



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres, Transporte y Logística

Evaluación de la influencia de la incorporación de escoria de alto horno en las características friccionantes de las mezclas asfálticas

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería de Vías terrestres, Transporte y Logística.

Presenta:
Ing. Eugenio Sánchez Briano

Dirigido por:
Dr. Mauricio Centeno Ortiz

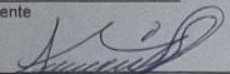
Dr. Mauricio Centeno Ortiz
Presidente

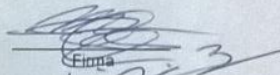
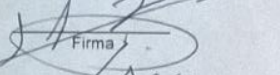
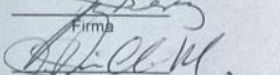
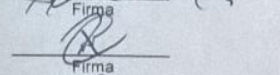
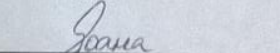
Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

Dr. Jesús Alonso Mota
Suplente

Dr. Pedro Limón Covarrubias
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Diciembre del 2015

I. RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se revisó la afectación del fenómeno de pulimento en las carpetas asfálticas, además, las implicaciones cuando se suscita este deterioro en la capa de rodadura, así como las algunas alternativas de mejoramiento para contrarrestarlo. Dentro de estas alternativas, existe la combinación de agregados con alta y baja resistencia al pulido, por ejemplo, escoria de alto horno-caliza, basalto-caliza, etc. El objetivo principal, fue encontrar la combinación volumétrica de estos dos agregados, que cumpliera con los niveles aceptables de fricción en una capa de rodadura, es decir que los niveles de microtextura no desaparezcán a corto y largo plazo. Las pruebas realizadas en este proyecto se llevaron a cabo en tres fases principalmente. La primera fue conocer la composición química de las escorias, aplicar el residuo insoluble a las calizas y elaborar pruebas de desprendimiento por fricción. Posteriormente, se realizaron pruebas de microdeval para la fracción gruesa y fina de los materiales utilizados. Por último, se realizaron pruebas de pulimento acelerado, elaboradas mediante combinaciones de escoria de alto horno con caliza a diferentes proporciones volumétricas, hasta cumplir con un adecuado nivel de fricción según la Normativa Mexicana. Las pruebas se basaron en la Normativa Tex-438-A y BPN-9 (Valor del péndulo británico después de 9 horas de pulido). Además, gracias a los resultados obtenidos, se desarrolló una metodología mediante pruebas de laboratorio, para determinar la cantidad óptima de escoria de alto horno a utilizar en mezclas asfálticas, así como verificar la inclusión de productos promotores de adherencia a diferentes concentraciones, mitiga el desprendimiento del asfalto en la escoria.

II. SUMMARY

This research analyzes the damage in asphalt binders caused by the polishing phenomenon, as well as the implications that this problem generates. It also studies an improvement alternative to counter the polishing phenomenon in asphalt binders. This alternative features the combination of aggregates with high and low polishing resistance and it is used in order to diminish the damage cause by the polishing phenomenon. This combination was made by the use of some aggregates as blast furnace slag-limestone, basalt-limestone, etc. The principal objective of this investigation was to find the volumetric combination to these two aggregates, so that the asphalt binders met the acceptable levels of friction, in other words, to maintain the microtexture admissible values. The tests in this research were divided into three parts. Firstly, chemical composition of blast furnace slag, insoluble residue for carbonate aggregates and antistripping by friction tests were realized. Secondly, the resistance of coarse aggregate and Fine aggregate to degradation by abrasion (Microdeval test) was determined. Last, the polishing tests was elaborated through volumetric proportions of blast furnace slag mixed with carbonate aggregates in order to met with suitable friction levels, this according to mexican regulations. These tests followed the accelerated polishing test for coarse aggregate and the BPN-9 (british pendulum before nine hours to polishing). A new methodology was developed with the use of the results obtained in this research to determine the optimum amount of blast furnace slag to use in asphalt binders, and to verify if the inclusion of adherence products at different concentrations mitigates the peeling in the asphalt.

Key words: Polishing, microtexture, macrotexture blast furnace slag, carbonate aggregate, volumetric combination.

III. DEDICATORIAS

A MIS PADRES

Agradezco infinitamente a mi señor padre Eugenio Sánchez Saucedo y a mi señora Madre Adela Briano Herrera, por su incondicional apoyo a lo largo de toda mi vida, sus consejos y regaños que recibí. Gracias por existir, por regalarme la vida y disfrutarla en compañía de ustedes, por darme todo cuanto pudieron,

A DIOS

Por ser tan bueno y fortaleza cuando más lo necesito, en mis horas de desesperación siempre encuentro consuelo en ti. Cristo firmes y adelante.

A MIS HERMANOS

Dome, Kathi, Gladys, y Muñe

IV. AGRADECIMIENTOS

A MI ASESOR

Al Dr. Mauricio Centeno Ortiz, principalmente por permitirme trabajar junto a usted, por confiar en mí y aceptarme en este trabajo de investigación, por el apoyo incondicional que recibí, y por animarme cuando más lo necesité. Doy gracias a dios por haber encontrado a una persona como usted, con esa calidad humana, honestidad, responsabilidad y sobre todo por la humildad que lo caracteriza, gracias por todo Dr. Mauricio.

A MIS AMIGOS

Especialmente a mis amigos Gerardo Medellín y Heriberto Galván: Gracias por darme el apoyo que necesité en el momento más duro de la maestría, por todos sus consejos y buenos deseos, por ser como son. Mil Gracias Geras, Heri

A los amigos de la maestría: Alma Rojas, Sergio Carrillo, Antonio Arjona, Ana Fabiola, Mónica, Rubén y bb, Juan Prieto, Irving Casados, Guliver, Rogelio, Tere.

A MI COORDINADOR DE LA MAESTRÍA

Al Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca. Gracias por el apoyo que no brindó a cada uno de nosotros, y por los buenos argumentos acerca de cada uno de los trabajos de la maestría. Gracias por las risas que nos hacía pasar. En particular gracias por todo Dr.

