45%														
	300 rev	79	B	1,196.30	1,190.56	5.74	0.48%	80	B	1,181.60	1,175.10	6.50	0.55%	81	B	1,191.70	1,184.79	6.91	0.58%														
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	73	C	1,196.40	1,195.68	0.72	0.06%	74	C	1,207.90	1,206.93	0.97	0.08%	75	C	1,193.60	1,191.69	1.91	0.16%														
	200 rev	76	C	1,193.50	1,191.59	1.91	0.16%	77	C	1,194.00	1,191.02	2.99	0.25%	78	C	1,186.10	1,183.02	3.08	0.26%														
	300 rev	79	C	1,184.90	1,181.82	3.08	0.26%	80	C	1,181.60	1,177.94	3.66	0.31%	81	C	1,188.70	1,184.42	4.28	0.36%														
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	73	D	1,196.20	1,195.36	0.84	0.07%	74	D	1,206.50	1,205.41	1.09	0.09%	75	D	1,186.60	1,184.58	2.02	0.17%														
	200 rev	76	D	1,189.90	1,187.76	2.14	0.18%	77	D	1,193.30	1,190.91	2.39	0.20%	78	D	1,187.40	1,184.08	3.32	0.28%														
	300 rev	79	D	1,188.70	1,184.78	3.92	0.33%	80	D	1,198.40	1,194.21	4.19	0.35%	81	D	1,189.00	1,183.89	5.11	0.43%														

Tabla 3-6. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Susceptibilidad Térmica para condición de 12hrs a 35°C.

SUSCEPTIBILIDAD TERMICA 12hrs a 45°C													PROBETAS ENUMERADAS DEL 55 AL 63				
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%	
AC-20	100 rev	55 A	1,183.00	1,178.74	4.26	0.36%	56 A	1,190.70	1,186.18	4.52	0.38%	57 A	1,170.50	1,165.12	5.38	0.46%	
	200 rev	58 A	1,190.00	1,185.12	4.88	0.41%	59 A	1,167.10	1,162.08	5.02	0.43%	60 A	1,184.10	1,178.06	6.04	0.51%	
	300 rev	61 A	1,190.60	1,183.81	6.79	0.57%	62 A	1,187.90	1,180.89	7.01	0.59%	63 A	1,198.90	1,190.87	8.03	0.67%	
AC-30	100 rev	55 B	1,187.70	1,184.02	3.68	0.31%	56 B	1,188.30	1,184.38	3.92	0.33%	57 B	1,187.20	1,182.33	4.87	0.41%	
	200 rev	58 B	1,195.20	1,190.30	4.90	0.41%	59 B	1,187.70	1,182.71	4.99	0.42%	60 B	1,165.70	1,159.75	5.95	0.51%	
	300 rev	61 B	1,195.60	1,189.26	6.34	0.53%	62 B	1,191.20	1,184.65	6.55	0.55%	63 B	1,189.70	1,182.20	7.50	0.63%	
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	55 C	1,205.50	1,204.17	1.33	0.11%	56 C	1,186.20	1,184.66	1.54	0.13%	57 C	1,187.60	1,185.11	2.49	0.21%	
	200 rev	58 C	1,193.80	1,191.29	2.51	0.21%	59 C	1,167.80	1,164.30	3.50	0.30%	60 C	1,179.20	1,175.54	3.66	0.31%	
	300 rev	61 C	1,193.40	1,189.70	3.70	0.31%	62 C	1,181.00	1,176.39	4.61	0.39%	63 C	1,187.40	1,182.53	4.87	0.41%	
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	55 D	1,174.70	1,173.41	1.29	0.11%	56 D	1,193.30	1,191.03	2.27	0.19%	57 D	1,192.20	1,189.70	2.50	0.21%	
	200 rev	58 D	1,189.80	1,187.06	2.74	0.23%	59 D	1,182.00	1,178.34	3.66	0.31%	60 D	1,189.50	1,185.57	3.93	0.33%	
	300 rev	61 D	1,192.60	1,188.19	4.41	0.37%	62 D	1,184.20	1,178.87	5.33	0.45%	63 D	1,191.30	1,185.70	5.60	0.47%	

Tabla 3-7. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Susceptibilidad Térmica para condición de 12hrs a 45°C

<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA 12hrs a 55°C</b>																<b>PROBETAS ENUMERADAS DEL 91 AL 99</b>															
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.		Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.		Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.		Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida													
						Masa (gr)	%					Masa (gr)	%					Masa (gr)	%												
AC-20	100 rev	91	A	1,154.30	1,149.11	5.19	0.45%	92	A	1,161.10	1,154.83	6.27	0.54%	93	A	1,215.30	1,208.62	6.68	0.55%												
	200 rev	94	A	1,175.20	1,169.21	5.99	0.51%	95	A	1,178.60	1,171.76	6.84	0.58%	96	A	1,218.50	1,211.07	7.43	0.61%												
	300 rev	97	A	1,180.90	1,172.99	7.91	0.67%	98	A	1,192.00	1,183.42	8.58	0.72%	99	A	1,205.00	1,195.72	9.28	0.77%												
AC-30	100 rev	91	B	1,189.50	1,184.62	4.88	0.41%	92	B	1,184.70	1,178.78	5.92	0.50%	93	B	1,191.80	1,185.72	6.08	0.51%												
	200 rev	94	B	1,184.00	1,177.96	6.04	0.51%	95	B	1,193.40	1,186.24	7.16	0.60%	96	B	1,194.70	1,187.41	7.29	0.61%												
	300 rev	97	B	1,188.90	1,181.65	7.25	0.61%	98	B	1,204.30	1,195.87	8.43	0.70%	99	B	1,070.80	1,063.20	7.60	0.71%												
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	91	C	1,202.80	1,200.27	2.53	0.21%	92	C	1,218.80	1,216.12	2.68	0.22%	93	C	1,209.90	1,206.15	3.75	0.31%												
	200 rev	94	C	1,232.50	1,228.68	3.82	0.31%	95	C	1,206.40	1,202.18	4.22	0.35%	96	C	1,207.80	1,202.85	4.95	0.41%												
	300 rev	97	C	1,219.40	1,214.40	5.00	0.41%	98	C	1,222.10	1,216.84	5.26	0.43%	99	C	1,166.70	1,160.75	5.95	0.51%												
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	91	D	1,220.70	1,218.14	2.56	0.21%	92	D	1,218.40	1,214.74	3.66	0.30%	93	D	1,238.20	1,234.36	3.84	0.31%												
	200 rev	94	D	1,226.00	1,222.08	3.92	0.32%	95	D	1,211.50	1,206.65	4.85	0.40%	96	D	1,232.70	1,227.52	5.18	0.42%												
	300 rev	97	D	1,219.80	1,214.19	5.61	0.46%	98	D	1,200.90	1,194.42	6.48	0.54%	99	D	1,270.10	1,262.99	7.11	0.56%												

Tabla 3-8. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Susceptibilidad Térmica para condición de 12hrs a 55°C

SUSCEPTIBILIDAD TERMICA 12 hrs a 60°C														PROBETAS ENUMERADAS DEL 46 AL 54			
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%	
AC-20	100 rev	46 A	1,171.10	1,163.37	7.73	0.66%	47 A	1,178.30	1,170.29	8.01	0.68%	48 A	1,190.20	1,181.15	9.05	0.76%	
	200 rev	49 A	1,139.60	1,125.36	14.25	1.25%	50 A	1,195.50	1,180.20	15.30	1.28%	51 A	1,177.80	1,161.90	15.90	1.35%	
	300 rev	52 A	1,184.80	1,166.20	18.60	1.57%	53 A	1,207.40	1,188.32	19.08	1.58%	54 A	1,900.00	1,868.27	31.73	1.67%	
AC-30	100 rev	46 B	1,157.40	1,150.11	7.29	0.63%	47 B	1,182.10	1,173.71	8.39	0.71%	48 B	1,187.90	1,179.23	8.67	0.73%	
	200 rev	49 B	1,202.20	1,188.37	13.83	1.15%	50 B	1,192.80	1,178.13	14.67	1.23%	51 B	1,199.20	1,184.21	14.99	1.25%	
	300 rev	52 B	1,181.50	1,164.60	16.90	1.43%	53 B	1,189.60	1,172.11	17.49	1.47%	54 B	1,193.80	1,175.53	18.27	1.53%	
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	46 C	1,188.90	1,184.74	4.16	0.35%	47 C	1,174.00	1,169.54	4.46	0.38%	48 C	1,176.10	1,170.81	5.29	0.45%	
	200 rev	49 C	1,165.70	1,159.04	6.66	0.57%	50 C	1,181.60	1,174.63	6.97	0.59%	51 C	1,198.90	1,190.86	8.04	0.67%	
	300 rev	52 C	1,188.60	1,176.36	12.24	1.03%	53 C	1,184.30	1,171.86	12.44	1.05%	54 C	1,193.50	1,180.01	13.49	1.13%	
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	46 D	1,184.10	1,178.65	5.45	0.46%	47 D	1,171.20	1,165.58	5.62	0.48%	48 D	1,190.00	1,183.34	6.66	0.56%	
	200 rev	49 D	1,178.30	1,169.23	9.07	0.77%	50 D	1,183.00	1,173.65	9.35	0.79%	51 D	1,174.20	1,163.98	10.22	0.87%	
	300 rev	52 D	1,187.70	1,174.04	13.66	1.15%	53 D	1,191.20	1,177.26	13.94	1.17%	54 D	1,159.30	1,144.81	14.49	1.25%	

Tabla 3-9. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Susceptibilidad Térmica para condición de 12hrs a 60°C

<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA 12hrs a 65°C</b>																<b>PROBETAS ENUMERADAS DEL 109 AL 117</b>			
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.		Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida			
						Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%		
AC-20	100 rev	109	A	1,194.60	1,185.04	9.56	0.80%	110	A	1,183.10	1,172.69	10.41	0.88%	111	A	1,186.50	1,175.82	10.68	0.90%
	200 rev	112	A	1,186.10	1,169.61	16.49	1.39%	113	A	1,189.80	1,172.31	17.49	1.47%	114	A	1,194.20	1,176.41	17.79	1.49%
	300 rev	115	A	1,187.90	1,167.71	20.19	1.70%	116	A	1,187.60	1,166.46	21.14	1.78%	117	A	1,196.10	1,174.57	21.53	1.80%
AC-30	100 rev	109	B	1,193.40	1,184.45	8.95	0.75%	110	B	1,196.10	1,186.65	9.45	0.79%	111	B	1,195.00	1,184.84	10.16	0.85%
	200 rev	112	B	1,184.30	1,168.90	15.40	1.30%	113	B	1,190.20	1,174.61	15.59	1.31%	114	B	1,198.20	1,181.43	16.77	1.40%
	300 rev	115	B	1,185.60	1,167.46	18.14	1.53%	116	B	1,193.80	1,174.58	19.22	1.61%	117	B	1,185.00	1,165.68	19.32	1.63%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	109	C	1,190.00	1,184.05	5.95	0.50%	110	C	1,190.80	1,184.61	6.19	0.52%	111	C	1,189.00	1,181.87	7.13	0.60%
	200 rev	112	C	1,160.00	1,151.53	8.47	0.73%	113	C	1,177.40	1,168.69	8.71	0.74%	114	C	1,179.60	1,169.81	9.79	0.83%
	300 rev	115	C	1,194.30	1,181.16	13.14	1.10%	116	C	1,183.50	1,170.36	13.14	1.11%	117	C	1,194.50	1,180.17	14.33	1.20%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	109	D	1,192.00	1,184.37	7.63	0.64%	110	D	1,185.00	1,176.94	8.06	0.68%	111	D	1,196.20	1,187.35	8.85	0.74%
	200 rev	112	D	1,198.00	1,186.74	11.26	0.94%	113	D	1,186.00	1,174.50	11.50	0.97%	114	D	1,198.20	1,185.74	12.46	1.04%
	300 rev	115	D	1,198.30	1,182.60	15.70	1.31%	116	D	1,193.00	1,177.25	15.75	1.32%	117	D	1,185.30	1,168.59	16.71	1.41%

Tabla 3-10. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Susceptibilidad Térmica para condición de 12hrs a 65°C

<b>SUSCEPTIBILIDAD TERMICA 12hrs a 75°C</b>																	<b>PROBETAS ENUMERADAS DEL 100 AL 108</b>																
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida																		
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%																	
AC-20	100 rev	100 A	1,209.80	1,196.98	12.82	1.06%	101 B	1,216.70	1,202.83	13.87	1.14%	102 B	1,183.10	1,169.38	13.72	1.16%																	
	200 rev	103 A	1,195.00	1,175.40	19.60	1.64%	104 B	1,212.20	1,191.35	20.85	1.72%	105 B	1,176.40	1,155.93	20.47	1.74%																	
	300 rev	106 A	1,189.40	1,168.23	21.17	1.78%	107 B	1,196.60	1,174.34	22.26	1.86%	108 B	1,188.10	1,165.76	22.34	1.88%																	
AC-30	100 rev	100 B	1,222.30	1,210.08	12.22	1.00%	101 A	1,215.50	1,203.22	12.28	1.01%	102 A	1,195.30	1,182.15	13.15	1.10%																	
	200 rev	103 B	1,211.60	1,193.79	17.81	1.47%	104 A	1,210.80	1,192.88	17.92	1.48%	105 A	1,196.30	1,177.52	18.78	1.57%																	
	300 rev	106 B	1,214.40	1,194.12	20.28	1.67%	107 A	1,209.30	1,187.77	21.53	1.78%	108 A	1,178.40	1,157.54	20.86	1.77%																	
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	100 C	1,208.30	1,199.84	8.46	0.70%	101 C	1,216.90	1,207.41	9.49	0.78%	102 C	1,189.50	1,179.98	9.52	0.80%																	
	200 rev	103 C	1,213.90	1,202.73	11.17	0.92%	104 C	1,213.30	1,201.05	12.25	1.01%	105 C	1,206.50	1,194.19	12.31	1.02%																	
	300 rev	106 C	1,253.90	1,237.22	16.68	1.33%	107 C	1,177.00	1,160.29	16.71	1.42%	108 C	1,182.60	1,165.69	16.91	1.43%																	
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	100 D	1,181.50	1,172.52	8.98	0.76%	101 D	1,170.60	1,161.59	9.01	0.77%	102 D	1,208.00	1,197.61	10.39	0.86%																	
	200 rev	103 D	1,188.40	1,175.57	12.83	1.08%	104 D	1,188.00	1,175.05	12.95	1.09%	105 D	1,195.50	1,181.39	14.11	1.18%																	
	300 rev	106 D	1,192.40	1,174.63	17.77	1.49%	107 D	1,178.00	1,159.39	18.61	1.58%	108 D	1,230.50	1,210.94	19.56	1.59%																	

Tabla 3-11. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Susceptibilidad Térmica para condición de 12hrs a 75°C

Con los resultados de los Porcentajes de Pérdida obtenidos mediante la Prueba de Desgaste, para el Asfalto AC-20 se elabora un resumen en Tabla 3-12 de los datos con los promedios.

TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO
CEMENTO ASFALTICO AC-20	100 REVOLUCIONES	25	0.33%
		35	0.34%
		45	0.40%
		55	0.51%
		60	0.70%
		65	0.86%
		75	1.16%
	200 REVOLUCIONES	25	0.39%
		35	0.40%
		45	0.45%
		55	0.57%
		60	1.29%
		65	1.45%
		75	1.70%
	300 REVOLUCIONES	25	0.56%
		35	0.57%
		45	0.61%
		55	0.72%
		60	1.61%
		65	1.76%
		75	1.84%

Tabla 3-12. Pérdida en ensayo Cántabro. Diferente Temperatura y Grado de Severidad. Cemento Asfaltico AC-20.

Una vez ordenados los resultados se pueden obtener los gráficos mostrando la tendencia de los resultados. En los gráficos 3-3 y 3-4 se puede observar el comportamiento del Asfalto AC-20 dentro de la mezcla asfáltica.

El gráfico 3-3 representa de manera más visible el incremento de porcentaje de pérdidas para las tres diferentes severidades. También se puede apreciar que a partir de los 45°C tiene a despegar el gráfico, haciendo una curva más inclinada al ensayarse a 100 revoluciones. Esta curva despegue de forma más pronunciada a partir de los 55°C para los ensayos a 200 y 300 revoluciones. A la vez se puede notar que el desgaste a corto plazo (espacio entre la curva de 100 y 200 revoluciones) es mucho mayor que a largo plazo (espacio entre la curva de 200 y 300 revoluciones).

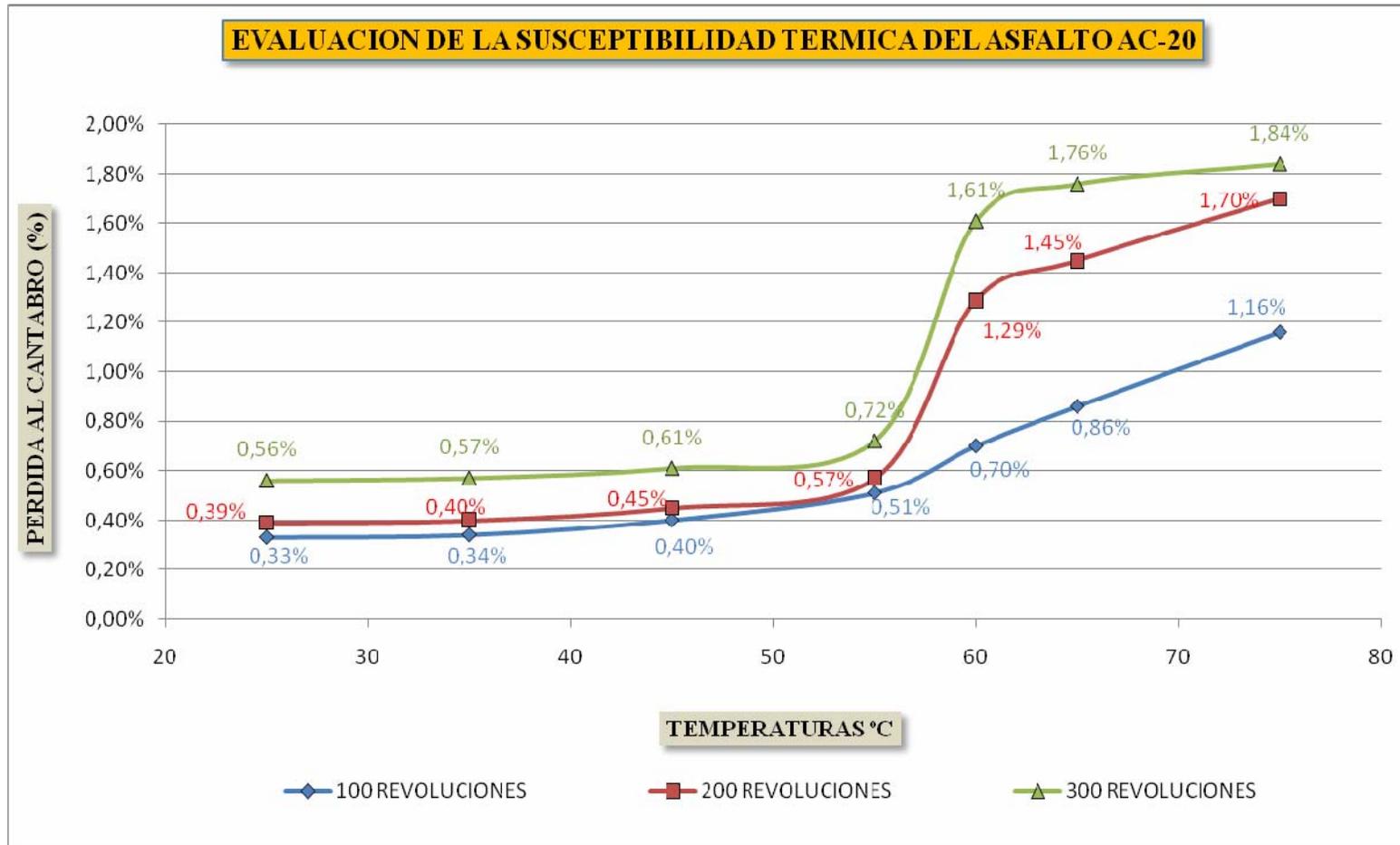


Gráfico 3-3. Comportamiento del cemento asfáltico AC-20 evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

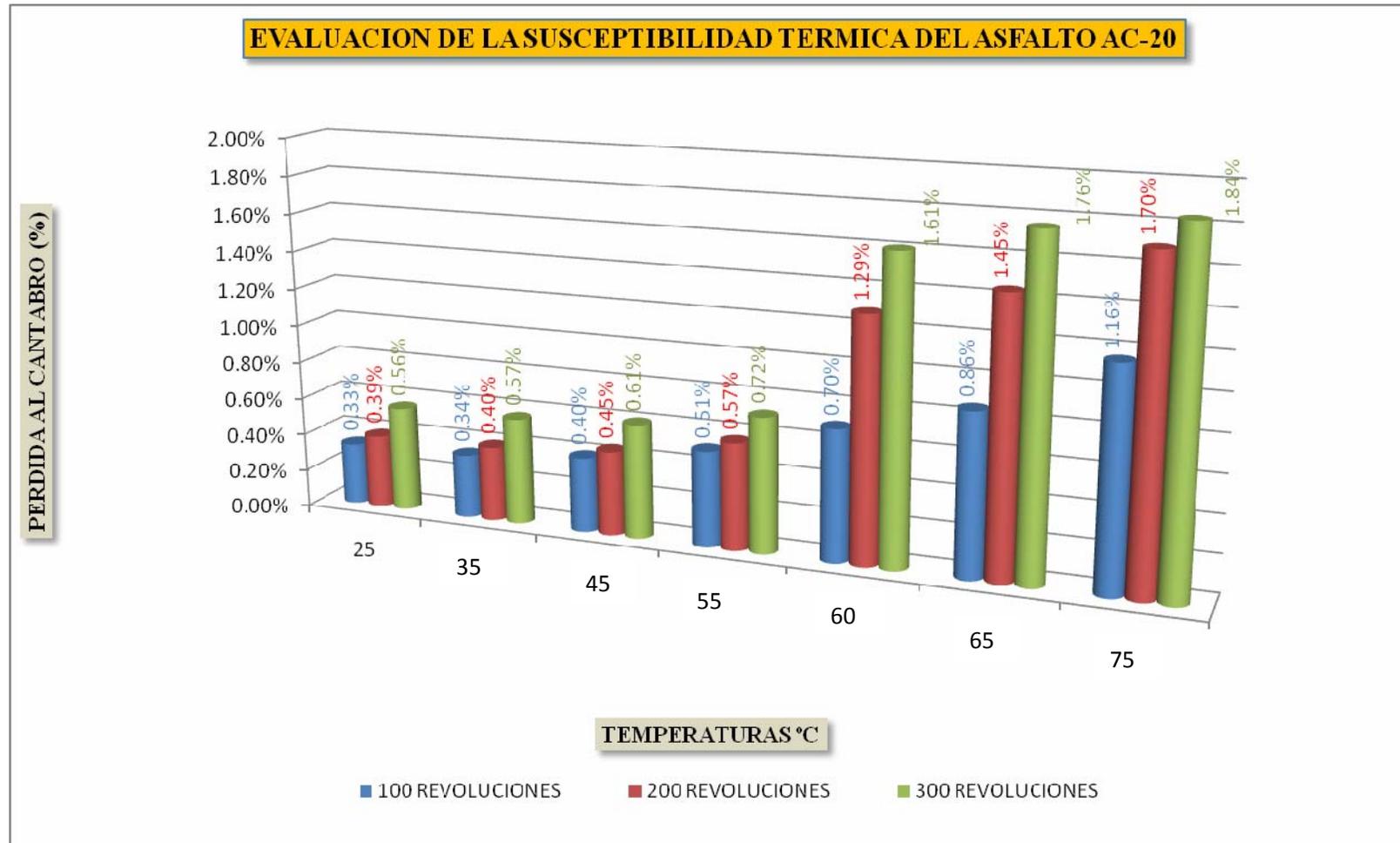


Gráfico 3-4. Comportamiento del cemento asfáltico AC-20 evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

Con los resultados de los Porcentajes de Pérdida obtenidos mediante la Prueba de Desgaste, para el Asfalto AC-30 se elabora un resumen en Tabla 3-13 de los datos con los promedios.

TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO
CEMENTO ASFALTICO AC-30	100 REVOLUCIONES	25	0.29%
		35	0.31%
		45	0.35%
		55	0.47%
		60	0.69%
		65	0.80%
		75	1.04%
	200 REVOLUCIONES	25	0.37%
		35	0.39%
		45	0.45%
		55	0.57%
		60	1.21%
		65	1.34%
		75	1.51%
	300 REVOLUCIONES	25	0.50%
		35	0.54%
		45	0.57%
		55	0.67%
		60	1.48%
		65	1.59%
		75	1.74%

Tabla 3-13. Tabla Resumen de pérdidas en ensayo Cántabro para evaluar Susceptibilidad Térmica.

Al igual que para el Asfalto AC-20 se puede observar, al obtener los gráficos 3-5 y 3-6, que la tendencia de los resultados es similar, variando únicamente los valores, que para el Asfalto AC-30 son menores.

Estas curvas también se ven afectadas al sobrepasar la temperatura de los 45°C, incrementándose notablemente después del punto de 55°C. Este asfalto brinda mejores resultados que el AC-20. Afirmamos nuevamente que el hecho que el Asfalto AC-20 no proporcione los mejores resultados, no hay forma de descalificarlo dado que solamente se están comparando los mejores resultados que son arrojados por cada tipo de asfalto, por lo que solo es un estudio de comparación.

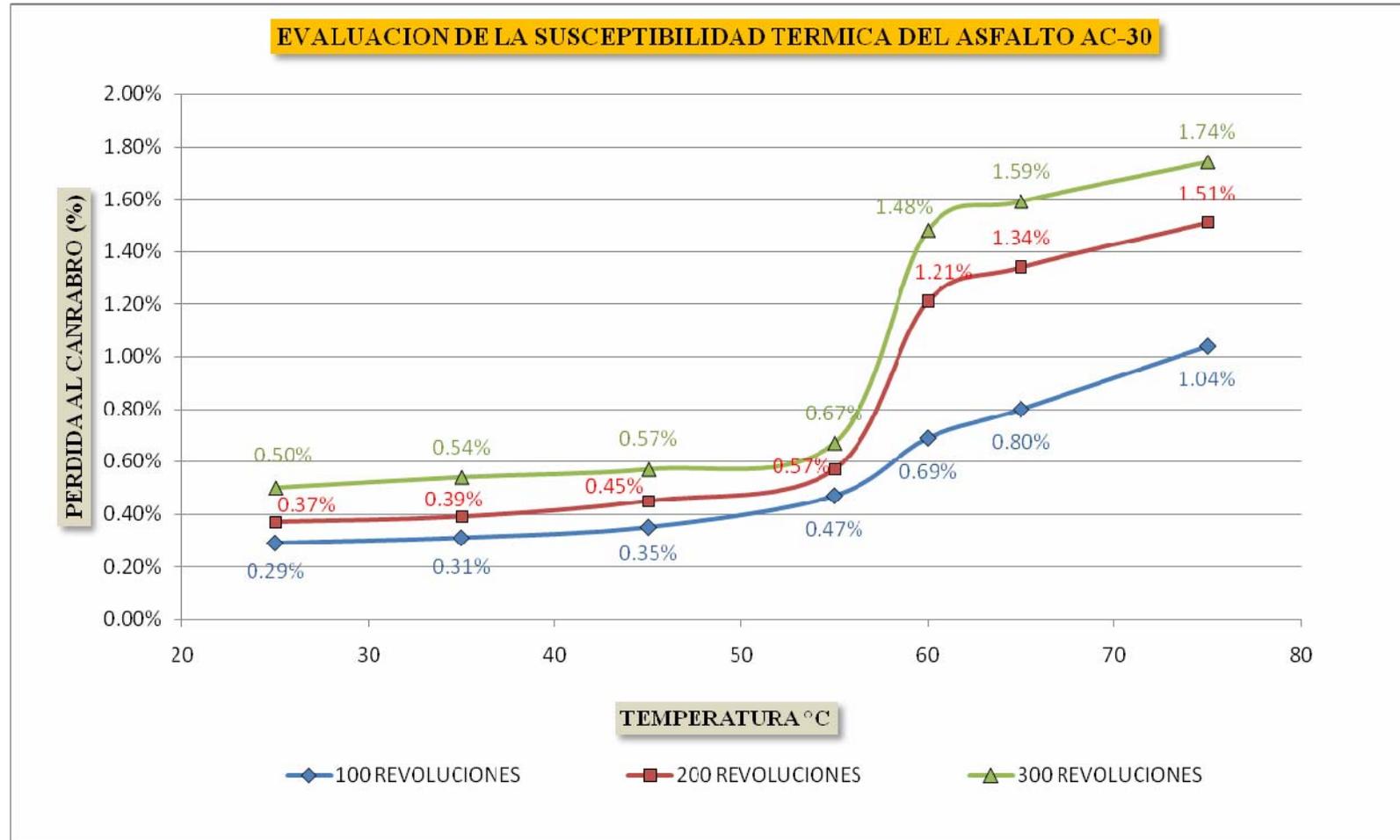


Gráfico 3-5 Comportamiento del cemento asfáltico AC-30 evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

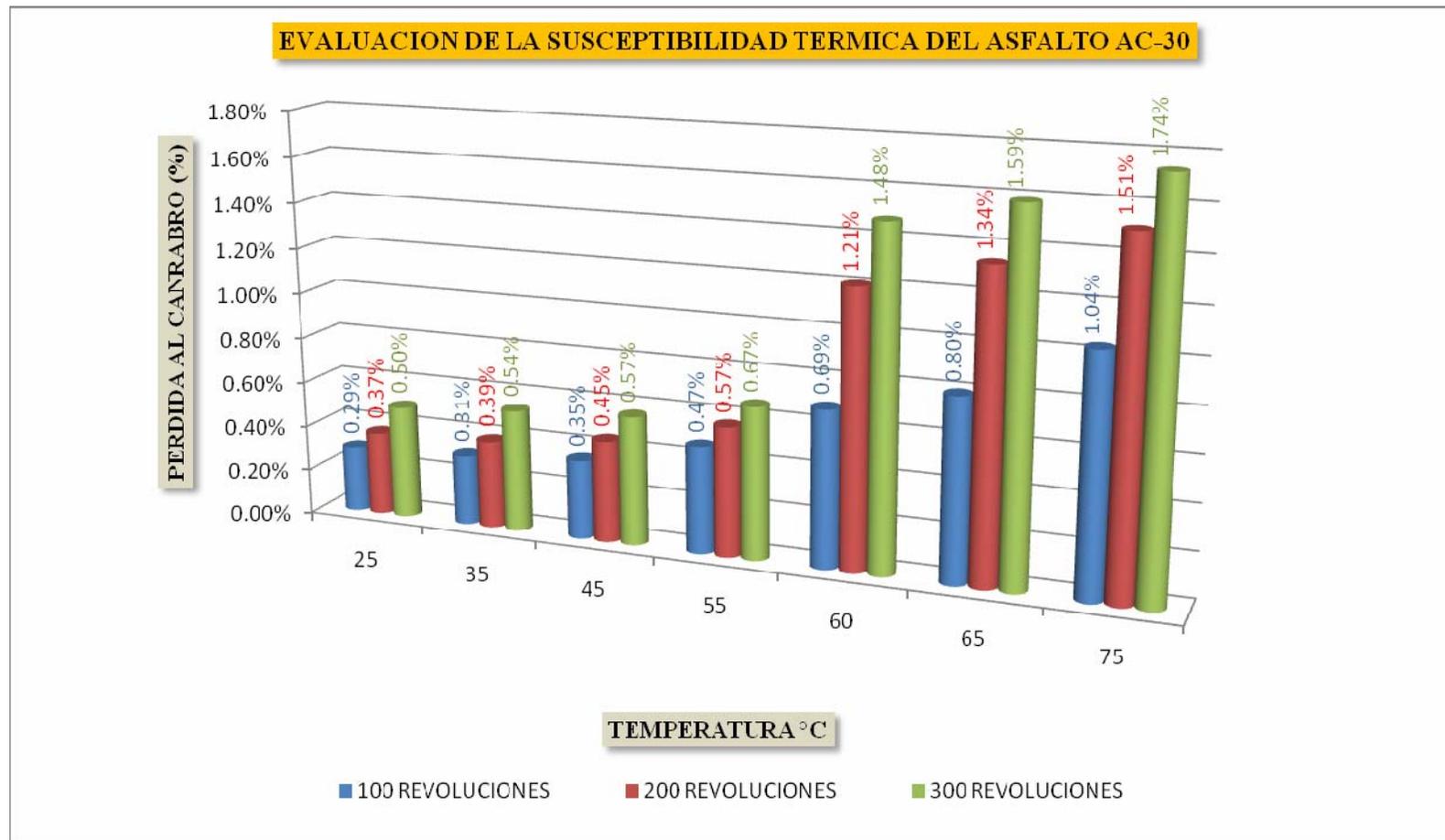


Gráfico 3-6 Comportamiento del cemento asfáltico AC-30 evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

Al igual que para el Asfalto AC-20 y AC-30 se elabora un resumen en la Tabla 3-14 con los resultados de los Porcentajes de Pérdida para el Asfalto Modificado Tipo I-D.

TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO
CEMETO ASFALTICO TIPO I-D	100 REVOLUCIONES	25	0.09%
		35	0.10%
		45	0.15%
		55	0.25%
		60	0.39%
		65	0.54%
		75	0.76%
	200 REVOLUCIONES	25	0.20%
		35	0.22%
		45	0.27%
		55	0.36%
		60	0.61%
		65	0.77%
		75	0.98%
	300 REVOLUCIONES	25	0.31%
		35	0.31%
		45	0.37%
		55	0.45%
		60	1.07%
		65	1.14%
		75	1.39%

Tabla 3-14. Tabla Resumen de pérdidas en ensayo Cántabro para evaluar Susceptibilidad Térmica.

En los gráficos 3-7 y 3-8 se puede observar el comportamiento del Asfalto Modificado Tipo I-D a las diferentes temperaturas que fue sometida para evaluar la susceptibilidad térmica.

El comportamiento en general no es diferente al que han tenido los asfaltos AC-20 y AC-30, es muy similar solo que no manifiesta curvas tan pronunciadas dado que los valores de las pérdidas han sido menores. Se puede apreciar que las curvas que representan las 3 severidades van incrementando de manera constante pero sufren un cambio más brusco a 60°C. En términos generales se puede apreciar que este asfalto ha tenido mejor comportamiento que los dos asfaltos anteriores.

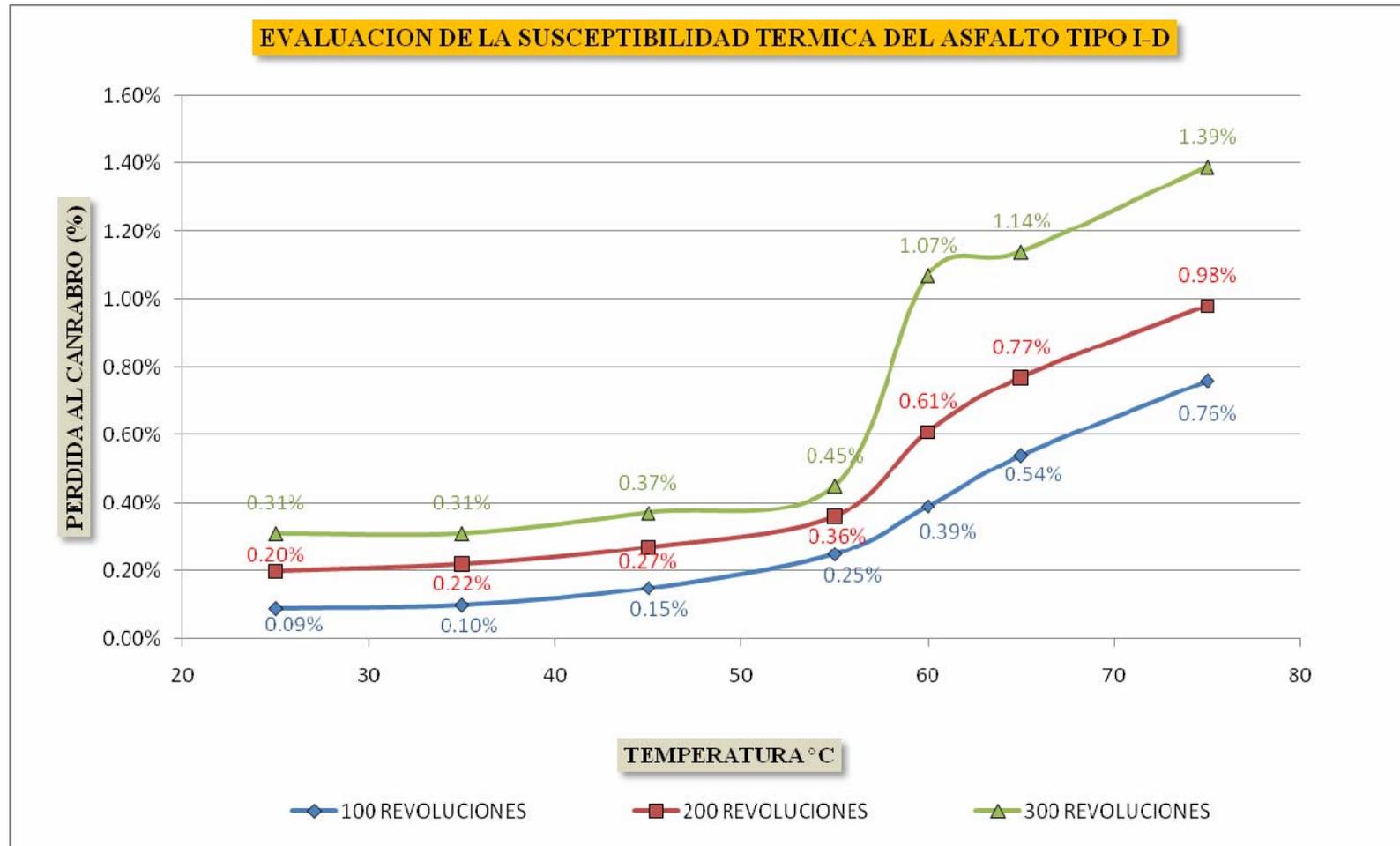


Gráfico 3-7 Comportamiento del cemento asfáltico modificado Tipo I-D evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

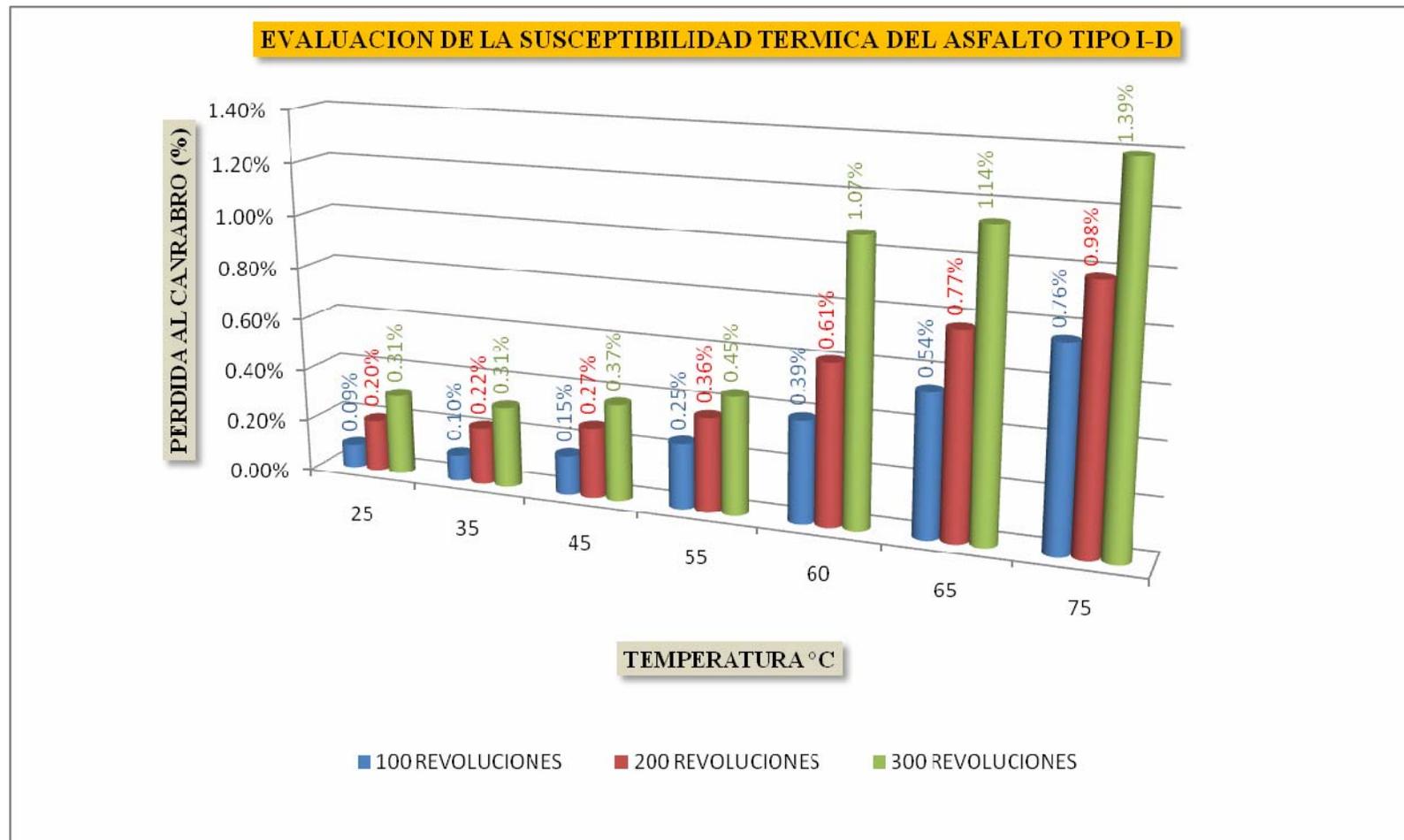


Gráfico 3-8 Comportamiento del cemento asfáltico modificado Tipo I-D evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

Finalmente para el ensayo de Susceptibilidad Térmica se reúnen los resultados de porcentajes de pérdida promedio en la Tabla 3-15 para el Asfalto Modificado Tipo III-D.

TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO
CEMENTO ASFALTICO TIPO III-D	100 REVOLUCIONES	25	0.13%
		35	0.11%
		45	0.17%
		55	0.27%
		60	0.50%
		65	0.69%
		75	0.80%
	200 REVOLUCIONES	25	0.19%
		35	0.22%
		45	0.29%
		55	0.38%
		60	0.81%
		65	0.98%
		75	1.12%
	300 REVOLUCIONES	25	0.38%
		35	0.37%
		45	0.43%
		55	0.52%
		60	1.19%
		65	1.35%
		75	1.55%

Tabla 3-15 Tabla Resumen de pérdidas en ensayo Cántabro para evaluar Susceptibilidad Térmica.

En los gráficos 3-9 y 3-10 se puede observar el comportamiento del Asfalto Modificado Tipo III-D, que al igual que los 3 asfaltos anteriores, tiene un comportamiento en que incrementa su porcentaje de pérdida conforme aumenta la temperatura a la cual se expuso durante 12 horas.

Se puede observar que a comparación con los asfaltos AC-20 y AC-30 este asfalto modificado demuestra mejores resultados, pero presenta mayores pérdidas en comparación con el Asfalto Modificado Tipo I-D. Por lo tanto se puede concluir que para el ensayo de Susceptibilidad Térmica, el Asfalto Modificado Tipo I-D es el que presenta los mejores resultados.

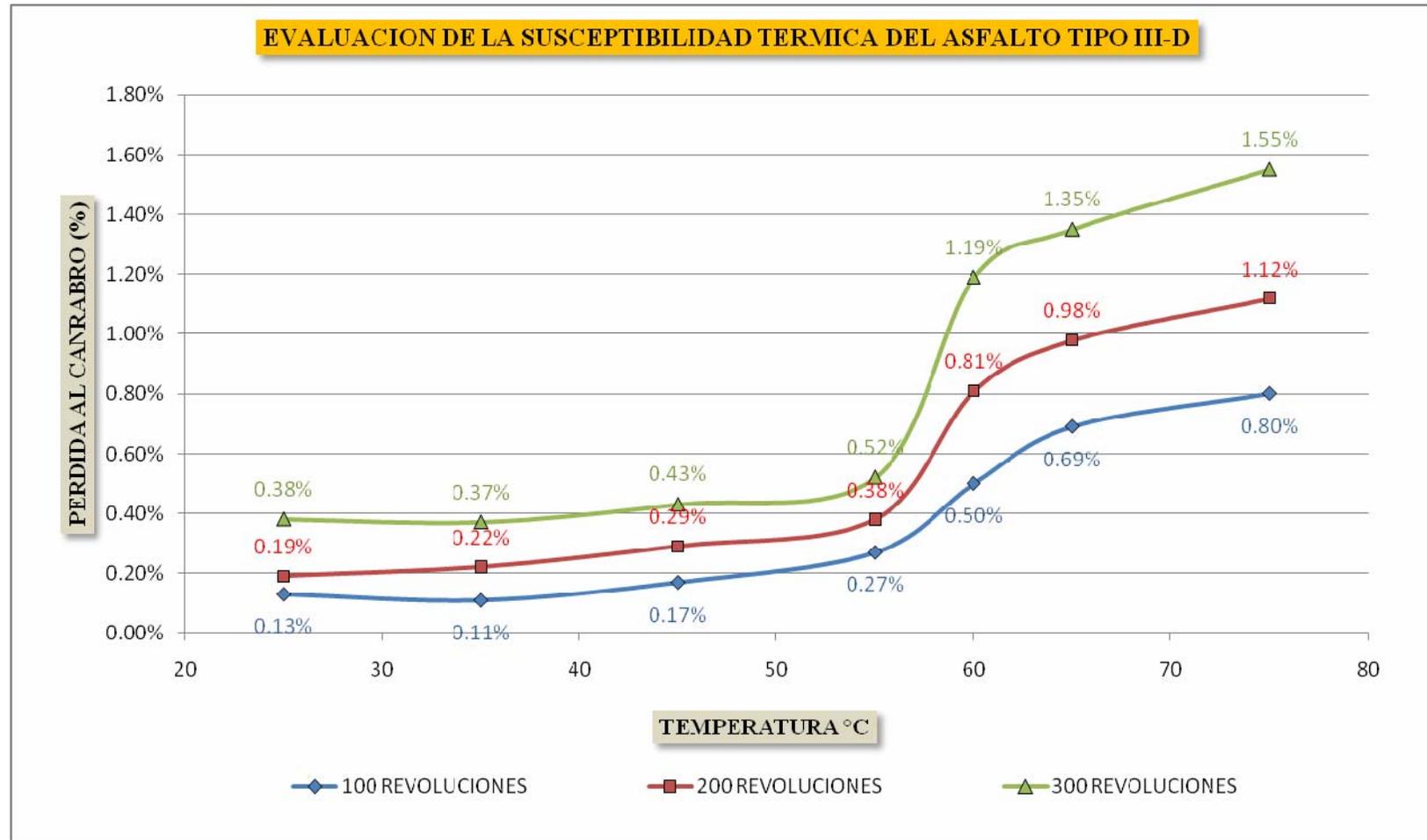


Gráfico 3-9 Comportamiento del cemento asfáltico modificado Tipo III-D evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

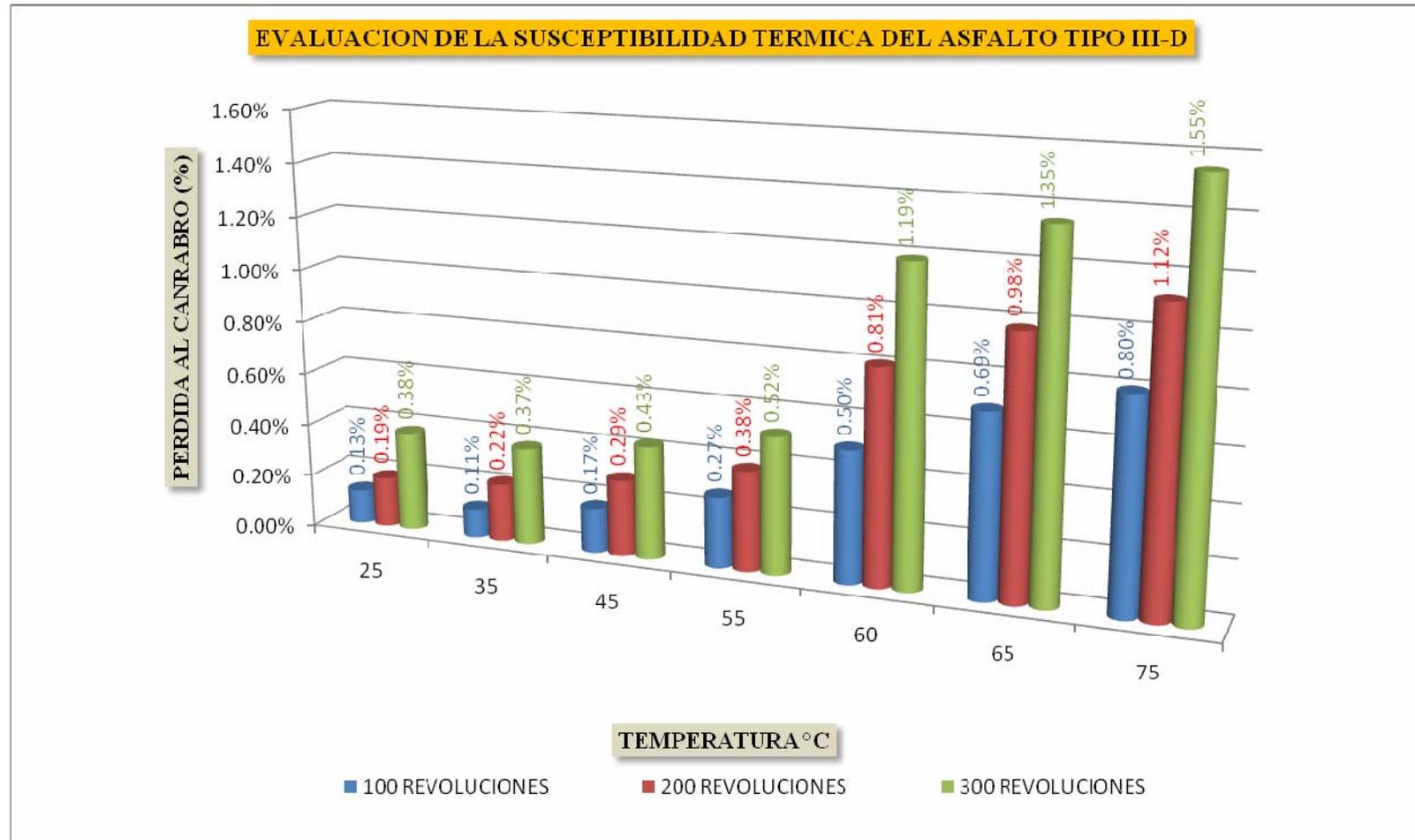


Gráfico 3-10 Comportamiento del cemento asfáltico modificado Tipo III-D evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

Para efectos de comparar los resultados de los 4 tipos de asfaltos para el ensayo de Susceptibilidad Térmica, se han elaborado gráficos en los que se puede comparar los resultados entre sí. En la Tabla 3-16 se resumen los resultados con los promedios para los 4 asfaltos ensayados a 100 revoluciones, en la Tabla 3-17 se resumen los resultados con los promedios para los 4 asfaltos ensayados a 200 revoluciones y en la Tabla 3-18 se resumen los resultados con los promedios para los 4 asfaltos ensayados a 300 revoluciones.

GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO	GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO
AC-20	25	0.33%	TIPO I-D	25	0.09%
	35	0.34%		35	0.10%
	45	0.40%		45	0.15%
	55	0.51%		55	0.25%
	60	0.70%		60	0.39%
	65	0.86%		65	0.54%
	75	1.16%		75	0.76%
AC-30	25	0.29%	TIPO III-D	25	0.13%
	35	0.31%		35	0.11%
	45	0.35%		45	0.17%
	55	0.47%		55	0.27%
	60	0.69%		60	0.50%
	65	0.80%		65	0.69%
	75	1.04%		75	0.80%

Tabla 3-16 Tabla Resumen de pérdidas en ensayo Cántabro para evaluar Susceptibilidad Térmica de todos los cementos asfálticos a 100 revoluciones.

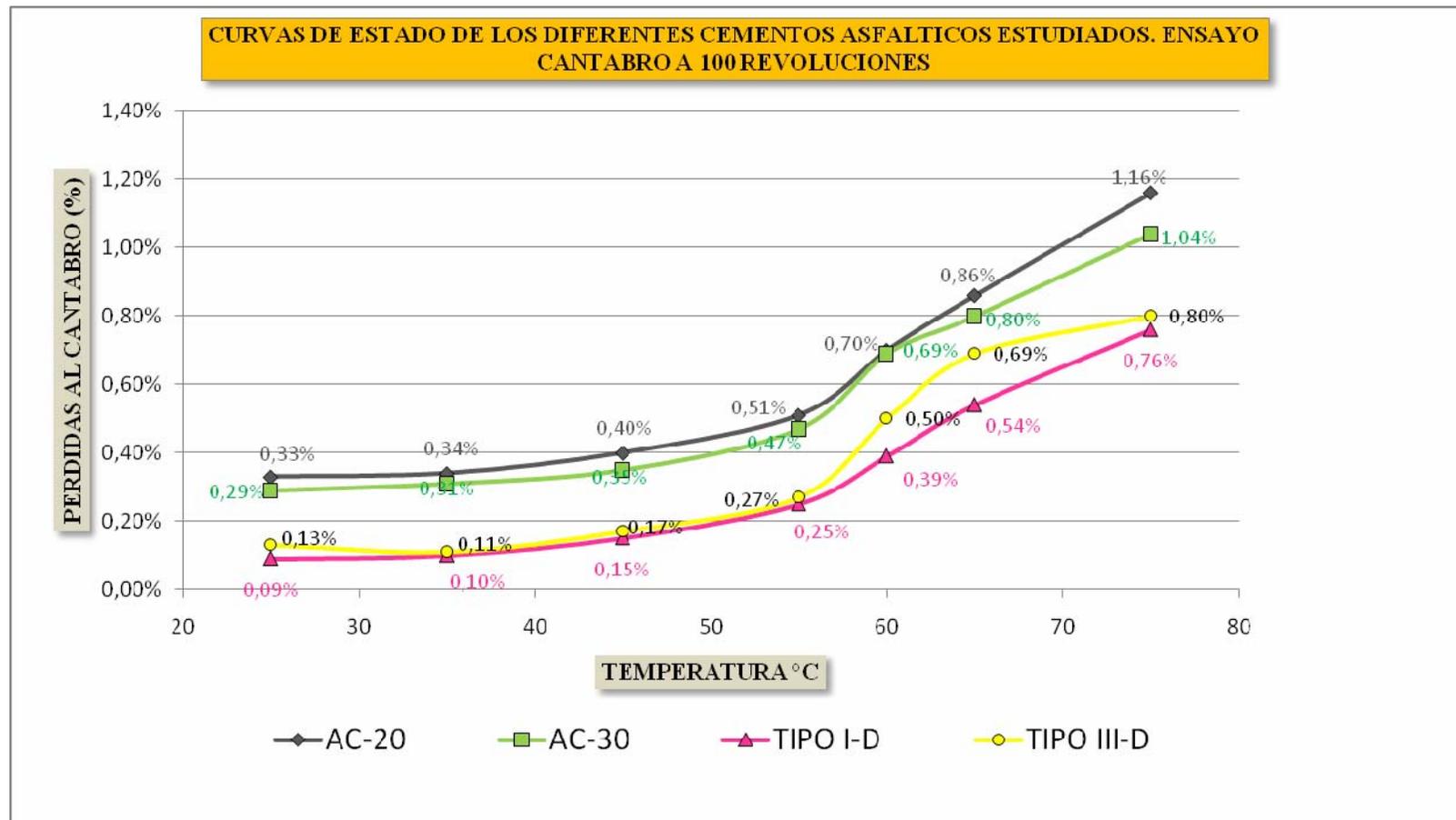


Gráfico 3-11 Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a 100 revoluciones, Diagrama de Dispersión.

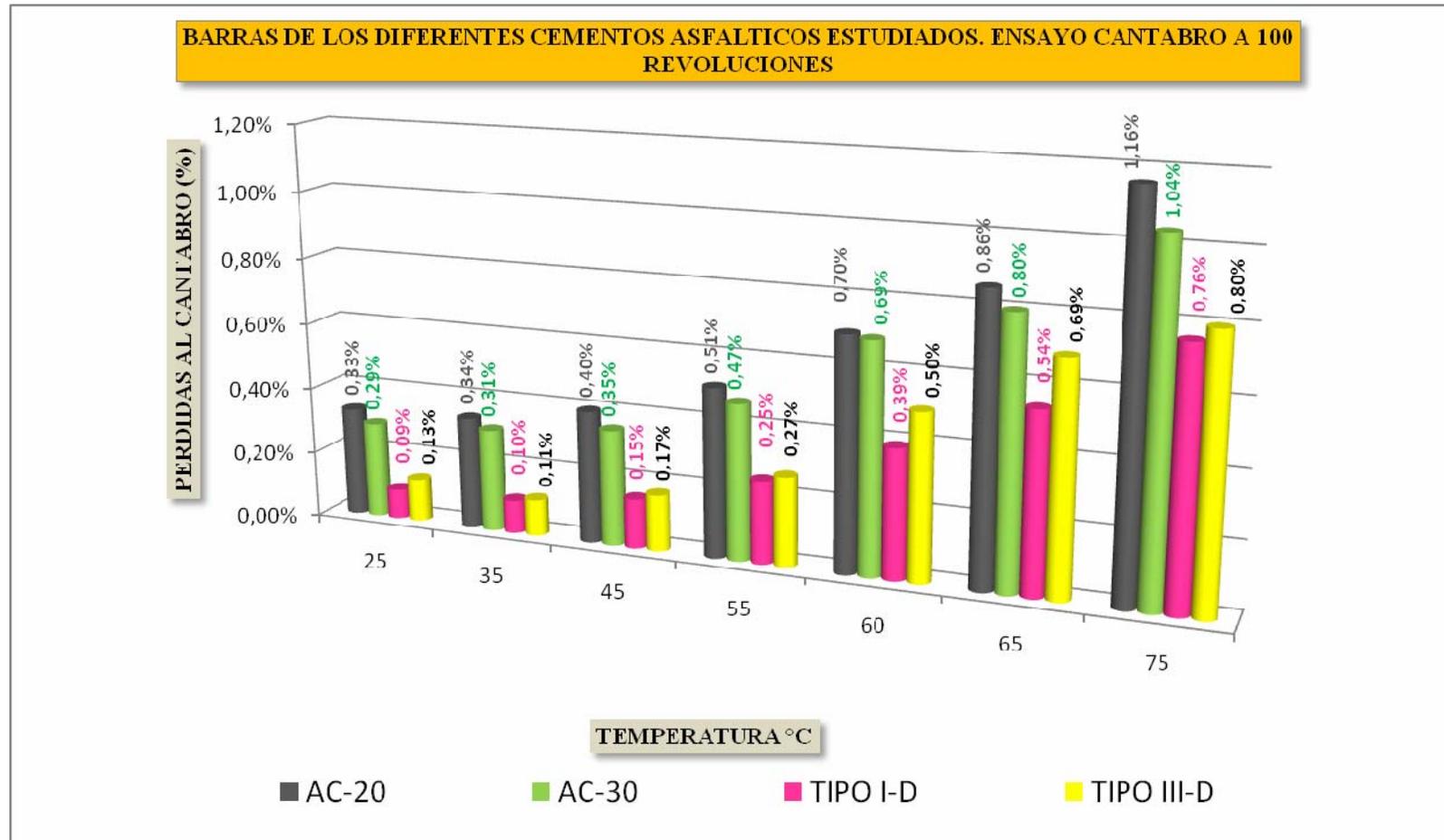


Gráfico 3-12 Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a 100 revoluciones, Diagrama de Barras.

GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO	GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO
AC-20	25	0.39%	TIPO I-D	25	0.20%
	35	0.40%		35	0.22%
	45	0.45%		45	0.27%
	55	0.57%		55	0.36%
	60	1.29%		60	0.61%
	65	1.45%		65	0.77%
	75	1.70%		75	0.98%
AC-30	25	0.37%	TIPO III-D	25	0.19%
	35	0.39%		35	0.22%
	45	0.45%		45	0.29%
	55	0.57%		55	0.38%
	60	1.21%		60	0.81%
	65	1.34%		65	0.98%
	75	1.51%		75	1.12%

Tabla 3-17. Tabla Resumen de pérdidas en ensayo Cántabro para evaluar Susceptibilidad Térmica de todos los cementos asfálticos a 200 revoluciones.

GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO	GRADO DE SEVERIDAD	TEMPERATURA °C	PERDIDAS POR DESGASTE AL CANTABRO
AC-20	25	0.56%	TIPO I-D	25	0.31%
	35	0.57%		35	0.31%
	45	0.61%		45	0.37%
	55	0.72%		55	0.45%
	60	1.61%		60	1.07%
	65	1.76%		65	1.14%
	75	1.84%		75	1.39%
AC-30	25	0.50%	TIPO III-D	25	0.38%
	35	0.54%		35	0.37%
	45	0.57%		45	0.43%
	55	0.67%		55	0.52%
	60	1.48%		60	1.19%
	65	1.59%		65	1.35%
	75	1.74%		75	1.55%

Tabla 3-18 Tabla Resumen de pérdidas en ensayo Cántabro para evaluar Susceptibilidad Térmica de todos los cementos asfálticos a 300 revoluciones.

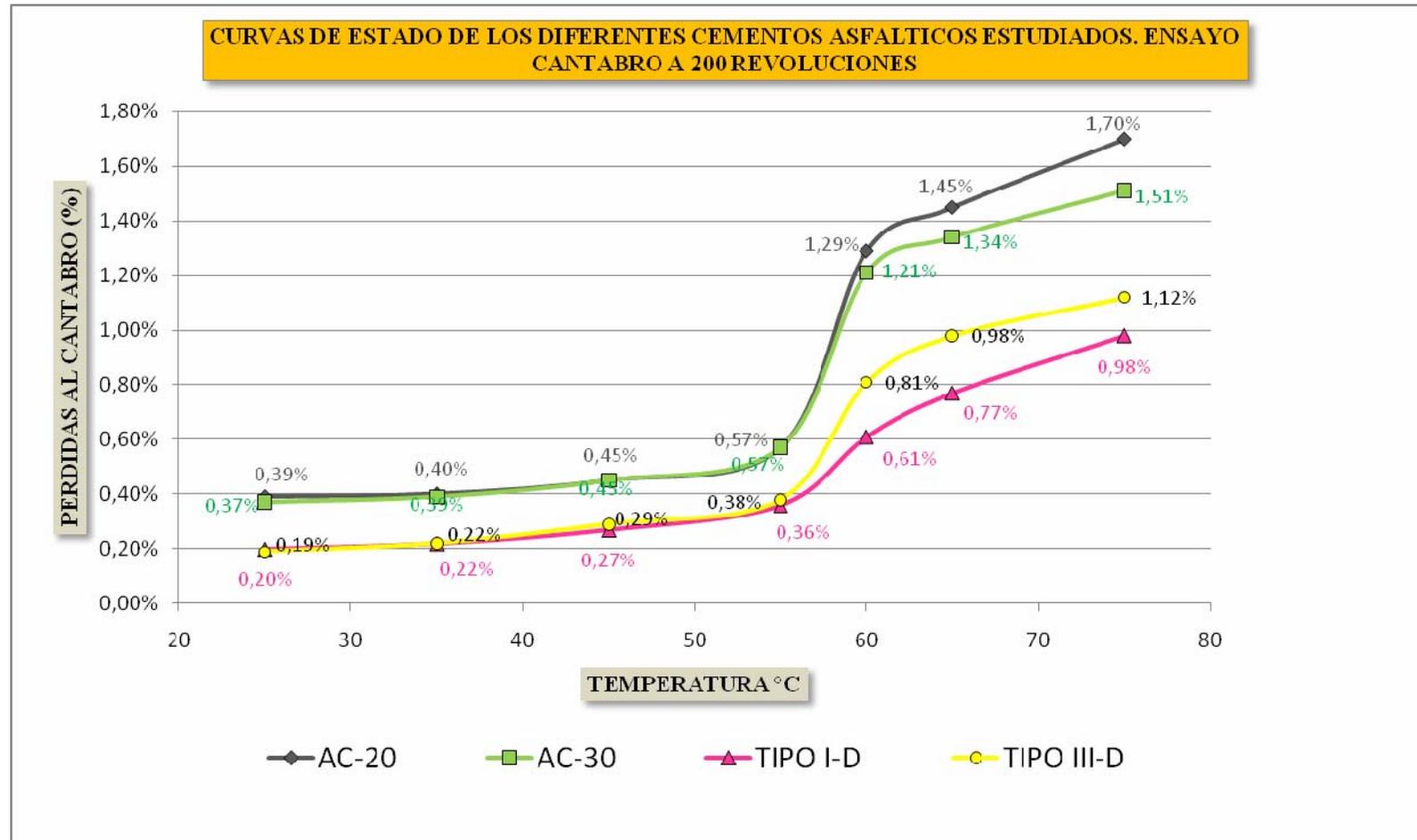


Gráfico 3-13 Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a 200 revoluciones, Diagrama de Dispersión.

**BARRAS DE LOS DIFERENTES CEMENTOS ASFÁLTICOS ESTUDIADOS. ENSAYO CANTABRO A 200 REVOLUCIONES**

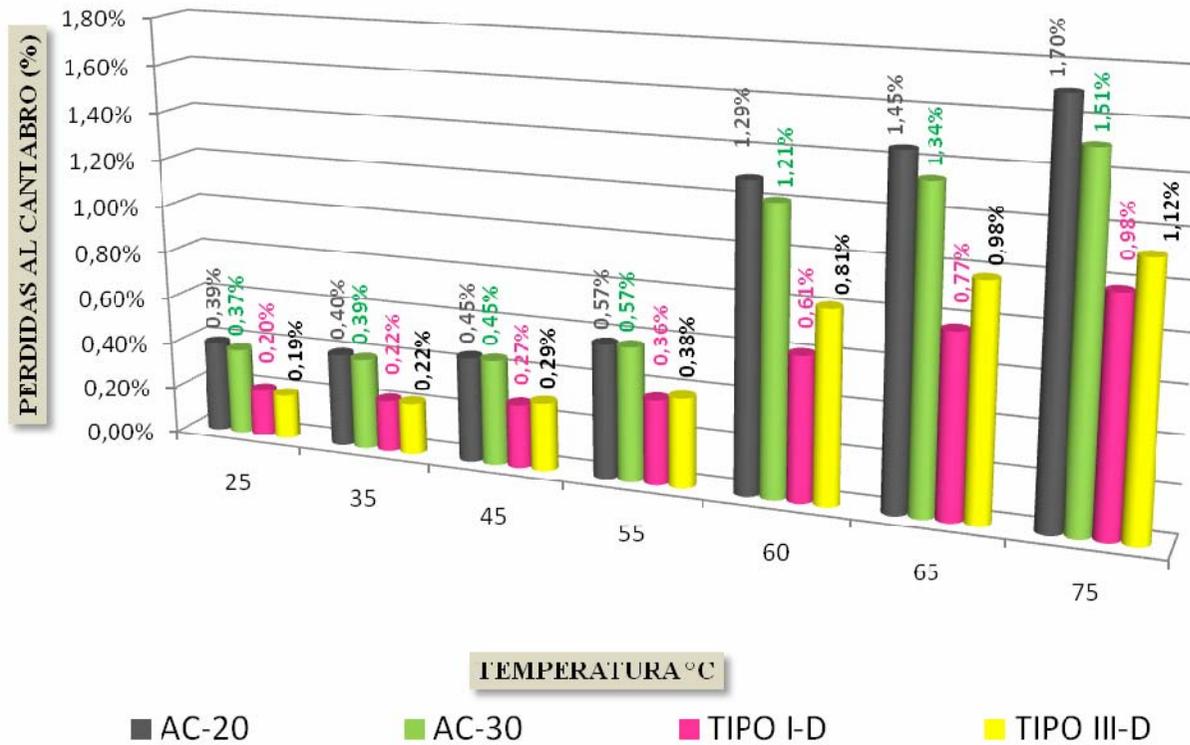


Gráfico 3-14 Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a 200 revoluciones, Diagrama de Barras.

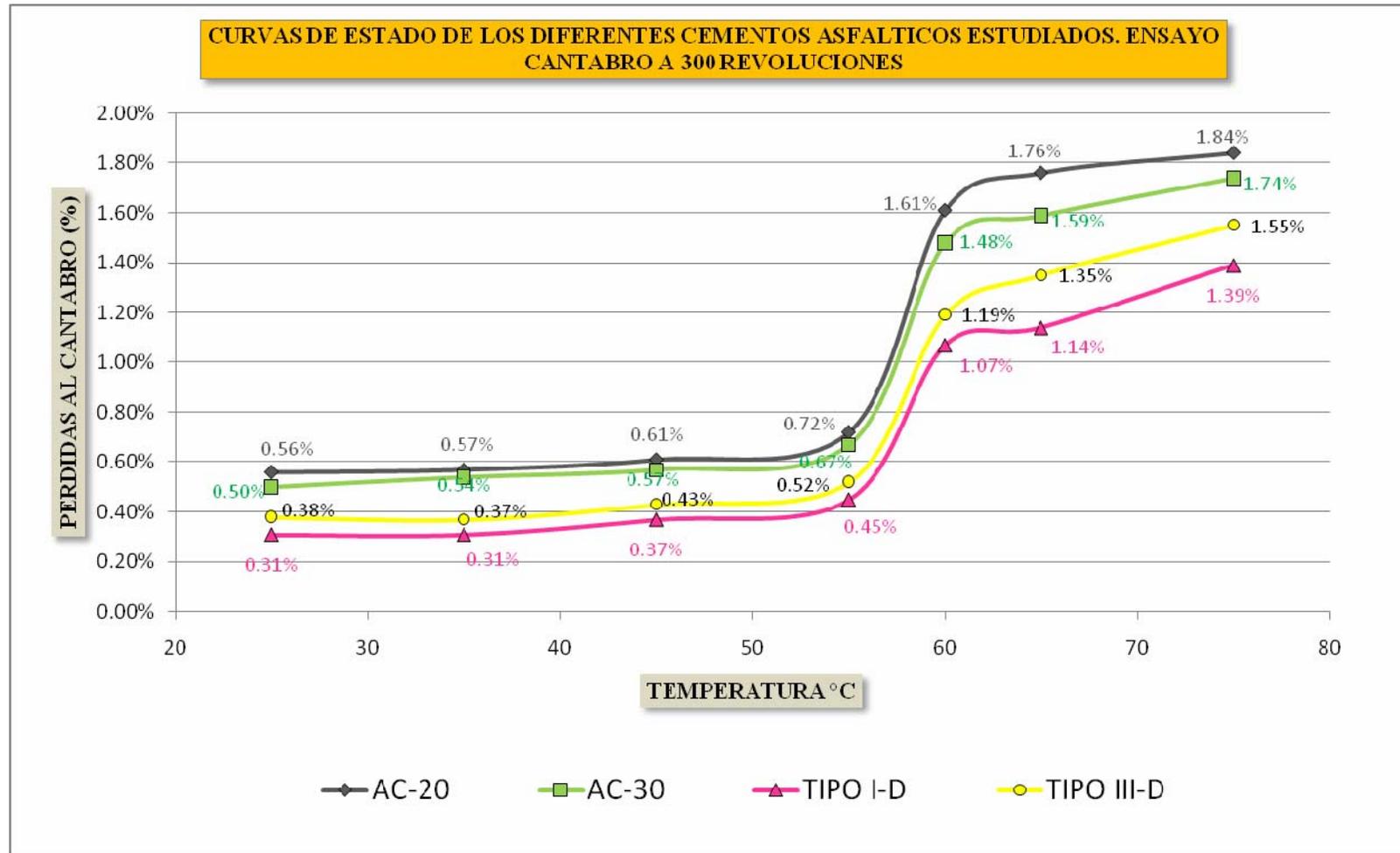


Gráfico 3-15 Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a 300 revoluciones, Diagrama de Dispersión.

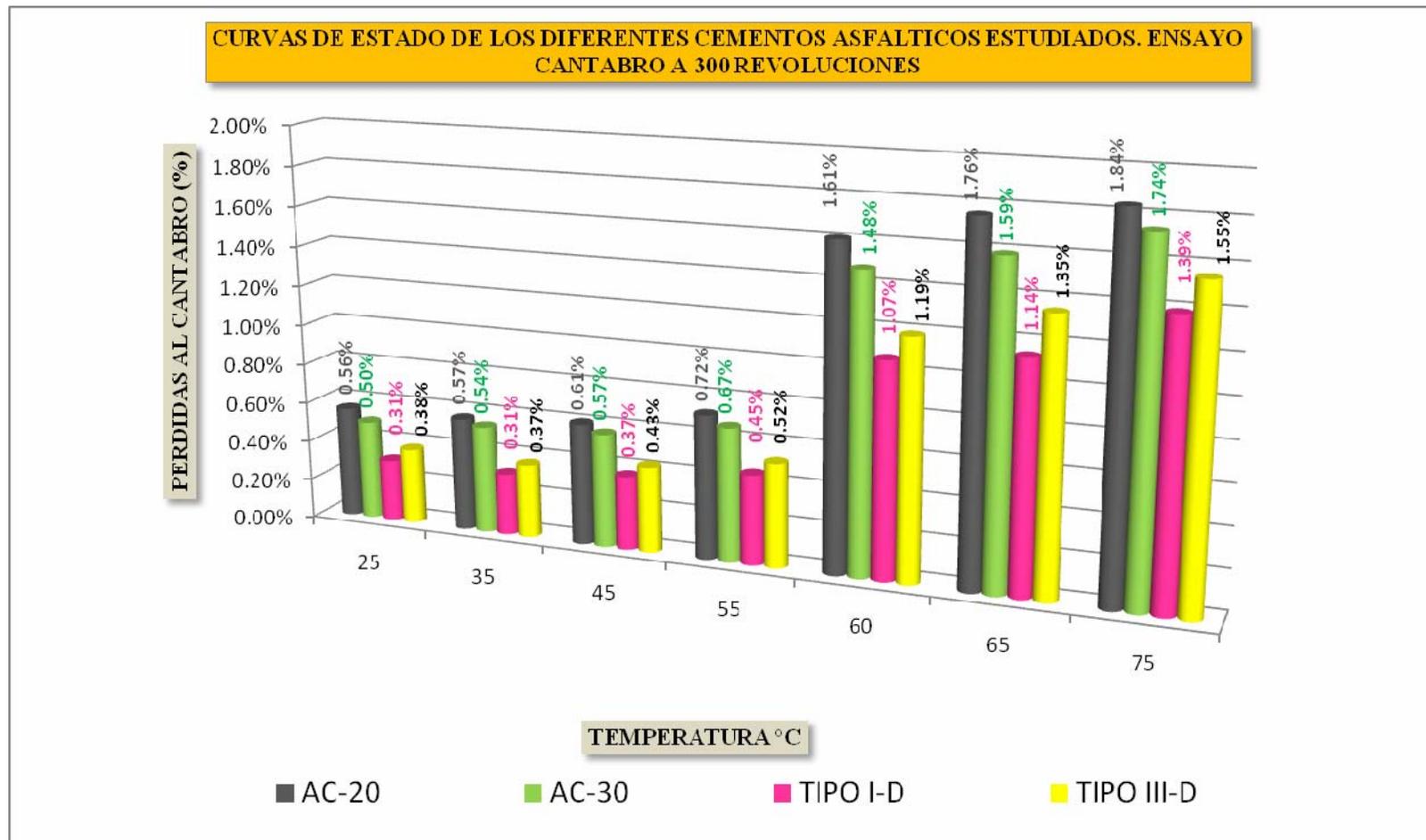


Gráfico 3-16 Comportamiento de los cementos asfálticos evaluando su susceptibilidad térmica a diferentes temperaturas a 300 revoluciones, Diagrama de Barras.

### 3.6.3. ENSAYO DE ADHESIVIDAD

Equipo:

- Baño María, ver Figura 3-9.
- Termómetro dial con capacidad de medición hasta 150°C.



Figura 3-9. Probetas en Baño María

Procedimiento:

Este ensayo requiere de un acondicionamiento previo a la prueba por desgaste en la máquina de Los Ángeles, que consiste en someter 9 probetas de cada tipo de asfalto bajo las condiciones:

- Inmersión A: Baño María a 35°C durante 4 días.
- Inmersión B: Baño María a 60°C durante 24 horas.

- Ensayo en seco a 25°C por 12 horas, estos datos serán tomados de los obtenidos del ensayo de Cohesión.
- Ensayo en seco a 60°C por 12 horas, estos datos serán tomados de los obtenidos del ensayo de Durabilidad.

Para cada tipo de asfalto a evaluar, 3 probetas que serán ensayadas a 100 revoluciones, 3 probetas que serán ensayadas a 200 revoluciones y 3 probetas que serán ensayadas a 300 revoluciones. Dado que las probetas a ensayar en seco serán tomadas de los datos obtenidos en ensayos anteriores, se requieren de 9 probetas a someter a cada tipo de Inmersión (A y B) para cada tipo de asfalto, por lo que se solicitan 36 probetas para cada tipo de asfalto. Esto que suma una cantidad de 72 probetas solamente para este ensayo.

Para las dos condiciones de Inmersión se debe verificar que el Baño María esté a la temperatura requerida antes de introducir las probetas a ensayar. Luego de cumplir el tiempo requerido para cada tipo de Inmersión (A y B), se deben sacar las probetas del Baño María y deben permanecer por lo menos durante 24 horas a temperatura ambiente ( $\pm 25^{\circ}\text{C}$ ) antes de ser ensayada, ver Figura 3-10.



Figura 3-10 Probetas extraídas del Baño María

Se prosigue con el paso de anotar el peso de cada probeta antes de introducirla a la máquina de Los Ángeles y tomarlo nuevamente al finalizar la prueba. Los datos obtenidos se recopilan en las Tablas 3-19, 3-20, 3-21 y 3-22.

<b>ENSAYO ADHESIVIDAD</b>																
Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C PROBETAS ENUMERADAS DEL 82 AL 90																
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	82 A	1,156.20	1,149.73	6.47	0.56%	83 A	1,199.10	1,192.15	6.95	0.58%	84 A	1,194.70	1,186.81	7.89	0.66%
	200 rev	85 A	1,190.80	1,180.56	10.24	0.86%	86 A	1,188.20	1,177.03	11.17	0.94%	87 A	1,208.50	1,196.90	11.60	0.96%
	300 rev	88 A	1,187.80	1,172.71	15.09	1.27%	89 A	1,169.50	1,154.30	15.20	1.30%	90 A	1,165.70	1,149.73	15.97	1.37%
AC-30	100 rev	82 B	1,195.00	1,190.70	4.30	0.36%	83 B	1,198.70	1,194.03	4.67	0.39%	84 B	1,198.60	1,193.09	5.51	0.46%
	200 rev	85 B	1,196.10	1,186.65	9.45	0.79%	86 B	1,179.90	1,169.75	10.15	0.86%	87 B	1,197.50	1,186.84	10.66	0.89%
	300 rev	88 B	1,189.50	1,175.11	14.39	1.21%	89 B	1,188.50	1,173.17	15.33	1.29%	90 B	1,200.40	1,184.67	15.73	1.31%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	82 C	1,196.30	1,192.35	3.95	0.33%	83 C	1,222.80	1,218.64	4.16	0.34%	84 C	1,224.00	1,218.74	5.26	0.43%
	200 rev	85 C	1,204.30	1,197.80	6.50	0.54%	86 C	1,205.60	1,198.13	7.47	0.62%	87 C	1,202.00	1,194.31	7.69	0.64%
	300 rev	88 C	1,186.50	1,176.18	10.32	0.87%	89 C	1,186.00	1,174.73	11.27	0.95%	90 C	1,190.80	1,179.25	11.55	0.97%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	82 D	1,250.60	1,246.10	4.50	0.36%	83 D	1,219.00	1,214.37	4.63	0.38%	84 D	1,224.70	1,219.07	5.63	0.46%
	200 rev	85 D	1,214.00	1,205.50	8.50	0.70%	86 D	1,218.80	1,210.02	8.78	0.72%	87 D	1,194.50	1,184.94	9.56	0.80%
	300 rev	88 D	1,236.30	1,222.70	13.60	1.10%	89 D	1,210.40	1,196.12	14.28	1.18%	90 D	1,202.00	1,187.58	14.42	1.20%

Tabla 3-19. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Adhesión para condición de Inmersión A, 4 días a 35°C.

<b>ENSAYO ADHESIVIDAD</b>																
Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C PROBETAS ENUMERADAS DEL 64 AL 72																
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	64 A	1,194.60	1,184.45	10.15	0.85%	65 B	1,199.40	1,188.13	11.27	0.94%	66 B	1,187.60	1,176.32	11.28	0.95%
	200 rev	67 A	1,199.60	1,181.97	17.63	1.47%	68 B	1,188.00	1,170.42	17.58	1.48%	69 B	1,196.70	1,177.91	18.79	1.57%
	300 rev	70 A	1,210.90	1,189.59	21.31	1.76%	71 B	1,197.10	1,175.79	21.31	1.78%	72 B	1,192.90	1,170.71	22.19	1.86%
AC-30	100 rev	64 B	1,191.60	1,182.66	8.94	0.75%	65 A	1,184.70	1,175.46	9.24	0.78%	66 A	1,182.90	1,172.85	10.05	0.85%
	200 rev	67 B	1,199.60	1,183.41	16.19	1.35%	68 A	1,188.00	1,171.01	16.99	1.43%	69 A	1,196.70	1,179.35	17.35	1.45%
	300 rev	70 B	1,210.90	1,191.16	19.74	1.63%	71 A	1,197.10	1,177.23	19.87	1.66%	72 A	1,192.90	1,172.26	20.64	1.73%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	64 C	1,182.20	1,175.46	6.74	0.57%	65 C	1,193.90	1,186.14	7.76	0.65%	66 C	1,193.10	1,185.11	7.99	0.67%
	200 rev	67 C	1,180.50	1,171.29	9.21	0.78%	68 C	1,204.70	1,194.46	10.24	0.85%	69 C	1,193.60	1,183.10	10.50	0.88%
	300 rev	70 C	1,175.30	1,160.73	14.57	1.24%	71 C	1,177.10	1,161.56	15.54	1.32%	72 C	1,193.20	1,177.21	15.99	1.34%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	64 D	1,185.30	1,177.36	7.94	0.67%	65 D	1,169.70	1,160.81	8.89	0.76%	66 D	1,207.90	1,198.60	9.30	0.77%
	200 rev	67 D	1,182.90	1,171.31	11.59	0.98%	68 D	1,193.90	1,182.08	11.82	0.99%	69 D	1,192.60	1,179.72	12.88	1.08%
	300 rev	70 D	1,186.40	1,170.15	16.25	1.37%	71 D	1,169.40	1,153.15	16.25	1.39%	72 D	1,194.00	1,176.45	17.55	1.47%

Tabla 3-20. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Adhesión para condición de Inmersión B, 24 horas a 60°C.