A LA DOCTORA LUZ

Gracias por haber hecho de mí una persona más culta y saber de lo que es bueno en esta vida Dra. Muchas gracias por acercarme a la persona que siempre está con nosotros, pero desgraciadamente nosotros lo apartamos de nuestro entorno, y sin embargo dice: "Estoy a la puerta y llamo"

A MIS MAESTROS:

A mis maestros al Dr. Mauricio Centeno Ortiz, Dr. Paul Garnica, Maestro Emilio Abarca, Dr. José Antonio Gómez López, Dr. Guillermo Torres Vargas, Maestro Fernando Mendoza, Dr. Eduardo Betanzo, Dra. Luz Pérez Rea, Dr. Ovidio

AL IMT

Por el apoyo para culminar este trabajo de investigación, al laboratorista "Mayín"

A LOS ADMINISTRATIVOS

Normis,

V. INDICE DE CONTENIDO

CONTENIDO

I.	RESUMEN	ii
II.	SUMMARY	iii
III.	DEDICATORIAS	iv
IV.	AGRADECIMIENTOS.....	v
V.	INDICE DE CONTENIDO	1
1	INTRODUCCIÓN.....	6
1.1	Características Friccionantes en Carreteras.....	6
1.2	Antecedentes	11
1.2.1	Resistencia al Deslizamiento y Pulimento de Agregados	12
1.2.2	Siniestralidades:	14
1.2.3	Siniestralidades: pavimento mojado y su condición superficial	16
1.2.4	Valor de pulido residual: Uso de la escoria de alto horno	19
1.2.5	Escoria de alto horno: problemas de adherencia	23
1.2.6	Tópicos Económicos: Externalidades, Costos, y Estadísticas	26
1.2.7	Método de Capital humano o de la producción bruta.....	26
1.2.8	Método de disposición a pagar	26
1.3	Departamentos de Transporte: Políticas de uso de agregados	31
1.3.1	Departamento de Alabama	32
1.3.2	Departamento de Florida	33
1.3.3	Departamento de Kentucky	33
1.3.4	Departamento de Lousiana	34
1.3.5	Departamento de Transporte de Minnesota	35
1.3.6	Departamento de Mississippi.....	35
1.3.7	Departamento de Oklahoma.....	35
1.3.8	Departamento de Pennsylvania	36
1.3.9	Departamento de Texas	37
1.4	Descripción del Problema	38
1.5	Justificación	41
1.6	Hipótesis.....	42
1.7	Objetivo General	43

1.8	Objetivos particulares	43
2	Fundamentación teórica.....	44
2.1	Mecanismos y problemas de fricción.....	44
2.2	Agregados: propiedades friccionantes.....	47
2.2.1	Ensayos para resistencia al pulido de los agregados	49
2.3	Índice de fricción	50
2.4	Adherencia	55
2.4.1	Adherencia: importancia e implicaciones	55
2.5	Tipos y uso de Micro-carpetas como alternativa.....	58
2.6	Capa asfáltica de granulometría abierta (OGFC).....	58
2.7	SMA	59
2.8	CASAA Capa asfáltica superficial altamente adherida (CASAA)	60
3	METODOLOGÍA.....	61
3.1	Desarrollo del Experimento	62
3.2	Introducción	63
3.3	Pruebas realizadas con base a la experimento	63
3.3.1	Selección de agregados y caracterización de propiedades físicas	64
3.3.2	Aditivado de asfalto	64
3.3.3	Prueba de Desprendimiento por Fricción	65
3.3.4	Prueba de Residuo Insoluble.....	66
3.3.5	Microdeval para arenas y gravas.....	67
3.3.6	Prueba de Pulimento Acelerado (TEX 438-A).....	67
4	RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	69
4.1	Mineralogía de escorias	70
4.1.1	Escoria Tipo I, (Nuevo León).....	70
4.1.2	Escoria Tipo II, (San Luis Potosí)	71
4.2	Residuo insoluble: Agregados Calizos	73
4.3	Desprendimiento por fricción	75
4.3.1	Desprendimiento por fricción: Aditivo AS-100	75
4.3.2	Desprendimiento por Fricción: Aditivo AS-500.....	78
4.3.3	Desprendimiento por fricción: Resultados de las escorias	79
4.3.4	Resultados de desprendimiento por fricción de las Calizas.....	82
4.3.5	Análisis Estadístico de los Datos.....	85
4.4	Carta de control estadístico de la calidad.....	87

4.5	Diagrama de caja y bigote	89
4.6	Microdeval para arenas y gravas aplicado a diferentes agregados	93
4.7	Análisis Estadístico de los datos de Microdeval	94
4.8	Pulimento Acelerado	97
4.8.1	Pulimento de agregado: Agregados de referencia.....	97
4.8.2	Mezcla de agregado; Calizo Monterrey - Escoria San Luis Potosí	99
4.8.3	Mezcla de agregado: Calizo Monterey y Escoria Nuevo León	101
4.8.4	Mezcla de agregado: Calizo Yucatán y Escoria San Luis Potosí	103
4.8.5	Mezcla de agregado: Calizo Yucatán y Escoria Nuevo León.....	105
4.8.6	Pulimento de agregado: Uso de las escorias (100%)	106
5	Propuesta de Metodología	111
6	CONCLUSIONES	112
7	Referencias bibliográficas.....	116
8	ANEXOS	119
8.1	Cartas de control para valores individuales, rangos móviles y diagramas de caja y bigote de los resultados de desprendimiento por fricción	119
8.1.1	AC-20 Querétaro	119
8.1.2	AC-20 Yucatán	121
8.2	AS-100	123
8.2.1	AC-20 aditivado a 0.5% de AS-100	123
8.2.2	AC-20 aditivado a 1% de AS-100	125
8.2.3	AC-20 aditivado a 1.5% de AS-100	127
8.3	AS-500	129
8.3.1	AC-20 aditivado a 0.5% de AS-500	129
8.3.2	AC-20 aditivado a 1% de AS-500	131
8.3.3	AC-20 aditivado a 1.5% de AS-500	133
8.4	Escorias.....	135
8.4.1	Escoria DM con AC-20	135
8.4.2	Escoria DM con AC-20 Aditivado a 1.5% de AS-500.....	137
8.4.3	Escoria SLP con AC-20	139
8.4.4	Escoria SLP con AC-20 aditivado a 1.5% de AS-500.....	141
8.5	Caliza Yucatán.....	143
8.5.1	Caliza Yucatán con AC-20	143
8.5.2	Caliza Yucatán con AC-20 aditivado a 1.5%.....	145

8.6	Caliza Monterrey	147
8.6.1	Caliza Monterrey con Ac-20	147
8.6.2	Caliza Monterrey AC-20 Aditivado a 1.5% con AS500.....	149