<b>ENSAYO ADHESIVIDAD</b>		En seco, 25°C por 12 hrs										PROBETAS ENUMERADAS DEL 1 AL 9				
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	1 A	1,172.20	1,168.92	3.28	0.28%	2 A	1,181.00	1,176.87	4.13	0.35%	3 A	1,186.80	1,182.53	4.27	0.36%
	200 rev	4 A	1,178.40	1,174.39	4.01	0.34%	5 A	1,164.80	1,160.26	4.54	0.39%	6 A	1,194.60	1,189.58	5.02	0.42%
	300 rev	7 A	1,202.80	1,196.67	6.13	0.51%	8 A	1,193.10	1,186.66	6.44	0.54%	9 A	1,109.80	1,102.48	7.32	0.66%
AC-30	100 rev	1 B	1,195.50	1,192.51	2.99	0.25%	2 B	1,200.00	1,196.88	3.12	0.26%	3 B	1,179.80	1,175.55	4.25	0.36%
	200 rev	4 B	1,202.10	1,198.13	3.97	0.33%	5 B	1,193.00	1,188.82	4.18	0.35%	6 B	1,202.00	1,196.95	5.05	0.42%
	300 rev	7 B	1,194.00	1,188.51	5.49	0.46%	8 B	1,199.00	1,193.24	5.76	0.48%	9 B	1,202.00	1,195.15	6.85	0.57%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	1 C	1,181.50	1,180.79	0.71	0.06%	2 C	1,186.60	1,185.29	1.31	0.11%	3 C	1,168.20	1,166.80	1.40	0.12%
	200 rev	4 C	1,178.40	1,176.51	1.89	0.16%	5 C	1,185.10	1,182.02	3.08	0.26%	6 C	1,191.10	1,187.76	3.34	0.28%
	300 rev	7 C	1,146.50	1,143.75	2.75	0.24%	8 C	1,191.90	1,187.97	3.93	0.33%	9 C	1,181.80	1,177.66	4.14	0.35%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	1 D	1,158.80	1,157.64	1.16	0.10%	2 D	1,189.70	1,188.39	1.31	0.11%	3 D	1,202.40	1,200.60	1.80	0.15%
	200 rev	4 D	1,184.00	1,182.22	1.78	0.15%	5 D	1,174.30	1,172.19	2.11	0.18%	6 D	1,185.40	1,182.32	3.08	0.26%
	300 rev	7 D	1,151.70	1,148.13	3.57	0.31%	8 D	1,181.90	1,178.00	3.90	0.33%	9 D	1,179.50	1,174.55	4.95	0.42%

Tabla 3-21. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Adhesión para condición en Seco de 25°C.

<b>ENSAYO ADHESIVIDAD</b>		En seco, 60°C por 12 hrs										PROBETAS ENUMERADAS DEL 46 AL 54					
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%	
AC-20	100 rev	46 A	1,171.10	1,163.37	7.73	0.66%	47 B	1,178.30	1,169.46	8.84	0.75%	48 B	1,190.20	1,181.15	9.05	0.76%	
	200 rev	49 A	1,139.60	1,125.36	14.25	1.25%	50 B	1,195.50	1,179.48	16.02	1.34%	51 B	1,177.80	1,161.90	15.90	1.35%	
	300 rev	52 A	1,184.80	1,166.20	18.60	1.57%	53 B	1,207.40	1,187.48	19.92	1.65%	54 B	1,900.00	1,868.27	31.73	1.67%	
AC-30	100 rev	46 B	1,157.40	1,150.11	7.29	0.63%	47 A	1,182.10	1,174.53	7.57	0.64%	48 A	1,187.90	1,179.23	8.67	0.73%	
	200 rev	49 B	1,202.20	1,188.37	13.83	1.15%	50 A	1,192.80	1,178.84	13.96	1.17%	51 A	1,199.20	1,184.21	14.99	1.25%	
	300 rev	52 B	1,181.50	1,164.60	16.90	1.43%	53 A	1,189.60	1,172.35	17.25	1.45%	54 A	1,193.80	1,175.53	18.27	1.53%	
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	46 C	1,188.90	1,184.74	4.16	0.35%	47 C	1,174.00	1,168.83	5.17	0.44%	48 C	1,176.10	1,170.81	5.29	0.45%	
	200 rev	49 C	1,165.70	1,159.04	6.66	0.57%	50 C	1,181.60	1,173.80	7.80	0.66%	51 C	1,198.90	1,190.86	8.04	0.67%	
	300 rev	52 C	1,188.60	1,176.36	12.24	1.03%	53 C	1,184.30	1,171.98	12.32	1.04%	54 C	1,193.50	1,180.01	13.49	1.13%	
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	46 D	1,184.10	1,178.65	5.45	0.46%	47 D	1,171.20	1,165.58	5.62	0.48%	48 D	1,190.00	1,183.34	6.66	0.56%	
	200 rev	49 D	1,178.30	1,169.23	9.07	0.77%	50 D	1,183.00	1,173.65	9.35	0.79%	51 D	1,174.20	1,163.98	10.22	0.87%	
	300 rev	52 D	1,187.70	1,174.04	13.66	1.15%	53 D	1,191.20	1,177.14	14.06	1.18%	54 D	1,159.30	1,144.81	14.49	1.25%	

Tabla 3-22. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Adhesión para condición en Seco de 60°C.

Con todos los resultados de los Porcentajes de Pérdida obtenidos mediante la Prueba de Desgaste para el ensayo de Adhesión, se elabora un resumen en la Tabla 3-23 con los promedios de los porcentajes de pérdida.

SEVERIDAD	CONDICIONES	CEMENTO ASFALTICO			
		AC-20	AC-30	TIPO I-D	TIPO III-D
100 revoluciones	25°C (Seco)	0.33%	0.29%	0.10%	0.12%
	35°C (Inmersión A)	0.60%	0.40%	0.37%	0.40%
	60°C (Inmersión B)	0.91%	0.79%	0.63%	0.73%
	60°C (Seco)	0.72%	0.67%	0.41%	0.50%
200 revoluciones	25°C (Seco)	0.38%	0.37%	0.23%	0.20%
	35°C (Inmersión A)	0.92%	0.85%	0.60%	0.74%
	60°C (Inmersión B)	1.51%	1.41%	0.84%	1.02%
	60°C (Seco)	1.31%	1.19%	0.63%	0.81%
300 revoluciones	25°C (Seco)	0.57%	0.50%	0.31%	0.35%
	35°C (Inmersión A)	1.31%	1.27%	0.93%	1.16%
	60°C (Inmersión B)	1.86%	1.67%	1.30%	1.41%
	60°C (Seco)	1.63%	1.47%	1.07%	1.19%

Tabla 3-23. Tabla resumen de Porcentajes de Pérdida mediante prueba Cántabro para el ensayo de Adhesión para los Cementos asfálticos AC-20, AC-30, Modificado TIPO I-D y Modificado TIPO III-D

Con ayuda de la Tabla 3-23 se pueden obtener una cantidad de gráficos de importancia para poder estudiar el comportamiento de los asfaltos y evaluar así la Adhesión.

Se han elaborado gráficos por cada tipo de asfalto y así poder observar la diferencia entre las pérdidas a los diferentes niveles de severidad. Estos están representados para el Asfalto AC-20 con los Gráficos 3-17 y 3-18, para el Asfalto AC-30 con los Gráficos 3-19 y 3-20, para el Asfalto Modificado Tipo I-D con los Gráficos 3-21 y 3-22, y finalmente para el Asfalto Modificado Tipo III-D con los Gráficos 3-23 y 3-24.

Con los datos de la misma Tabla 3-23 también se han elaborados los gráficos para poder comparar los cuatro asfaltos entre sí sometidos a las diferentes condiciones que fueron sometidas previo al la prueba de desgaste. Para la condición en seco a 25 °C, basta ver los resultados del ensayo de Cohesión. Estos se pueden apreciar en los Gráficos 3-1 y 3-2.

Para efectos de comparación entre los asfaltos para la Inmersión A (Baño María durante 4 días a 35 °C) se puede apreciar los resultados en los Gráficos 3-31 y 3-32. Para los resultados de la Inmersión B (Baño María durante 24 horas a 60 °C) se observan en los Gráficos 3-25 y 3-26. La comparación entre los 4 asfaltos para la condición en seco a 60 °C se puede apreciar en los Gráficos 3-27 y 3-28.

Para este ensayo se presenta un comportamiento semejante entre todos los asfaltos, dado que todos presentan mayores pérdidas bajo la condición de Inmersión B, Inmersión a 60°C durante 24 horas, demostrando que esta condición los afecta de manera más severa que la condición en que se introducen en horno a 60°C durante 12 horas, que es la condición que queda en segundo lugar en cuanto al Porcentaje de Pérdida de material de las probetas.

Luego viene la condición de Inmersión A, Inmersión a 35°C durante 4 días, siendo la condición de 25°C durante 12 horas la más gentil dado que produce los menores porcentajes de pérdida, que son los mismos resultados del ensayo de Cohesión.

Al igual que en las pruebas anteriores, el asfalto que ha arrojado el menor Porcentaje de Pérdidas de peso de las probetas ha sido el Asfalto Modificado Tipo I-D, demostrando nuevamente ser el que menos desgaste sufre, seguido por el Asfalto Modificado Tipo III-D, luego el Asfalto AC-30 y el Asfalto AC-20 en último lugar.

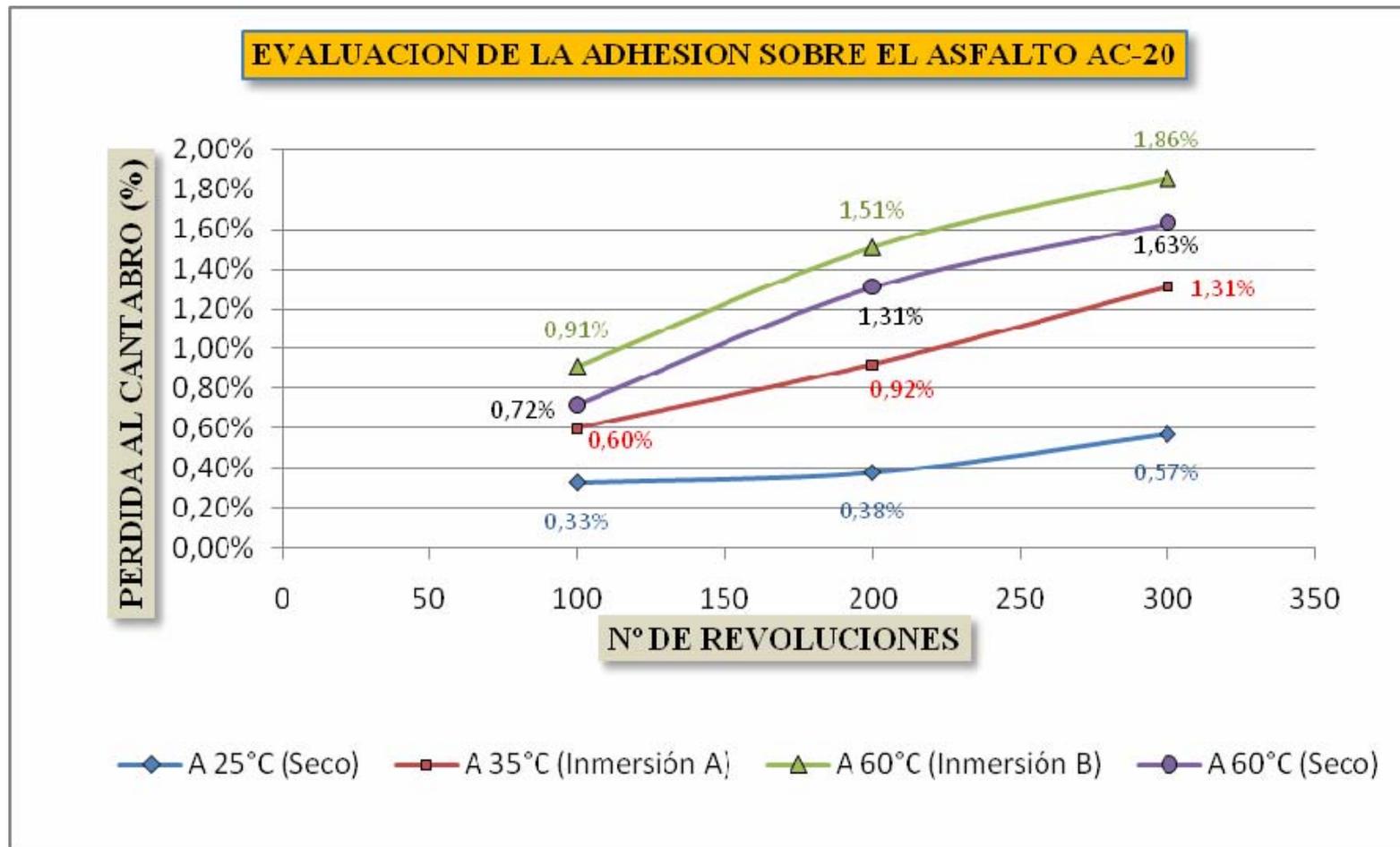


Gráfico 3-17. Comportamiento del cemento asfáltico AC-20 evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

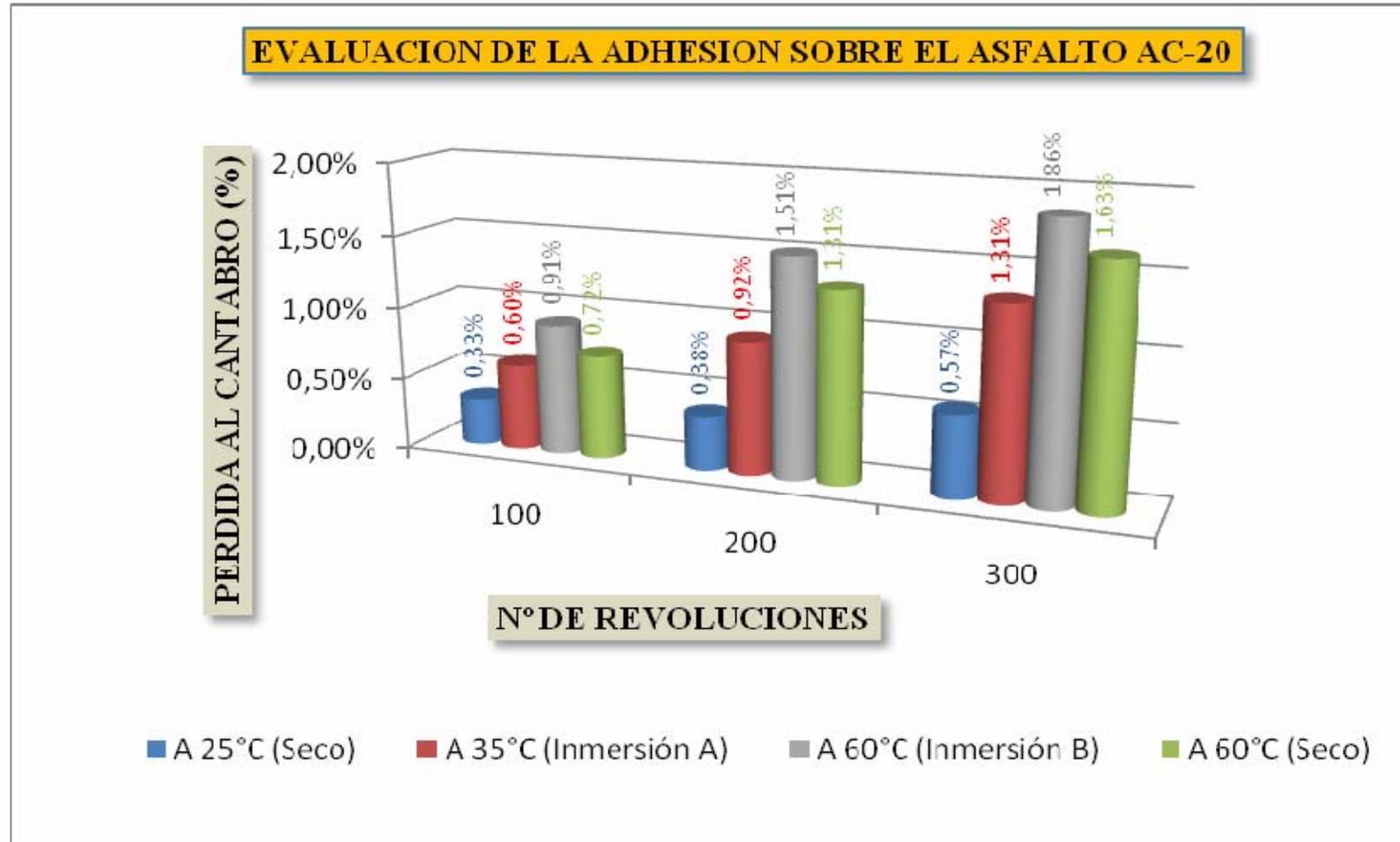


Gráfico 3-18. Comportamiento del cemento asfáltico AC-20 evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

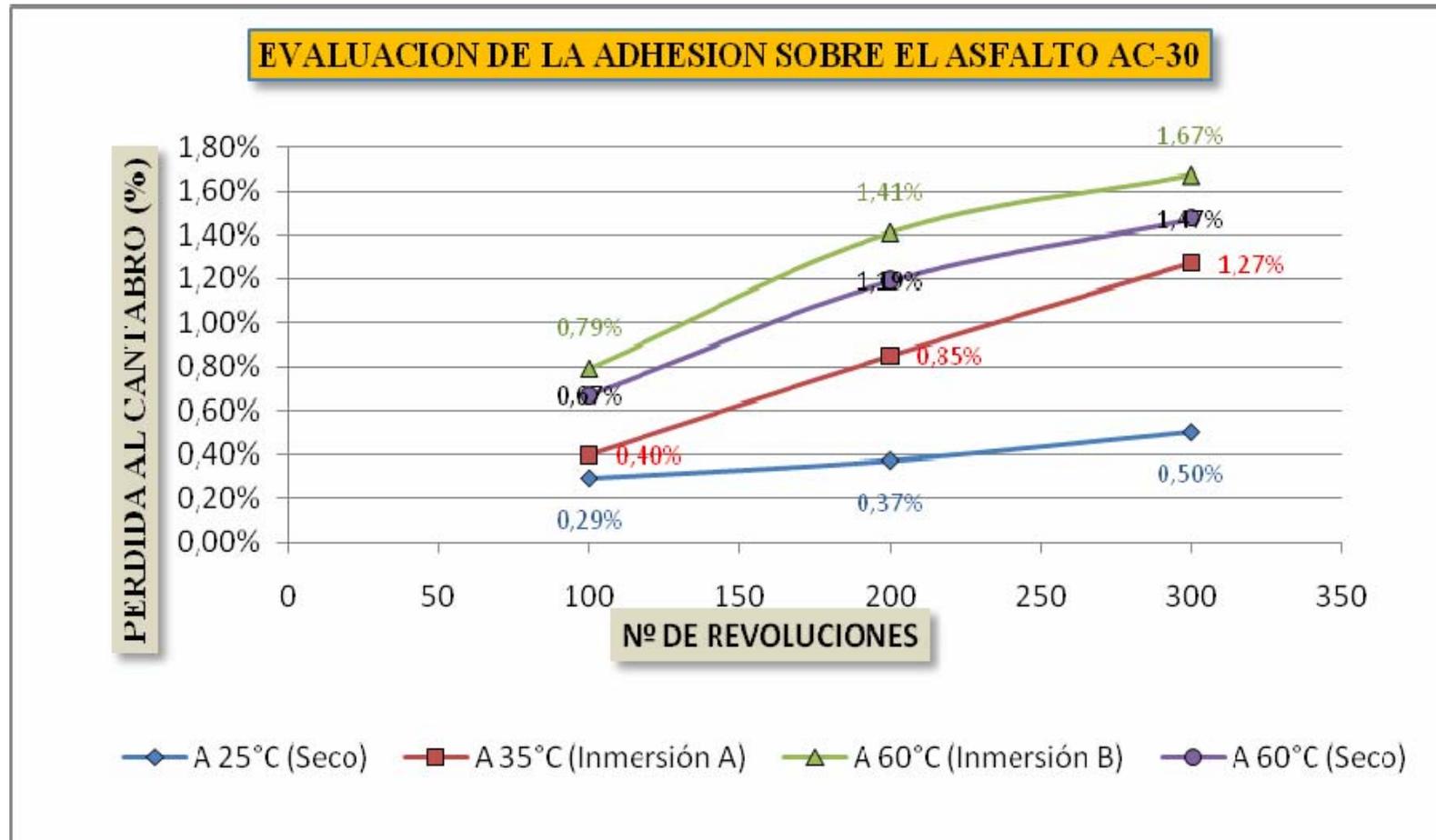


Gráfico 3-19. Comportamiento del cemento asfáltico AC-30 evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

### EVALUACION DE LA ADHESION SOBRE EL ASFALTO AC-30

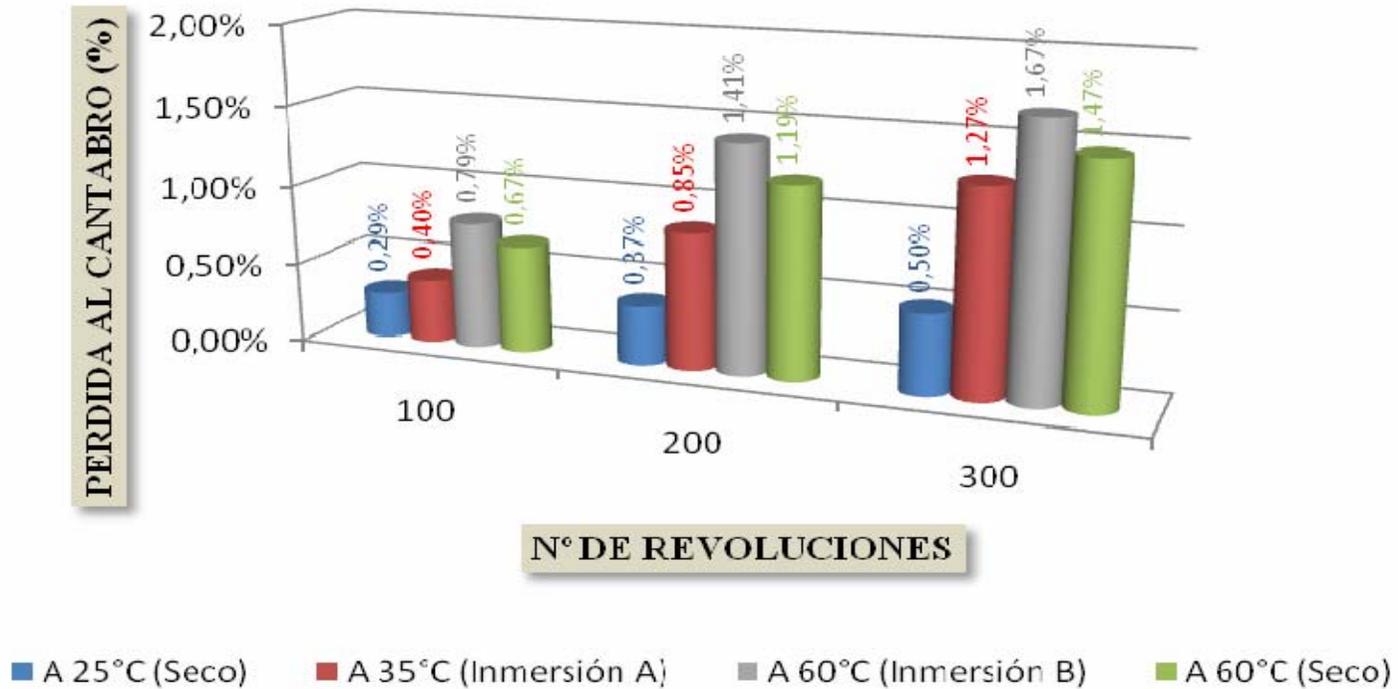


Gráfico 3-20. Comportamiento del cemento asfáltico AC-30 evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

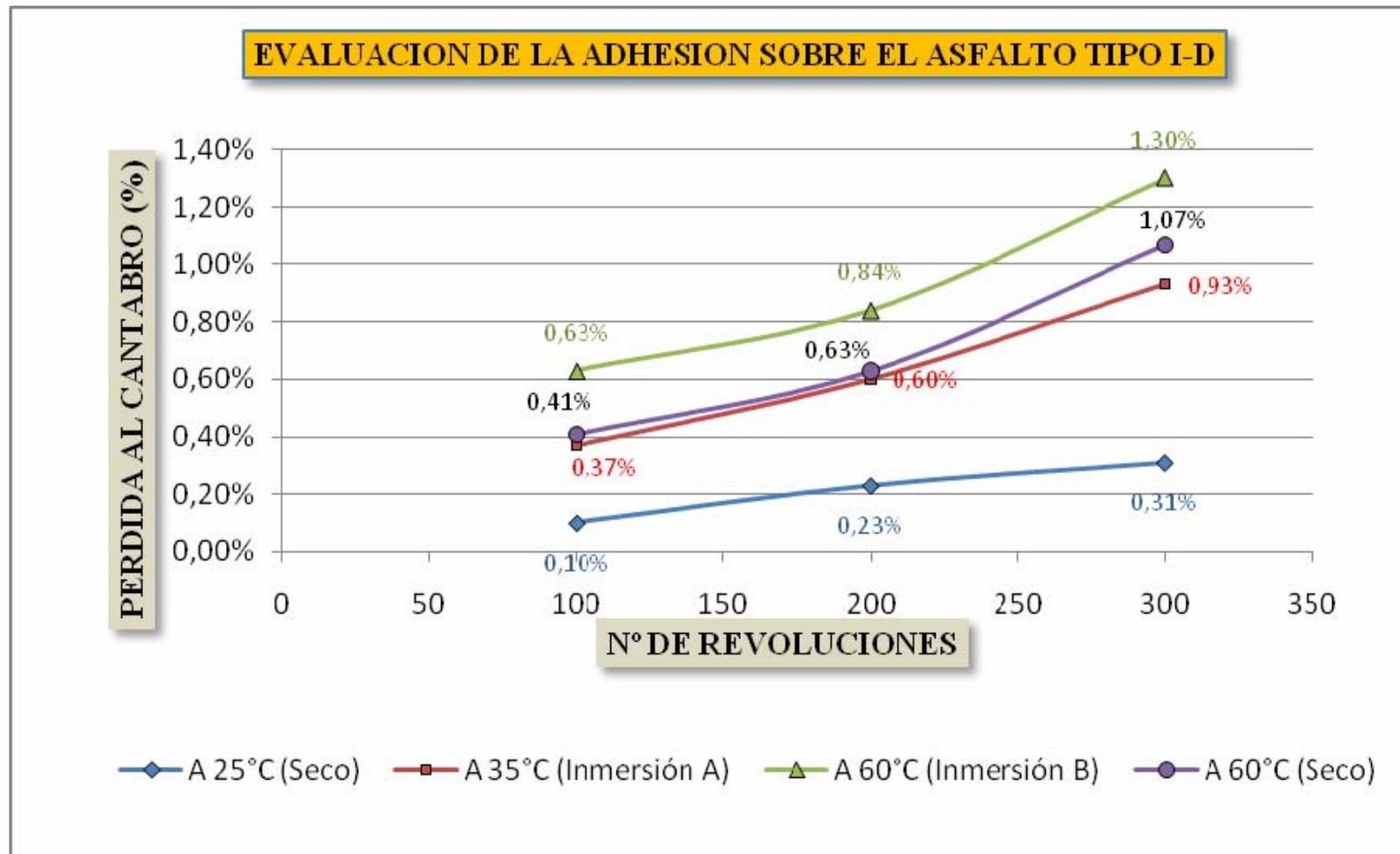


Gráfico 3-21. Comportamiento del cemento asfáltico Modificado Tipo I-D evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

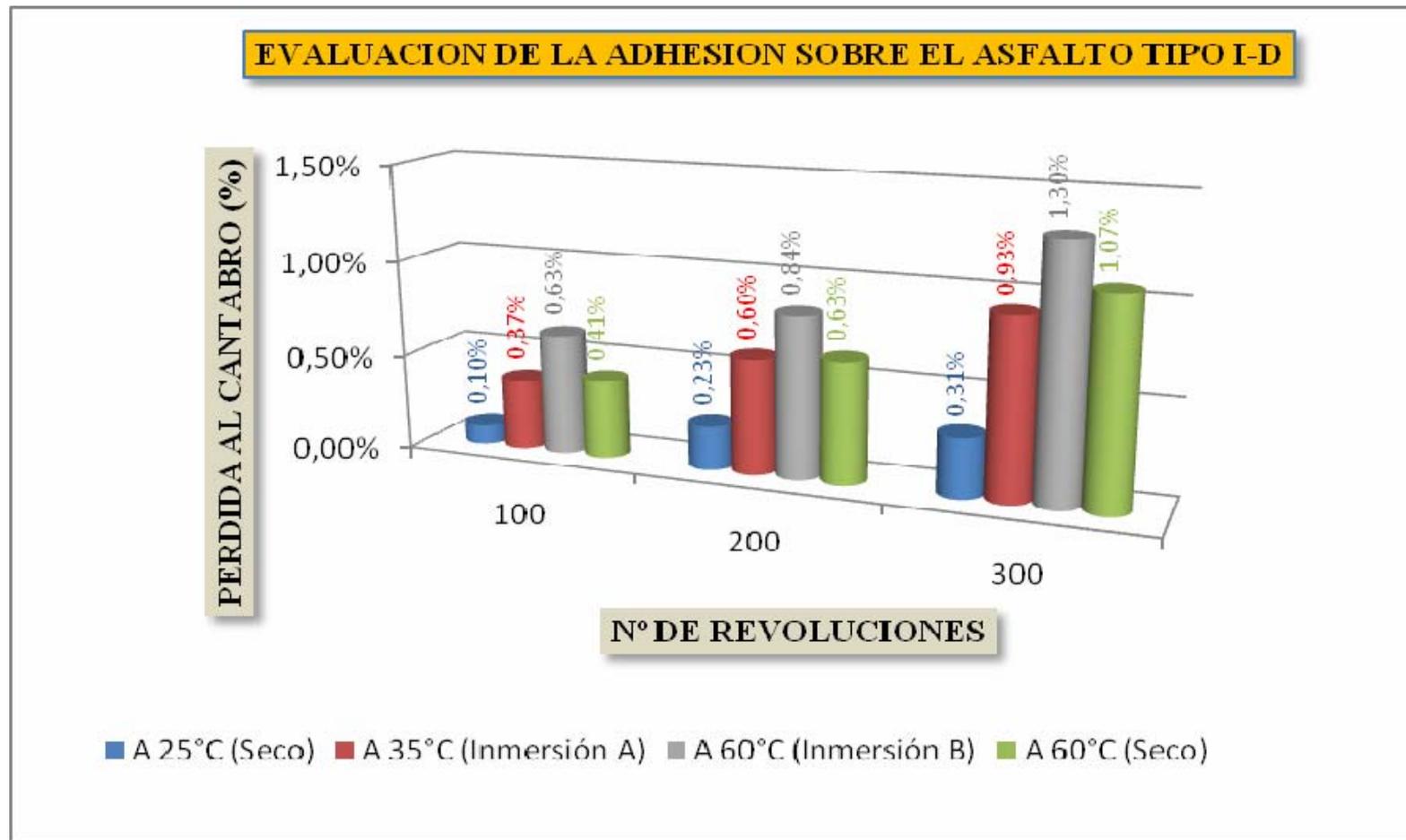


Gráfico 3-22. Comportamiento del cemento asfáltico Modificado Tipo I-D evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

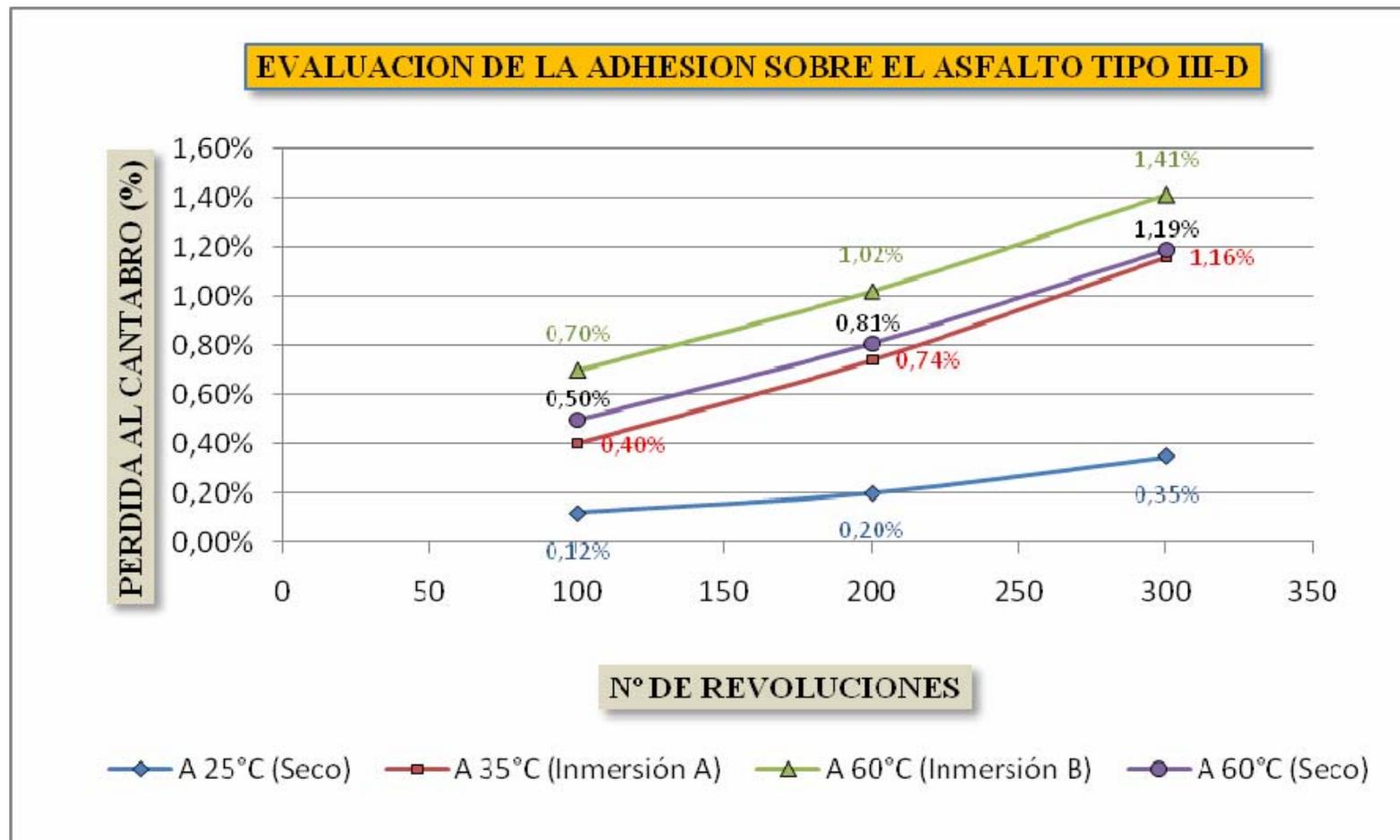


Gráfico 3-23. Comportamiento del cemento asfáltico Modificado Tipo III-D evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

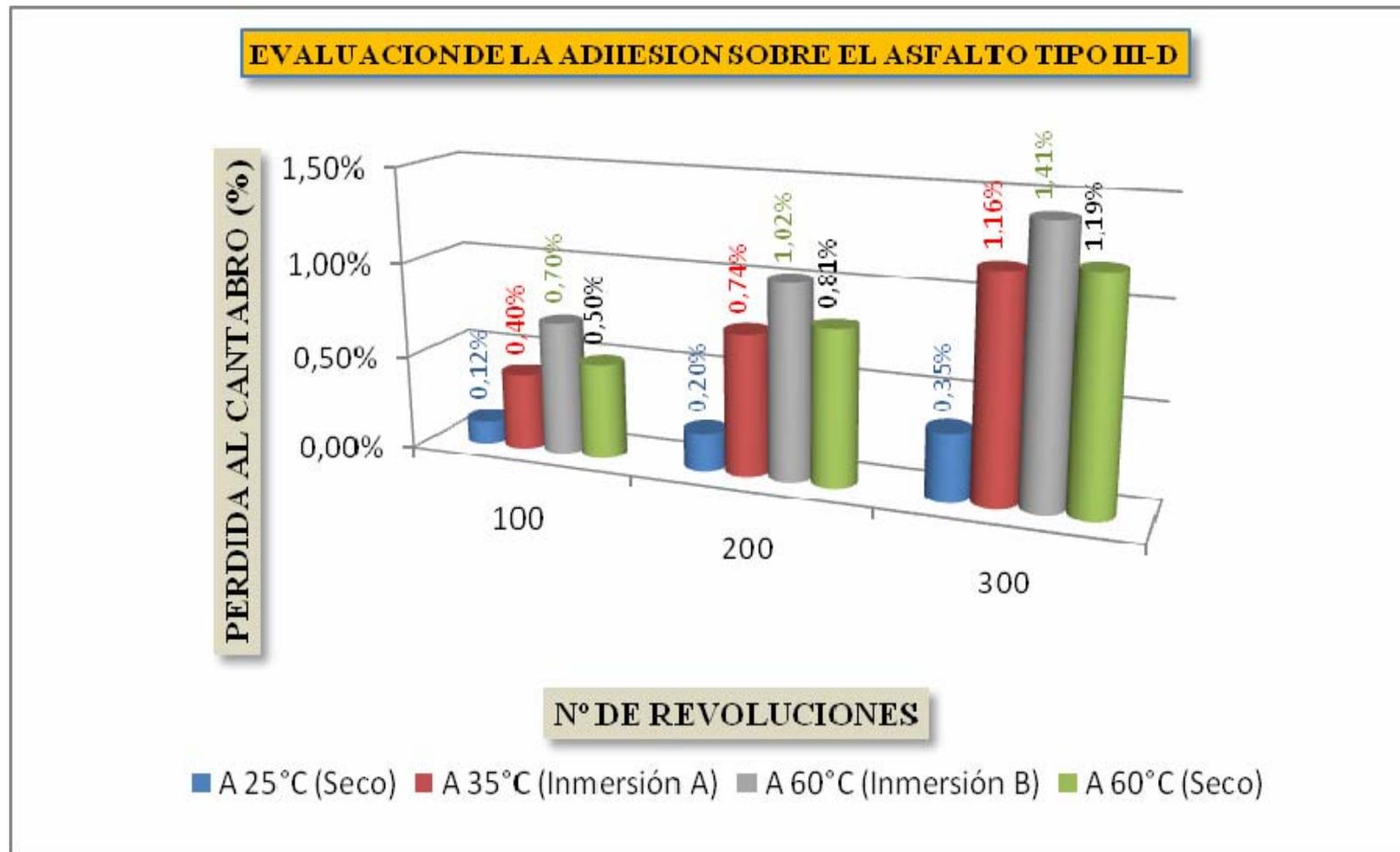


Gráfico 3-24 Comportamiento del cemento asfáltico Modificado Tipo III-D evaluando su Adhesividad a diferentes condiciones y diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

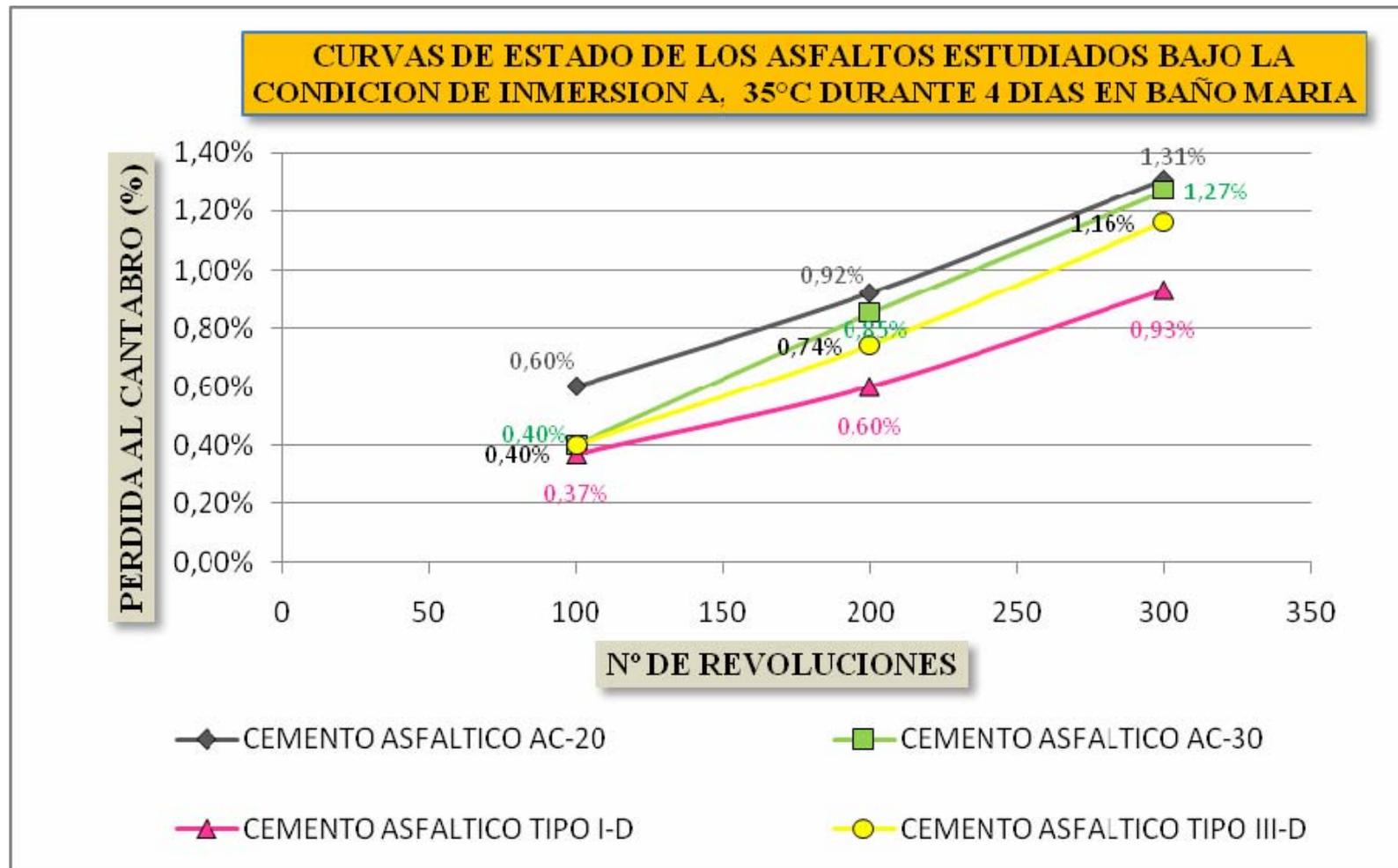


Gráfico 3-25. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Adhesividad tras Inmersión a 35°C durante 4 días (Inmersión A) a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

**BARRAS DE LOS ASFALTOS ESTUDIADOS BAJO LA CONDICION DE INMERSION A, 35°C DURANTE 4 DIAS EN BAÑO MARIA**

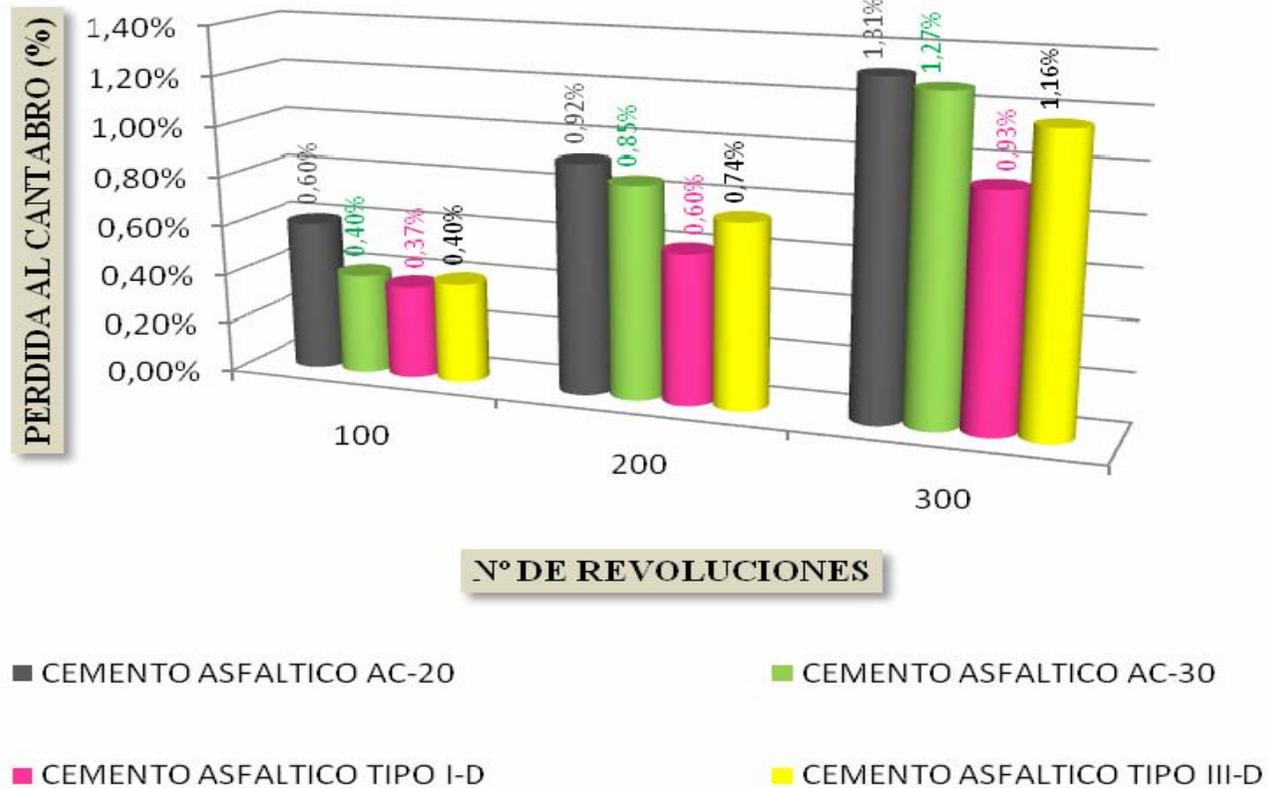


Gráfico 3-26. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Adhesividad tras Inmersión a 35°C durante 4 días (Inmersión A) a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

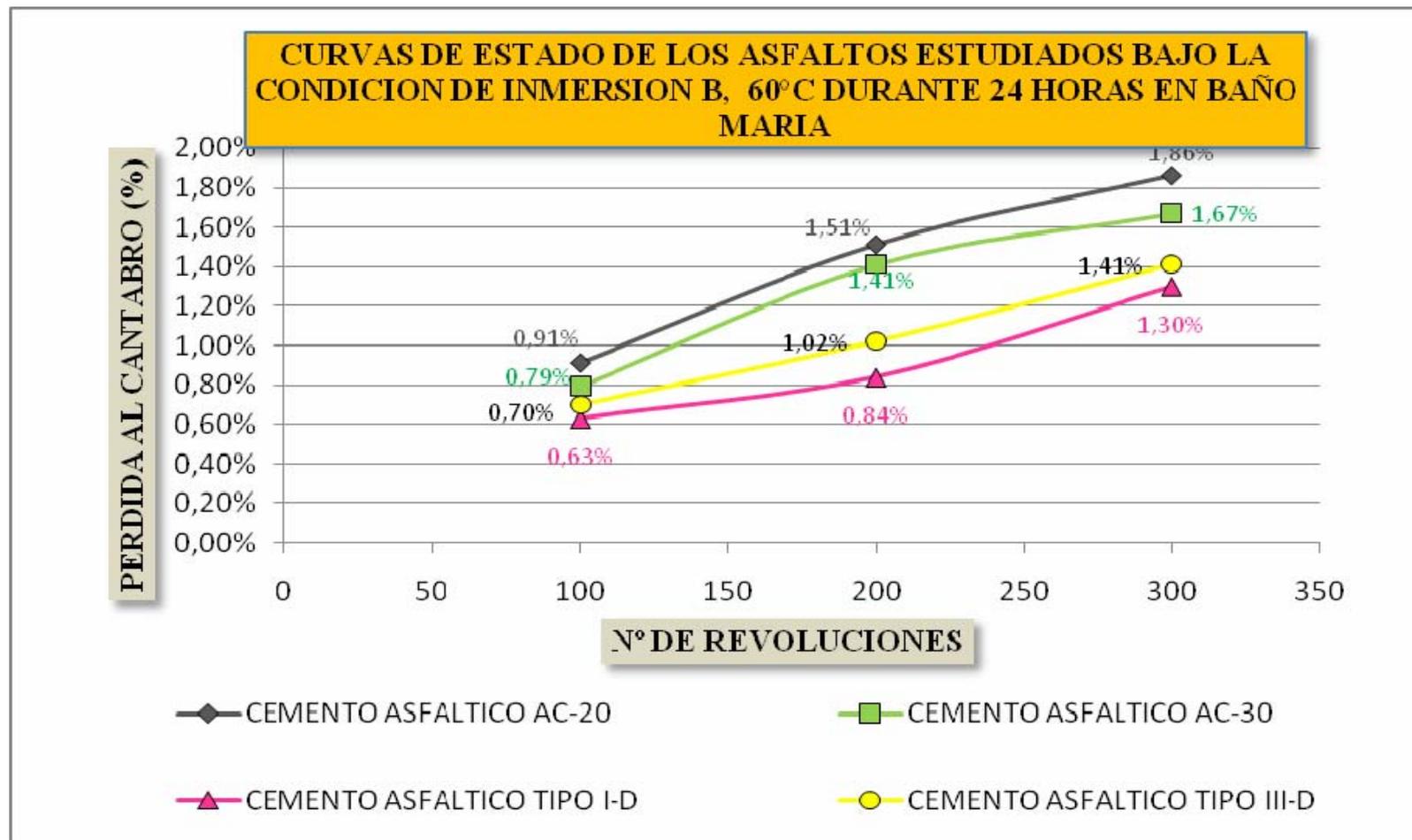


Gráfico 3-27. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Adhesividad tras Inmersión a 60°C durante 24 horas (Inmersión B) a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

**BARRAS DE LOS ASFALTOS ESTUDIADOS BAJO LA CONDICION DE INMERSION B, 60°C DURANTE 24 HORAS EN BAÑO MARIA**

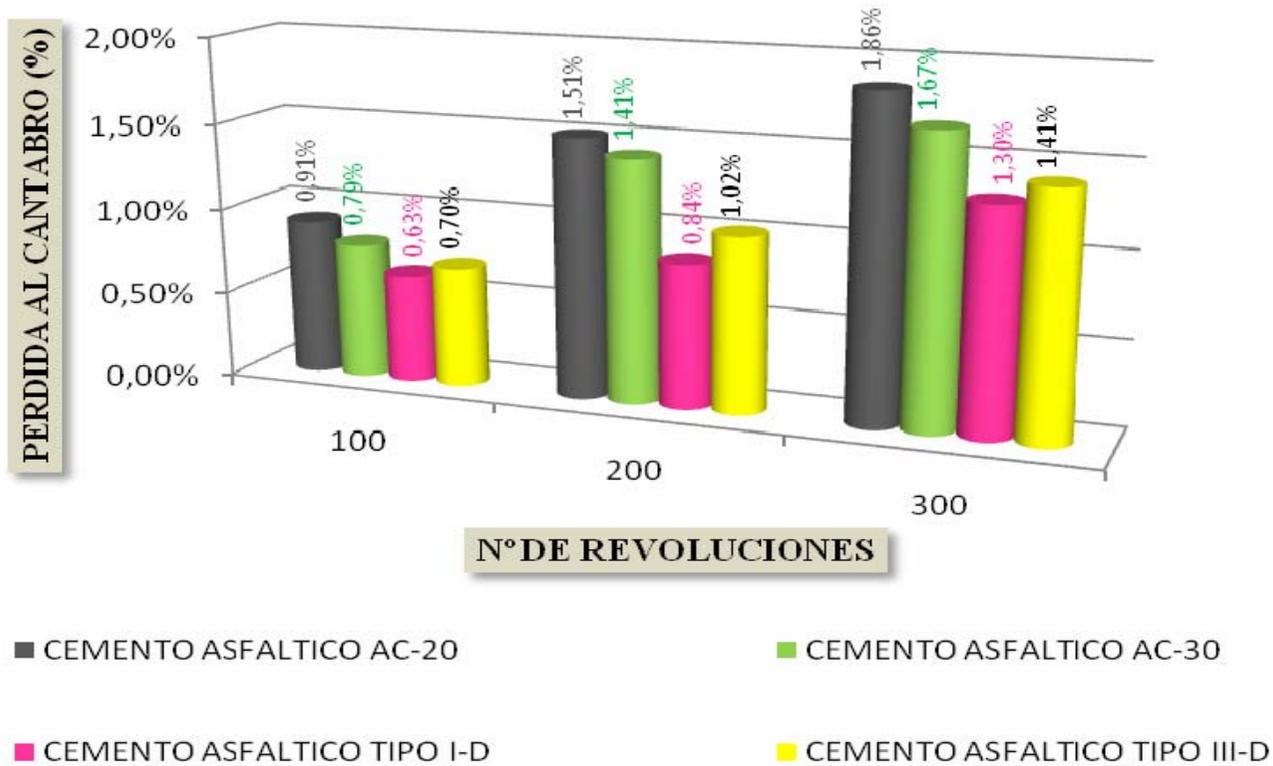


Gráfico 3-28 Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Adhesividad tras Inmersión a 60°C durante 24 horas (Inmersión B) a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

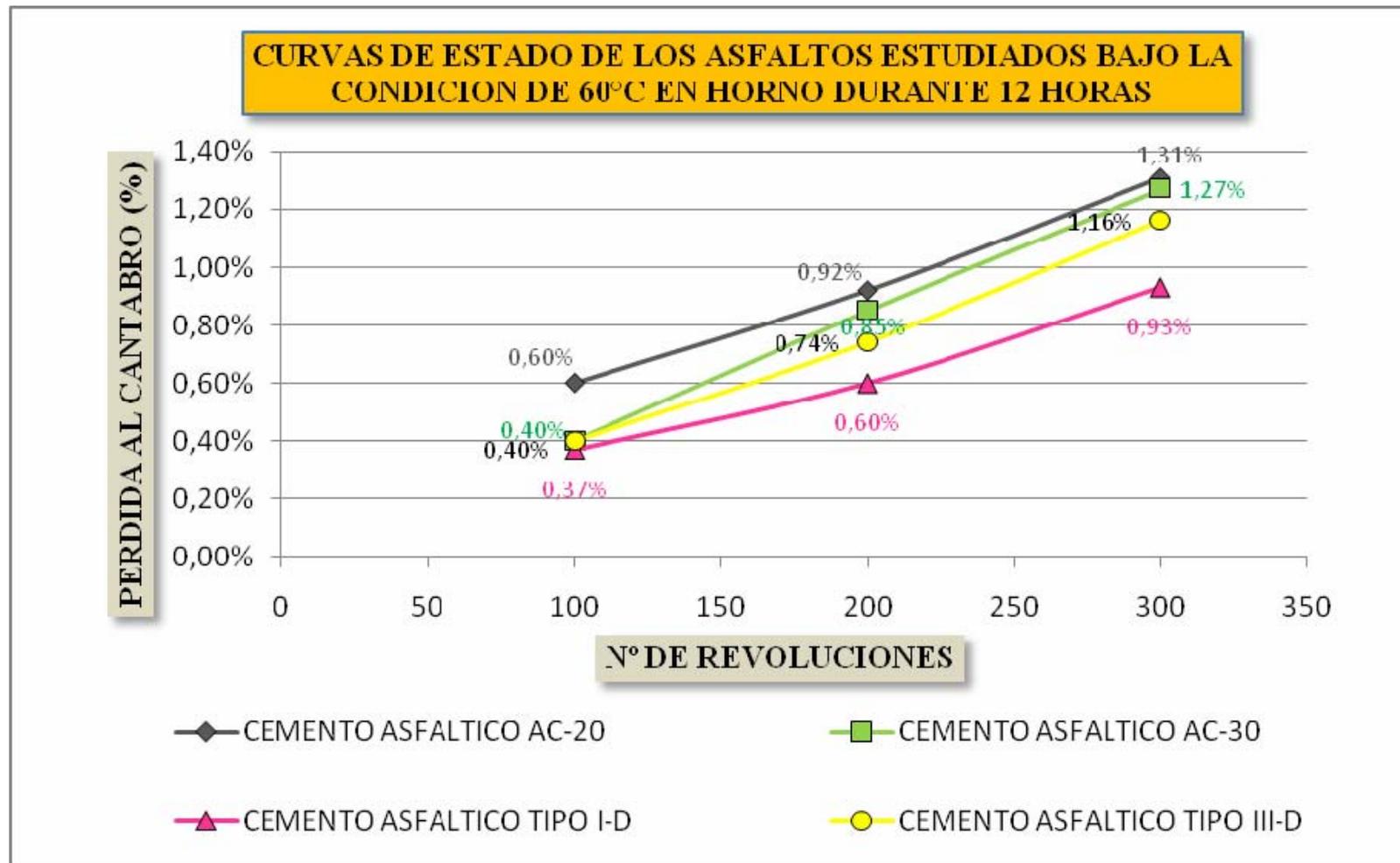


Gráfico 3-29. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Adhesividad introducción al horno a 60°C durante 12 horas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Dispersión.

**BARRAS DE LOS ASFALTOS ESTUDIADOS BAJO LA CONDICION DE 60°C EN HORNO DURANTE 12 HORAS**

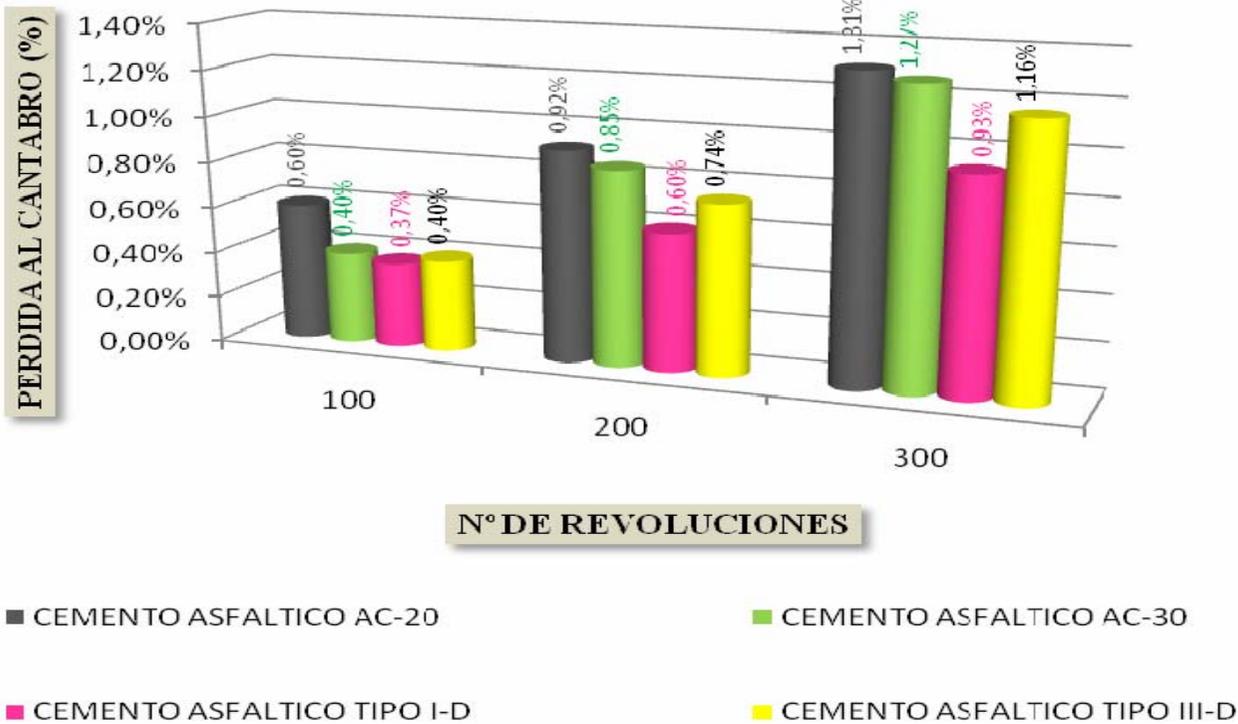


Gráfico 3-30. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Adhesividad introducción al horno a 60°C durante 12 horas a diferentes grados de severidad, Diagrama de Barras.

#### **3.6.4. ENSAYO DE DURABILIDAD**

Equipo:

- Horno, con capacidad de generar temperaturas hasta de 400°C.
- Termómetro de dial con un rango de medición de temperaturas de 150°C.

Procedimiento:

Este ensayo requiere de un acondicionamiento previo a la prueba por desgaste en la máquina de Los Ángeles, que consiste en someter 9 probetas de cada tipo de asfalto a una temperatura de 60°C bajo las siguientes condiciones de envejecimiento:

Sin someterse a periodo de envejecimiento en horno, condiciones sin alterar, estos datos serán tomados de los obtenidos del ensayo de Cohesión.

- Período de envejecimiento dentro del horno de 1.5 horas
- Período de envejecimiento dentro del horno de 3.0 horas
- Período de envejecimiento dentro del horno de 6.0 horas
- Período de envejecimiento dentro del horno de 12.0 horas
- Período de envejecimiento dentro del horno de 24.0 horas

Para cada tipo de asfalto a evaluar, 3 probetas que serán ensayadas a 100 revoluciones, 3 probetas que serán ensayadas a 200 revoluciones y 3 probetas que serán ensayadas a 300 revoluciones. Dado que las probetas a ensayar sin ningún tipo de envejecimiento serán tomadas de los datos obtenidos del ensayo de Cohesión, se requieren de 9 probetas a someter para las 5 diferentes condiciones de envejecimiento (1.5, 3.0, 6.0, 12 y 24 horas) para cada tipo de asfalto, por lo que se solicitan 45 probetas para cada tipo de asfalto. Esto que suma una cantidad de 180 probetas solamente para este ensayo.

Las probetas deben introducirse a un horno, una vez regulada la temperatura del mismo, y dejarse por el periodo. Al extraer las probetas, estas deben permanecer por lo menos durante 24 horas a temperatura ambiente ( $\pm 25^{\circ}\text{C}$ ) antes de ser ensayada. Luego se anota el peso de cada probeta antes de introducirla a la máquina de Los Ángeles y tomarlo nuevamente al finalizar la prueba, proporcionando los resultados recopilados en las Tablas del 3-24 al 3-29. Tabla 3-24. 0 horas en horno, Tabla 3-25. 1.5 horas en horno a  $60^{\circ}\text{C}$ , Tabla 3-26. 3.0 horas en horno a  $60^{\circ}\text{C}$ , Tabla 3-27. 6.0 horas en horno a  $60^{\circ}\text{C}$ , Tabla 3-28. 12 horas en horno a  $60^{\circ}\text{C}$  y Tabla 3-29. 24 horas en horno a  $60^{\circ}\text{C}$ .

<b>ENSAYO DURABILIDAD</b>		Envejecimiento de 0 hrs						PROBETAS ENUMERADAS DEL 1 AL 9								
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	1 A	1,195.50	1,192.51	2.99	0.25%	2 A	1,200.00	1,196.28	3.72	0.27%	3 A	1,179.80	1,175.55	4.25	0.36%
	200 rev	4 A	1,202.10	1,198.13	3.97	0.33%	5 A	1,193.00	1,188.47	4.53	0.35%	6 A	1,202.00	1,196.95	5.05	0.42%
	300 rev	7 A	1,194.00	1,188.51	5.49	0.46%	8 A	1,199.00	1,192.77	6.23	0.48%	9 A	1,202.00	1,195.15	6.85	0.57%
AC-30	100 rev	1 B	1,172.20	1,168.92	3.28	0.28%	2 B	1,181.00	1,177.10	3.90	0.30%	3 B	1,186.80	1,182.53	4.27	0.36%
	200 rev	4 B	1,178.40	1,174.39	4.01	0.34%	5 B	1,164.80	1,160.26	4.54	0.40%	6 B	1,194.60	1,189.58	5.02	0.42%
	300 rev	7 B	1,202.80	1,196.67	6.13	0.51%	8 B	1,193.10	1,186.42	6.68	0.64%	9 B	1,109.80	1,102.48	7.32	0.66%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	1 C	1,181.50	1,180.79	0.71	0.06%	2 C	1,186.60	1,185.41	1.19	0.11%	3 C	1,168.20	1,166.80	1.40	0.12%
	200 rev	4 C	1,178.40	1,176.51	1.89	0.16%	5 C	1,185.10	1,182.73	2.37	0.27%	6 C	1,191.10	1,187.76	3.34	0.28%
	300 rev	7 C	1,146.50	1,143.75	2.75	0.24%	8 C	1,191.90	1,188.32	3.58	0.34%	9 C	1,181.80	1,177.66	4.14	0.35%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	1 D	1,158.80	1,157.64	1.16	0.10%	2 D	1,189.70	1,188.39	1.31	0.14%	3 D	1,202.40	1,200.60	1.80	0.15%
	200 rev	4 D	1,184.00	1,182.22	1.78	0.15%	5 D	1,174.30	1,171.83	2.47	0.24%	6 D	1,185.40	1,182.32	3.08	0.26%
	300 rev	7 D	1,151.70	1,148.13	3.57	0.31%	8 D	1,181.90	1,177.65	4.25	0.40%	9 D	1,179.50	1,174.55	4.95	0.42%

Tabla 3-24. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Durabilidad para condición 0.0 hrs de envejecimiento a 60°C en horno.

<b>ENSAYO DURABILIDAD</b>			Envejecimiento de 1.5 hrs a 60°C				PROBETAS ENUMERADAS DEL 10 AL 18									
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	10 A	1,187.20	1,183.64	3.56	0.30%	11 A	1,197.60	1,193.41	4.19	0.31%	12 A	1,182.30	1,177.57	4.73	0.40%
	200 rev	13 A	1,197.70	1,193.27	4.43	0.37%	14 A	1,194.80	1,189.78	5.02	0.45%	15 A	1,196.00	1,190.38	5.62	0.47%
	300 rev	16 A	1,188.10	1,181.80	6.30	0.53%	17 A	1,195.00	1,188.07	6.93	0.61%	18 A	1,195.70	1,188.17	7.53	0.63%
AC-30	100 rev	10 B	1,189.90	1,186.57	3.33	0.28%	11 B	1,178.00	1,174.11	3.89	0.30%	12 B	1,177.10	1,172.63	4.47	0.38%
	200 rev	13 B	1,186.10	1,181.95	4.15	0.35%	14 B	1,071.40	1,067.11	4.29	0.37%	15 B	1,189.00	1,183.65	5.35	0.45%
	300 rev	16 B	1,180.00	1,174.34	5.66	0.48%	17 B	1,186.90	1,180.61	6.29	0.49%	18 B	1,231.30	1,224.16	7.14	0.58%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	10 C	1,191.30	1,190.35	0.95	0.08%	11 C	1,178.10	1,176.57	1.53	0.09%	12 C	1,177.10	1,174.98	2.12	0.18%
	200 rev	13 C	1,130.70	1,128.66	2.04	0.18%	14 C	1,189.50	1,186.76	2.74	0.23%	15 C	1,171.50	1,168.22	3.28	0.28%
	300 rev	16 C	1,196.40	1,193.05	3.35	0.28%	17 C	1,183.90	1,179.99	3.91	0.30%	18 C	1,186.30	1,181.79	4.51	0.38%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	10 D	1,168.00	1,166.95	1.05	0.09%	11 D	1,196.50	1,194.82	1.68	0.11%	12 D	1,181.00	1,178.76	2.24	0.19%
	200 rev	13 D	1,191.20	1,188.82	2.38	0.20%	14 D	1,149.50	1,146.63	2.87	0.22%	15 D	1,200.10	1,196.50	3.60	0.30%
	300 rev	16 D	1,192.00	1,187.95	4.05	0.34%	17 D	1,199.60	1,194.92	4.68	0.36%	18 D	1,190.00	1,184.76	5.24	0.44%

Tabla 3-25. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Durabilidad para condición 1.5 hrs de envejecimiento a 60°C en horno.

<b>ENSAYO DURABILIDAD</b>		Envejecimiento de 3.0 hrs a 60°C										PROBETAS ENUMERADAS DEL 19 AL 27				
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	19 A	1,148.30	1,144.51	3.79	0.33%	20 A	1,185.80	1,181.29	4.51	0.35%	21 A	1,160.30	1,155.31	4.99	0.43%
	200 rev	22 A	1,189.30	1,184.54	4.76	0.40%	23 A	1,195.30	1,189.92	5.38	0.42%	24 A	1,198.30	1,192.31	5.99	0.50%
	300 rev	25 A	1,186.20	1,179.56	6.64	0.56%	26 A	1,198.20	1,190.89	7.31	0.58%	27 A	1,196.20	1,188.31	7.89	0.66%
AC-30	100 rev	19 B	1,183.80	1,180.25	3.55	0.30%	20 B	1,169.80	1,165.71	4.09	0.31%	21 B	1,141.30	1,136.73	4.57	0.40%
	200 rev	22 B	1,186.20	1,181.69	4.51	0.38%	23 B	1,198.20	1,193.05	5.15	0.40%	24 B	1,186.30	1,180.61	5.69	0.48%
	300 rev	25 B	1,192.40	1,186.32	6.08	0.51%	26 B	1,183.50	1,176.87	6.63	0.53%	27 B	1,195.20	1,187.91	7.29	0.61%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	19 C	1,183.50	1,182.08	1.42	0.12%	20 C	1,192.20	1,190.17	2.03	0.21%	21 C	1,189.90	1,187.28	2.62	0.22%
	200 rev	22 C	1,177.10	1,174.63	2.47	0.21%	23 C	1,190.00	1,186.91	3.09	0.22%	24 C	1,179.80	1,176.14	3.66	0.31%
	300 rev	25 C	1,194.50	1,190.80	3.70	0.31%	26 C	1,180.20	1,175.95	4.25	0.33%	27 C	1,185.30	1,180.44	4.86	0.41%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	19 D	1,173.10	1,171.69	1.41	0.12%	20 D	1,169.20	1,167.21	1.99	0.13%	21 D	1,187.50	1,184.89	2.61	0.22%
	200 rev	22 D	1,192.90	1,190.16	2.74	0.23%	23 D	1,190.00	1,186.67	3.33	0.28%	24 D	1,218.30	1,214.28	4.02	0.33%
	300 rev	25 D	1,153.50	1,149.23	4.27	0.37%	26 D	1,172.00	1,167.08	4.92	0.42%	27 D	1,187.50	1,181.92	5.58	0.47%

Tabla 3-26. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Durabilidad para condición 3.0 hrs de envejecimiento a 60°C en horno.

<b>ENSAYO DURABILIDAD</b>			Envejecimiento de 6.0 hrs a 60°C						PROBETAS ENUMERADAS DEL 28 AL 36							
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	28 A	1,211.50	1,207.02	4.48	0.37%	29 A	1,208.10	1,203.03	5.07	0.45%	30 A	1,196.40	1,190.66	5.74	0.48%
	200 rev	31 A	1,115.00	1,109.87	5.13	0.46%	32 A	1,212.40	1,206.22	6.18	0.51%	33 A				
	300 rev	34 A	1,213.30	1,205.90	7.40	0.61%	35 A	1,196.40	1,188.50	7.90	0.66%	36 A				
AC-30	100 rev	28 B	1,212.70	1,208.46	4.24	0.35%	29 B	1,222.00	1,217.11	4.89	0.40%	30 B				
	200 rev	31 B	1,210.50	1,205.29	5.21	0.43%	32 B	1,213.30	1,207.48	5.82	0.48%	33 B				
	300 rev	34 B	1,208.40	1,201.75	6.65	0.55%	35 B	1,210.40	1,203.14	7.26	0.60%	36 B				
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	28 C	1,196.30	1,194.39	1.91	0.16%	29 C	1,208.40	1,205.86	2.54	0.25%	30 C	1,209.40	1,206.01	3.39	0.28%
	200 rev	31 C	1,208.40	1,205.14	3.26	0.27%	32 C	1,133.30	1,129.67	3.63	0.28%	33 C	1,216.00	1,211.62	4.38	0.36%
	300 rev	34 C	1,225.70	1,221.16	4.54	0.37%	35 C	1,210.00	1,204.92	5.08	0.42%	36 C				
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	28 D	1,210.70	1,208.52	2.18	0.18%	29 D	1,203.70	1,200.93	2.77	0.19%	30 D	1,230.60	1,227.15	3.45	0.28%
	200 rev	31 D	1,206.20	1,202.82	3.38	0.28%	32 D	1,224.40	1,220.36	4.04	0.36%	33 D	1,228.50	1,223.71	4.79	0.39%
	300 rev	34 D	1,215.40	1,210.17	5.23	0.43%	35 D	1,213.10	1,207.28	5.82	0.48%	36 D				

Tabla 3-27. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Durabilidad para condición 6.0 hrs de envejecimiento a 60°C en horno.

<b>ENSAYO DURABILIDAD</b>		Envejecimiento de 12 hrs a 60°C						PROBETAS ENUMERADAS DEL 46 AL 54								
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	46 A	1,171.10	1,163.37	7.73	0.66%	47 A	1,178.30	1,169.93	8.37	0.68%	48 A	1,190.20	1,181.15	9.05	0.76%
	200 rev	49 A	1,139.60	1,125.36	14.25	1.25%	50 A	1,195.50	1,179.96	15.54	1.26%	51 A	1,177.80	1,161.90	15.90	1.35%
	300 rev	52 A	1,184.80	1,166.20	18.60	1.57%	53 A	1,207.40	1,187.84	19.56	1.58%	54 A	1,900.00	1,868.27	31.73	1.67%
AC-30	100 rev	46 B	1,157.40	1,150.11	7.29	0.63%	47 B	1,182.10	1,174.06	8.04	0.68%	48 B	1,187.90	1,179.23	8.67	0.73%
	200 rev	49 B	1,202.20	1,188.37	13.83	1.15%	50 B	1,192.80	1,178.49	14.31	0.16%	51 B	1,199.20	1,184.21	14.99	1.25%
	300 rev	52 B	1,181.50	1,164.60	16.90	1.43%	53 B	1,189.60	1,171.99	17.61	1.51%	54 B	1,193.80	1,175.53	18.27	1.53%
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	46 C	1,188.90	1,184.74	4.16	0.35%	47 C	1,174.00	1,169.30	4.70	0.43%	48 C	1,176.10	1,170.81	5.29	0.45%
	200 rev	49 C	1,165.70	1,159.04	6.66	0.57%	50 C	1,181.60	1,174.26	7.34	0.59%	51 C	1,198.90	1,190.86	8.04	0.67%
	300 rev	52 C	1,188.60	1,176.36	12.24	1.03%	53 C	1,184.30	1,171.51	12.79	1.05%	54 C	1,193.50	1,180.01	13.49	1.13%
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	46 D	1,184.10	1,178.65	5.45	0.46%	47 D	1,171.20	1,165.23	5.97	0.48%	48 D	1,190.00	1,183.34	6.66	0.56%
	200 rev	49 D	1,178.30	1,169.23	9.07	0.77%	50 D	1,183.00	1,173.30	9.70	0.78%	51 D	1,174.20	1,163.98	10.22	0.87%
	300 rev	52 D	1,187.70	1,174.04	13.66	1.15%	53 D	1,191.20	1,176.91	14.29	1.24%	54 D	1,159.30	1,144.81	14.49	1.25%

Tabla 3-28. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Durabilidad para condición 12.0 hrs de envejecimiento a 60°C en horno.

<b>ENSAYO DURABILIDAD</b>		Envejecimiento de 24 hrs a 60°C										PROBETAS ENUMERADAS DEL 37 AL 45				
Tipo de cemento asfáltico	Severidad de desgaste	No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida		No. Prob.	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Pérdida	
					Masa (gr)	%				Masa (gr)	%				Masa (gr)	%
AC-20	100 rev	37 A	1,220.90	1,220.89	12.82	1.05%	38 A	1,216.50	1,203.12	13.38	1.07%	39 A	1,207.70	1,193.81	13.89	1.15%
	200 rev	40 A	1,206.20	1,206.18	18.45	1.53%	41 A	1,217.60	1,198.36	19.24	1.54%	42 A	1,211.50	1,191.87	19.63	1.62%
	300 rev	43 A	1,210.20	1,210.18	23.36	1.93%	44 A	1,184.70	1,161.24	23.46	1.98%	45 A				
AC-30	100 rev	37 B	1,216.00	1,215.99	11.55	0.95%	38 B	1,214.70	1,202.55	12.15	0.96%	39 B	1,221.30	1,207.87	13.43	1.10%
	200 rev	40 B	1,217.80	1,217.79	17.41	1.43%	41 B	1,232.90	1,214.65	18.25	1.48%	42 B				
	300 rev	43 B	1,217.60	1,217.58	20.70	1.70%	44 B	1,217.20	1,195.90	21.30	1.75%	45 B				
Asfalto modificado tipo I-D	100 rev	37 C	1,182.50	1,182.49	7.45	0.63%	38 C	1,184.90	1,176.84	8.06	0.65%	39 C	1,190.30	1,181.97	8.33	0.70%
	200 rev	40 C	1,184.30	1,184.29	10.42	0.88%	41 C	1,181.10	1,170.12	10.98	0.90%	42 C	1,194.90	1,181.04	13.86	1.16%
	300 rev	43 C	1,177.30	1,177.29	16.01	1.36%	44 C	1,189.10	1,172.33	16.77	1.41%	45 C				
Asfalto modificado tipo III-D	100 rev	37 D	1,180.20	1,180.19	8.97	0.76%	38 D	1,191.70	1,182.05	9.65	0.81%	39 D	1,136.70	1,124.99	11.71	1.03%
	200 rev	40 D	1,174.50	1,174.49	12.57	1.07%	41 D	1,188.60	1,175.29	13.31	1.12%	42 D	1,189.90	1,176.22	13.68	1.15%
	300 rev	43 D	1,187.60	1,187.59	17.81	1.50%	44 D	1,191.90	1,173.43	18.47	1.55%	45 D				

Tabla 3-29. Resultados del Ensayo de Desgaste para la prueba de Durabilidad para condición de 24.0 hrs de envejecimiento a 60°C en horno.

Con todos los resultados de los Porcentajes de Pérdida obtenidos mediante la Prueba de Desgaste, se elabora una tabla resumen de los datos, con los promedios de los porcentajes de pérdida:

SEVERIDAD	TIEMPO (HRS)	PORCENTAJES DE PERDIDA			
		ASFALTO AC-20	ASFALTO AC-30	ASFALTO TIPO I-D	ASFALTO TIPO III-D
100 revoluciones	0.00	0.31%	0.29%	0.10%	0.13%
	1.50	0.34%	0.32%	0.12%	0.13%
	3.00	0.37%	0.34%	0.18%	0.16%
	6.00	0.43%	0.38%	0.23%	0.22%
	12.00	0.70%	0.68%	0.41%	0.50%
	24.00	1.09%	1.00%	0.66%	0.87%
200 revoluciones	0.00	0.39%	0.37%	0.24%	0.22%
	1.50	0.43%	0.39%	0.23%	0.24%
	3.00	0.44%	0.42%	0.25%	0.28%
	6.00	0.49%	0.46%	0.30%	0.34%
	12.00	1.29%	0.85%	0.61%	0.81%
	24.00	1.56%	1.46%	0.98%	1.11%
300 revoluciones	0.00	0.60%	0.50%	0.31%	0.38%
	1.50	0.59%	0.52%	0.32%	0.38%
	3.00	0.60%	0.55%	0.35%	0.42%
	6.00	0.64%	0.58%	0.40%	0.46%
	12.00	1.61%	1.49%	1.07%	1.21%
	24.00	1.96%	1.73%	1.39%	1.53%

Tabla 3-30. Pérdida por desgaste en ensayo Cántabro. Temperatura de 60°C a diferente grado de severidad. Cementos asfálticos AC-20, AC-30, TIPO I-D y TIPO III-D.

Mediante la recopilación de los datos obtenidos en la Tabla 3-30 obtenemos los gráficos 3-31 al 3-36 para comparar el efecto que tuvieron las probetas durante el envejecimiento en el horno entre los 4 asfaltos y evaluar su durabilidad.

Como era de esperarse los porcentajes de pérdidas incrementan en las probetas que estuvieron expuestas por mayor tiempo en el horno a 60°C en los 4 asfaltos. Una vez más se puede comprobar en los resultados que el Asfalto Modificado Tipo I-D es la línea que representa menores pérdidas, por lo que brinda los mejores resultados bajo estas condiciones. Se mantiene el comportamiento como en los ensayos anteriores, siendo el Asfalto AC-20 el que tiene las mayores pérdidas. En el Gráfico 3-31 se observa que las pérdidas del AC-20 son de casi el doble en el punto de 24 horas a una severidad de 100 revoluciones con respecto al Asfalto Modificado Tipo I-D. La diferencia entre estos dos asfaltos aumenta un poco en el Gráfico 3-33 en el mismo punto donde se ensayaron a 200 revoluciones, y se mantiene para el ensayo a 300 revoluciones que se refleja en el Gráfico 3-35, habiendo primero una diferencia de 0.43%, 0.58% y 0.57% respectivamente.

En base a los resultados los asfaltos se colocan nuevamente en las mismas posiciones que en los casos anteriores donde, como ya se mencionó, el asfalto que ha arrojado el menor Porcentaje de Pérdidas de peso de las probetas ha sido el Asfalto Modificado Tipo I-D, seguido por el Asfalto Modificado Tipo III-D, luego el Asfalto AC-30 y el Asfalto AC-20 en último lugar.

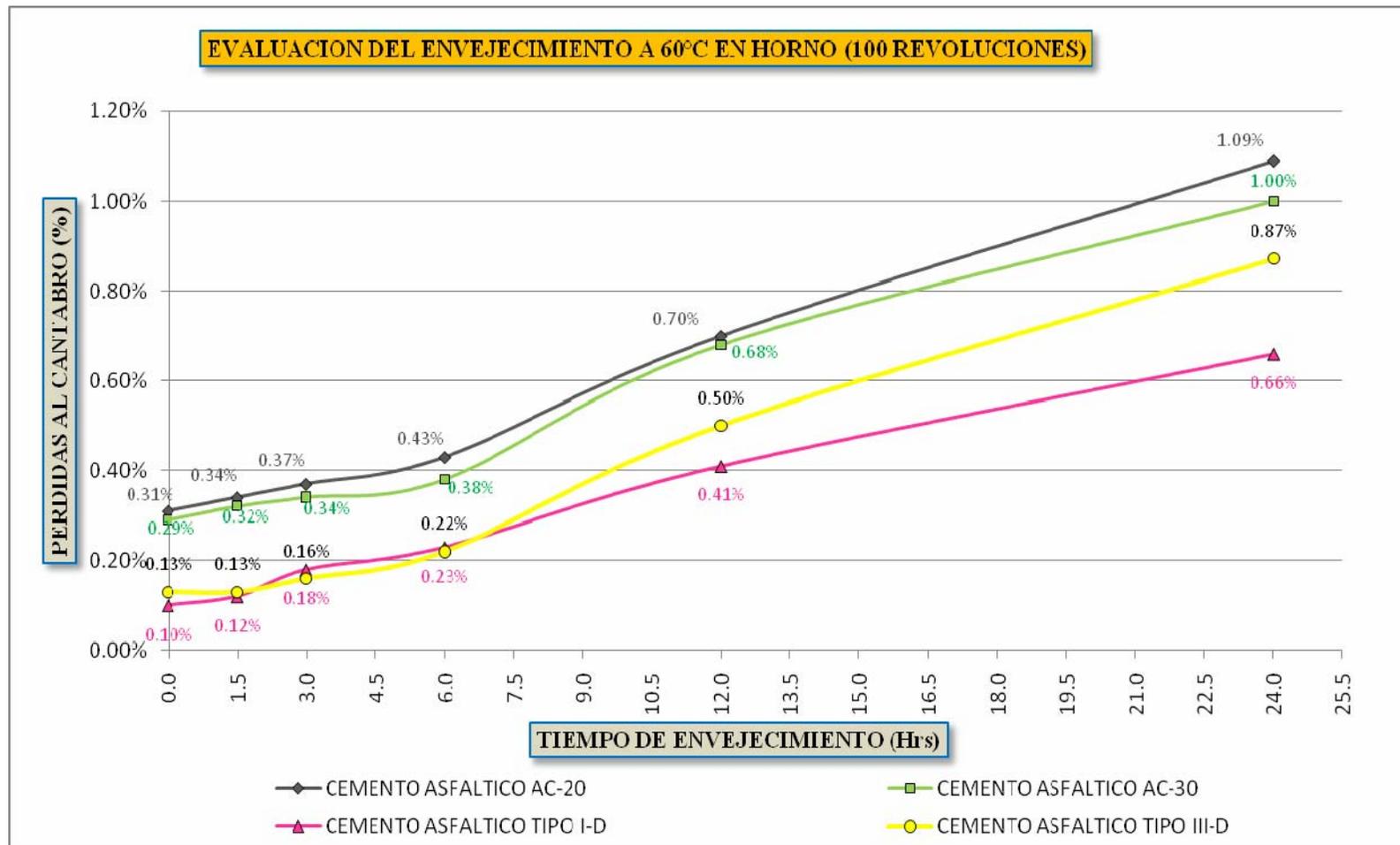


Gráfico 3-31 Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Durabilidad a diferentes periodos de envejecimiento a una severidad de 100 revoluciones, Diagrama de Dispersión.