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.-Péndulo Británico Portable	29
Figura 2.- Stradograf, funcionando. Fuente: Agencia Sueca de Transporte	30
Figura 3.- Geología de La República Mexicana Fuente: INEGI (2012).....	39
Figura 4.- Niveles de Textura en el Pavimento Fuente: (Hall et. al., 2009.)	45
Figura 5.- Niveles de textura en un pavimento.....	45
Figura 6.- Fuerzas resultantes en el movimiento de un vehículo. Fuente: (Hall et al., 2009).....	46
Figura 7.- Fuerzas resultantes de un vehículo al transitar por una curva, Fuente; (Hall, et al., 2009)	47
Figura 8.- Mineralogía de la escoria Tipo I (NuevoLeón).....	70
Figura 9.- Mineralogía de la escoria Tipo II (San Luis Potosí)	71
Tabla 1.- Costo anual en billones de pesos mexicanos por accidentes: Fuente The global cost of Road Crashes; irap 2008	27
Tabla 2.- Intervalo de fricción y tasa de accidentalidad . Fuente: Carl-Gustaf Wallman et al., 2001.	31
Tabla 3.- Especificaciones del Departamento de Alabama para el agregado grueso resistente al pulido Fuente: (Flores et al., 2010).....	33
Tabla 4.- Especificaciones del Departamento de Luisiana para el agregado grueso resistente al pulido Fuente: (Flores et al., 2010).....	34
Tabla 5.- Especificaciones del departamento de Minnessota para agregados resistentes al pulido. Fuente (Flores et al., 2010).....	35
Tabla 6.- Especificaciones del Departamento de Pennsylvania para agregado resistente al pulido Fuente: (Flores et al., 2010).....	36
Tabla 7.- Niveles de tránsito, y resistencia al deslizamiento de los agregados.....	37
Tabla 8 Propiedades típicas de las escorias	49
Tabla 9.- Mineralogía típica de las escorias	49
Tabla 10. Recomendaciones; pruebas de laboratorio y umbrales necesarios para un adecuada fricción, Fuente: (Hall et al 2009).....	53
Tabla 11.- Criterio para evaluar los valores d fricción en la superficie de pavimento Fuente: López et al., 2002	54
Tabla 12.- Propiedades físicas de los agregados.....	69
Tabla 13.- Resultados de la escoria Tipo 1 (resultados de la empresa)	72
Tabla 14.- Resultados de Residuo insoluble para los agregados calizos	74
Tabla 15.- Valores de desprendimiento por fricción de los asfaltos convencionales	76
Tabla 16.- <i>Valores de desprendimiento por fricción del AC-20 vs AS-100</i>	77
Tabla 17.- Valores de desprendimiento por fricción del AC-20 vs AS-500.....	79
Tabla 18.- <i>Valores de desprendimiento por fricción en la escoria de alto horno</i>	81
Tabla 19.-Resultados de desprendimiento por fricción de los calizos.....	83
Tabla 20.- Análisis Estadístico de valores de desprendimiento por fricción del AC-20, AS-100 y AS-500 en agregado de la región	85
Tabla 21.- Análisis Estadístico de valores de desprendimiento por fricción en los dos tipos de escoria de alto horno.....	86
Tabla 22.- Análisis Estadístico de valores de desprendimiento por fricción de los dos tipos de calizos.....	86
Tabla 23.- Valores de Microdeval para los diferentes agregados	93
Tabla 24.- Análisis estadístico de la prueba de Microdeval	95

Tabla 25.- Evolución del VPR respecto al tiempo del Calizo Monterrey.....	100
Tabla 26.- Evolución del VPR respecto al tiempo Calizo Yucatán	103

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Características Friccionantes en Carreteras

En este capítulo se explica de manera puntual, la importancia de los parámetros de seguridad para los usuarios que transitan en una carretera, al contemplar aspectos que involucran desde el correcto diseño geométrico y las características superficiales, es decir, los grados de curvatura, las sobreelevaciones, las pendientes etc. así como las características que contribuyen a la seguridad de los usuarios tales como la micro y macrotextura. De igual manera se explica que la ausencia de fricción en los pavimentos ocasiona siniestralidades, por tal motivo, se han hecho investigaciones en México y el mundo, donde se ha encontrado que una manera de hacerlo es mediante la combinación de agregado con diferente valor de pulido residual, tal como la escoria de alto horno. Sin embargo, es sabido que la escoria de alto horno, por ser un material de origen industrial de la fabricación de acero, tiene problemas de afinidad con el asfalto provocando desprendimiento de agregado en las carpetas asfálticas.

En la actualidad, el diseño de los pavimentos es un tema importante que engloba muchos aspectos, inicialmente, comprende desde la caracterización de los materiales que serán utilizados para la conformación de cada una de las capas, analizando sus principales características y aplicaciones, sin dejar de lado el tránsito proyectado en el tiempo. Asimismo, aspectos que no deben pasar desapercibidos como las características geométricas, el alineamiento y señalamiento horizontal como vertical, indispensables para la seguridad del conductor.

Lo anteriormente expuesto, engloba estándares, características y especificaciones para un diseño adecuado y funcional, además involucra factores importantes como el tipo de camino que se vaya a proyectar, el horizonte económico de la carretera, ubicación, conexión con las principales carreteras, sin omitir la topografía que presenta el terreno.

Es importante comentar que las características y factores, forman un amplio sistema en el cual deben cumplir un objetivo principal; brindar al conductor confort y seguridad al transitar a través de toda su trayectoria. Por una parte el llevar a cabo lo es necesario entre otras cosas, que el proyecto contemple un adecuado diseño geométrico, en virtud de que las pendientes (gubernadora y máxima), sobreelevaciones, y grados de curvatura, garantizan la disminución de probabilidades de la aparición de alguna siniestralidad respecto al tema de seguridad se refiere, con respecto al confort, se contemplan aspectos como el índice general de regularidad (IRI), macro y micro textura, etc.

Hasta este momento como se ha señalado, las características estructurales y funcionales, proveen seguridad y resistencia ante fenómenos de acciones de carga, así como fenómenos meteorológicos. Por esta razón, los pavimentos a nivel de superficie deben de ser lo suficientemente resistentes, seguros, y cómodos al contemplar especificaciones adecuadas frente a estas solicitudes.

Al retomar la aseveración anterior respecto a la cuestión estructural, el pavimento debe ser capaz de resistir los agentes del intemperismo, (lluvia, viento, nieve, cambios de gradiente de la temperatura, cambios de humedad en el terreno natural, etc.) resistencia mecánica ante el fenómeno de fatiga, ocasionadas por las cargas impuestas por el tránsito, así mismo, la cuestión superficial, contar con una textura adecuada, y ser lo más cómodo posible, tal como lo mencionan Rico et al. (1998).

En la actualidad, existe lo denominado auscultación en las carreteras, procedimiento mediante el cual se mide el desempeño de la misma, tanto a nivel de estructura como superficie. La auscultación estructural, se refiere a la medición de todas aquellas características estructurales, donde se verifica primordialmente parámetros como módulos de resiliencia de cada una de las capas, iniciando desde el terreno natural, pasando por la subrasante, sub-base, hasta llegar a la carpeta

asfáltica, medidas a partir de deformaciones inducidas y dependiendo de su magnitud, se confirma si su estructura es lo suficientemente resistente al tránsito que está proyectando por ese punto.

Respecto a la auscultación superficial, procedimiento que mide características a nivel de superficie que exhiben los pavimentos, cuya función principal que el pavimento, sea funcional, seguro y cómodo. Evidentemente estos parámetros están directamente relacionados a la seguridad de los usuarios, porque puntualmente interactúan dos partes fundamentales del sistema de transporte, tanto el vehículo y la vía de comunicación. Particularmente existe una interacción directa entre estas dos partes, es decir, la vinculación entre el vehículo-pavimento aparecen algunos fenómenos físicos, que son indispensables para la seguridad de los usuarios.

Si estos fenómenos se estudian a una escala menor, la interacción que tienen los agregados de la mezcla asfáltica con el neumático del vehículo es el punto clave para estudiarlo.

Con base en la situación descrita, es imprescindible estudiar su comportamiento, porque en la actualidad existen dos características interrelacionadas que son analizadas mundialmente e influyen directamente en la seguridad del conductor. La primera de ellas es la geometría de la carretera (características mencionadas con antelación) y la segunda que está directamente con la interacción entre vehículo-pavimento, como se había mencionado anteriormente.

Dentro de esta interacción, surgen la *resistencia al deslizamiento* y el *coeficiente de fricción*. Dada su importancia para la seguridad de los usuarios, se encuentran en los niveles de textura de la capa de rodadura del pavimento justamente en los agregados de la carpeta asfáltica y el neumático de vehículo. Sin embargo, es importante aclarar que la primera de ellas es indispensable para que

el conductor mantenga la trayectoria deseada del vehículo sin importar si circula con condiciones atmosféricas adversas, (pavimento mojado o con exceso de humedad) y la segunda es el coeficiente de fricción μ (mu), parámetro o número adimensional que se opone al movimiento de cualquier objeto al tratar de cambiar de un punto a otro aplicando una fuerza. Sin embargo estos dos parámetros se pueden encontrar a la par en la misma carretera, y presentar valores completamente diferentes.

En este sentido, la resistencia al deslizamiento es proporcionada principalmente por la fricción que generan los agregados pétreos que contiene la mezcla asfáltica, y estos a su vez por la microtextura que exhiben, es decir, las pequeñas irregularidades en los agregados una vez que son triturados. Existen una serie de problemas ocasionados por la ausencia o desaparición de esta característica, en la capa de rodadura, uno de ellos aparece frecuentemente, y es conocida comúnmente en México y el mundo como pulimento de la carpeta asfáltica que no es más que la pérdida de micro y macrotextura de sus agregados.

En consecuencia, se ha estudiado este problema en los pavimentos y se han identificado una serie de características similares entre todos los pavimentos que han sufrido de este deterioro. En primer lugar, se ha identificado principalmente que este deterioro (pulimento) se suscita en lugares donde se utilizan agregados pétreos predominantemente calizos altamente pulimentables, los cuales por efectos ambientales y mecánicos, la microtextura de los mismos poco a poco tiende a desaparecer. Esto es lógico porque estos materiales poseen un origen geológico de tipo sedimentario, en los cuales existen gran cantidad de carbonatos dentro de su estructura mineralógica y al entrar en contacto con el agua y efectos de fatiga se degradan con facilidad, originando que, la microtextura se pierda hasta llegar prácticamente a desaparecer. Caso contrario con agregados de tipo ígneo que por sus características mineralógicas diferentes al calizo y de acuerdo a su naturaleza poseen la suficiente dureza para que la microtextura no desaparezca, o se reduzca a niveles alarmantes.

Con referencia a lo anterior, al disminuir la resistencia al deslizamiento dentro de las capa de rodadura, el derrapamiento en el pavimento de los vehículos se potencializa y comienza la aparición de siniestralidades de manera más frecuente.

En la actualidad se han hecho varias investigaciones a nivel internacional para mitigar o tratar de mejorar estas condiciones, una de ellas es simplemente “fresar” la carpeta unos pocos centímetros, que no es más que retirar una pequeño espesor de la carpeta para elevar los niveles de fricción, pero tal intervención no resulta satisfactoria, gracias a que agregado que está presente en la carpeta es el mismo y nuevamente se suscitará el pulimento en el futuro, resulta claro que la actividad es de carácter temporal, resultando impráctico su utilización.

Partiendo de los supuestos anteriores en el presente trabajo de investigación se implementó una política, llevada a cabo mediante la combinación de agregado pétreo en ciertas proporciones con ciertas características que permitan mejorar las condiciones de resistencia al pulimento, tales como escoria de alto horno, añadidas en diferentes porcentajes hasta encontrar valores de pulido residuales, tales que satisfagan la condiciones mínimas de fricción aceptables dentro de la textura de los pavimentos con el objetivo de garantizar la seguridad de los usuarios a lo largo del horizonte económico.

Sin embargo, es sabido que la escoria de alto horno no posee una buena afinidad con el asfalto, es por ello la necesidad de utilizar productos promotores de adherencia para mitigar el problema, gracias a que su función principal es maximizar el enlace químico entre las partículas de asfalto con las de la escoria.