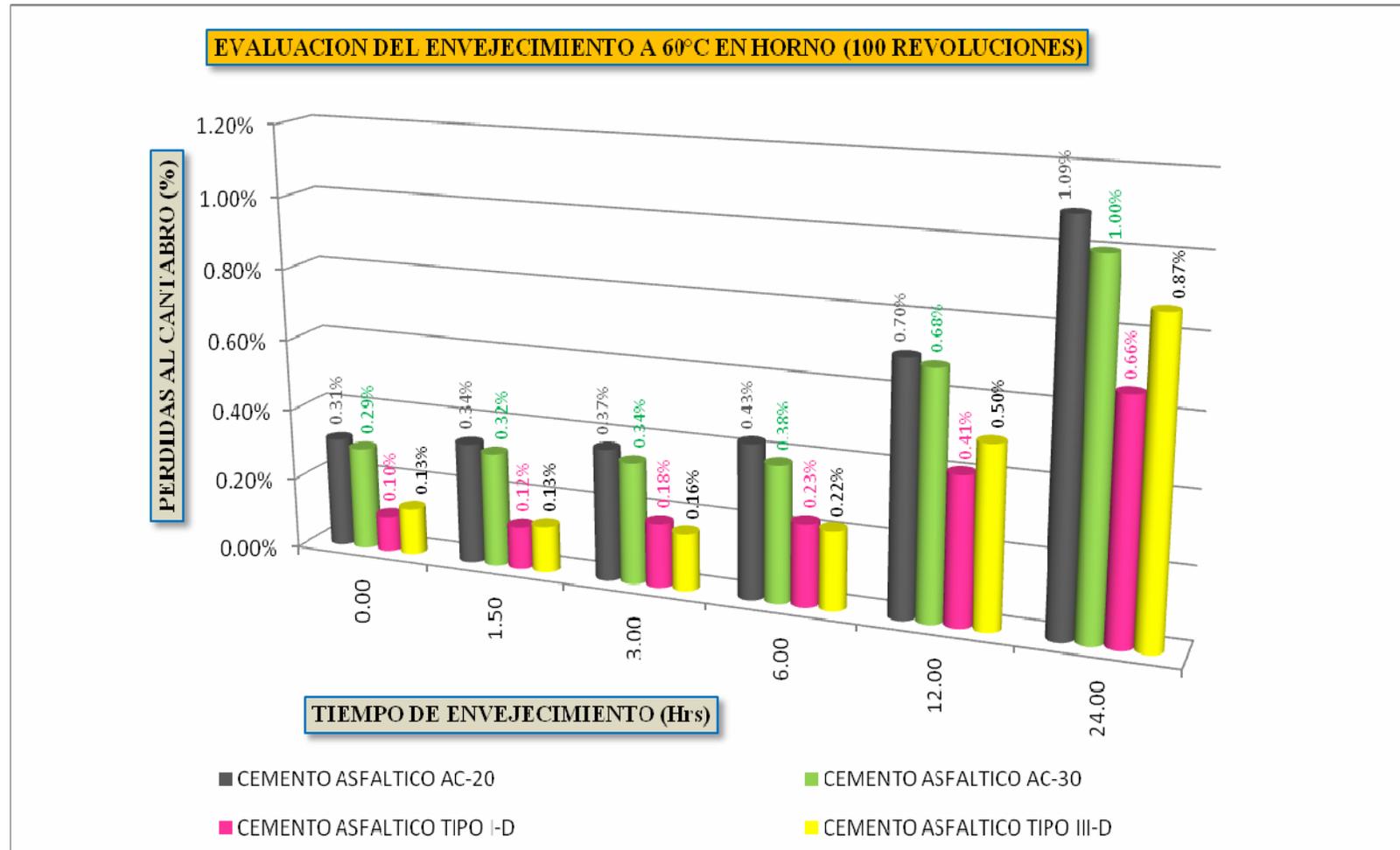


Gráfico 3-32. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Durabilidad a diferentes periodos de envejecimiento a una severidad de 100 revoluciones, Diagrama de Barras.

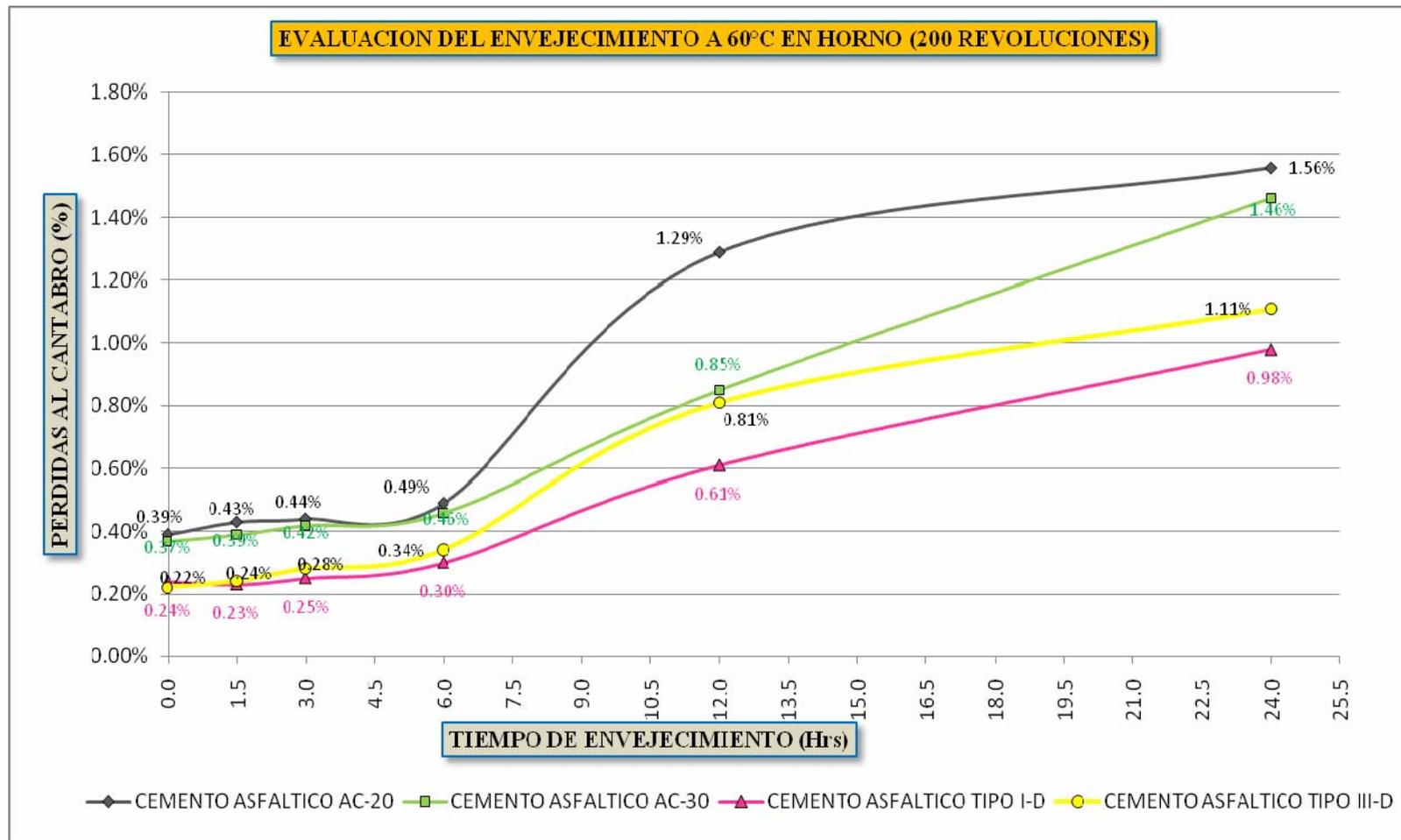


Gráfico 3-33. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Durabilidad a diferentes periodos de envejecimiento a una severidad de 200 revoluciones, Diagrama de Dispersión.

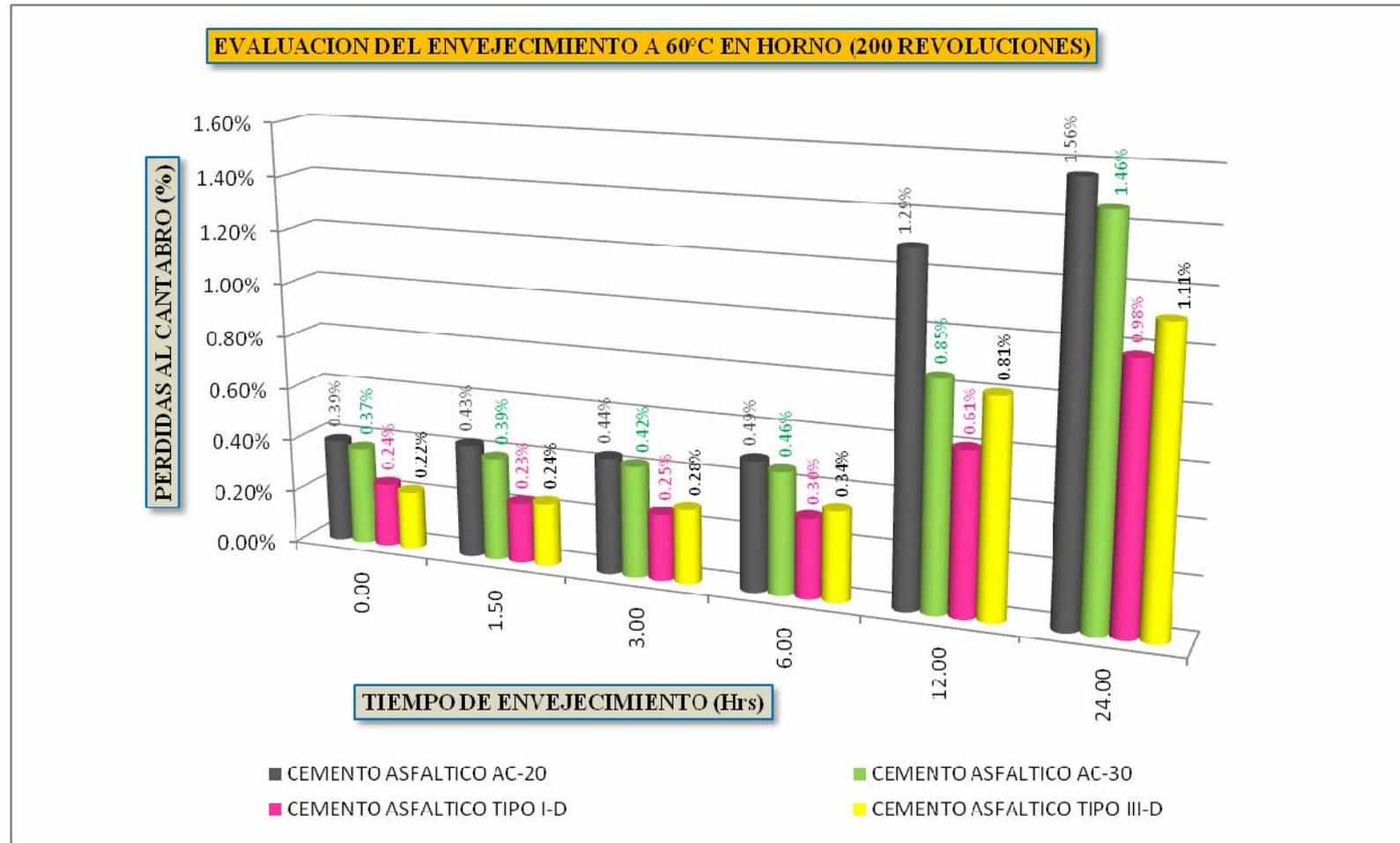


Gráfico 3-34. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Durabilidad a diferentes periodos de envejecimiento a una severidad de 200 revoluciones, Diagrama de Barras.

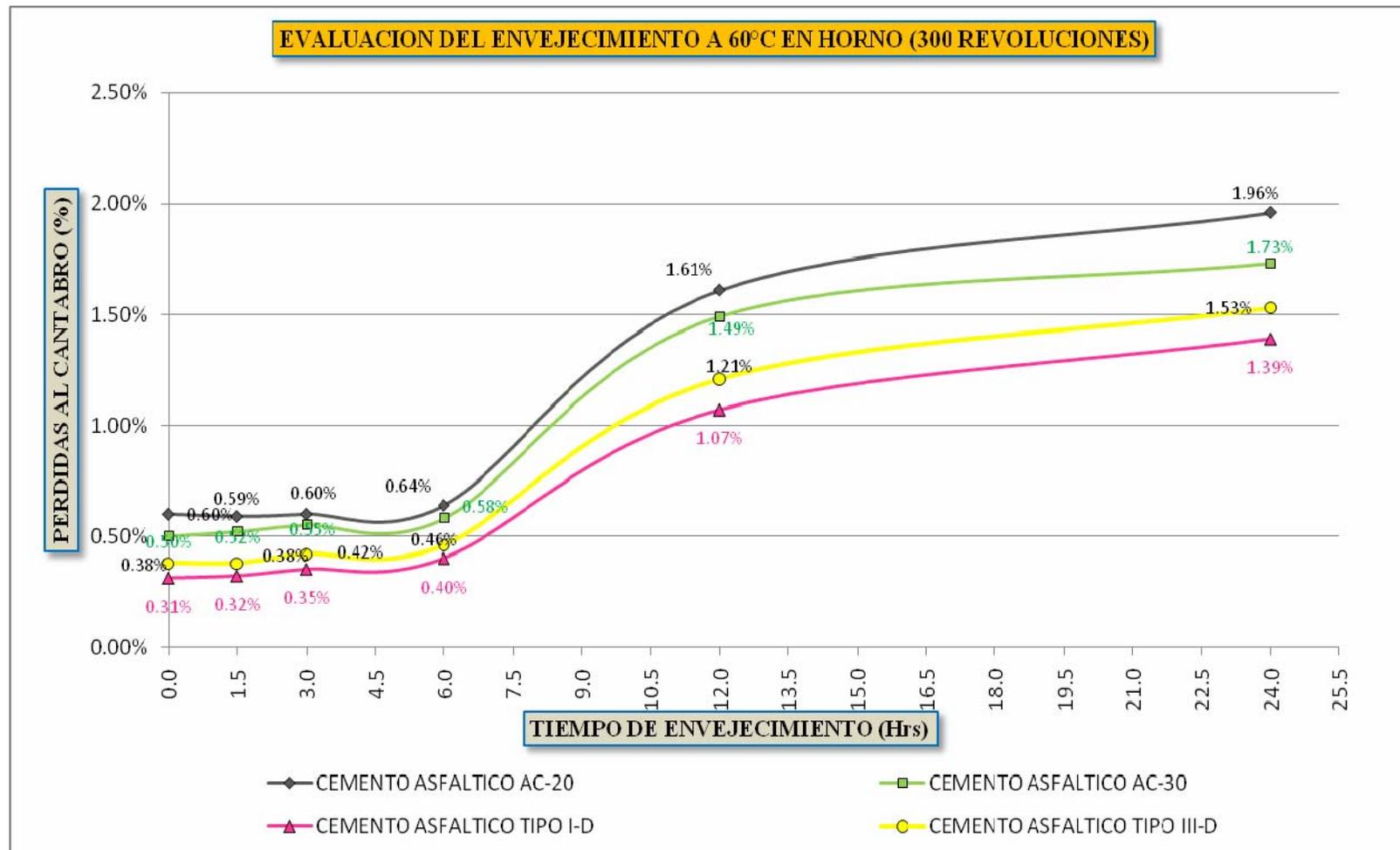


Gráfico 3-35. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Durabilidad a diferentes periodos de envejecimiento a una severidad de 300 revoluciones, Diagrama de Dispersión.

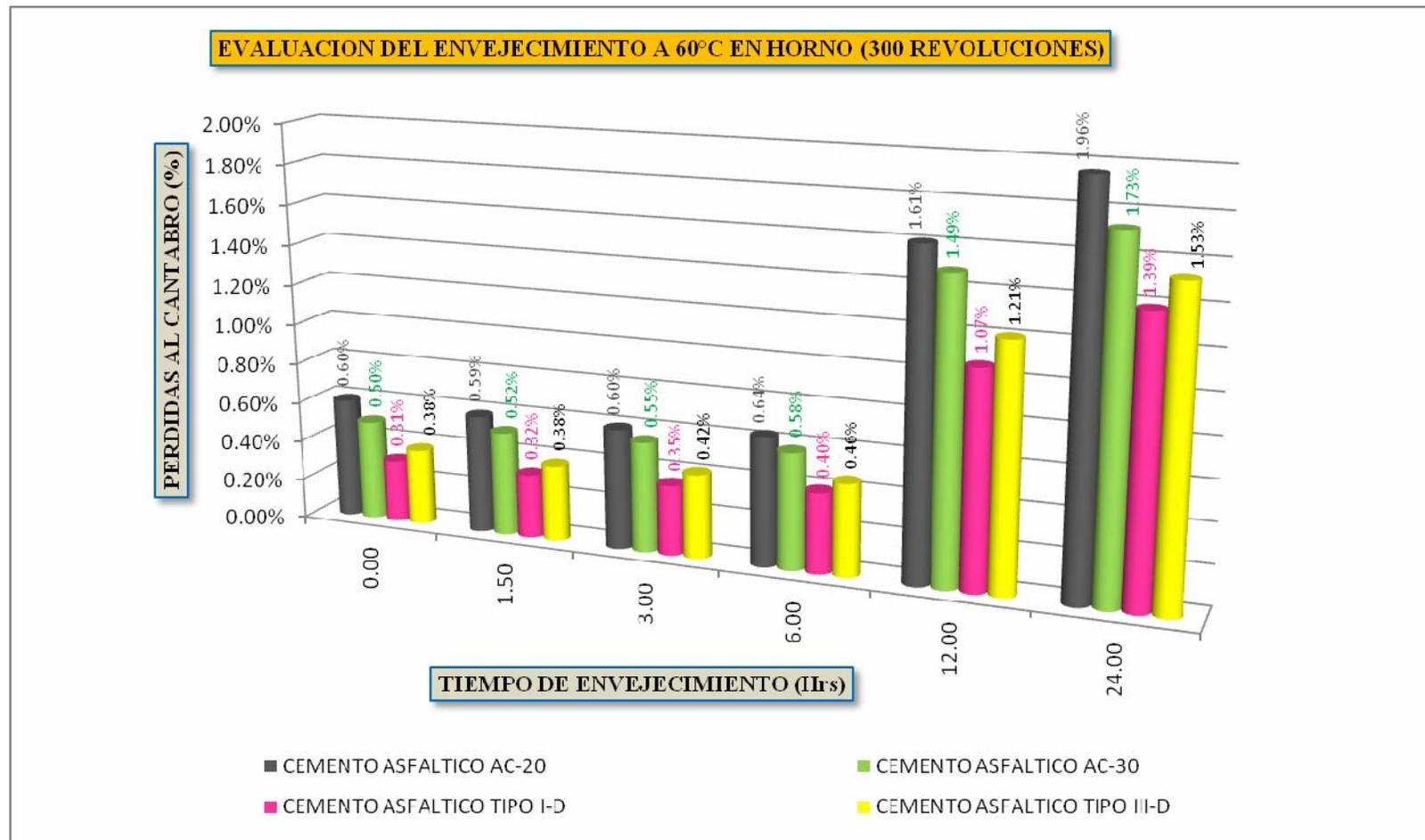


Gráfico 3-36. Comparación del comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluando su Durabilidad a diferentes periodos de envejecimiento a una severidad de 300 revoluciones, Diagrama de Barras.

## **CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

- Al evaluar los asfaltos para determinar la su respuesta a la Cohesión, se obtuvo el primer resultado que se fue manteniendo a lo largo de las pruebas. Los resultados manifiestan que los Asfaltos Modificados presentaron los menores porcentajes de pérdidas y los convencionales AC-20 y AC-30 tuvieron mayores, por lo que se comprueba que debido a la existencia de polímeros dentro de estas mezclas modificadas se pueden obtener mejores desempeños ofreciendo mayor resistencia al desgaste dado que brindan mayor cohesión a la mezcla asfáltica.
- Existe una marcada tendencia en el aumento de la pendiente de las curvas de estado de Susceptibilidad Térmica que indica mayores porcentajes de pérdidas por desgaste, para todos los asfaltos del estudio, al pasar los 55°C, lo que nos indica como todos los asfaltos sin excepción, aunque en diferente grado uno de otro, presenta mayores porcentajes de pérdida cuando están sometidos a temperaturas superiores a las de sus puntos de ablandamiento. Demostrando que el asfalto perteneciente a una mezcla es más susceptible a daños cuando se encuentra a temperaturas mayores a las de su punto de ablandamiento; y en términos generales a mayor temperatura de servicio en la carpeta asfáltica mayor deterioro sufre ésta.

- Al analizar los resultados de la prueba de Adhesión realizada a los cuatro asfaltos, observamos que si bien la presencia del agua para una mezcla asfáltica significa aumento de deterioro en la misma observada en la disminución de la adhesión del asfalto sobre las partículas de pétreo (desenvuelta de las partículas), sigue siendo más significativo la temperatura sobre la mezcla en servicio como indicativo de una mayor susceptibilidad al deterioro, para ver esto solo basta comparar los resultados de pérdidas por desgaste de las cuatro condiciones de adhesión: 1) Inmersión A a 35°C durante 4 días, 2) Inmersión B a 60°C durante 24 horas, 3) En seco a 25°C y 4) al horno a 60°C durante 12 horas; en donde la tercera condición muestra las menor perdidas y la segunda las mayores. La condición 2) fue la más desfavorable dado que además de encontrarse bajo los efectos del agua, esta tenía una temperatura alta. Resulta entonces interesante al comparar la primera y la cuarta condición; demuestra que esta última (al horno a 60°C) muestra mayores porcentajes de perdida respecto a la de inmersión a 35°C, aunque es poca la diferencia, la evidencia demuestra que son mayores los porcentajes de pérdida en las condiciones de temperatura a 60°C, por lo que predomina la temperatura como principal factor de deterioro de la mezcla.
- Entendiendo que la temperatura es el factor de mas significancia en el deterioro de una mezcla asfáltica, el ensayo de Durabilidad nos muestra las curva de estado, de los asfaltos estudiados, que expone como afecta a la mezcla asfáltica el período en el cual a estado sometido la mezcla a una temperatura especifica; de estas curvas

observamos una tendencia aproximadamente lineal, con un escalón de pérdidas entre los períodos de 6hrs a 12hrs, lo que nos explica que el deterioro será mayor a mayor temperatura de servicio de mezcla asfáltica y mayor aún cuanto más largos sean los períodos de tiempo en que esa mezcla asfáltica se encuentra a esas altas temperaturas.

- Cuatro asfaltos, de los más empleados en el país, fueron estudiados para predecir el comportamiento que tendrán estos como parte de una mezcla asfáltica sobre una carretera. En términos generales fue el asfalto TIPO I-D el que mejor resistencia presentó a cada uno de los ensayos realizados, demostrando poder aportar una mejor cohesión y adhesión a la mezcla, una mayor resistencia a la Susceptibilidad Térmica y una mejor respuesta al Envejecimiento indicando poder retener sus características originales durante un mayor período de tiempo. El segundo lugar lo ocupa el asfalto TIPO III-D, seguido del AC-30 y finalmente el AC-20. Cabe aclarar que el hecho de que el asfalto AC-20 quedé ubicado en último lugar al evaluar los aportes que puede hacer a la mezcla, no es indicio de que este asfalto no pueda emplearse en carreteras; lo que esta investigación simplemente concluye es que de los cuatro asfaltos estudiados es el que menor resistencia al desgaste presentó.

- Estos resultados son determinados como aceptables bajo la evaluación de un software que analiza el comportamiento de los datos de manera estadística bajo la óptica del Análisis de la Varianza. Este análisis se puede apreciar de manera resumida en el Anexo 4 y sirvió para determinar las diferencias significativas entre los asfaltos, además de obtener datos estadísticos más específicos para determinar los comportamientos entre sí de los grupos de datos.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Al iniciar un proyecto de carreteras se debería realizar un estudio similar a éste, simultáneamente al desarrollo del diseño Marshall, con el objetivo de comparar los posibles asfaltos con los que se fabricarán la mezcla de la carpeta, a manera de conocer cuál de los asfaltos que se tienen previstos, pueden usarse en la obra, resulta ser el más adecuado para el proyecto, siendo éste el que brinde mejores resultados de pérdidas por desgaste, garantizando un asfalto que aporte la mejor cohesión y adhesión a la mezcla, así como una mejor durabilidad y mejor resistencia a la temperatura de servicio; asegurándonos así, de haber empleado el asfalto de mejores características a la obra.
- En este estudio se empleó el diseño de una mezcla asfáltica con porcentaje óptimo de asfalto que incluía agregados finos y filler, con el objeto de ensayar una mezcla tal y como aparecería en una carpeta asfáltica densa, sin embargo, para facilitar un estudio futuro para comparación de asfaltos, recomendamos el desarrollo de un estudio similar en donde se pueda evaluar, además de una mezcla densa para las briquetas, una mezcla abierta, y así analizar si los resultados de este estudio arrojan tendencias similares en cuanto a la caracterización y comportamiento de los ligantes aunque los porcentajes de pérdidas sean diferentes, permitiéndonos considerar como el cambio del tipo de mezcla, para la elaboración de briquetas, afectaría o no, en la caracterización de los asfalto mediante el desarrollo del Método UCL.

## **BIBLIOGRAFIA**

### **NORMAS**

- Norma NLT-362/92 “Efecto del Agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdidas por desgaste”.
- Norma NLT-352/86 “Caracterización de las mezclas bituminosas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste”.
- Norma AASHTO M226-80 (2000), “Grados de Viscosidad del Cemento Asfáltico”.
- Norma AASHTO T245-97 (2001), “Resistencia a la plasticidad de las Mezclas Asfálticas usando el aparato de Marshall”.
- Norma ASTM D3381-83 “Grado de Viscosidad del Cemento Asfáltico para uso de la Construcción de Pavimentos”.
- Norma ASTM D5976-00 “Especificaciones para Asfaltos Modificados Tipo I, usados para pavimentos de construcción”.
- Norma ASTM D5841-00 “Especificaciones para Asfaltos Modificados Tipo III, usados para pavimentos de construcción”.

## DOCUMENTOS

- Ing Cira Piedrahita, Irina Rivera, David González, Hugo Arenas, “Asiduidad del Método Universal de Caracterización Ligante (Método UCL) para la selección del cemento asfáltico en mezclas asfálticas de alto módulo” Universidad de Cataluña, 1994.
- Raúl González F., “Obtención y producción de Asfalto” Universidad Técnica Federico Santamaría, Año 1999.
- Hugo Bianchetto, Rodrigo Miró, Felix Pérez, “Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: Beneficios y Limitaciones de la incorporación de filleres comerciales, Primera Parte: Estudios en base al Método UCL.”, Universidad Nacional de la Plata, Argentina, Año 1998.
- Dr. Saúl Castillo Aguilar, “Estudio comparativo de mezclas asfálticas modificadas mediante el ensayo tensión indirecta y cántabro” Universidad Veracruzana, Año 2004.
- Ing. Carlos Mata Trigueros, “Análisis comparativo del Funcionamiento de los Cementos Asfálticos AC 60/70, PMB Tipo III-E y PMB Tipo I-D en el Concreto Asfáltico bajo las condiciones del Bypass de Usulután”, Asfaltos de Centroamérica, Año 2002.
- Instituto del Asfalto, “Manual Básico de Emulsiones Asfálticas” Año 2003.
- Ing. Luis Guillermo Loría, “Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros” Universidad de Costa Rica, Año 2007.

- Garnica, Delgado, Gómez, Romero, Alarcón, “Aspectos del Diseño volumétrico de Mezclas Asfálticas” Instituto Mexicano de Transporte, Publicación Técnica #246, Año 2004.

#### TESIS

- Mauricio Cortéz, Hugo Guzmán y Aplicar Reyes: “Guía básica de Diseño, Control de Producción y Colocación de Mezclas Asfálticas en caliente” Universidad de El Salvador, Año 2007.
- Walter Barrios, “Guía Teórica y Práctica del Curso de Pavimentos y Mantenimiento de Carreteras” Universidad de San Carlos, Guatemala, Año 2007.

# **ANEXOS**

## **INDICE DE ANEXOS**

**ANEXO 1: NORMA NLT-352/86**

**ANEXO 2: DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA**

**ANEXO 3: ESPECIFICACIONES DE LOS LIGANTES ASFALTICOS**

**ANEXO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS**

**ANEXO 1**

**NORMA NLT  
ENSAYO CANTABRO**

## **NLT-352/86**

### **Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste**

#### **1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN**

- 1.1. Esta Norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación del valor de la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas, empleando la máquina de Los Ángeles. El procedimiento puede emplearse tanto en el proyecto de mezclas en laboratorio como para el control en obra de las mismas.
- 1.2. El procedimiento se aplica a las mezclas bituminosas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño máximo sea inferior a 25mm.
- 1.3. El ensayo permite valorar indirectamente la cohesión, trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico.

## 2. APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

- 2.1. Equipo de compactación. Formado por el molde, collar, placa de base y maza de compactación, empleados en la norma NLT-159, “Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall”.
- 2.2. Máquina de Los Ángeles. La máquina para el ensayo de desgaste de Los Ángeles tendrá las características indicadas en la norma NLT-149, “Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Ángeles”
- 2.3. Termómetros. Para medir temperaturas de los áridos, ligante y mezcla bituminosa, se emplearán termómetros metálicos, con escala hasta 200°C y sensibilidad de 3°C. Para la medida de la temperatura a la que se realiza el ensayo, se utilizará un termómetro con escala 0 a 40°C y sensibilidad de 0.5°C.
- 2.4. Balanzas. Una balanza de 2 kg de capacidad y 0.1 g de sensibilidad para pesar las probetas y otra de 5 kg de capacidad y 1 g de sensibilidad para la preparación de las mezclas.
- 2.5. Cámara termostática. Para mantener constante la temperatura durante el ensayo, se deberá disponer de una cámara o recinto capaz de alojar la máquina de Los Ángeles, y en la que la temperatura de ensayo pueda regularse con un error máximo de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .
- 2.6. Material general. Bandejas, cazos, espátulas, guantes de amianto, lápices grasos, cogedores curvos, discos de papel de filtro, etc.

### 3. PROCEDIMIENTO

#### 3.1. Preparación de las probetas

3.1.1. Número de probetas. Se prepara un mínimo de cuatro probetas para cada contenido ensayado de ligante.

3.1.2. Preparación de los áridos. Las distintas fracciones de áridos que componen la mezcla se secan en estufa hasta pesada constante a una temperatura de 105 a 110°C.

3.1.3. Temperaturas de mezcla y compactación. Las temperaturas de ligante en la mezcla y compactación de las probetas, serán las adecuadas para hacer compatible una buena envuelta sin que se produzca escurrimiento. Como criterio orientativo, se pueden elegir las temperaturas que se prescriben, según viscosidad, en el apartado 3.1.3 de la norma NLT-159, modificándolas si fuera preciso para cumplir los requisitos de envuelta y escurrimiento indicado antes.

3.1.4. Preparación de mezclas. Se pesan sucesivamente en un cazo tarado las cantidades de cada fracción de los áridos necesarios para la fabricación de una probeta, de tal modo que la cantidad total de áridos sea de 1,000 g. El resto del proceso de preparación coincide con el indicado en la norma NLT-159 para la fabricación de las probetas Marshall.

3.1.5. Compactación de las mezclas. La energía de compactación será de 50 golpes por cara, empleando el equipo y procedimiento de compactación descritos en la norma NLT-159.

3.1.6. Densidad y análisis de huevos. Una vez desmoldadas las probetas, se determina su densidad y contenido de huecos a partir de la medida geométrica de su volumen y densidad relativa de los materiales, según la Norma NLT-168.

### 3.2. Ejecución del ensayo

3.2.1. En general, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15 y 30°C, con una tolerancia máxima de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

3.2.2. Se determina la masa de cada probeta con aproximación de 0.1 g y se anota este valor,  $P_1$ . Antes de ensayarlas, las probetas se mantienen a la temperatura de ensayo un mínimo de seis horas.

3.2.3. Se introduce a continuación una probeta en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a la misma velocidad normalizada en la NLT-149 de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas.

3.2.4. Al final del ensayo, se saca la probeta y se pesa de nuevo con la misma aproximación de 0.1 g anotando este valor como  $P_2$ .

3.2.5. El ensayo se repite de forma idéntica con cada una de las probetas análogas preparadas según 3.1.

#### 4. RESULTADOS

4.1. Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la expresión:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Donde:

P = Valor de la pérdida por desgaste, en %.

P<sub>1</sub> = Masa inicial de la probeta, en gramos.

P<sub>2</sub> = Masa final de la probeta, en gramos.

4.2. Se calcula el valor medio de todas las probetas análogas ensayadas según 3.2.

4.3. En el resultado se incluirá la pérdida media por desgaste y la temperatura de ensayo.

#### 5. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

5.1. “Estudio de la dosificación, características y comportamiento de las mezclas bituminosas porosas para capas de rodadura drenantes”. Cátedra de Caminos y Aeropuertos. ETSICCP. Universidad de Santander. 1980.

## 6. NORMAS PARA CONSULTAR

6.1. NLT-159 “Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall”

6.2. NLT-149 “Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Ángeles”

6.3. NLT-168 “Densidad y huecos de las mezclas bituminosas compactadas”

# ANEXO 2

## DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA

## **INTRODUCCION**

Para el diseño de la mezcla asfáltica para la realización de nuestras probetas de ensayo se tomó como base la utilizada en el proyecto: Ejecución del Mantenimiento Periódico de la Ruta CA01E, Tramo ET. Cus. 20E-ET. SAV01N, el cual se elaboró de acuerdo al MS-2, Instituto del Asfalto.

Se identifican los materiales a utilizar, la composición de la mezcla por cada agregado, las propiedades físicas de los agregados y del asfalto a utilizar.

Los criterios de diseño utilizados son los dados por el Método Marshall para tránsito pesado, considerando los parámetros de diseños dados por este método.

## RESUMEN DE DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE.

### METODO MARSHALL

#### 1. ASFALTO AC 30

Asfalto	AC- 30
Temperatura de mezcla	156 °C -162 °C
Temperatura de compactación	144 °C-148 °C
Peso especifico	1.0409

#### 2. DOSIFICACION DE LA MEZCLA

**Agregado Grueso 1"** Grava mal graduada, gris claro.

**Agregado fino 1** Chispa de 0 a 3/8" Arena mal graduada, gris claro.

Material	Proporción en Peso	Peso Especifico
Grava 1"	42 %	2.544
Chispa 0 a 3/8"	58%	2.538

### **3. CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA**

Se elaboraron cinco juegos de probetas, constituidas por 3 especímenes, con distintas cantidades de asfalto, al 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, procediéndose a realizar los siguientes ensayos de Laboratorio.

- Estabilidad.
- Flujo.
- Densidad Bulk.
- % de Vacíos V.M.A. (vacíos en el agregado mineral).
- V.F.A. (vacíos rellenos de asfalto).
- Gravedad Específica teórica Máxima.

Se tabularon y graficaron los resultados, procediéndose a determinar el % de Asfalto correspondiente a una mezcla con 4% de vacíos (de acuerdo a lo recomendado por el Método Marshall, manual MS-2), verificando el cumplimiento de los parámetros indicados en el Método.

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado.</b>
Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico (%)	5.3 %
Estabilidad Marshall Kgs. – N - Lbs.	1230-12062-2490
Flujo (0.25 mm.)	3.50
Gravedad Específica Bulk.	2.252
Gravedad Específica Teórica Máxima.	2.355
Vacíos de Aire (%)	4.00
Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) (%)	15.97
Vacíos llenados por Asfalto. (VFA)(%)	73

# ANEXO 3

## ESPECIFICACIONES DE ASFALTOS

## ANÁLISIS DE ASFALTOS CONVENCIONALES

A continuación se detallan los resultados obtenidos a las pruebas realizadas de los asfaltos convencionales utilizados para la parte experimental de este trabajo de graduación:

### ASFALTO AC-20

Tanque N°	77
Fecha de muestra	17 de Septiembre de 2008
Fecha de análisis	17 de Septiembre de 2008
Volumen Bbls	2,930
Volumen Gls.	123,060
Batch N°	ASF-AC20-08-039

### ASFALTO AC-30

Tanque N°	73
Fecha de muestra	20 de Octubre de 2008
Fecha de análisis	20 de Octubre de 2008
Volumen Bbls	4,527
Volumen Gls.	190,134
Batch N°	ASF-AC30-08-010

Análisis	Método ASTM	Resultados	
		AC-20	AC-30
Apariencia	Visual	Homogénea	Homogénea
Gravedad Específica a 60 °F	D 3289	1,021	1.023
Flash Point (Cleveland Open Cup), °C	D 92	255	284
Penetración a 25 °C, 100gr, 5seg, mm/10	D 5	73	56
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	D 2042	100	100
Viscosidad a 60 °C, poises	D 2171	2,166	2,662
Viscosidad Cinemática a 135 °C, cSt	D 2170	382	365
Pruebas después del Thin Film Oven Test (TFOT)			
TFOT, Viscosidad a 60 °C, poises	D 1754, D2171	7,018	7,446
TFOT, Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min, cm	D 1754, D113	52	78

## ANÁLISIS DE ASFALTOS MODIFICADOS

Para la modificación de estos asfaltos se tomo como asfalto base el convencional AC-20, a continuación los resultados obtenidos de las pruebas:

Análisis	Resultados	
	Tipo I*	Tipo III**
Penetración a 25 °C, 100gr, 5seg, mm/10	43	37
Viscosidad Cinemática a 135 °C, cSt	900	353
Punto de reblandecimiento anillo y bola, °C	68	71,5
Punto de encendido, °C	292	261
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	99,9	99,9
Recuperación elástica Torsional, %	52	40

\* Ver Norma ASTM D 5976 – 00

\*\* Ver Norma ASTM D 5841 – 00



# Standard Specification for Type I Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 5976; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

## 1. Scope

1.1 This specification covers asphalt cements that have been modified by the addition of an appropriate polymer for use in pavement construction. It was developed to provide a reference for specifying polymer-modified asphalt and reflects the properties of currently available commercial products. This is not intended to be a performance-based specification.

1.2 Type I polymer-modified asphalts are typically made with styrene-butadiene or styrene-butadiene-styrene block copolymers. However, any polymer may be used that will give the required test results when blended with the desired asphalt.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

- D 5 Test Method for Penetration of Bituminous Materials<sup>2</sup>
- D 36 Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)<sup>3</sup>
- D 92 Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup<sup>4</sup>
- D 113 Test Method for Ductility of Bituminous Materials<sup>2</sup>
- D 140 Practice for Sampling Bituminous Materials<sup>2</sup>
- D 1754 Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)<sup>2</sup>
- D 2042 Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene<sup>2</sup>
- D 2170 Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)<sup>2</sup>
- D 2872 Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving

- Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)<sup>2</sup>
- D 4957 Test Method for Apparent Viscosity of Asphalt Emulsion Residues<sup>2</sup> and Non-Newtonian Bitumens by Vacuum Capillary Viscometer<sup>2</sup>
- D 6084 Test Method for Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer<sup>2</sup>
- E 11 Specification for Wire-Cloth and Sieves for Testing Purposes<sup>5</sup>

## 3. Manufacture

3.1 The asphalt used to prepare the polymer-modified asphalt cement shall be prepared by the refining of crude petroleum by suitable means.

## 4. Physical Requirements

4.1 The polymer-modified asphalt cement shall be homogeneous and free from water and shall not foam when heated to 175°C (347°F).

4.2 The polymer-modified asphalt cement shall conform to the requirements of Table 1.

4.3 The polymer modifier and asphalt cement shall be compatible and pre-blended prior to use.

## 5. Methods of Sampling and Testing

5.1 Sample and test the polymer-modified asphalt cement in accordance with the following test methods or practice:

- 5.1.1 *Sampling*—Practice D 140.
- 5.1.2 *Penetration*—Test Method D 5.
- 5.1.3 *Viscosity at 60°C (140°F)*—Test Method D 4957.
- 5.1.4 *Viscosity at 135°C (275°F)*—Test Method D 2170.
- 5.1.5 *Ring and Ball Softening Point*—Test Method D 36.
- 5.1.6 *Flash Point, Cleveland Open Cup*—Test Method D 92.
- 5.1.7 *Rolling Thin Film Oven Test*—Test Method D 2872.
- 5.1.8 *Thin Film Oven Test*—Test Method D 1754.
- 5.1.9 *Solubility*—Test Method D 2042.
- 5.2 *Elastic Recovery*—Test Method D 6084.

## 6. Test Methods for Type I Polymer-Modified Asphalt Binder

### 6.1 Summary of Separation Test:

6.1.1 *Scope*—The separation of polymer and asphalt during

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.45 on Modified Asphalt Specifications.

Current edition approved Dec. 10, 2000. Published February 2001. Originally published as D 5976–96. Last previous edition D 5976–96.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.04.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

**TABLE 1 Physical Property Requirements for Type I Polymer-Modified Asphalts**

Designation	I-A		I-B		I-C		I-D	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Penetration, 25°C (77°F), 100 g, 5 s, dmm	100	150	75	100	50	75	40	75
Viscosity, 60°C (140°F), 1 s <sup>-1</sup> , poise <sup>A</sup>	1250		2500		5000		5000	
Viscosity, 135°C (275°F), cSt		2000		2000		2000		5000
Flash Point, COC, °C (°F)	232 (450)		232 (450)		232 (450)		232 (450)	
Solubility in trichloroethylene, %	99		99		99		99	
Separation, difference, °C (°F)		2.2 (4)		2.2 (4)		2.2 (4)		2.2 (4)
Tests on RTFOT Residue <sup>B</sup>								
Elastic recovery, 25°C (77°F), 10 cm elongation, %	60		60		60		60	
Penetration, 4°C (39.2°F), 200 g, 60 s, dmm	20		15		13		10	

<sup>A</sup>The absolute viscosity should be run in a modified Koppers or Asphalt Institute vacuum capillary viscometer. Report the viscosity at a shear rate of 1 reciprocal second.