En otras palabras, estudios revelan que la no afinidad entre escoria-asfalto es un problema que se soluciona con el aditivado de asfalto mediante la inclusión de un producto promotor de adherencia. Sin embargo se reitera que la adición de escoria de alto horno en el diseño de capas de rodadura que utilizan agregados

pétreos de origen calizo altamente pulimentable ayuda a contrarrestar el problema de la pérdida de microtextura en la capa de rodadura, incluyéndola y evaluándola en ciertos porcentajes hasta cumplir con los estándares aceptables.

1.2 Antecedentes

Con base a esta problemática (pulimento) existen investigaciones que se han realizado a nivel internacional, donde se explica de manera general, la importancia de la resistencia al deslizamiento y el factor (μ) o coeficiente de fricción. Desde sus inicios, la AASHTO (American Association of State Highways Transportation Officials), estableció por primera vez el concepto de resistencia al deslizamiento, así como su diseño, utilizado por cada uno de los Departamentos de Transporte en los Estados Unidos de América. Las políticas se implementaron por la gran accidentalidad que se estaba suscitando en los años 70's, ocasionada principalmente por la falta de fricción en la carretera, así como el efecto en la economía del país y por la pérdida de vidas humanas.

En consecuencia, cada Departamento se dio a la tarea de hacer investigación de cómo mitigar ese problema, los procedimientos constructivos que se deberían implementar, así como el monitoreo del comportamiento de las primeras propuestas de investigación. Cabe mencionar que los diseños fueron fijados por las dependencias, como resultado de sus propias investigaciones, de acuerdo a sus necesidades, para cumplir el objetivo de garantizar la disminución de la tasa de siniestralidades ocasionadas por la falta de fricción. De igual manera, se mencionan algunas pruebas que se aplican directamente a los agregados pétreos utilizados en las mezclas asfálticas, que son instrumento para aceptar o rechazar dichos agregados, por ejemplo, pulimento acelerado, o en su caso la prueba de residuo insoluble, etc.

Sin embargo, el factor de resistencia al deslizamiento debe cumplir con valores mínimos establecidos dependiendo la utilización de los agregados, sobre todo en aquellos que tienden a desaparecer las propiedades físicas que contribuyen

a la seguridad de los usuarios dentro de las capas de rodadura, sin duda es necesario consultar bibliografía de lo que se ha investigado, recomendado y encontrado a nivel internacional, para contrarrestar los accidentes provocados por el pulimento (pérdida de microtextura) dentro de las capas de rodadura. Dada esta problemática, se han implementado recomendaciones a base de combinación de agregado con diferentes propiedades, resistentes ante tal sollicitación, por ejemplo, materiales como la escoria de alto horno, basaltos, reolitas etc. A continuación se exhiben algunos de los datos provistos en investigaciones que se han realizado en México y el mundo respecto a esta problemática.

1.2.1 Resistencia al Deslizamiento y Pulimento de Agregados

Sin duda el tema de fricción en pavimentos, contempla una gama de conocimientos, conceptos, y características que se deben de identificar con toda claridad, los cuales deben ser estudiados detalladamente para identificar el cómo funciona, cómo se mide y sobre todo que acciones correctivas o de mantenimiento deben contemplarse, para que los pavimentos mantengan esta característica de acuerdo a lo proyectado.

Las primeras investigaciones al respecto, se remontan hacia los años 70's donde aparece por primera vez la publicación emitida por la AASHTO por sus siglas en inglés, llamada "Diseño de la resistencia al deslizamiento en pavimentos", en donde se inician los trabajos de investigación respecto a los niveles de fricción en pavimentos (Hall et al., 2009).

Según los autores el diseño de la fricción pavimento, es básicamente un proceso de selección, en la que la combinación de micro y macrotextura sea la adecuada según su demanda (Hall *et al.*, 2009). Cabe señalar que los primeros estudios iniciaron por dos cuestiones principalmente: La primera de ellas es la económica, implícitamente se comprobó que un adecuado nivel de fricción, beneficia el costo de operación de los vehículos y la segunda, ocasionada por el problema de los accidentes por la falta de fricción en los pavimentos. Cabe destacar

tal metodología contemplaba las superficies de los dos tipos de pavimentos, sea flexible o rígido.

Con respecto a las características de la superficie de los pavimentos, señalaban dos partes fundamentales exclusivas que deben de cumplir los agregados pétreos, una de ellas la “microtextura”, a la que se consideró como una de las propiedades de mayor influencia a corto y largo plazo, respecto al problema de resistencia al deslizamiento, y dependía de las siguientes características principales:

- La mineralogía y petrografía
- Composición del agregado (estructura)
- Propiedades físicas y geométricas (angularidad, forma y textura)
- Propiedades mecánicas (abrasión y pulimento)
- Propiedades de durabilidad
- Economía

Asimismo, se definió la “macrotextura”, contemplándose como el tipo de superficie en mezclas de los pavimentos. Gracias al inicio de estos estudios preliminares, varias guías enfocadas hacia el tema de fricción, fueron elaboradas por diversas Agencias de Transporte, así como por diversas organizaciones privadas tales como se muestran a continuación:

- Federal Highway Administration (FHWA) por sus siglas en inglés. Guía enfocada principalmente sobre la advertencia del problema de ausencia de la fricción en las carreteras.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) por sus siglas en inglés.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) por sus siglas en inglés.
- Grupo de la Industria dedicados a la pavimentación.
- Agencias internacionales ubicadas en el Reino Unido, Australia y Japón