<sup>B</sup>The thin film oven test may be used, but the rolling thin film test shall be the referee method.

hot storage is evaluated by comparing the ring and ball softening point of the top and bottom portions taken from a conditioned, sealed tube of polymer-modified asphalt. The conditioning consists of placing a sealed tube of polymer-modified asphalt in a vertical position in a 163 ± 5°C (325 ± 10°F) oven for a 48-h period.

6.1.2 *Referenced Documents*—Test Method D 36 and Specification E 11.

6.1.3 *Apparatus*:

6.1.3.1 *Aluminum Tubes*<sup>6</sup>—25.4-mm (1-in.) diameter by 139.7-mm (5.5-in.) length blind aluminum tubes used to hold the test sample during the conditioning.

6.1.3.2 *Oven*, capable of maintaining 163 ± 5°C (325 ± 10°F).

6.1.3.3 *Freezer*, capable of maintaining - 6.7 ± 5°C (20 ± 10°F).

6.1.3.4 *Rack*, capable of supporting the aluminum tubes in a vertical position in the oven and freezer.

6.1.3.5 *Spatula and Hammer*—The spatula must be rigid and sharp to allow cutting of the tube containing the sample when at a low temperature.

6.1.4 *Procedure*:

6.1.4.1 Place the empty tube with the sealed end down in the rack.

6.1.4.2 Carefully heat the sample until sufficiently fluid to pour. Care should be taken to avoid localized overheating. Strain the melted sample through a No. 50 sieve conforming to Specification E 11. After thorough stirring, pour 50.0 g into the

vertically held tube. Fold the excess tube over two times and crimp and seal.

6.1.4.3 Place the rack containing the sealed tubes in a 163 ± 5°C (325 ± 10°F) oven. Allow the tubes to stand undisturbed in the oven for a period of 48 ± 1 h. At the end of the heating period, remove the rack from the oven and immediately place in the freezer at - 6.7 ± 5°C (20 ± 10°F), taking care to keep the tubes in a vertical position at all times. Leave the tubes in the freezer for a minimum of 4 h to solidify the sample completely.

6.1.4.4 Upon removing the tube from the freezer, place the tube on a flat surface. Cut the tube into three equal length portions with the spatula and hammer. Discard the center portion and place the top and bottom portion of the tube into separate beakers. Place the beakers in a 163 ± 5°C (325 ± 10°F) oven until sufficiently fluid to remove the pieces of aluminum tube.

6.1.4.5 After a thorough stirring, pour the top and bottom samples into appropriately marked rings for the ring and ball softening point test. Prepare the rings and apparatus as described in Test Method D 36.

6.1.4.6 The top and bottom samples from the same tube should be tested at the same time in the softening point test.

6.1.5 *Report*—Report the difference in °C or °F of the softening point between the top and bottom portions.

6.1.6 *Precision and Bias*—No statement is made regarding either the precision or bias of this test method for measuring separation since the result states merely whether there is conformance to the criteria for success specified in the procedure.

## 7. Keywords

7.1 asphalt; polymer modified asphalt; specification

<sup>6</sup> Aluminum tubes suitable for this purpose may be obtained from R/H Specialty & Machine, P. O. Box 10187, Terre Haute, IN 47801, (812) 232-0781. Observations have been reported regarding leakage of asphalt from the bottom of the tube during the conditioning period. Other tubes may be required if this leakage is significant.

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*



# Standard Specification for Type III Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 5841; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

## 1. Scope

1.1 This specification covers asphalt cements that have been modified by the addition of the appropriate polymer for use in pavement construction. It was developed to provide a reference for specifying polymer modified asphalt and reflects the properties of currently available commercial products. The tests are intended to measure compatibility and degree of modification, not performance characteristics. This is not intended to be a performance based specification.

1.2 Type III polymer-modified asphalts are typically made with ethyl vinyl acetate. However any polymer may be used that will give the required test results when blended with the desired asphalt.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

- D 5 Test Method for Penetration of Bituminous Materials<sup>2</sup>
- D 36 Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)<sup>3</sup>
- D 92 Test Method for Flash and Fire Point by Cleveland Open Cup<sup>4</sup>
- D 140 Practice for Sampling Bituminous Materials<sup>2</sup>
- D 1754 Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)<sup>2</sup>
- D 2042 Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene<sup>2</sup>
- D 2170 Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)<sup>2</sup>
- D 2872 Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials and is under the direct responsibility of Subcommittee D04.45 on Modified Asphalt Specifications.

Current edition approved Dec. 10, 2000. Published February 2001. Originally published as D 5841–95. Last previous edition D 5841–95.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.04.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

## 3. Physical Requirements

3.1 The polymer modified asphalt cement shall be homogeneous, free from water and shall not foam when heated to 347°F (175°C).

3.2 The polymer modified asphalt cement shall conform to the requirements of Table 1.

3.3 The polymer modifier and the asphalt cement shall be compatible and pre-blended prior to use.

## 4. Sampling and Test Methods

4.1 Sample and test the polymer modified asphalt cement in accordance with the following test methods and practices:

- 4.1.1 *Sampling*—Practice D 140.
- 4.1.2 *Penetration*—Test Method D 5.
- 4.1.3 *Viscosity at 275°F (135°C)*—Test Method D 2170.
- 4.1.4 *Softening Point*—Test Method D 36.
- 4.1.5 *Flash Point, Cleveland Open Cup*—Test Method D 92.
- 4.1.6 *Solubility in Trichloroethylene*—Test Method D 2042.
- 4.1.7 *Rolling Thin-Film Oven Test*—Test Method D 2872.
- 4.1.8 *Thin-Film Oven Test*—Test Method D 1754.

## 5. Test Method for Type III Polymer Modified Asphalt

5.1 *Separation Test for Type III Polymer Modified Asphalt:*

5.1.1 *Scope:*

5.1.1.1 This test is a simple qualitative test for compatibility of low density polymers in asphalt.

5.2 *Apparatus:*

5.2.1 *Containers*—Standard 6 oz metal sample cups (1.875 in. high by 2.75 in. inside diameter).

5.2.2 *Oven*—An oven capable of maintaining  $275 \pm 10^\circ\text{F}$  ( $135 \pm 5^\circ\text{C}$ ).

5.3 *Procedure:*

5.3.1 After a blend of polymer in asphalt has been prepared and is still at elevated temperature, pour enough of the mix into a clean 6 oz metal test cup to fill it to the formed roll on the cup (approximately  $\frac{1}{4}$  in. from the top). Place the sample in a controlled temperature oven at 275°F (135°C) for 15 to 18 h. Remove carefully from the oven without disturbing the surface and observe the sample. After the initial observation, a spatula can be used to gently probe the sample and check consistency of any surface layer and check for sludge on the bottom. These observations and tests should be done while the sample is still

**TABLE 1 Requirements for Type III Polymer Modified Asphalt Cement**

Designation	III-A		III-B		III-C		III-D		III-E	
	Min	Max								
Penetration at 39.2°F (4°C), 200 g, 60 s	48		35		28		22		18	
Penetration at 77°F (25°C), 100 g, 5 s	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosity, 275°F (135°C), cSt	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Flash Point COC, ° F (°C)	425 (218)		425 (218)		425 (218)		425 (218)		425 (218)	
Softening Point, R and B, °F (°C)	125 (52)		130 (54)		135 (57)		140 (60)		145 (63)	
Separation, 275°F (135°C), 18 h	Report									
Solubility in TCE, %	99		99		99		99		99	
RTFOT Residue <sup>A</sup>										
Penetration, 39.2°F (4°C), 200 g, 60 s	24		18		14		11		9	
Loss, %	1		1		1		1		1	

<sup>A</sup> Thin-film oven test may be used, but rolling thin-film test shall be referee method.

hot, within 5 min after removal from the oven.

5.3.2 Depending on the physical characteristics of the polymer and compatibility of the particular asphalt/polymer system, varying conditions will be noted. These are described and should be reported as follows:

Description	Report
Homogeneous, no skinning or sludge	Homogeneous
Slight polymeric skin at edges of cup	Slight edge skinning

Thin polymeric skin on entire surface	Thin total skinning
Thick polymeric skin (1/32 in. + ) on entire surface	Thick total skinning
No surface skinning but thin sludge at bottom of container	Thin bottom skinning
No surface skinning but thick (1/4 in. + ) sludge at bottom of container	Thick bottom sludge

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*

# ANEXO 4

## EVALUACION ESTADISTICA

## **ANALISIS DE VARIANZA (ANOVA)**

El análisis de varianza es un procedimiento estadístico que sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. Este análisis recopila cada conjunto de datos, la varianza se distribuye entre los diferentes factores que intervienen. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar. Este método sirve comúnmente para asociar una probabilidad a la conclusión de que la media de un grupo de puntuaciones es distinta de la media de otro grupo de puntuaciones.

### **1. PORCENTAJE DE PÉRDIDA PARA LA PRUEBA DE COHESIÓN**

Variable dependiente: PORCENTAJE DE PÉRDIDA

Factores:

- SEVERIDAD
- TIPO DE ASFALTO

Número de casos completos: 36

Este procedimiento realiza un análisis de variación de varios factores para el Porcentaje de Pérdida. Construye varias pruebas y gráficos para determinar cuál de los factores tiene un efecto estadístico en la variable de Porcentaje de Pérdida. También realiza pruebas de las

interacciones significativas entre los factores, al proporcionar suficientes datos. Las pruebas F en la Tabla 1-a ANOVA permiten identificar los factores significativos. Por cada factor significativo, la prueba de rangos múltiples permitirá evaluar cuales medias son significativamente diferentes unas de otras. Los gráficos de las medias y los gráficos de interacciones ayudarán a determinar cuáles son los efectos significativos. Los gráficos de residuos ayudarán a juzgar si las asunciones que son la base del análisis de variación son violadas por los datos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media Cuadrada</i>	<i>Rango F</i>	<i>Valor P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Severidad	0.317539	2	0.158769	60.17	0.0000
B:Tipo de Asfalto	0.361253	3	0.120418	45.63	0.0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB (Severidad-Tipo de Asfalto)	0.0101722	6	0.00169537	0.64	0.6954
Residuos	0.0633333	24	0.00263889		
TOTAL (CORREGIDO)	0.752297	35			

TABLA 1. ANOVA, Análisis de la varianza para el Porcentaje de Pérdida Tipo III: Suma de cuadrados  
 Todos los cocientes F están basados en el error de la media cuadrada residual.

La Tabla 1 ANOVA descompone la variabilidad de Porcentaje de Pérdida en las contribuciones debido a varios factores. Puesto que se ha elegido el Tipo III Sumas de cuadrados, la contribución de cada factor se mide quitando los efectos de factores en la tabla anterior. Los valores P prueban la significación estadística de cada uno de los factores. Dado que 2 valores P son menores a 0.05, estos factores tienen un efecto estadístico significativo sobre el factor de Porcentaje de Pérdida en un nivel de confianza del 95.0%.

Los factores que influyen sobre el porcentaje de pérdidas en la prueba de adhesión son: los 2 efectos principales: La Severidad (A) y El Tipo de Asfalto (B).

La Interacción de segundo orden Severidad-Tipo de Asfalto (AB) no indica que sea un efecto significativo debido a que arrojan un valor P superior al 0.05. Esto indica aún siendo ambos efectos individualmente significativos, en conjunto no producen efecto significativo alguno.

## COMPARACION DE MEDIAS

### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LAS MEDIAS

<i>Nivel</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
<b>GRAND MEAN</b>	36	0.314722			
<b>Severidad (A)</b>					
1. 100 revoluciones	12	0.210833	0.0148293	0.180227	0.24144
2. 200 revoluciones	12	0.295	0.0148293	0.264394	0.325606
3. 300 revoluciones	12	0.438333	0.0148293	0.407727	0.46894
<b>Tipo de Asfalto</b>					
1. AC-20	9	0.4	0.0171234	0.364659	0.435341
2. AC-30	9	0.427778	0.0171234	0.392437	0.463119
3. Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.201111	0.0171234	0.16577	0.236452
4. Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.23	0.0171234	0.194659	0.265341
<b>INTERACCION AB</b>					
<b>Severidad - Tipo de Cemento</b>					
1,1: 100 revoluciones, AC-20	3	0.306667	0.0296586	0.245454	0.367879
1,2: 100 revoluciones, AC-30	3	0.323333	0.0296586	0.262121	0.384546
1,3: 100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	3	0.0933333	0.0296586	0.032121	0.154546
1,4: 100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	3	0.12	0.0296586	0.0587876	0.181212
2,1: 200 revoluciones, AC-20	3	0.376667	0.0296586	0.315454	0.437879
2,2: 200 revoluciones, AC-30	3	0.383333	0.0296586	0.322121	0.444546
2,3: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	3	0.213333	0.0296586	0.152121	0.274546
2,4: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	3	0.206667	0.0296586	0.145454	0.267879
3,1: 300 revoluciones, AC-20	3	0.516667	0.0296586	0.455454	0.577879
3,2: 300 revoluciones, AC-30	3	0.576667	0.0296586	0.515454	0.637879
3,3: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	3	0.296667	0.0296586	0.235454	0.357879
3,4: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	3	0.363333	0.0296586	0.302121	0.424546

TABLA 2. Tabla de medias de mínimos cuadrados para el Porcentaje de Pérdida con intervalos de confianza de 95 por ciento

## COMPARACION DE MEDIAS PARA LOS DIFERENTES FACTORES

Permite comparar si hay diferencia entre los datos en función de los niveles del factor:

- **Factor: Severidad (A)**

### PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 3a y Tabla 3b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 3a se identifican a 3 grupos homogéneos usando columnas con X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadísticas significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa de Fisher (LSD: Least Significant Difference). Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Severidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1. 100 revoluciones	12	0.210833	0.0148293	x
2. 200 revoluciones	12	0.295	0.0148293	x
3. 300 revoluciones	12	0.438333	0.0148293	x

TABLA 3a. Factor: Condición (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 3b 98 aplica un procedimiento múltiple de comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 3b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de 3 pares (1-2), (1-3) y (2-3), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contrast</i>	<i>Sig.</i>	<i>Difference</i>	<i>+/- Limits</i>
1 - 2	*	-0.0841667	0.0432837
1 - 3	*	-0.2275	0.0432837
2 - 3	*	-0.143333	0.0432837

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 3b. Factor: Condición (procedimiento de comparación)

Se puede apreciar en el Gráfico 1 una diferencia significativa en el comportamiento de los datos (Porcentaje de Pérdida) para todos los niveles de severidad. Esta diferencia es más notable entre la severidad 2 y 3 donde el margen es mayor. Se da un comportamiento lógico de mayores pérdidas a mayores severidades.

<i>Severidad</i>
1. 100 revoluciones
2. 200 revoluciones
3. 300 revoluciones

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

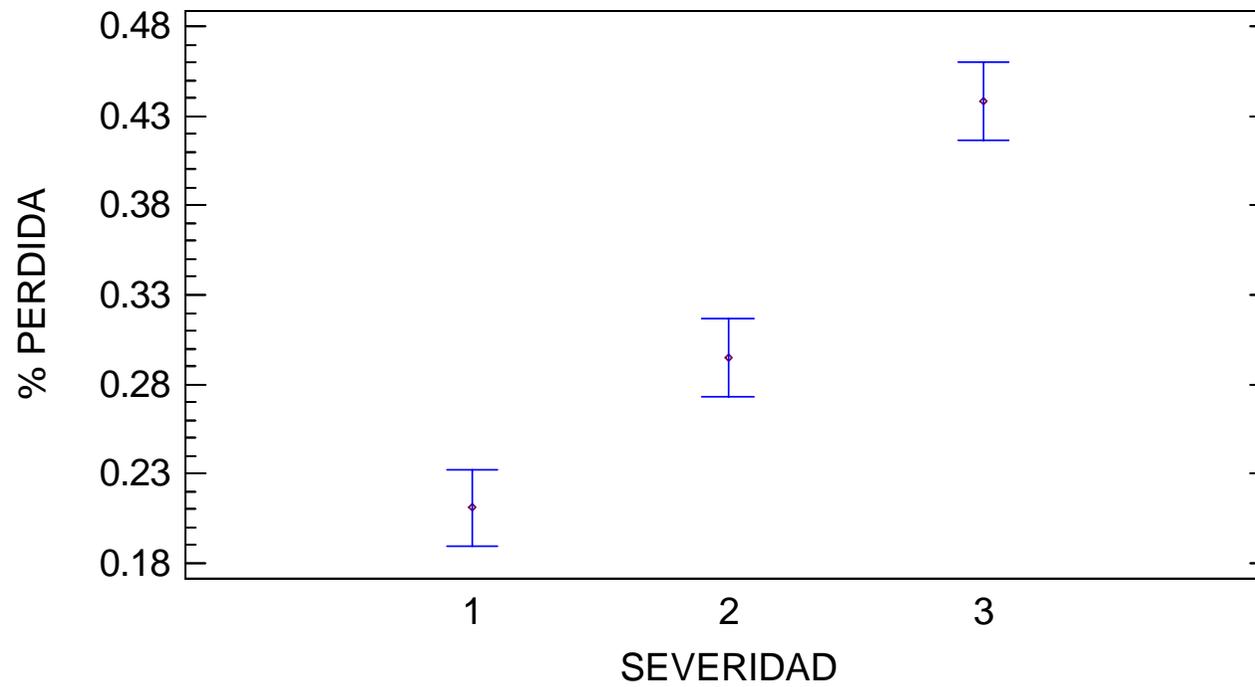


Gráfico 1. Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad

- **FACTOR: Tipo de Asfalto (B)**

PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 5a y Tabla 5b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 4a se identifican a 4 grupos homogéneos usando la columna con una X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadístico significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD: Least Significant Difference) de Fisher. Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Tipo de Asfalto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
3. Modificado Tipo I-D	9	0.201111	0.0171234	X
4. Modificado Tipo III-D	9	0.23	0.0171234	X
1. AC-20	9	0.4	0.0171234	X
2. AC-30	9	0.427778	0.0171234	X

TABLA 4a. Factor: Tipo de Cemento (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 4b aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 4b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de 4 pares (1-3), (1-4), (2-3) y (2-4), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2		-0.0277778	0.0499797
1 - 3	*	0.198889	0.0499797
1 - 4	*	0.17	0.0499797
2 - 3	*	0.226667	0.0499797
2 - 4	*	0.197778	0.0499797
3 - 4		-0.0288889	0.0499797

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 4b. Factor: Tipo de Cemento (procedimiento de comparación)

De acuerdo a la Tabla 5b del factor Tipo de Asfalto si existen diferencias significativas al 95% en el comportamiento del porcentaje de pérdidas respecto al tipo de cemento. Como lo indica la el Gráfico 2 Se observa el comportamiento de estos asfaltos según el Tipo de Asfalto, sin embargo pocas diferencias entre los asfaltos AC-20 y AC-30, así como entre los asfaltos modificados Tipo I-D y II-D, indicando que entre ellos los comportamientos en general son similares. El Asfalto con mejores resultados (menores Porcentajes de Pérdidas) es el número 3 Modificado Tipo I-D.

<i>Tipo de Asfalto</i>
1. AC-20
2. AC-30
3. Modificado Tipo I-D
4. Modificado Tipo III-D

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

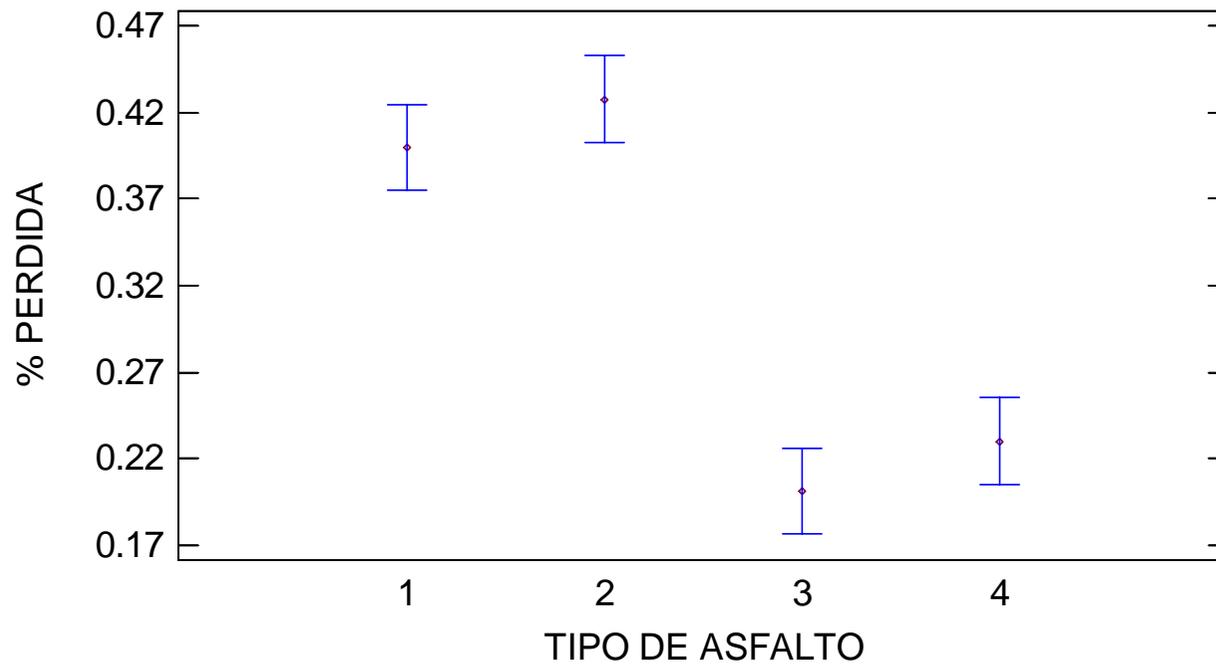


Gráfico 2. Porcentaje de Pérdida debido al Tipo de Asfalto

## ANALISIS DE LAS INTERACCIONES

### INTERACCION AB, Severidad-Tipo de Asfalto

De acuerdo al análisis de la varianza los efectos de interacción entre los dos factores independientes no son significativos, debido al valor de P obtenido. En el Gráfico 3 se observa la interacción de estos dos factores.

<i>Severidad</i>	<i>Tipo de Asfalto</i>
1. 100 revoluciones	1. AC-20
2. 200 revoluciones	2. AC-30
3. 300 revoluciones	3. Modificado Tipo I-D
	4. Modificado Tipo III-D

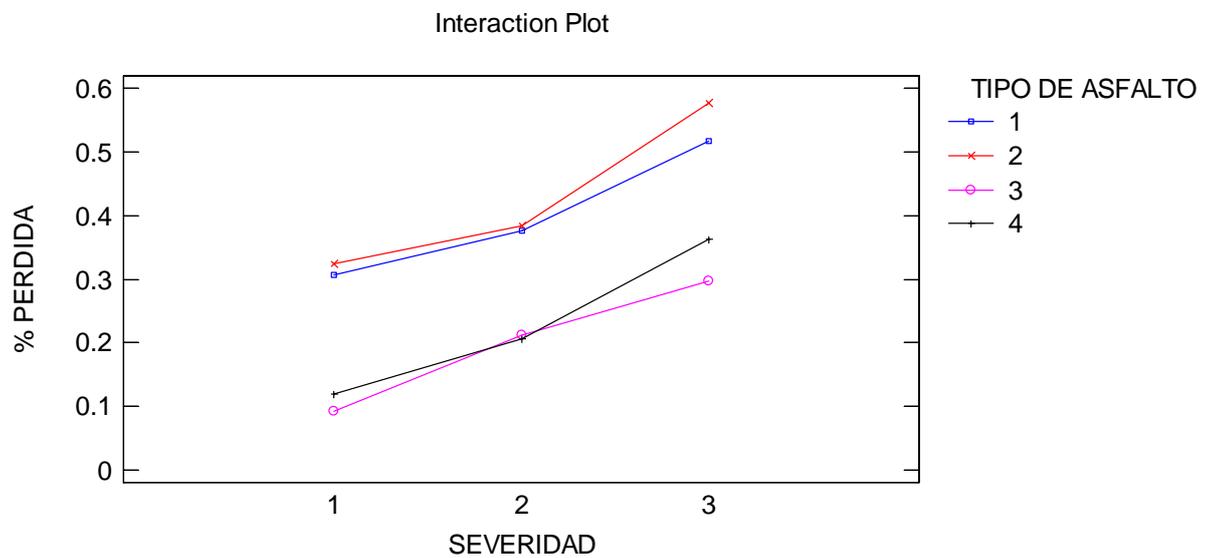


Gráfico 3. Interacción AB, Severidad-Tipo de Asfalto

## **2. PORCENTAJE DE PÉRDIDA PARA LA PRUEBA DE ADHESIÓN**

METODO: VARIANZA ANOVA MULTIFACTOR

Variable dependiente: PORCENTAJE DE PÉRDIDA

Factores:

- CONDICION
- SEVERIDAD
- TIPO DE ASFALTO

Número de casos completos: 144

Este procedimiento realiza un análisis de variación de varios factores para el Porcentaje de Pérdida. Construye varias pruebas y gráficos para determinar cuál de los factores tiene un efecto estadístico en la variable de Porcentaje de Pérdida. También realiza pruebas de las interacciones significativas entre los factores, al proporcionar suficientes datos. Las pruebas F en la Tabla 5 ANOVA permiten identificar los factores significativos. Por cada factor significativo, la prueba de rangos múltiples permitirá evaluar cuales medias son significativamente diferentes unas de otras. Los gráficos de las medias y los gráficos de interacciones ayudarán a determinar cuáles son los efectos significativos. Los gráficos de residuos ayudarán a juzgar si las asunciones que son la base del análisis de variación son violadas por los datos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media Cuadrada</i>	<i>Rango F</i>	<i>Valor P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A: Condición	10.3425	3	3.4475	1353.79	0.0000
B: Severidad	9.20713	2	4.60356	1807.76	0.0000
C: Tipo de Asfalto	3.44074	3	1.14691	450.38	0.0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB (Condición-Severidad)	1.27258	6	0.212096	83.29	0.0000
AC (Condición- Tipo de Asfalto)	0.407526	9	0.0452806	17.78	0.0000
BC (Severidad-Tipo de Asfalto)	0.181708	6	0.0302847	11.89	0.0000
ABC (Condición-Severidad-Tipo de Asfalto)	0.18638	18	0.0103544	4.07	0.0000
Residuos	0.244469	96	0.00254656		
TOTAL (CORREGIDO)	25.283	143			

TABLA 5. ANOVA, Análisis de la varianza para el Porcentaje de Pérdida Tipo III: Suma de cuadrados  
 Todos los cocientes F están basados en el error de la media cuadrada residual.

La Tabla 5 ANOVA descompone la variabilidad de Porcentaje de Pérdida en las contribuciones debido a varios factores. Puesto que se ha elegido el Tipo III Sumas de cuadrados, la contribución de cada factor se mide quitando los efectos de factores en la tabla anterior. Los valores P prueban la significación estadística de cada uno de los factores. Dado que 7 valores P son menores a 0.05, estos factores tienen un efecto estadístico significativo sobre el factor de Porcentaje de Pérdida en un nivel de confianza del 95.0%.

Los factores que influyen sobre el porcentaje de pérdidas en la prueba de adhesión son: los 3 efectos principales: La Condición (A), La Severidad (B) y El Tipo de Asfalto (C) además de las Interacciones Condición-Severidad (AB), Severidad-Tipo de Asfalto (BC), Condición-Tipo de Asfalto (AC) y la combinación de las tres Condición-Severidad-Tipo de Asfalto (ABC), debido a que arrojan un valor P inferior al 0.05. Esto indica que existen

efectos significativos de los factores así como efectos interactivos significativos de segundo orden.

## COMPARACION DE MEDIAS

### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LAS MEDIAS

<i>Nivel</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
GRAND MEAN	144	0.762375			
<b>Condición (A)</b>					
1. Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C	36	0.795833	0.00841057	0.779138	0.812528
2. Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C	36	0.968889	0.00841057	0.952194	0.985584
3. En seco, 25°C por 12 horas	36	0.314722	0.00841057	0.298027	0.331417
4. En seco, 60°C por 12 horas	36	0.970056	0.00841057	0.953361	0.98675
<b>Severidad (B)</b>					
4. 100 revoluciones	48	0.453333	0.00728377	0.438875	0.467792
5. 200 revoluciones	48	0.761083	0.00728377	0.746625	0.775542
6. 300 revoluciones	48	1.07271	0.00728377	1.05825	1.08717
<b>Tipo de Asfalto (C)</b>					
5. AC-20	36	0.869167	0.00841057	0.852472	0.885862
6. AC-30	36	0.948611	0.00841057	0.931916	0.965306
7. Asfalto Modificado Tipo I-D	36	0.558611	0.00841057	0.541916	0.575306
8. Asfalto Modificado Tipo III-D	36	0.673111	0.00841057	0.656416	0.689806
<b>INTERACCION AB</b>					
<b>Condición - Severidad</b>					
1,1: Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C, 100 revoluciones	12	0.4525	0.0145675	0.423584	0.481416
1,2: Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C 200 revoluciones	12	0.7725	0.0145675	0.743584	0.801416
1,3: Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C, 300 revoluciones	12	1.1625	0.0145675	1.13358	1.19142
2,1: Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C, 100 revoluciones	12	0.575	0.0145675	0.546084	0.603916
2,2: Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C, 200 revoluciones	12	0.986667	0.0145675	0.95775	1.01558
2,3: Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C, 300 revoluciones	12	1.345	0.0145675	1.31608	1.37392
3,1: En seco, 25°C por 12 horas, 100 revoluciones	12	0.210833	0.0145675	0.181917	0.23975
3,2: En seco, 25°C por 12 horas, 200 revoluciones	12	0.295	0.0145675	0.266084	0.323916
3,3: En seco, 25°C por 12 horas, 300 revoluciones	12	0.438333	0.0145675	0.409417	0.46725

4,1: En seco, 60°C por 12 horas, 100 revoluciones	12	0.575	0.0145675	0.546084	0.603916
4,2: En seco, 60°C por 12 horas, 200 revoluciones	12	0.990167	0.0145675	0.96125	1.01908
4,3: En seco, 60°C por 12 horas, 300 revoluciones	12	1.345	0.0145675	1.31608	1.37392
<b>INTERACCION AC</b>					
<b>Condición - Tipo de Asfalto</b>					
1,1: Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C En seco, AC-20	9	0.836667	0.0168211	0.803277	0.870056
1,2: Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C, Asfalto AC-30	9	0.946667	0.0168211	0.913277	0.980056
1,3: Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.63	0.0168211	0.59661	0.66339
1,4: Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.77	0.0168211	0.73661	0.80339
2,1: Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C, Asfalto AC-20	9	1.12	0.0168211	1.08661	1.15339
2,2: Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C, Asfalto AC-30	9	1.21	0.0168211	1.17661	1.24339
2,3: Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.702222	0.0168211	0.668832	0.735612
2,4: Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.843333	0.0168211	0.809944	0.876723
3,1: En seco, 25°C por 12 horas, Asfalto AC-20	9	0.4	0.0168211	0.36661	0.43339
3,2: En seco, 25°C por 12 horas, Asfalto AC-30	9	0.427778	0.0168211	0.394388	0.461168
3,3: En seco, 25°C por 12 horas, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.201111	0.0168211	0.167721	0.234501
3,4: En seco, 25°C por 12 horas, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.23	0.0168211	0.19661	0.26339
4,1: En seco, 60°C por 12 horas, Asfalto AC-20	9	1.12	0.0168211	1.08661	1.15339
4,2: En seco, 60°C por 12 horas, Asfalto AC-30	9	1.21	0.0168211	1.17661	1.24339
4,3: En seco, 60°C por 12 horas, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.701111	0.0168211	0.667721	0.734501
4,4: En seco, 60°C por 12 horas, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.849111	0.0168211	0.815721	0.882501
<b>INTERACCION BC</b>					
<b>Severidad - Tipo de Cemento</b>					
1,1: 100 revoluciones, Asfalto AC-20	12	0.519167	0.0145675	0.49025	0.548083
1,2: 100 revoluciones, Asfalto AC-30	12	0.588333	0.0145675	0.559417	0.61725
1,3: 100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	12	0.318333	0.0145675	0.289417	0.34725
1,4:100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	12	0.3875	0.0145675	0.358584	0.416416
2,1: 200 revoluciones, Asfalto AC-20	12	0.904167	0.0145675	0.87525	0.933083
2,2: 200 revoluciones, Asfalto AC-30	12	0.973333	0.0145675	0.944417	1.00225
2,3: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	12	0.513333	0.0145675	0.484417	0.54225
2,4: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	12	0.6535	0.0145675	0.624584	0.682416
3,1: 300 revoluciones, Asfalto AC-20	12	1.18417	0.0145675	1.15525	1.21308

3,2: 300 revoluciones, Asfalto AC-30	12	1.28417	0.0145675	1.25525	1.31308
3,3: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	12	0.844167	0.0145675	0.81525	0.873083
3,4: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	12	0.978333	0.0145675	0.949417	1.00725

TABLA 6. Tabla de medias de mínimos cuadrados para el Porcentaje de Pérdida con intervalos de confianza de 95 porciento

## COMPARACION DE MEDIAS PARA LOS DIFERENTES FACTORES

Permite comparar si hay diferencia entre los datos en función de los niveles del factor:

- **Factor: Condición (A)**

### PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 7a y Tabla 7b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 7a se identifican a 4 grupos homogéneos usando columnas con X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadísticas significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa de Fisher (LSD: Least Significant Difference). Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Condición</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
3. En seco, 25°C por 12 horas	36	0.314722	0.00841057	X
1. Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C	36	0.795833	0.00841057	X
2. Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C	36	0.968889	0.00841057	X
4. En seco, 60°C por 12 horas	36	0.970056	0.00841057	X

TABLA 7a. Factor: Condición (Método: LSD 95 por ciento)

La Tabla 7b aplica un procedimiento múltiple de comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 7b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de 5 pares (1-2), (1-3), (1-4), (2-3) y (3-4), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2	*	-0.173056	0.0236101
1 - 3	*	0.481111	0.0236101
1 - 4	*	-0.174222	0.0236101
2 - 3	*	0.654167	0.0236101
2 - 4		-0.00116667	0.0236101
3 - 4	*	-0.655333	0.0236101

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 7b. Factor: Condición (procedimiento de comparación)

De acuerdo a la prueba LSD, existe diferencia significativa en el comportamiento del porcentaje de pérdida respecto a los diferentes niveles de condición. Como se puede observar en el Gráfico 4 la condición 3 tiene un comportamiento de Porcentaje de Pérdida diferente muy notable con respecto a las otras condiciones (1, 2 y 4). La condición 3, que constituyen los mismos datos del ensayo de Cohesión, hace que el porcentaje de pérdidas sea menor debido a que esta condición no exige la exposición a determinado tratamiento posterior a la elaboración de probetas salvo mantenerse en temperatura de 25°C durante 12 horas antes de ensayarse. Dado que las condiciones 1, 2 y 4 si requerían de un procedimiento adicional que implica un cierto deterioro de la probeta es de esperar que estas arrojaran mayores porcentajes de pérdida de material.

Condición
1. Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C
2. Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C
3. En seco, 25°C por 12 horas
4. En seco, 60°C por 12 horas

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

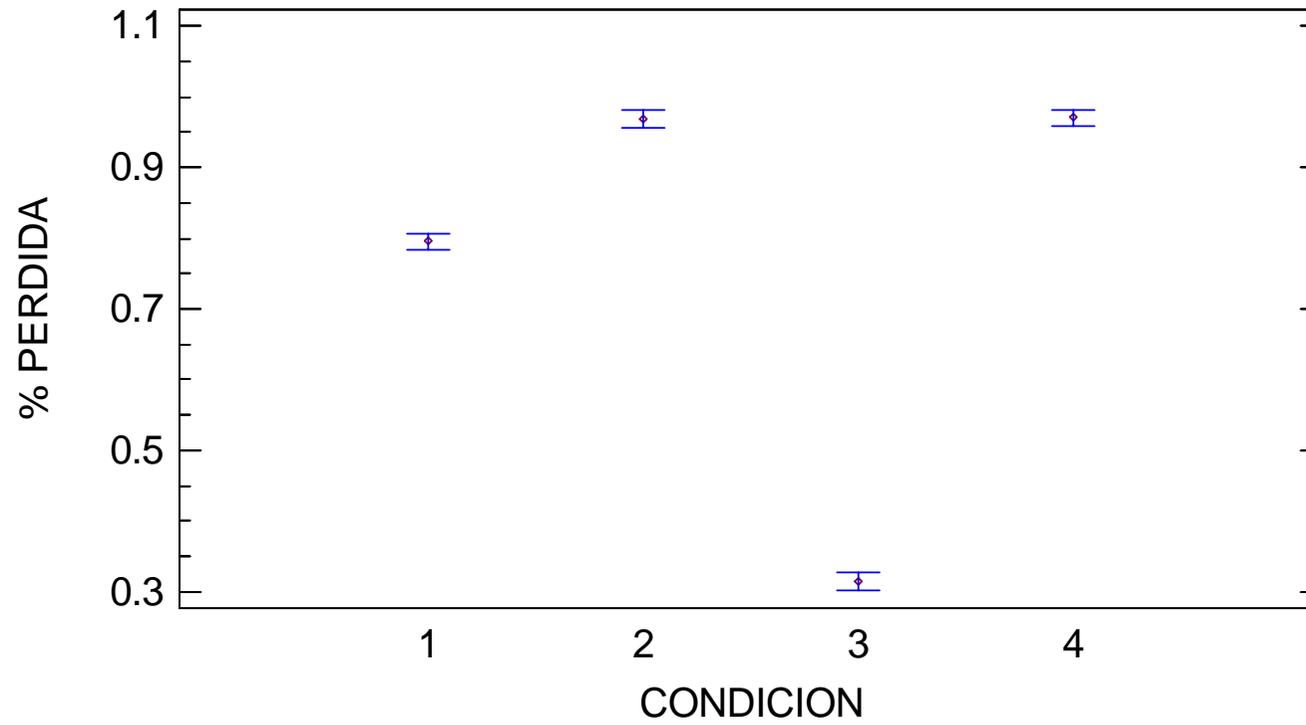


Gráfico 4. Porcentaje de Pérdida debido a la Condición

- **Factor: Severidad (B)**

PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 8a y Tabla 8b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 8a se identifican a 3 grupos homogéneos usando la columna con una X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadístico significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD: Least Significant Difference) de Fisher. Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Severidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1. 100 revoluciones	48	0.453333	0.00728377	X
2. 200 revoluciones	48	0.761083	0.00728377	X
3. 300 revoluciones	48	1.07271	0.00728377	X

TABLA 8a. Factor: Severidad (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 8b aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 8b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de

3 pares (1-2), (1-3) y (2-3), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2	*	-0.30775	0.020447
1 - 3	*	-0.619375	0.020447
2 - 3	*	-0.311625	0.020447

\* denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 8b. Factor: Severidad (procedimiento de comparación)

Existe diferencia significativa en las Medias y en los Intervalos LSD al 95% en el comportamiento de los datos (Porcentaje de Pérdida) para todos los niveles de severidad. Como se puede observar en el Gráfico 5 entre mayor es la severidad mayores son los porcentajes de pérdidas en la prueba de adhesión.

<i>Severidad</i>
1. 100 revoluciones
2. 200 revoluciones
3. 300 revoluciones

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

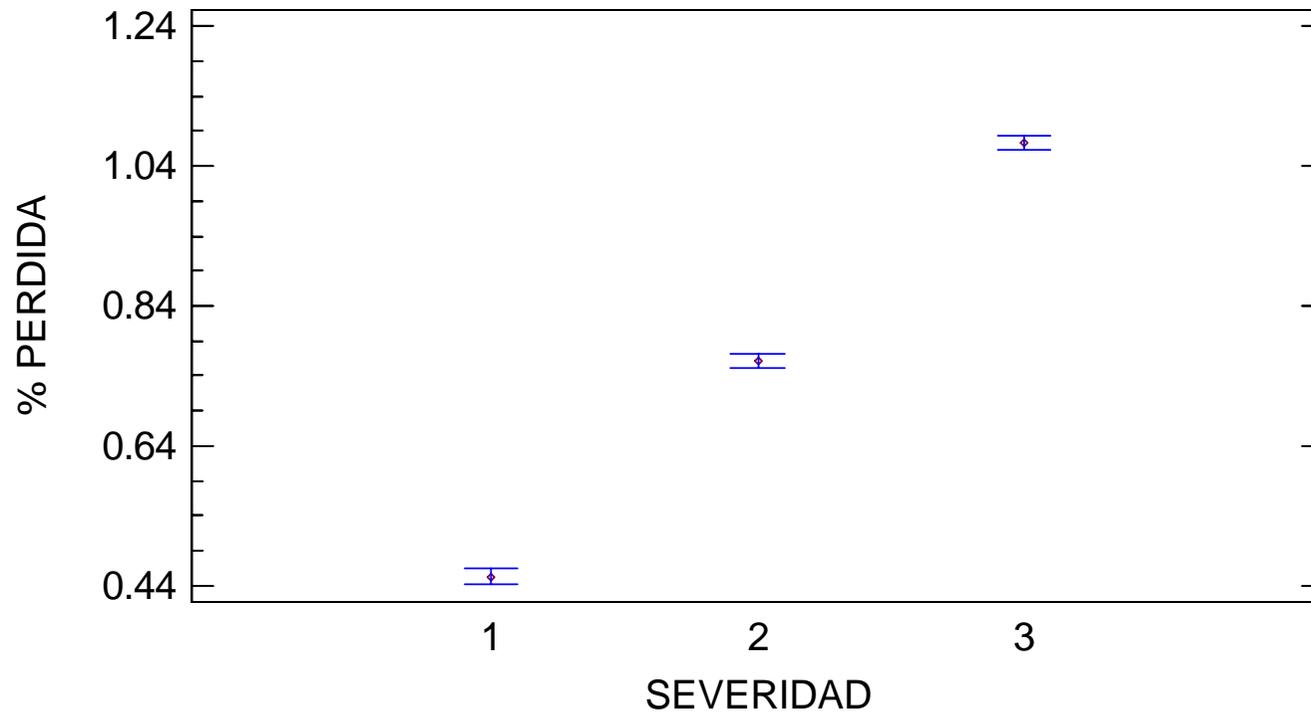


Gráfico 5. Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad

- **Factor: Tipo de Asfalto (C):**

PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 9a y Tabla 9b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 9a se identifican a 4 grupos homogéneos usando la columna con una X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadístico significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD: Least Significant Difference) de Fisher. Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Tipo de Asfalto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
3. Modificado Tipo I-D	36	0.558611	0.00841057	x
4. Modificado Tipo III-D	36	0.673111	0.00841057	x
1. AC-20	36	0.869167	0.00841057	x
2. AC-30	36	0.948611	0.00841057	x

TABLA 9a. Factor: Tipo de Cemento (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 9b aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 9b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de

6 pares (1-2), (1-3), (1-4), (2-3), (2-4) y (3,4), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2	*	-0.0794444	0.0236101
1 - 3	*	0.310556	0.0236101
1 - 4	*	0.196056	0.0236101
2 - 3	*	0.39	0.0236101
2 - 4	*	0.2755	0.0236101
3 - 4	*	-0.1145	0.0236101

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 9b. Factor: Tipo de Cemento (procedimiento de comparación)

De acuerdo a la Tabla 9b del factor Tipo de Asfalto si existen diferencias significativas al 95% en el comportamiento del porcentaje de pérdidas respecto al tipo de cemento. Como se puede observar en el Gráfico 6 el Porcentaje de Pérdida promedio no es el mismo para todos los Tipos de Asfalto presentándose mejores resultados en el tercero, Asfalto Modificado Tipo I-D.

<i>Tipo de Asfalto</i>
1. AC-20
2. AC-30
3. Modificado Tipo I-D
4. Modificado Tipo III-D

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

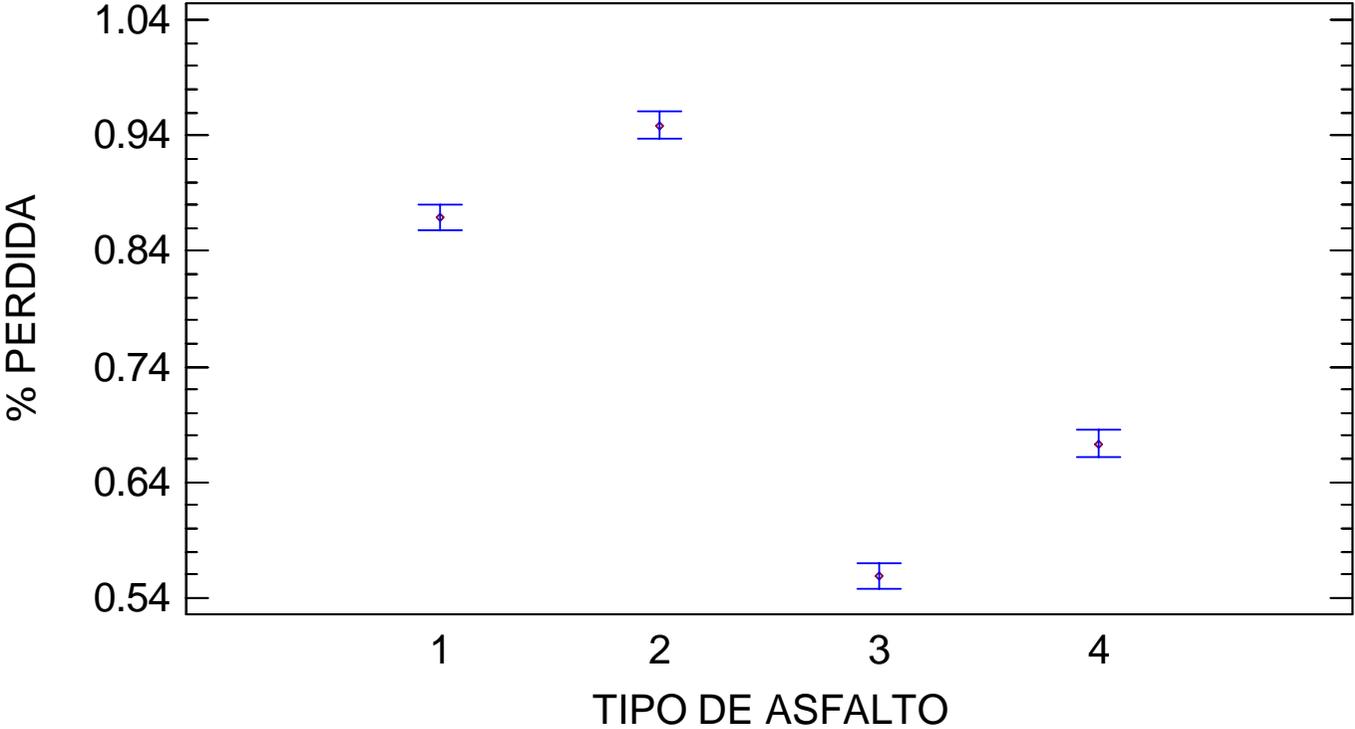


Gráfico 6. Porcentaje de Pérdida debido al Tipo de Asfalto

## **ANALISIS DE LAS INTERACCIONES**

De acuerdo al análisis de la varianza los efectos de las tres interacciones dobles son significativos al 95%, todos los como efectos interactivos significativos de segundo orden tienen igual valor de significancia, lo que es lógico dado que todos los factores tienen efectos significativos (valores P inferiores a 0.05). A continuación se describe el comportamiento de las interacciones:

### **INTERACCION AB, Condición-Severidad**

Como se puede observar en el Gráfico 7, las líneas señalan casi el mismo comportamiento con un cierto intervalo para todos los tipos de condición y de severidad. La importancia de esta interacción radica en que la variabilidad observada tanto en los niveles de severidad (líneas de colores) que van en aumento, como en los niveles de condición (cada línea continua) es indicación del efecto que ejercen ambos factores.

Condición	Severidad
1. Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C	1. 100 revoluciones
2. Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C	2. 200 revoluciones
3. En seco, 25°C por 12 horas	3. 300 revoluciones
4. En seco, 60°C por 12 horas	

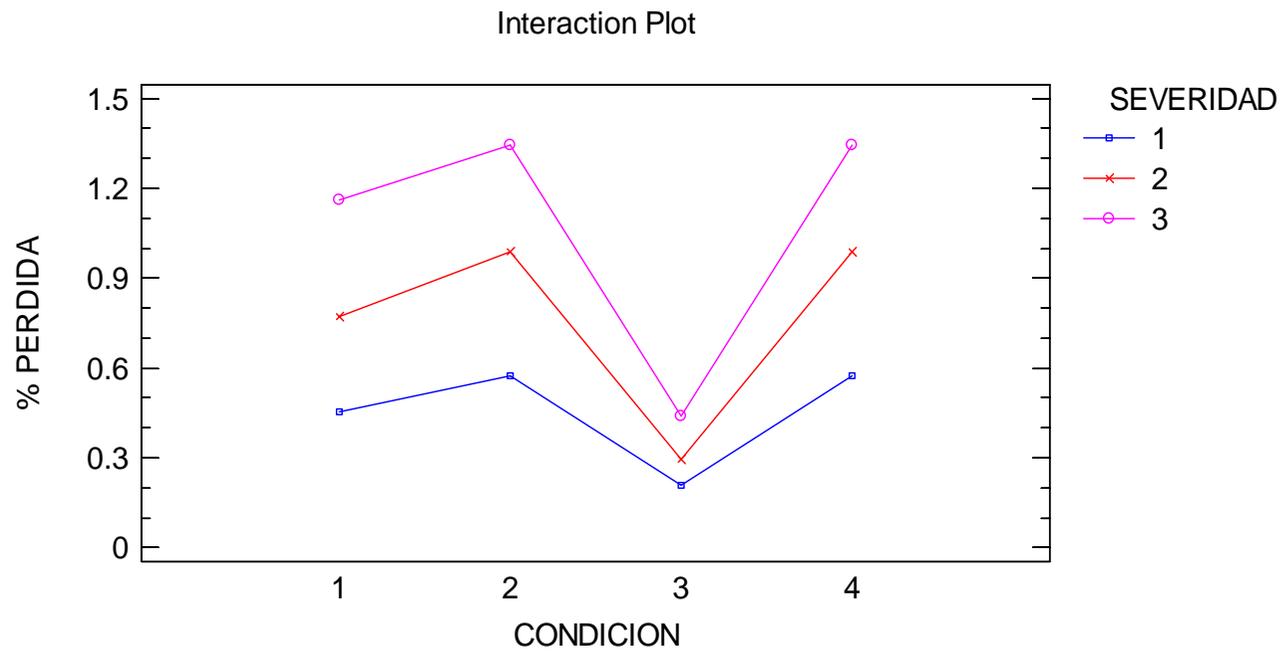


Gráfico 7. Interacción AB, Condición-Severidad

### INTERACCION AC, Condición-Tipo de Asfalto

Dado que la observación va en el sentido de la combinación de niveles que genere la menor pérdida, se hace notar en el Gráfico 8 que para todos los tipos de cemento la condición 3 es la que tiende a provocar menores pérdidas. Por otra parte, el tipo de cemento 3 el porcentaje de perdidas presenta una variabilidad más estable en función del tipo de condición y orientada hacia las menores pérdidas en general.

Condición	Tipo de Asfalto
1. Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C	1. AC-20
2. Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C	2. AC-30
3. En seco, 25°C por 12 horas	3. Modificado Tipo I-D
4. En seco, 60°C por 12 horas	4. Modificado Tipo III-D

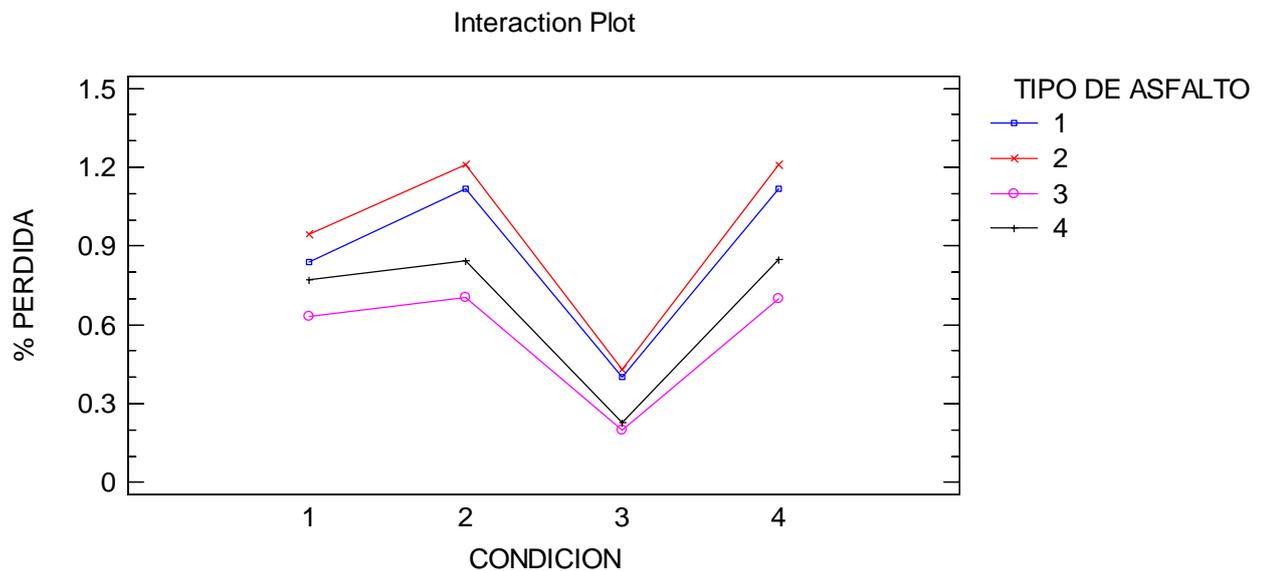


Gráfico 8. Interacción AC, Condición-Tipo de Asfalto

### INTERACCION BC, Severidad-Tipo de Asfalto

De acuerdo a la significancia del factor severidad, en el Gráfico 9 se observa un aumento en el porcentaje de pérdidas en la medida que aumenta el nivel de severidad. También se observa una tendencia del mismo comportamiento en los diferentes Tipos de Asfalto.

<i>Severidad</i>	<i>Tipo de Asfalto</i>
1. 100 revoluciones	1. AC-20
2. 200 revoluciones	2. AC-30
3. 300 revoluciones	3. Modificado Tipo I-D
	4. Modificado Tipo III-D

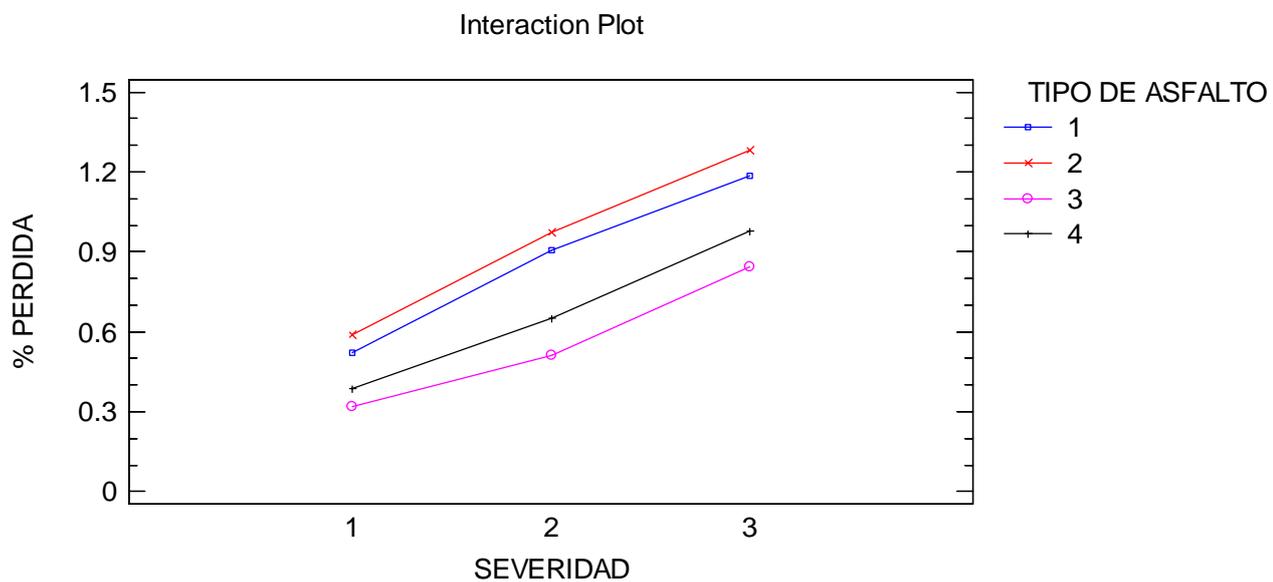


Gráfico 9. Interacción BC, Severidad-Tipo de Asfalto

### **3. PORCENTAJE DE PÉRDIDA PARA LA PRUEBA DE SUSCEPTIBILIDAD TERMICA**

METODO: VARIANZA ANOVA MULTIFACTOR

Variable dependiente: PORCENTAJE DE PÉRDIDA

Factores:

- CONDICION
- SEVERIDAD
- TIPO DE ASFALTO

Número de casos completos: 252

Este procedimiento realiza un análisis de variación de varios factores para el Porcentaje de Pérdida. Construye varias pruebas y gráficos para determinar cuál de los factores tiene un efecto estadístico en la variable de Porcentaje de Pérdida. También realiza pruebas de las interacciones significativas entre los factores, al proporcionar suficientes datos. Las pruebas F en la Tabla 10 ANOVA permiten identificar los factores significativos. Por cada factor significativo, la prueba de rangos múltiples permitirá evaluar cuales medias son significativamente diferentes unas de otras. Los gráficos de las medias y los gráficos de interacciones ayudarán a determinar cuáles son los efectos significativos. Los gráficos de residuos ayudarán a juzgar si las asunciones que son la base del análisis de variación son violadas por los datos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media Cuadrada</i>	<i>Rango F</i>	<i>Valor P</i>
<b>EFECTOS PRINCIPALES</b>					
A. Condición	37.0535	6	6.17559	2450.79	0.0000
B. Severidad	8.17249	2	4.08625	1621.63	0.0000
C. Tipo de Asfalto	5.34682	3	1.78227	707.30	0.0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB (Condición-Severidad)	2.7435	12	0.228625	90.73	0.0000
AC (Condición- Tipo de Asfalto)	0.681462	18	0.037859	15.02	0.0000
BC (Severidad-Tipo de Asfalto)	0.141306	6	0.0235509	9.35	0.0000
ABC (Condición-Severidad-Tipo de Asfalto)	0.334817	36	0.00930046	3.69	0.0000
Residuos	0.423333	168	0.00251984		
TOTAL (CORREGIDO)	54.8973	251			

TABLA 10. ANOVA, Análisis de la varianza para el Porcentaje de Pérdida Tipo III: Suma de cuadrados  
 Todos los cocientes F están basados en el error de la media cuadrada residual.

La Tabla 10 ANOVA descompone la variabilidad de Porcentaje de Pérdida en las contribuciones debido a varios factores. Puesto que se ha elegido el Tipo III Sumas de cuadrados, la contribución de cada factor se mide quitando los efectos de factores en la tabla anterior. Los valores P prueban la significación estadística de cada uno de los factores. Dado que 7 valores P son menores a 0.05, estos factores tienen un efecto estadístico significativo sobre el factor de Porcentaje de Pérdida en un nivel de confianza del 95.0%.

Los factores que influyen sobre el porcentaje de pérdidas en la prueba de adhesión son: los 3 efectos principales: La Condición (A), La Severidad (B) y El Tipo de Asfalto (C) además de las Interacciones Condición-Severidad (AB), Severidad-Tipo de Asfalto (BC), Condición-Tipo de Asfalto (AC) y la combinación de las tres Condición-Severidad-Tipo de Asfalto (ABC), debido a que arrojan un valor P inferior al 0.05. Esto indica que existen efectos significativos de los factores así como efectos interactivos significativos de segundo orden.

## COMPARACION DE MEDIAS

### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LAS MEDIAS

<i>Nivel</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
GRAND MEAN	252	0.694603			
<b>CONDICION</b>					
1. 12hrs en horno a 25°C	36	0.314722	0.00836634	0.298205	0.331239
2. 12hrs en horno a 35°C	36	0.329167	0.00836634	0.31265	0.345683
3. 12hrs en horno a 45°C	36	0.3775	0.00836634	0.360983	0.394017
4. 12hrs en horno a 55°C	36	0.473333	0.00836634	0.456817	0.48985
5. 12hrs en horno a 60°C	36	0.968333	0.00836634	0.951817	0.98485
6. 12hrs en horno a 65°C	36	1.1075	0.00836634	1.09098	1.12402
7. 12hrs en horno a 75°C	36	1.29167	0.00836634	1.27515	1.30818
<b>Severidad (B)</b>					
7. 100 revoluciones	84	0.472262	0.00547705	0.461449	0.483075
8. 200 revoluciones	84	0.698214	0.00547705	0.687402	0.709027
9. 300 revoluciones	84	0.913333	0.00547705	0.902521	0.924146
<b>Tipo de Asfalto (C)</b>					
9. AC-20	63	0.805238	0.00632436	0.792753	0.817724
10. AC-30	63	0.866349	0.00632436	0.853864	0.878835
11. Asfalto Modificado Tipo I-D	63	0.513016	0.00632436	0.50053	0.525501
12. Asfalto Modificado Tipo III-D	63	0.59381	0.00632436	0.581324	0.606295
<b>INTERACCION AB</b>					
<b>Condición - Severidad</b>					
1,1: 12hrs en horno a 25°C, 100 revoluciones	12	0.210833	0.0144909	0.182226	0.239441
1,2: 12hrs en horno a 25°C, 200 revoluciones	12	0.295	0.0144909	0.266392	0.323608
1,3: 12hrs en horno a 25°C, 300 revoluciones	12	0.438333	0.0144909	0.409726	0.466941
2,1: 12hrs en horno a 35°C, 100 revoluciones	12	0.225	0.0144909	0.196392	0.253608
2,2: 12hrs en horno a 35°C, 200 revoluciones	12	0.3125	0.0144909	0.283892	0.341108
2,3: 12hrs en horno a 35°C, 300 revoluciones	12	0.45	0.0144909	0.421392	0.478608
3,1: 12hrs en horno a 45°C, 100 revoluciones	12	0.2725	0.0144909	0.243892	0.301108
3,2: 12hrs en horno a 45°C, 200 revoluciones	12	0.365	0.0144909	0.336392	0.393608
3,3: 12hrs en horno a 45°C, 300 revoluciones	12	0.495	0.0144909	0.466392	0.523608
4,1: 12hrs en horno a 55°C, 100 revoluciones	12	0.37	0.0144909	0.341392	0.398608
4,2: 12hrs en horno a 55°C, 200 revoluciones	12	0.4625	0.0144909	0.433892	0.491108
4,3: 12hrs en horno a 55°C, 300 revoluciones	12	0.5875	0.0144909	0.558892	0.616108
5,1: 12hrs en horno a 60°C, 100 revoluciones	12	0.575	0.0144909	0.546392	0.603608
5,2: 12hrs en horno a 60°C, 200 revoluciones	12	0.985	0.0144909	0.956392	1.01361
5,3: 12hrs en horno a 60°C, 300 revoluciones	12	1.345	0.0144909	1.31639	1.37361
6,1: 12hrs en horno a 65°C, 100 revoluciones	12	0.7225	0.0144909	0.693892	0.751108
6,2: 12hrs en horno a 65°C, 200 revoluciones	12	1.14	0.0144909	1.11139	1.16861
6,3: 12hrs en horno a 65°C, 300 revoluciones	12	1.46	0.0144909	1.43139	1.48861
7,1: 12hrs en horno a 75°C, 100 revoluciones	12	0.93	0.0144909	0.901392	0.958608
7,2: 12hrs en horno a 75°C, 200 revoluciones	12	1.3275	0.0144909	1.29889	1.35611
7,3: 12hrs en horno a 75°C, 300 revoluciones	12	1.6175	0.0144909	1.58889	1.64611

<b>INTERACCION AC</b>					
<b>Condición – Tipo de Asfalto</b>					
1,1: 12hrs en horno a 25°C, AC-20	9	0.4	0.0167327	0.366967	0.433033
1,2: 12hrs en horno a 25°C, AC-30	9	0.427778	0.0167327	0.394744	0.460811
1,3: 12hrs en horno a 25°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.201111	0.0167327	0.168078	0.234145
1,4: 12hrs en horno a 25°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.23	0.0167327	0.196967	0.263033
2,1: 12hrs en horno a 35°C, AC-20	9	0.416667	0.0167327	0.383633	0.4497
2,2: 12hrs en horno a 35°C, AC-30	9	0.446667	0.0167327	0.413633	0.4797
2,3: 12hrs en horno a 35°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.21	0.0167327	0.176967	0.243033
2,4: 12hrs en horno a 35°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.243333	0.0167327	0.2103	0.276367
3,1: 12hrs en horno a 45°C, AC-20	9	0.466667	0.0167327	0.433633	0.4997
3,2: 12hrs en horno a 45°C, AC-30	9	0.496667	0.0167327	0.463633	0.5297
3,3: 12hrs en horno a 45°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.26	0.0167327	0.226967	0.293033
3,4: 12hrs en horno a 45°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.286667	0.0167327	0.253633	0.3197
4,1: 12hrs en horno a 55°C, AC-20	9	0.56	0.0167327	0.526967	0.593033
4,2: 12hrs en horno a 55°C, AC-30	9	0.593333	0.0167327	0.5603	0.626367
4,3: 12hrs en horno a 55°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.36	0.0167327	0.326967	0.393033
4,4: 12hrs en horno a 55°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.38	0.0167327	0.346967	0.413033
5,1: 12hrs en horno a 60°C, AC-20	9	1.12	0.0167327	1.08697	1.15303
5,2: 12hrs en horno a 60°C, AC-30	9	1.21	0.0167327	1.17697	1.24303
5,3: 12hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.7	0.0167327	0.666967	0.733033
5,4: 12hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.843333	0.0167327	0.8103	0.876367
6,1: 12hrs en horno a 65°C, AC-20	9	1.24333	0.0167327	1.2103	1.27637
6,2: 12hrs en horno a 65°C, AC-30	9	1.34667	0.0167327	1.31363	1.3797
6,3: 12hrs en horno a 65°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.826667	0.0167327	0.793633	0.8597
6,4: 12hrs en horno a 65°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	1.01333	0.0167327	0.9803	1.04637
7,1: 12hrs en horno a 75°C, AC-20	9	1.43	0.0167327	1.39697	1.46303
7,2: 12hrs en horno a 75°C, AC-30	9	1.54333	0.0167327	1.5103	1.57637
7,3: 12hrs en horno a 75°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	1.03333	0.0167327	1.0003	1.06637
7,4: 12hrs en horno a 75°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	1.16	0.0167327	1.12697	1.19303
<b>INTERACCION AC</b>					
<b>Severidad – Tipo de Asfalto</b>					
1,1: 100 revoluciones, AC-20	21	0.568095	0.0109541	0.54647	0.589721
1,2: 100 revoluciones, AC-30	21	0.607619	0.0109541	0.585994	0.629245
1,3: 100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	21	0.331905	0.0109541	0.310279	0.35353
1,4: 100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	21	0.381429	0.0109541	0.359803	0.403054
2,1: 200 revoluciones, AC-20	21	0.838095	0.0109541	0.81647	0.859721
2,2: 200 revoluciones, AC-30	21	0.891905	0.0109541	0.870279	0.91353
2,3: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo	21	0.487619	0.0109541	0.465994	0.509245

I-D					
2,4: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	21	0.575238	0.0109541	0.553613	0.596864
3,1: 300 revoluciones, AC-20	21	1.00952	0.0109541	0.987898	1.03115
3,2: 300 revoluciones, AC-30	21	1.09952	0.0109541	1.0779	1.12115
3,3: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	21	0.719524	0.0109541	0.697898	0.741149
3,4: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	21	0.824762	0.0109541	0.803136	0.846387

TABLA 11. Tabla de medias de mínimos cuadrados para el Porcentaje de Pérdida con intervalos de confianza de 95 por ciento

## COMPARACION DE MEDIAS PARA LOS DIFERENTES FACTORES

Permite comparar si hay diferencia entre los datos en función de los niveles del factor:

- **Factor: Condición (A)**

### PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 12a y Tabla 12b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 12a se identifican a 6 grupos homogéneos usando columnas con X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadísticas significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa de Fisher (LSD: Least Significant Difference). Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Condición</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1. 12hrs en horno a 25°C	36	0.314722	0.00836634	X
2. 12hrs en horno a 35°C	36	0.329167	0.00836634	X
3. 12hrs en horno a 45°C	36	0.3775	0.00836634	X
4. 12hrs en horno a 55°C	36	0.473333	0.00836634	X
5. 12hrs en horno a 60°C	36	0.968333	0.00836634	X
6. 12hrs en horno a 65°C	36	1.1075	0.00836634	X
7. 12hrs en horno a 75°C	36	1.29167	0.00836634	X

TABLA 12a. Factor: Condición (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 12b aplica un procedimiento múltiple de comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 12b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de 20 pares (1-3), (1-4), (1-5), (1-6), (1,7), (2-3), (2-4), (2-5), (2-6), (2-7), (3-4), (3-5), (3-6), (3-7), (4-5), (4-6), (4,7), (5-6), (5-7) y (6-7) indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2		-0.0144444	0.0233582
1 - 3	*	-0.0627778	0.0233582
1 - 4	*	-0.158611	0.0233582
1 - 5	*	-0.653611	0.0233582
1 - 6	*	-0.792778	0.0233582
1 - 7	*	-0.976944	0.0233582
2 - 3	*	-0.0483333	0.0233582
2 - 4	*	-0.144167	0.0233582
2 - 5	*	-0.639167	0.0233582
2 - 6	*	-0.778333	0.0233582
2 - 7	*	-0.9625	0.0233582
3 - 4	*	-0.0958333	0.0233582
3 - 5	*	-0.590833	0.0233582
3 - 6	*	-0.73	0.0233582
3 - 7	*	-0.914167	0.0233582
4 - 5	*	-0.495	0.0233582
4 - 6	*	-0.634167	0.0233582
4 - 7	*	-0.818333	0.0233582
5 - 6	*	-0.139167	0.0233582
5 - 7	*	-0.323333	0.0233582
6 - 7	*	-0.184167	0.0233582

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 12b. Factor: Condición (procedimiento de comparación)

De acuerdo a la prueba LSD, existe diferencia significativa en el comportamiento del porcentaje de pérdida respecto a los diferentes niveles de condición. Como se puede observar en el Gráfico 10, las primeras 4 condiciones mantienen una tendencia de incremento constante en el Porcentaje de Pérdidas desde la Condición 1 hasta condición 4. Para las condiciones 5, 6 y 7 el aumento se mantiene, solo que la diferencia es notoria con respecto a las primeras cuatro, incrementándose de forma significativa el Porcentaje de Pérdidas. Es importante recalcar que las pérdidas son mayores a partir de la condición 5, 12 horas en el horno a 60°C, siendo esta temperatura la máxima esperada en un pavimento en servicio.

Condición
1. 12hrs en horno a 25°C
2. 12hrs en horno a 35°C
3. 12hrs en horno a 45°C
4. 12hrs en horno a 55°C
5. 12hrs en horno a 60°C
6. 12hrs en horno a 65°C
7. 12hrs en horno a 75°C

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

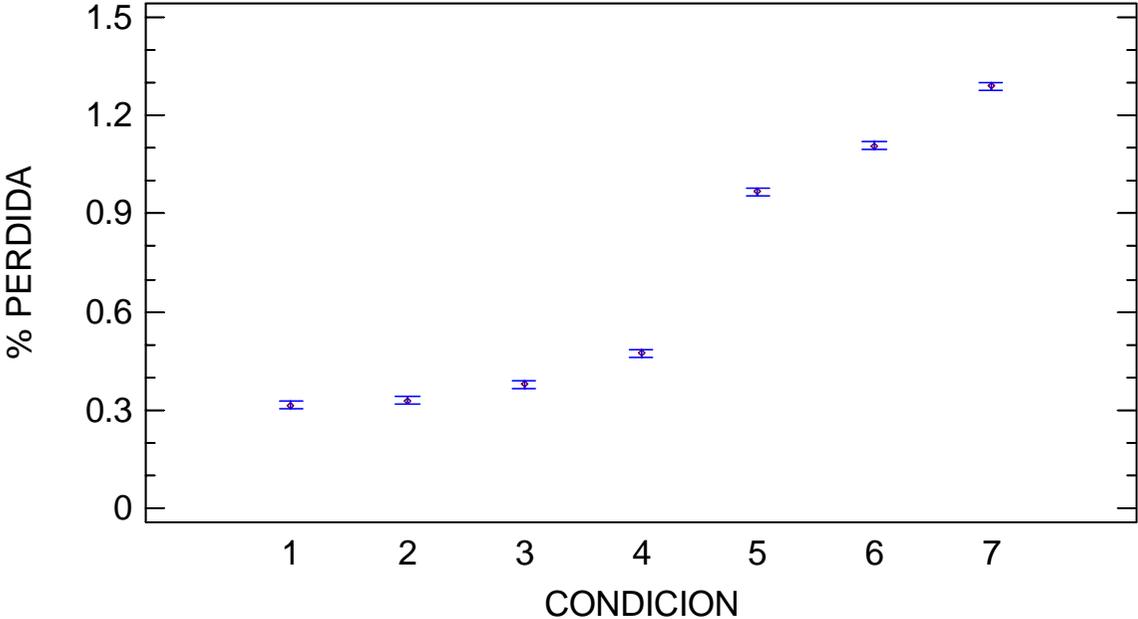


Gráfico 10. Porcentaje de Pérdida debido a la Condición

- **Factor: Severidad (B)**

PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 4a y Tabla 4b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 13a se identifican a 3 grupos homogéneos usando la columna con una X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadístico significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD: Least Significant Difference) de Fisher. Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Severidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1. 100 revoluciones	84	0.472262	0.00547705	X
2. 200 revoluciones	84	0.698214	0.00547705	X
3. 300 revoluciones	84	0.913333	0.00547705	X

TABLA 13a. Factor: Severidad (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 13b aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 13b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de

3 pares (1-2), (1-3) y (2-3), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	-0.225952	0.0152915
1 - 3	*	-0.441071	0.0152915
2 - 3	*	-0.215119	0.0152915

\* denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 8b. Factor: Severidad (procedimiento de comparación)

En el Gráfico 11, se puede observar un comportamiento lineal, donde el comportamiento se mantiene en el sentido de que aumentan los Porcentajes de Pérdidas al aumentar la Severidad. La diferencia en las Medias y en los Intervalos LSD al 95% presentan unos Porcentajes de Pérdidas entre el 0.46% - 0.96%, intervalo mayor que el presentado en el ensayo de Cohesión que solo oscila entre 0.18% – 0.48%.

<i>Severidad</i>
1. 100 revoluciones
2. 200 revoluciones
3. 300 revoluciones

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

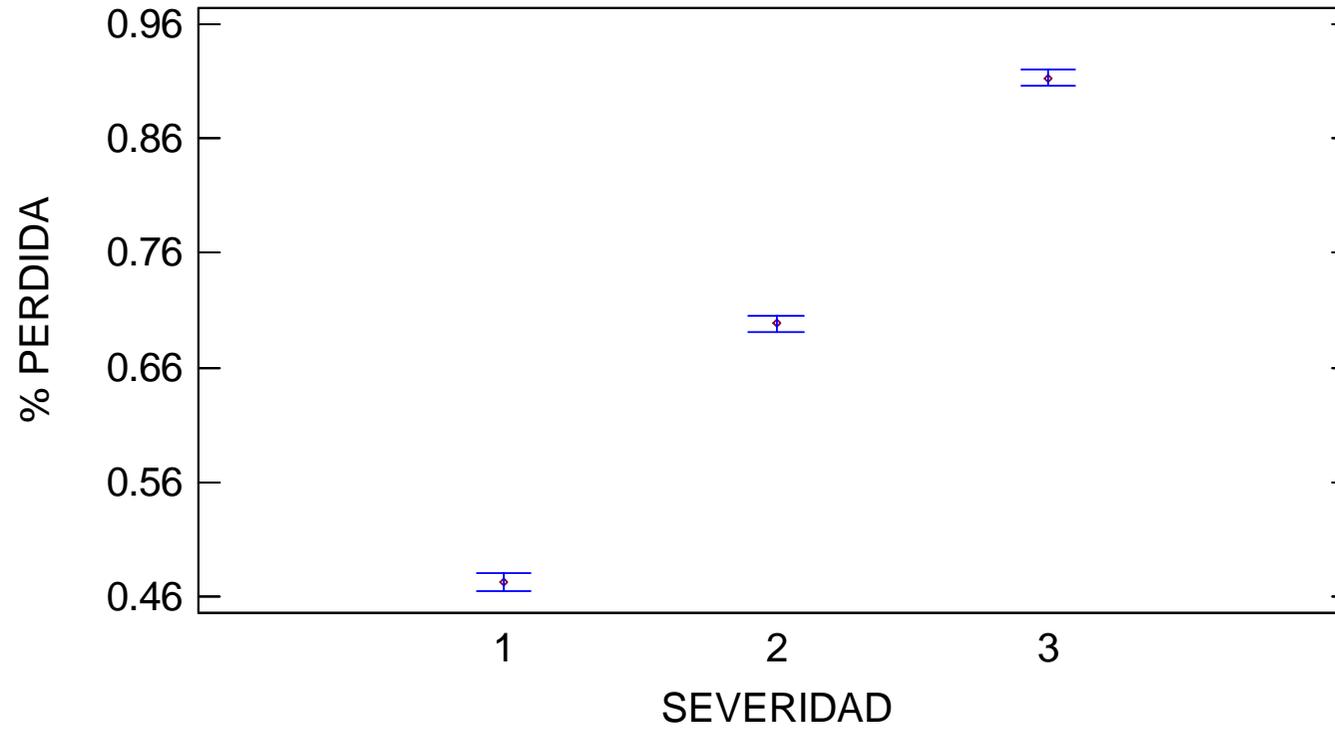


Gráfico 11. Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad

- **Factor: Tipo de Asfalto (C):**

PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 14a y Tabla 14b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 14a se identifican a 4 grupos homogéneos usando la columna con una X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadísticas significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD: Least Significant Difference) de Fisher. Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Tipo de Asfalto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
3. Modificado Tipo I-D	63	0.513016	0.00632436	X
4. Modificado Tipo III-D	63	0.59381	0.00632436	X
1. AC-20	63	0.805238	0.00632436	X
2. AC-30	63	0.866349	0.00632436	X

TABLA 14a. Factor: Tipo de Cemento (Método: LSD 95 por ciento)

La Tabla 14b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de 6 pares (1-2), (1-3), (1-4), (2-3), (2-4) y (3,4), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	-0.0611111	0.0176571
1 - 3	*	0.292222	0.0176571
1 - 4	*	0.211429	0.0176571
2 - 3	*	0.353333	0.0176571
2 - 4	*	0.27254	0.0176571
3 - 4	*	-0.0807937	0.0176571

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 14b. Factor: Tipo de Cemento (procedimiento de comparación)

En la Tabla 14b se muestran las diferencias significativas entre cada Tipo de Asfalto. Estas diferencias se pueden observar en el Gráfico 12 donde es notable que el Porcentaje de Pérdida promedio tiene menor impacto en el Tipo de Asfalto 3, Asfalto Modificado Tipo I-D. Se observa también que las diferencias entre los dos Asfaltos Convencionales no es mucha por lo que tienen similar comportamiento. Lo mismo se repite para los dos Asfaltos modificados que a su vez presentan los menores Porcentajes de Pérdidas.

<i>Tipo de Asfalto</i>
1. AC-20
2. AC-30
3. Modificado Tipo I-D
4. Modificado Tipo III-D

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

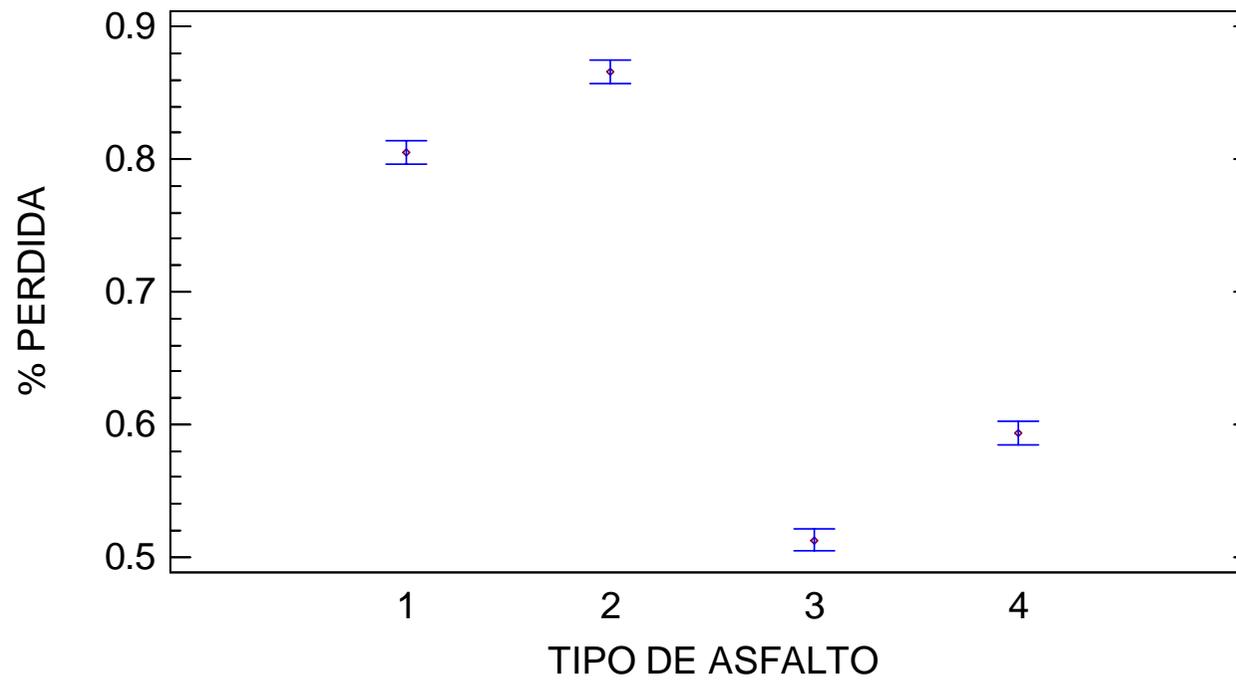


Gráfico 12. Porcentaje de Pérdida debido al Tipo de Asfalto

## **ANALISIS DE LAS INTERACCIONES**

De acuerdo al análisis de la varianza los efectos de las tres interacciones dobles son significativos al 95%, todos los como efectos interactivos significativos de segundo orden tienen igual valor de significancia, lo que es lógico dado que todos los factores tienen efectos significativos (valores P inferiores a 0.05). A continuación se describe el comportamiento de las interacciones:

### **INTERACCION AB, Condición-Severidad**

El Gráfico 13 muestra tendencias de aumento de Porcentaje de Pérdidas conforme aumenta el nivel de severidad, así mismo también aumenta el de Porcentaje de Pérdidas conforme van agudizándose los requerimientos de las diferentes condiciones por lo que se aprecia que al aumentar la temperatura los efectos de esta inducen un deterioro por el cual la probeta tiene menor resistencia y sufre mayor Porcentaje de Pérdida durante el ensayo.