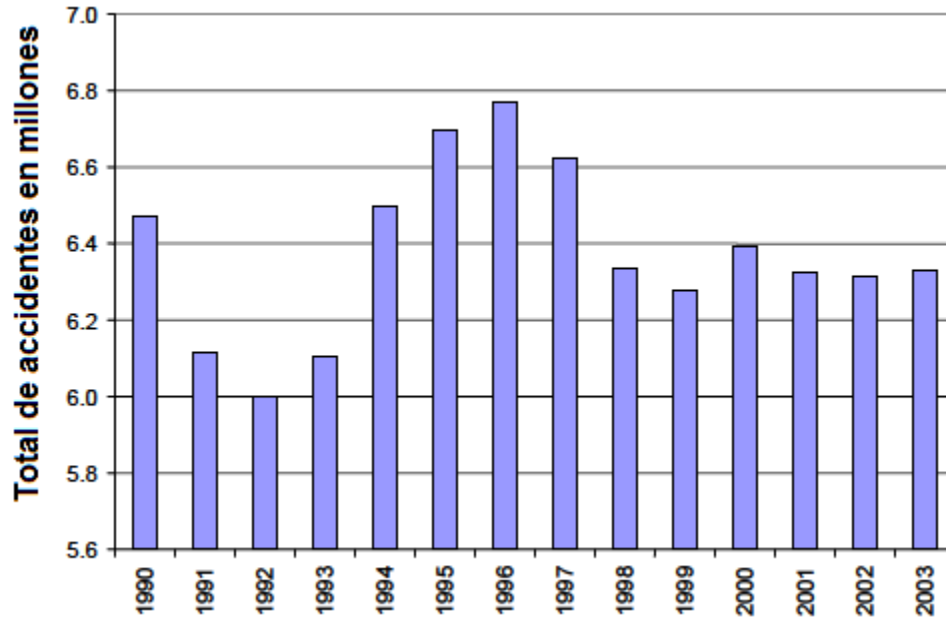
Visto desde el punto de vista de seguridad para los usuarios, se contemplaron dos aspectos relevantes: el primero de ellos, es la calidad o condición del pavimento de ser seguro, es decir, “libre de peligro” el cual no genere lesiones o daños. El segundo, todas las acciones diseñadas para “prevenir un impacto, es decir, todos los factores, y características donde se pueda conducir en un ambiente libre de peligro, una vez que se haya diseñado y al mismo tiempo se encuentre en operación, bajo normativas regulatorias, enfocado hacia evitar fatalidades, lesiones, pérdidas económicas, etc. (Hall et al., 2009)

1.2.2 Siniestralidades:

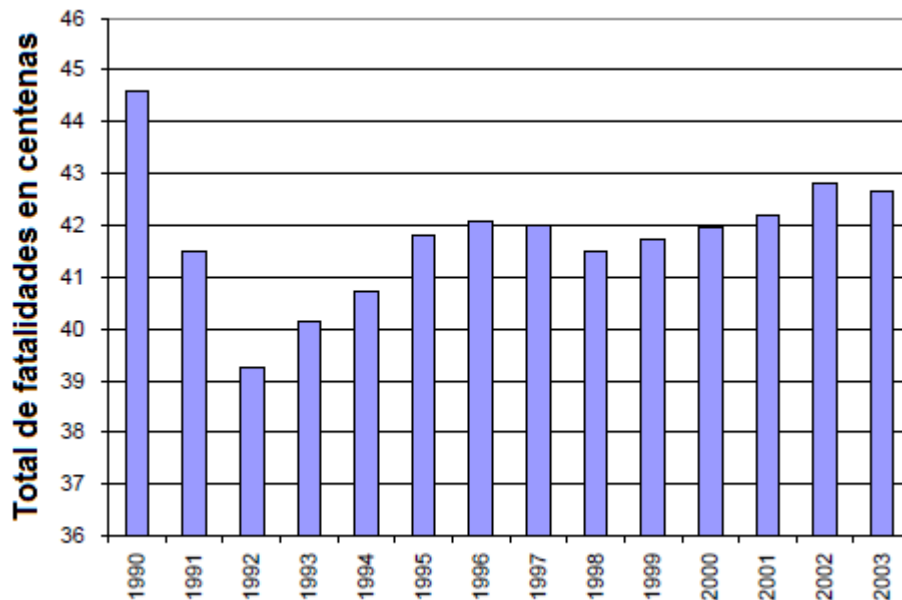
A nivel internacional, los problemas de algunos países que dejan mayores pérdidas económicas son los accidentes viales, considerados como un grave problema de salud pública. Algunas estadísticas proporcionadas por la FWHA muestran que entre los años 1990 y 2003, en Estados Unidos ocurrieron 6.4 millones de accidentes dentro de las carreteras y autopistas, en donde se involucraron todo tipo de vehículo. Específicamente del total de accidentes, resultaron 3 millones de lesiones y 42,000 fatalidades. El equivalente a 115 muertos por día y una muerte cada 12 minutos (Noice *et al.*, 2005; NHTSA, 2004).

En el mismo contexto, las siniestralidades es un problema para la economía de cada país. Por ejemplo en el año 2000, el costo económico de las siniestralidades ocurridas en carreteras fue estimado en 230.6 billones de dólares (Noice *et al.*, 2005; NHTSA, 2004).

Para visualizar lo anteriormente expuesto, a continuación se muestran las Gráfica 1 y Gráfica 2 del total de accidentes y fatalidades para todo tipo de vehículos, ocurridos en los Estados Unidos de los años 1990 a 2003. En tales gráficas se encontraron diferencias significativas, comentan (Kuemmel *et al.*, 2000), encontraron que aproximadamente entre el 13.5 y 25% de fatalidades ocurren cuando el pavimento se encuentra mojado o exceso de humedad.



Gráfica 1.- Total de accidentes de todos los tipos de vehículos, ocurridos en carreteras de Estados Unidos de 1990 a 2003 Fuente: (NHTSA, 2004)



Gráfica 2.- Total de fatalidades de todos los tipos de vehículos, ocurridos en carreteras de Estados Unidos d 1990 a 2003 Fuente: (NHTSA, 2004)

De acuerdo citado anteriormente, la cantidad de pérdidas económicas que se pierden por las siniestralidades es considerable para las economías de cada

país, ocasionadas quizás muchas veces por la omisión de factores sencillos pero con un grado de importancia mayor e influyentes en la seguridad de los usuarios, ya sea el factor de fricción, un pésimo proyecto geométrico, una deficiente resistencia estructural, así como un inadecuado plan de mantenimiento, etc.

1.2.3 Siniestralidades: pavimento mojado y su condición superficial

Hasta este momento se ha hablado acerca de los costos económicos que generan las siniestralidades para los gobiernos de manera global, por una parte traen consigo secuelas abrumadoras de gastos económicos para las personas que lo sufren, así como para el gobierno, porque se generan gastos médicos, seguros, etc. Resulta claro la necesidad de investigar al respecto, donde se identifiquen y puntualicen las causas principales por las que aparecen dichas siniestralidades. Debido a esto, existen estudios realizados que afirman que la combinación entre los bajos niveles de fricción y el pavimento mojado, potencializan su aparición.

Un punto importante que han identificado por algunos autores, es la coincidencia y atribución, sobre el grado de importancia de las características superficiales en los pavimentos para que sea seguro, al atribuir que la textura juega el papel más importante de todos. Sin embargo la aparición de la siniestralidad en las carreteras, es un evento complejo que involucra más de un factor, tales como; el conductor, el vehículo y la condición de la carretera (Partes fundamentales del transporte) (Noice et al., 2005; NHTSA, 2004).

Puntualmente McCullough y Hankins, en 1996 mostraron un estudio de la interrelación entre la fricción del pavimento, con las siniestralidades, medidos en 571 sitios en el Estado de Texas, y se encontró que la gran cantidad de choques, aparecían con mayor frecuencia en lugares con poca fricción, y pocos donde la fricción era adecuada. Partiendo de los supuestos anteriores, se recomendó una fricción mínima de 0.4, medida a 30 mi/hr (millas por hora). Fijándose así estos valores como condición mínima aceptable.

De la misma manera (Kutesch, 2004) mostró que existen evidencias en estudios realizados en diversos países (Francia y Estados Unidos) al argumentar y atribuir que los accidentes de los vehículos tienen mayor frecuencia en zonas donde el pavimento se encuentra con exceso de humedad, así como bajos índices de fricción. De la misma manera, por primera vez, se dan a conocer los estudios sobre la influencia que gobiernan el comportamiento de la textura en el pavimento. Entre ellos el tamaño máximo nominal de la parte fina y gruesa que conforman la granulometría de las superficies de rodamiento.

Por esta razón, se le atribuye al máximo diámetro nominal del agregado, el tipo de macrotextura para los dos tipos de pavimento, es decir, tanto flexible como rígido. Sin embargo, el diseño de las capas de rodadura, es necesario identificar características como la angularidad, el factor de forma (Fracturada o redondeada) y la durabilidad. De la misma, el agregado fino también está gobernado principalmente por la angularidad y la durabilidad de los materiales.

En síntesis, es necesario comprender y considerar las características superficiales presentes en un pavimento, donde se identifique cada una de sus variables, métodos de medición, y los valores de cada una de estas, para aceptar, rechazar o en su caso, realizar una corrección.

Lo anteriormente expuesto contempla principalmente la importancia de las características superficiales de los pavimentos en cuestiones de seguridad para los usuarios, visto desde diferentes escalas a nivel de superficie, los factores que intervienen fuertemente son la resistencia al deslizamiento y el coeficiente μ de fricción, los cuales son diferentes entre sí, por ejemplo el primero se mide directamente con el péndulo británico y el segundo se mide con el μ -meter, y por su física de medición los valores son diferentes entre sí.

Cabe decir que la resistencia al deslizamiento ha llamado la atención, y gracias a esto, se han elaborado investigaciones a nivel internacional, por ejemplo

(Noyce *et al.*, 2005) afirmaron que ésta característica tiene dos componentes: adherencia e histéresis. La primera, resulta del corte de la unión molecular formado cuando el neumático cuando es comprimido en el área de contacto con las partículas de la superficie del pavimento. La segunda componente resulta de la disipación de energía cuando el neumático se deforma al pasar a través de las asperezas de la superficie rugosa del pavimento. Con respecto a lo anterior, ambas componentes se relacionan entre sí, por esta razón es necesario diferenciar una de otra, ya que dependiendo de la escala de los niveles de textura en un pavimento (micro, macro y mega texturas) se originan fenómenos diferentes. Por ejemplo, la adherencia es provocada por la microtextura y la histéresis por macrotextura.

De la misma manera, existen investigaciones similares al respecto, por ejemplo (Henderson *et al.*, 2006) explicaron que la histéresis resulta de la deformación del neumático cuando está en contacto con las asperezas de la macrotextura. Afirmando que esta componente de fricción es pequeña cuando el neumático gira libremente, en cambio es significativa durante el frenado del vehículo, debido al incremento en la deformación del hule cuando se desliza en vez de rodar.

Para efectos de esta investigación, es necesario puntualizar y explicar el problema principal por el cual los niveles de fricción, decrecen. Principalmente los agregados pétreos de origen calizo que se utilizan en la producción de carpetas asfálticas en caliente, son susceptibles al pulido o pérdida de la microtextura ante fenómenos de sollicitación de carga así como fenómenos de intemperismo ocasionados por el medio ambiente. De la misma manera, el origen geológico del agregado, depende directamente su comportamiento, por ejemplo, no se puede comparar un agregado de tipo ígneo con uno de origen sedimentario como la caliza altamente pulimentable, ya que el segundo ocasionará problemas de pulimento y el primero no sufrirá de este tipo de deterioro, gracias a que poseen diferentes características que componen su estructura principal.

1.2.4 Valor de pulido residual: Uso de la escoria de alto horno

A la pérdida de microtextura se le conoce como pulimento acelerado y por su mineralogía, depende su comportamiento. Para determinar el grado de pulido del agregado, en México se utiliza el ensayo de pulimento acelerado. El parámetro que se determina con este ensayo se denomina valor de pulido residual o coeficiente de pulimento acelerado el cual es un indicador de las características friccionantes que poseen los agregados (Flores *et al.*, 2008).

Dentro de este contexto países como Argentina por ejemplo, La Comisión Permanente del Asfalto (2005), argumentó que las características de fricción del agregado se determinan de manera similar por medio del ensayo de pulimento acelerado de acuerdo con la Norma IRAM 1543, la cual se basa en la norma española NLT 174. Las especificaciones técnicas de mezclas asfálticas en caliente definen un valor apropiado de coeficiente de pulimento acelerado mayor o igual a 0,4. Si el coeficiente de pulimento acelerado no es mayor a lo antes mencionado se provocan problemas relacionados con el deslizamiento en el pavimento.

A nivel internacional, las investigaciones al respecto referidas al comportamiento de pulimento de la mezcla de agregado, (Masad Eyad *et al.*, 2009). En su documento afirman que los agregados en mezclas asfálticas son pulidos de manera diferente dependiendo de su mineralogía. Ya que las rocas constituidas por minerales con aproximadamente la misma dureza se desgastan uniformemente. Para esta problemática el Departamento de Transporte del Estado de Texas en el año (2005) desarrolló un ensayo de sanidad del agregado y otro de pulimento acelerado (Tex 438-A), el cual es aplicado a todo tipo de agregado utilizado en la fabricación de carpetas asfálticas o capas de rodadura. Posteriormente en el año 2006 el mismo Departamento de Transporte generó ensayos de residuo insoluble en ácido (Tex 638-J), el cual identifica de manera rápida si el agregado es de origen calizo.