Condición	Severidad
1. 12hrs en horno a 25°C	1. 100 revoluciones
2. 12hrs en horno a 35°C	2. 200 revoluciones
3. 12hrs en horno a 45°C	3. 300 revoluciones
4. 12hrs en horno a 55°C	
5. 12hrs en horno a 60°C	
6. 12hrs en horno a 65°C	
7. 12hrs en horno a 75°C	

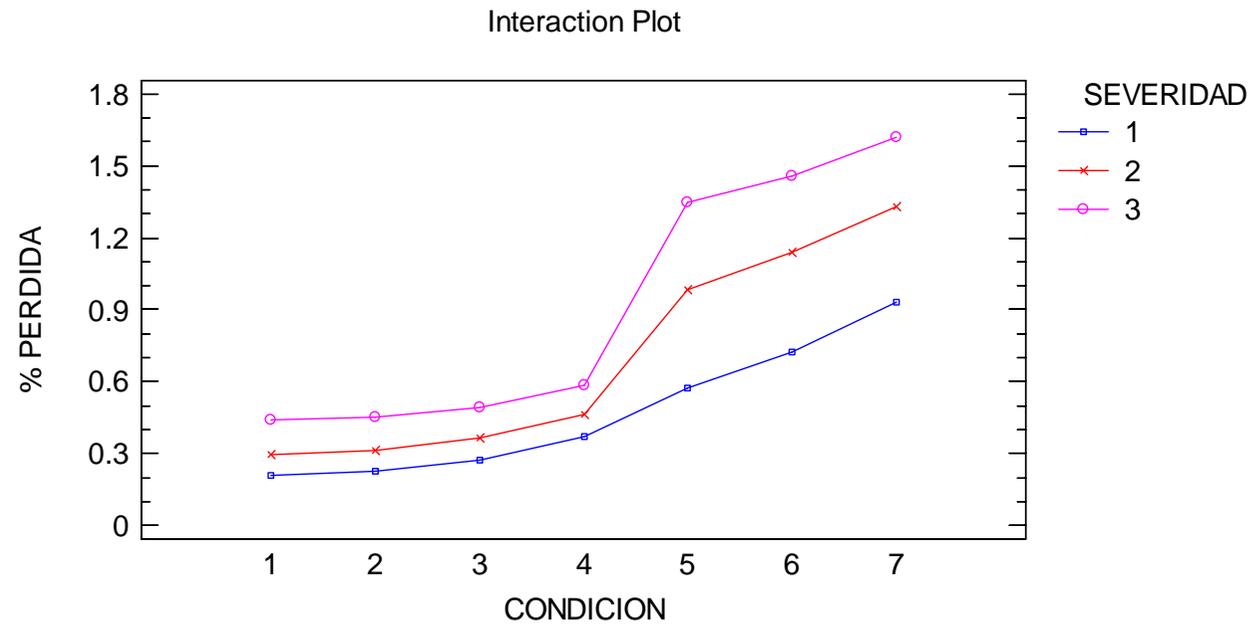


Gráfico 13. Interacción AB, Condición-Severidad

### INTERACCION AC, Condición-Tipo de Asfalto

En esta interacción que se presenta en el Gráfico 14 se observa de forma más notoria el parecido del comportamiento entre ambos Asfaltos Convencionales, que tienen los mayores Porcentajes de Pérdida, así como entre ambos Asfaltos Modificados, que son los que tienen los menores Porcentajes de Pérdida.

Condición	Tipo de Asfalto
1. 12hrs en horno a 25°C	1. AC-20
2. 12hrs en horno a 35°C	2. AC-30
3. 12hrs en horno a 45°C	3. Modificado Tipo I-D
4. 12hrs en horno a 55°C	4. Modificado Tipo III-D
5. 12hrs en horno a 60°C	
6. 12hrs en horno a 65°C	
7. 12hrs en horno a 75°C	

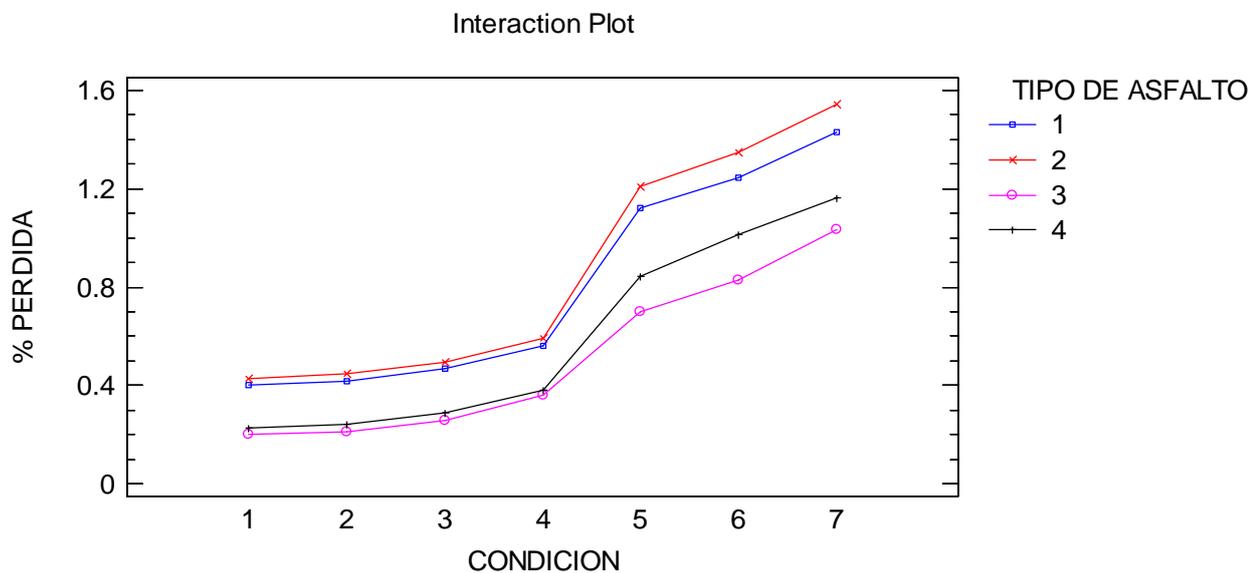


Gráfico14. Interacción AC, Condición-Tipo de Asfalto

### INTERACCION BC, Severidad-Tipo de Asfalto

Esta interacción muestra el mismo comportamiento para las 4 propiedades evaluadas. En el Gráfico 15 se observa el comportamiento predecible de un aumento en el porcentaje de pérdidas de manera proporcional al aumento del nivel de severidad. Los 4 asfaltos mantienen un comportamiento similar con diferentes pendientes, arrojando menores Porcentajes de Pérdidas los Asfaltos Modificados y teniendo mayores Porcentajes de Pérdidas los Asfaltos Convencionales.

<i>Severidad</i>	<i>Tipo de Asfalto</i>
1. 100 revoluciones	1. AC-20
2. 200 revoluciones	2. AC-30
3. 300 revoluciones	3. Modificado Tipo I-D
	4. Modificado Tipo III-D

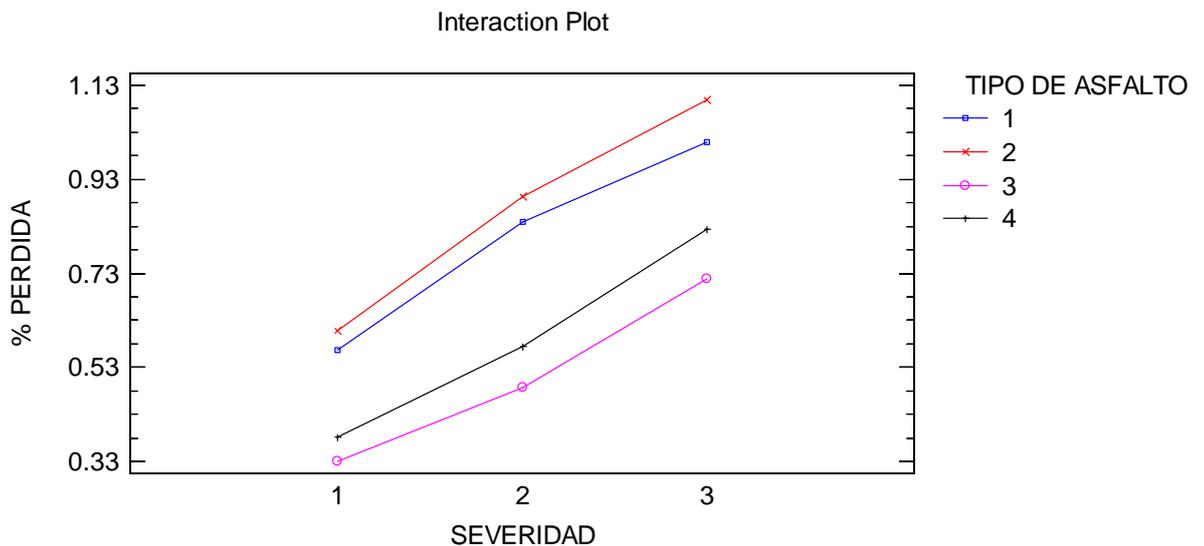


Gráfico 15. Interacción BC, Severidad-Tipo de Asfalto

#### **4. PORCENTAJE DE PÉRDIDA PARA LA PRUEBA DE DURABILIDAD**

METODO: VARIANZA ANOVA MULTIFACTOR

Variable dependiente: PORCENTAJE DE PÉRDIDA

Factores:

- CONDICION
- SEVERIDAD
- TIPO DE ASFALTO

Número de casos completos: 205

Este procedimiento realiza un análisis de variación de varios factores para el Porcentaje de Pérdida. Construye varias pruebas y gráficos para determinar cuál de los factores tiene un efecto estadístico en la variable de Porcentaje de Pérdida. También realiza pruebas de las interacciones significativas entre los factores, al proporcionar suficientes datos. Las pruebas F en la Tabla 15 ANOVA permiten identificar los factores significativos. Por cada factor significativo, la prueba de rangos múltiples permitirá evaluar cuales medias son significativamente diferentes unas de otras. Los gráficos de las medias y los gráficos de interacciones ayudarán a determinar cuáles son los efectos significativos. Los gráficos de residuos ayudarán a juzgar si las asunciones que son la base del análisis de variación son violadas por los datos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media Cuadrada</i>	<i>Rango F</i>	<i>Valor P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A. Condición	26.8361	5	5.36721	1137.74	0.0000
B. Severidad	4.99806	2	2.49903	529.75	0.0000
C. Tipo de Asfalto	3.52899	3	1.17633	249.36	0.0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB (Condición-Severidad)	2.01368	10	0.201368	42.69	0.0000
AC (Condición- Tipo de Asfalto)	0.625009	15	0.0416673	8.83	0.0000
BC (Severidad-Tipo de Asfalto)	0.0564238	6	0.00940396	1.99	0.0709
ABC (Condición-Severidad-Tipo de Asfalto)	0.235671	30	0.00785571	1.67	0.0267
Residuos	0.627417	133	0.00471742		
TOTAL (CORREGIDO)	37.7481	204			

TABLA 15. ANOVA, Análisis de la varianza para el Porcentaje de Pérdida Tipo III: Suma de cuadrados  
 Todos los cocientes F están basados en el error de la media cuadrada residual.

La Tabla 15 ANOVA descompone la variabilidad de Porcentaje de Pérdida en las contribuciones debido a varios factores. Puesto que se ha elegido el Tipo III Sumas de cuadrados, la contribución de cada factor se mide quitando los efectos de factores en la tabla anterior. Los valores P prueban la significación estadística de cada uno de los factores. Dado que 6 valores P son menores a 0.05, estos factores tienen un efecto estadístico significativo sobre el factor de Porcentaje de Pérdida en un nivel de confianza del 95.0%.

Los factores que influyen sobre el porcentaje de pérdidas en la prueba de adhesión son: los 3 efectos principales: La Condición (A), La Severidad (B) y El Tipo de Asfalto (C) además de las Interacciones Condición-Severidad (AB), Severidad-Tipo de Asfalto (BC), Condición-Tipo de Asfalto (AC) y la combinación de las tres Condición-Severidad-Tipo de Asfalto (ABC), debido a que arrojan un valor P inferior al 0.05. Esto indica que existen

efectos significativos de los factores así como efectos interactivos significativos de segundo orden.

## COMPARACION DE MEDIAS

### INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LAS MEDIAS

<i>Nivel</i>	<i>Cantida d</i>	<i>Media</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
GRAND MEAN	205	0.611042			
<b>Condición</b>					
1. Envejecimiento 0 horas	36	0.314722	0.0114472	0.29208	0.337364
2. Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C	36	0.34	0.0114472	0.317358	0.362642
3. Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C	36	0.37	0.0114472	0.347358	0.392642
4. Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C	29	0.407917	0.01301	0.382183	0.43365
5. Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C	36	0.968333	0.0114472	0.945691	0.990976
6. Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C	32	1.26528	0.0123644	1.24082	1.28973
<b>Severidad (B)</b>					
10. 100 revoluciones	71	0.419236	0.00817831	0.40306	0.435413
11. 200 revoluciones	69	0.606875	0.00834354	0.590372	0.623378
12. 300 revoluciones	65	0.807014	0.00866456	0.789876	0.824152
<b>Tipo de Asfalto (C)</b>					
13. AC-20	49	0.708981	0.00997461	0.689252	0.728711
14. AC-30	51	0.771019	0.00972829	0.751776	0.790261
15. Asfalto Modificado Tipo I-D	52	0.453148	0.00960276	0.434154	0.472142
16. Asfalto Modificado Tipo III-D	53	0.511019	0.00947556	0.492276	0.529761
<b>INTERACCION AB Condición - Severidad</b>					
1,1: Envejecimiento 0 horas, 100 revoluciones	12	0.210833	0.0198272	0.171616	0.250051
1,2: Envejecimiento 0 horas, 200 revoluciones	12	0.295	0.0198272	0.255782	0.334218
1,3: Envejecimiento 0 horas, 300 revoluciones	12	0.438333	0.0198272	0.399116	0.477551
2,1: Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C, 100 revoluciones	12	0.2375	0.0198272	0.198282	0.276718
2,2: Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C, 200 revoluciones	12	0.325	0.0198272	0.285782	0.364218
2,3: Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C, 300 revoluciones	12	0.4575	0.0198272	0.418282	0.496718
3,1: Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C, 100 revoluciones	12	0.2675	0.0198272	0.228282	0.306718
3,2: Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C, 200 revoluciones	12	0.355	0.0198272	0.315782	0.394218
3,3: Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C, 300 revoluciones	12	0.4875	0.0198272	0.448282	0.526718
4,1: Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C,	11	0.31125	0.0210299	0.269654	0.352846

100 revoluciones					
4,2: Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C, 200 revoluciones	10	0.3975	0.0221675	0.353653	0.441347
4,3: Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C, 300 revoluciones	8	0.515	0.0242833	0.466969	0.563031
5,1: Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C, 100 revoluciones	12	0.575	0.0198272	0.535782	0.614218
5,2: Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C, 200 revoluciones	12	0.985	0.0198272	0.945782	1.02422
5,3: Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C, 300 revoluciones	12	1.345	0.0198272	1.30578	1.38422
6,1: Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C, 100 revoluciones	12	0.913333	0.0198272	0.874116	0.952551
6,2: Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C, 200 revoluciones	11	1.28375	0.0210299	1.24215	1.32535
6,3: Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C, 300 revoluciones	9	1.59875	0.0232495	1.55276	1.64474
<b>INTERACCION AC</b>					
<b>Condición – Tipo de Asfalto</b>					
1,1: Envejecimiento 0 horas, AC-20	9	0.4	0.0228945	0.354716	0.445284
1,2: Envejecimiento 0 horas, AC-30	9	0.427778	0.0228945	0.382493	0.473062
1,3: Envejecimiento 0 horas, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.201111	0.0228945	0.155827	0.246396
1,4: Envejecimiento 0 horas, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.23	0.0228945	0.184716	0.275284
2,1: Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C, AC-20	9	0.42	0.0228945	0.374716	0.465284
2,2: Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C, AC-30	9	0.45	0.0228945	0.404716	0.495284
2,3: Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.23	0.0228945	0.184716	0.275284
2,4: Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.26	0.0228945	0.214716	0.305284
3,1: Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C, AC-20	9	0.446667	0.0228945	0.401382	0.491951
3,2: Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C, AC-30	9	0.48	0.0228945	0.434716	0.525284
3,3: Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.263333	0.0228945	0.218049	0.308618
3,4: Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	0.29	0.0228945	0.244716	0.335284
4,1: Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C, AC-20	6	0.468333	0.0280399	0.412871	0.523795
4,2: Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C, AC-30	7	0.514444	0.0264363	0.462154	0.566734
4,3: Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	8	0.309444	0.0247289	0.260532	0.358357
4,4: Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	8	0.339444	0.0247289	0.290532	0.388357
5,1: Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C, AC-20	9	1.12	0.0228945	1.07472	1.16528
5,2: Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C, AC-30	9	1.21	0.0228945	1.16472	1.25528
5,3: Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	9	0.7	0.0228945	0.654716	0.745284
5,4: Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C,	9	0.843333	0.0228945	0.798049	0.888618

Asfalto Modificado Tipo III-D					
6,1: Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C, AC-20	7	1.39889	0.0264363	1.3466	1.45118
6,2: Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C, AC-30	8	1.54389	0.0247289	1.49498	1.5928
6,3: Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo I-D	8	1.015	0.0247289	0.966087	1.06391
6,4: Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C, Asfalto Modificado Tipo III-D	9	1.10333	0.0228945	1.05805	1.14862
<b>INTERACCION AC</b>					
<b>Severidad – Tipo de Asfalto</b>					
1,1: 100 revoluciones, AC-20	17	0.509722	0.0168499	0.476394	0.543051
1,2: 100 revoluciones, AC-30	18	0.547778	0.0161888	0.515757	0.579799
1,3: 100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	18	0.28	0.0161888	0.247979	0.312021
1,4: 100 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	18	0.339444	0.0161888	0.307423	0.371465
2,1: 200 revoluciones, AC-20	16	0.719444	0.017486	0.684858	0.754031
2,2: 200 revoluciones, AC-30	17	0.769167	0.0168499	0.735838	0.802495
2,3: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	18	0.438333	0.0161888	0.406312	0.470354
2,4: 200 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	18	0.500556	0.0161888	0.468535	0.532577
3,1: 300 revoluciones, AC-20	16	0.897778	0.017486	0.863191	0.932364
3,2: 300 revoluciones, AC-30	16	0.996111	0.017486	0.961525	1.0307
3,3: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo I-D	16	0.641111	0.017486	0.606525	0.675698
3,4: 300 revoluciones, Asfalto Modificado Tipo III-D	17	0.693056	0.0168499	0.659727	0.726384

TABLA 16. Tabla de medias de mínimos cuadrados para el Porcentaje de Pérdida con intervalos de confianza de 95 porciento

## COMPARACION DE MEDIAS PARA LOS DIFERENTES FACTORES

Permite comparar si hay diferencia entre los datos en función de los niveles del factor:

- **Factor: Condición (A)**

### PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 17a y Tabla 17b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 17a se identifican a 5 grupos homogéneos usando columnas con X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadísticas significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa de Fisher (LSD: Least Significant Difference). Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Condición</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1. Envejecimiento 0 horas	36	0.314722	0.0114472	X
2. Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C	36	0.34	0.0114472	XX
3. Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C	36	0.37	0.0114472	X
4. Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C	29	0.407917	0.01301	X
5. Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C	36	0.968333	0.0114472	X
6. Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C	32	1.26528	0.0123644	X

TABLA 17a. Factor: Condición (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 17b aplica un procedimiento múltiple de comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 17b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de 13 pares (1-3), (1-4), (1-5), (1-6), (2-4), (2-5), (2-6), (3-4), (3-5), (3-6), (4-5), (4-6) y (5-6) indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1 - 2		-0.0252778	0.032021
1 - 3	*	-0.0552778	0.032021
1 - 4	*	-0.0931944	0.0342764
1 - 5	*	-0.653611	0.032021
1 - 6	*	-0.950556	0.0333285
2 - 3		-0.03	0.032021
2 - 4	*	-0.0679167	0.0342764
2 - 5	*	-0.628333	0.032021
2 - 6	*	-0.925278	0.0333285
3 - 4	*	-0.0379167	0.0342764
3 - 5	*	-0.598333	0.032021
3 - 6	*	-0.895278	0.0333285
4 - 5	*	-0.560417	0.0342764
4 - 6	*	-0.857361	0.0355009
5 - 6	*	-0.296944	0.0333285

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 17b. Factor: Condición (procedimiento de comparación)

De acuerdo a la prueba LSD, existe diferencia significativa en el comportamiento del porcentaje de pérdida respecto a los diferentes niveles de condición. Como se puede observar en el Gráfico 16, las primeras 4 condiciones mantienen una tendencia constante, aumentando el Porcentaje de Pérdidas desde la Condición 1 hasta condición 4. Para las condiciones 5 y 6 el aumento se mantiene, solo que la diferencia es notoria con respecto a las primeras cuatro, haciéndose notar que el tiempo adicional en el horno les ha afectado significativamente de manera que se desgastan más al ensayarse.

Condición
1. Envejecimiento 0 horas
2. Envejecimiento de 1.5 hrs en horno a 60°C
3. Envejecimiento de 3.0 hrs en horno a 60°C
4. Envejecimiento de 6.0 hrs en horno a 60°C
5. Envejecimiento de 12 hrs en horno a 60°C
6. Envejecimiento de 24 hrs en horno a 60°C

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

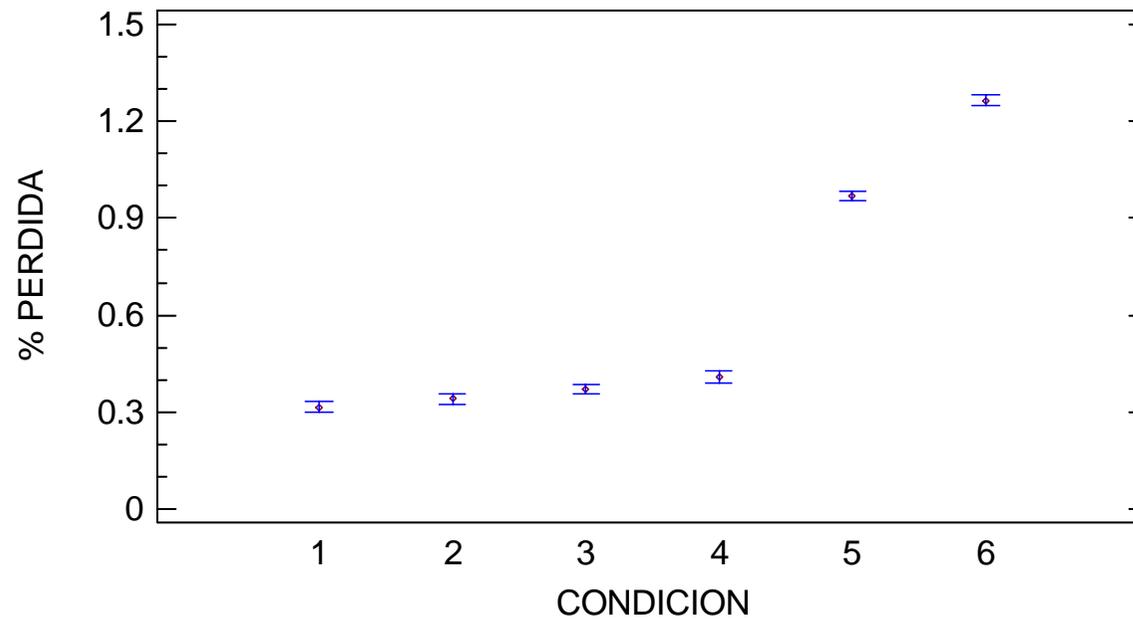


Gráfico 16. Porcentaje de Pérdida debido a la Condición

- **Factor: Severidad (B)**

PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 18a y Tabla 18b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 18a se identifican a 3 grupos homogéneos usando la columna con una X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadístico significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD: Least Significant Difference) de Fisher. Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Severidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1. 100 revoluciones	71	0.419236	0.00817831	X
2. 200 revoluciones	69	0.606875	0.00834354	X
3. 300 revoluciones	65	0.807014	0.00866456	X

TABLA 18a. Factor: Severidad (Método: LSD 95 porciento)

La Tabla 18b aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La Tabla 18b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de

3 pares (1-2), (1-3) y (2-3), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2	*	-0.187639	0.0231091
1 - 3	*	-0.387778	0.0235668
2 - 3	*	-0.200139	0.0237923

\* denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 18b. Factor: Severidad (procedimiento de comparación)

En el Gráfico 17, como era de esperarse, se puede observar tal como en los ensayos anteriores que se mantiene la tendencia de de aumento en el Porcentaje de Pérdidas a medida que incrementa la severidad en la prueba. Por lo que la diferencia en las Medias y en los Intervalos LSD al 95% presentan unas perdidas entre el 0.4% - 0.9%, intervalo mayor que el presentado en el ensayo de Cohesión sin embargo se mantiene en rango similar con el Porcentaje de Pérdidas del ensayo de Adhesión.

<i>Severidad</i>
1. 100 revoluciones
2. 200 revoluciones
3. 300 revoluciones

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

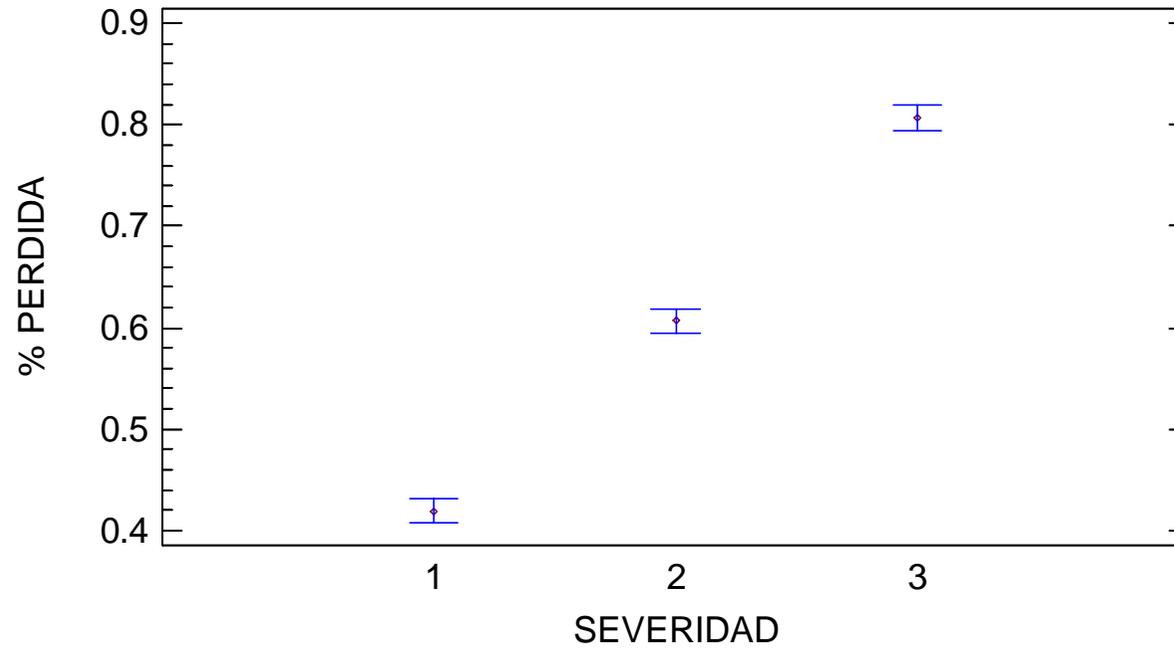


Gráfico 17. Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad

- **Factor: Tipo de Asfalto (C):**

PRUEBA LSD (DIFERENCIA MINIMA SIGNIFICATIVA)

Pruebas múltiples de rango para el Porcentaje de Pérdida debido a la Severidad.

Esta tabla dividida en dos partes, Tabla 19a y Tabla 19b, aplica un procedimiento múltiple de la comparación para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras.

En la Tabla 19a se identifican a 4 grupos homogéneos usando la columna con una X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias dentro de los cuales no hay diferencias estadísticas significativas. El método que es utilizado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de menor diferencia significativa (LSD: Least Significant Difference) de Fisher. Con este método, hay un riesgo del 5.0% de llamar cada par de medios significativamente diferente la diferencia en realidad sea 0.

<i>Tipo de Asfalto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma L</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
3. Modificado Tipo I-D	52	0.453148	0.00960276	x
4. Modificado Tipo III-D	53	0.511019	0.00947556	x
1. AC-20	49	0.708981	0.00997461	x
2. AC-30	51	0.771019	0.00972829	x

TABLA 19a. Factor: Tipo de Cemento (Método: LSD 95 por ciento)

La Tabla 19b muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco al lado de 6 pares (1-2), (1-3), (1-4), (2-3), (2-4) y (3,4), indicando que estos pares demuestran una diferencia estadística significativa en el nivel de confianza del 95.0%.

<i>Contrast</i>	<i>Sig.</i>	<i>Difference</i>	<i>+/- Limits</i>
1 - 2	*	-0.062037	0.0275593
1 - 3	*	0.255833	0.0273865
1 - 4	*	0.197963	0.0272126
2 - 3	*	0.31787	0.0270376
2 - 4	*	0.26	0.0268615
3 - 4	*	-0.0578704	0.0266841

\*denota una diferencia estadística significativa.

TABLA 5b. Factor: Tipo de Cemento (procedimiento de comparación)

La Tabla 19b demuestra que existen diferencias significativas al 95% entre los 4 tipos de asfaltos por el comportamiento del Porcentaje de Pérdidas. Esto se puede visualizar en el Gráfico 18 donde el Porcentaje de Pérdida promedio no es el mismo para todos los tipos de asfalto presentándose nuevamente los mejores resultados en el tercero, que contiene el Porcentaje más bajo de Pérdidas, Asfalto Modificado Tipo I-D.

<i>Tipo de Asfalto</i>
1. AC-20
2. AC-30
3. Modificado Tipo I-D
4. Modificado Tipo III-D

Means and 95.0 Percent LSD Intervals

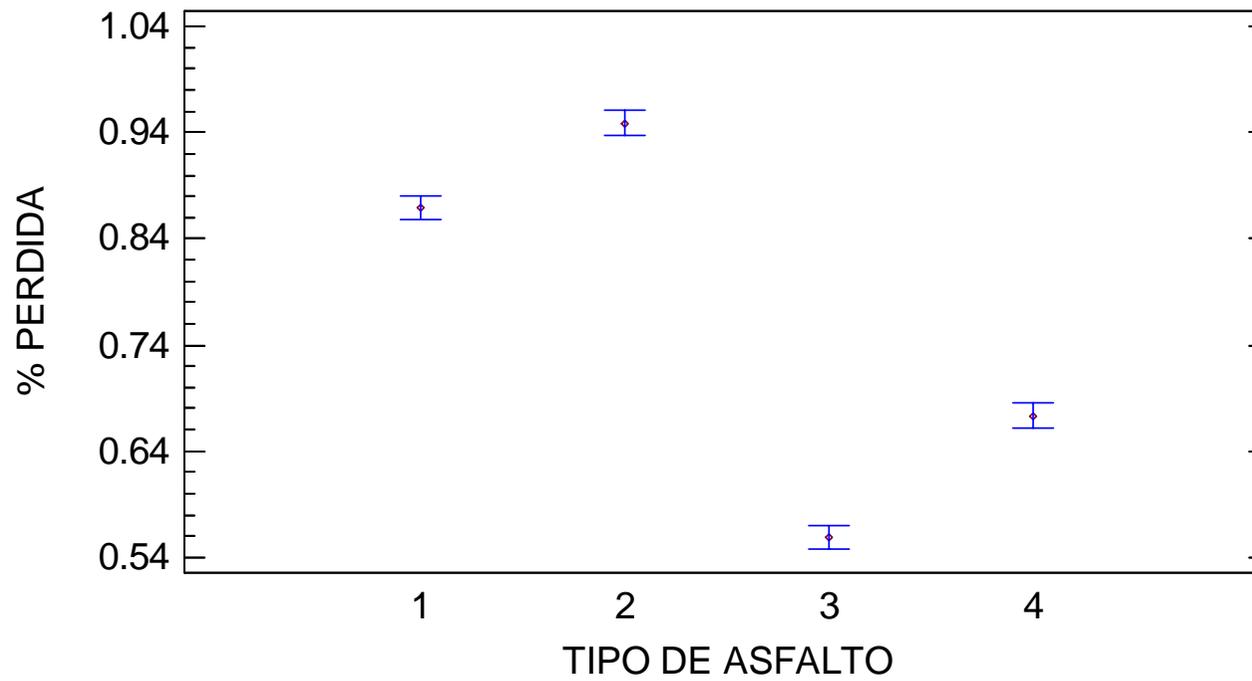


Gráfico 18. Porcentaje de Pérdida debido al Tipo de Asfalto

## **ANALISIS DE LAS INTERACCIONES**

De acuerdo al análisis de la varianza los efectos de las tres interacciones dobles son significativos al 95%, todos los como efectos interactivos significativos de segundo orden tienen igual valor de significancia, lo que es lógico dado que todos los factores tienen efectos significativos (valores P inferiores a 0.05). A continuación se describe el comportamiento de las interacciones:

### **INTERACCION AB, Condición-Severidad**

Como se puede observar en el Gráfico 19, las líneas señalan comportamientos similares para las diferentes severidades, y mantiene la tendencia para las diferentes condiciones. Se puede observar el cambio brusco de las primeras 4 condiciones a las siguientes 2 donde es notable el incremento de Porcentaje de Pérdidas lo que se mantiene para ambos factores; condición y severidad.

Condición	Severidad
1. Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C	1. 100 revoluciones
2. Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C	2. 200 revoluciones
3. En seco, 25°C por 12 horas	3. 300 revoluciones
4. En seco, 60°C por 12 horas	

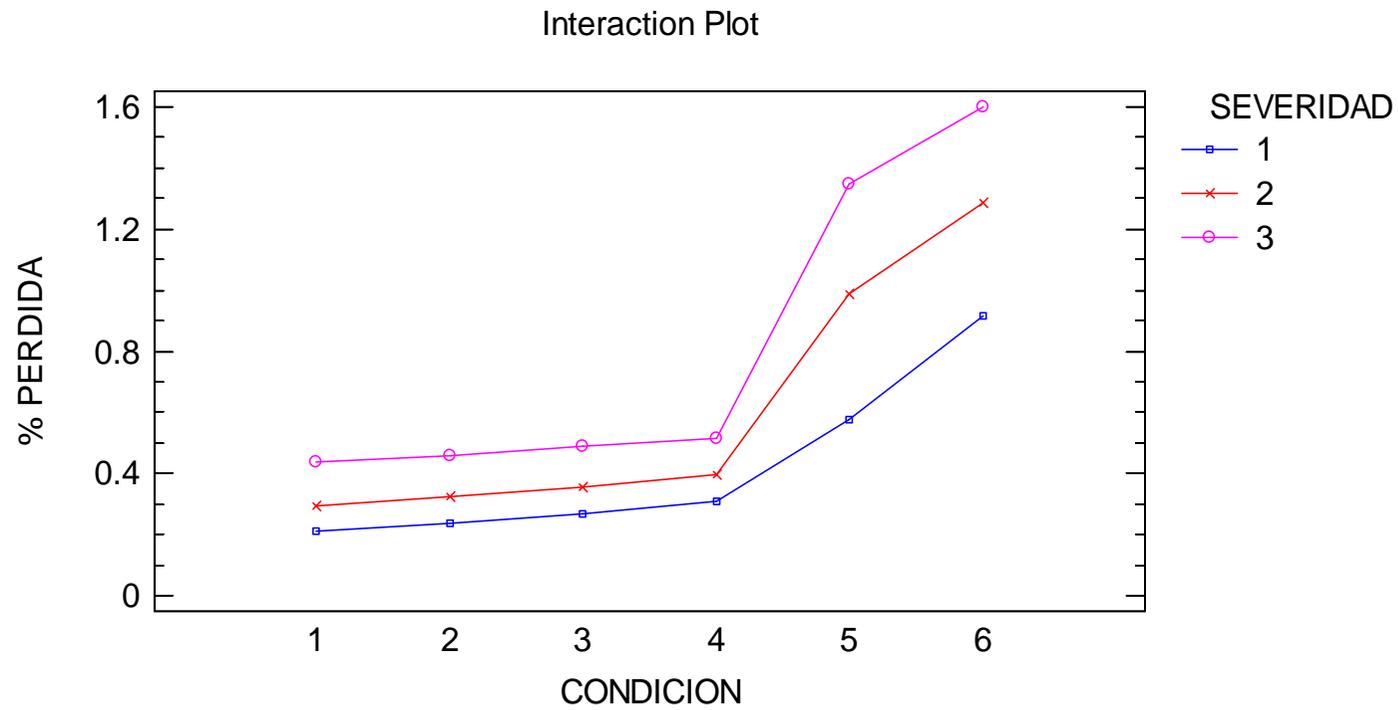


Gráfico 19. Interacción AB, Condición-Severidad

### INTERACCION AC, Condición-Tipo de Asfalto

Por la interacción de estos dos factores se aprecia en el Gráfico 20 que se mantienen comportamientos similares en los asfaltos. Marcándose una ligera diferencia entre los Asfaltos Modificados, y otra entre los Asfaltos Convencionales. Siempre queda una diferencia notable al momento que las probetas son sometidas a 12 y 24 horas al horno respectivamente para las condiciones 5 y 6, por lo que debido al incremento del deterioro se presentan mayores Porcentajes de Pérdidas.

Condición	Tipo de Asfalto
1. Inmersión A, Baño María 4 días a 35°C	1. AC-20
2. Inmersión B, Baño María 24 hrs a 60°C	2. AC-30
3. En seco, 25°C por 12 horas	3. Modificado Tipo I-D
4. En seco, 60°C por 12 horas	4. Modificado Tipo III-D

Interaction Plot

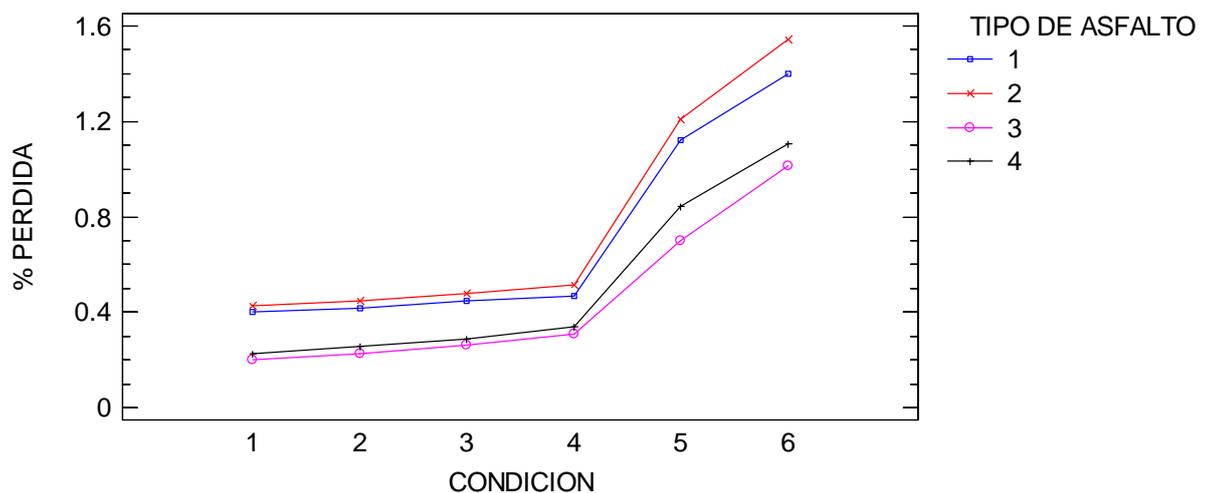


Gráfico 20. Interacción AC, Condición-Tipo de Asfalto

### INTERACCION BC, Severidad-Tipo de Asfalto

En el Gráfico 21 se observa un aumento en el porcentaje de pérdidas de manera proporcional al aumentar el nivel de severidad. Los asfaltos mantienen el comportamiento, arrojando menores Porcentajes de Pérdidas los Asfaltos Modificados y teniendo mayores Porcentajes de Pérdidas los Asfaltos Convencionales.

<i>Severidad</i>	<i>Tipo de Asfalto</i>
1. 100 revoluciones	1. AC-20
2. 200 revoluciones	2. AC-30
3. 300 revoluciones	3. Modificado Tipo I-D
	4. Modificado Tipo III-D

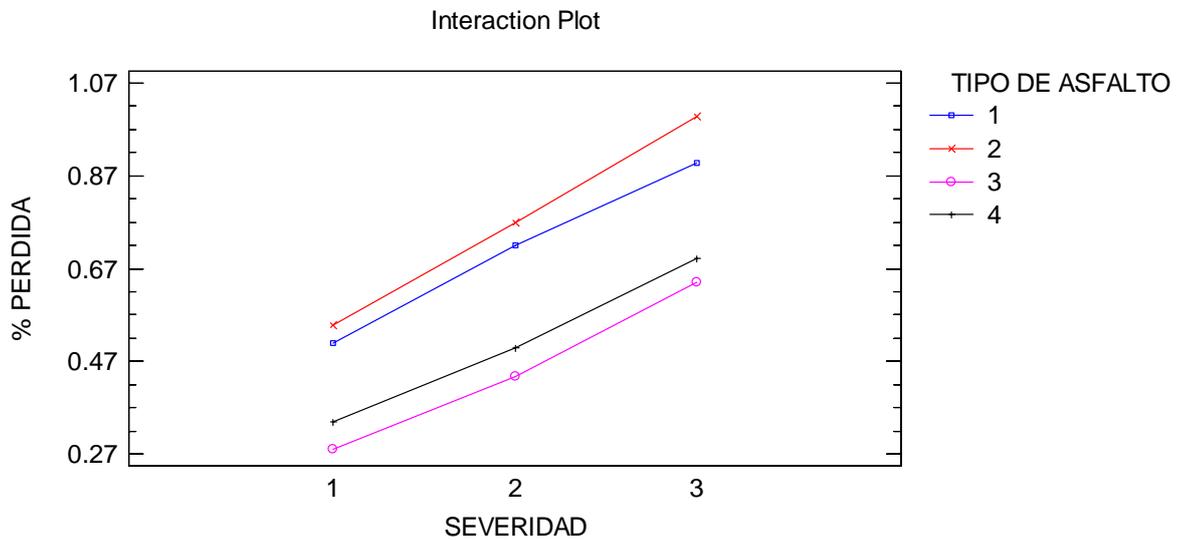


Gráfico 21. Interacción BC, Severidad-Tipo de Asfalto