Tratando de colaborar con la solución de la problemática, Goyat (2006) desarrolló una política para establecer niveles de fricción Reino Unido (U.K) aceptables en diferentes carreteras, zonas y volúmenes de tránsito. Los niveles de fricción se llaman niveles de investigación; cuando los valores medidos en una zona son iguales o están por debajo del nivel de investigación, se realiza inmediatamente un estudio y análisis a fondo, o se ejecuta algún tratamiento. Como objetivo de investigación y con el propósito de brindar una solución a esta problemática, se han hecho varias investigaciones acerca de la incorporación de diferentes materiales con valores de pulimento bajos. Algunos de estos estudios se muestran a continuación.

Si bien es cierto, el valor de pulido residual es el parámetro que permite evaluar los agregados ante los agentes abrasivos como el tráfico y agentes atmosféricos, y dada la importancia que tiene en los pavimentos, es importante conocer su valor para saber la disminución de la resistencia al deslizamiento. Una vez conocido el valor de pulido residual, es necesario decidir si este agregado es adecuado para su utilización en las carpetas asfálticas. Sin embargo, en México no existe un valor establecido que permita aceptar o rechazar la utilización de un determinado agregado. Sin embargo existen valores de referencia que se han fijado como el Valor de pulido residual igual a 32, aplicado en el norte de la República Mexicana donde existen agregados calizos altamente pulimentables, valor tomado como frontera para reducir la tasa de accidentalidad en las carreteras, aplicado en Nuevo León y Coahuila, estados que poseen Geología de origen sedimentario y gracias a esto proliferan agregados calizos altamente pulimentables en zonas extensas.

Por ejemplo, si se especificara un valor de pulido de 68, o mayor, con respecto a la normativa inglesa, en México difícilmente se encontrará un agregado que cumpla con esta especificación. Para tal caso, en Inglaterra utilizan un agregado sintético, llamado bauxita calcinada, obtenida de una arcilla rica en bauxita y se

cancina alrededor de 1600°C, el cual se aplica con un epóxico especial, y el conjunto comercialmente se llama Shellgrip.

A nivel internacional, el valor de pulido residual forma parte de las especificaciones del cumplimiento del agregado grueso, utilizado en la elaboración de capas de rodadura y mezclas asfálticas, así como los tratamientos superficiales. Para el caso de México, se mencionó anteriormente que no existe una reglamentación de valor de pulido residual para aceptar o rechazar un determinado agregado, si no que las instituciones recurren a las especificaciones de otros países, sin embargo se tiene que tener extrema cautela para implementar esos valores por la variabilidad de los agregados.

En este sentido el Departamento de Transporte de Texas, estableció un valor de pulido de 29 como mínimo para aceptar el agregado que se esté utilizando para la fabricación de capas de rodadura y mezclas asfálticas. Sin embargo, los Departamentos de los diferentes Estados de la Unión Americana, tienen variaciones en las especificaciones para asegurar una adecuada resistencia al deslizamiento en sus carreteras. Con respecto a lo anterior, algunos de estos organismos gubernamentales, limitan el uso de agregados calizos. De la misma manera utilizan diferentes equipos para medir la resistencia al deslizamiento, pero siempre enfocadas las propiedades friccionantes de los agregados.

Estudios realizados en Francia, Inglaterra, EUA y otros países han demostrado que la tasa de accidentes tiende a aumentar cuando la resistencia al deslizamiento disminuye, la cual depende de la macrotextura y de la microtextura del agregado. Flores *et al.*, (2010). De manera similar Kutesch, (2004) mostró que existen evidencias en estudios realizados en diversos países que los accidentes de vehículos tienen mayor ocurrencia dentro de pavimentos mojados con pocos niveles de fricción.

En base a lo anterior, la importancia de la resistencia al deslizamiento es una de las características del pavimento que tienen mayor influencia en la seguridad de los conductores. Una buena condición de adherencia entre neumático y pavimento permite reducir la distancia de frenado y mantener en todo momento la trayectoria deseada del vehículo (Crespo *et al.* 1992).

Por otro lado dependencias como la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), con ayuda con centros de investigación, han desarrollado bastas investigaciones al tratar encontrar una alternativa para mitigar el problema, una de ellas y la más conocida fue la mezcla de agregado, con alto y bajo valor de pulido residual que ayuden a mejorar esta propiedad.

Sobre la base de lo explicado anteriormente, la fricción además de contemplar el tipo de agregado, también es necesario que posean una adecuada adherencia en todos sus componentes, es decir, se requiere que todos sus elementos permanezcan unidos adecuadamente ante efectos de tránsito y efectos ambientales, si bien es sabido que combinaciones como la caliza-escoria de alto horno han sido estudiadas, tienen problemas de afinidad con el asfalto, esto se debe evidentemente a su origen. Principalmente es un agregado de origen industrial en la fabricación de acero, y sus características mineralógicas, físicas y mecánicas lo hace un material adecuado en la fabricación de capas de rodadura al incluirlo para sustituir parte de su volumetría en el diseño. Sin embargo para contrarrestar los problemas de desprendimiento de agregado de la carpeta asfáltica, en la actualidad se utilizan productos promotores de adherencia para mantener unido todo el sistema de agregado-asfalto.

Así mismo, (Méndez *et al.*, 2010) han comentado que la escoria siderúrgica como agregado, es un subproducto generado con propiedades específicas gracias a su origen, y al mismo tiempo, lo convierten en un material valioso para otros usos, tales como la construcción de carreteras y otras obras particular una vez que se haya tratado.

Comentarios similares al respecto los han realizado (Flores *et al.*, 2010), al señalar que en México se ha utilizado la escoria mediante la implementación de combinaciones con agregado de baja y alta resistencia al pulido, tal es el caso de este agregado (escoria) y calizo, alternativa que mejora la fricción de la superficie de rodamiento y la eleva a niveles aceptables. Igualmente existen combinaciones de agregados naturales como el basalto y reolitas, combinadas con el calizo, para proporcionar el mismo efecto que la anterior. Por ello es necesario encontrar la cantidad adecuada de escoria de alto horno, mediante pruebas de laboratorio, que garanticen de manera satisfactoria los niveles de fricción en las carreteras.

Por su parte, Larson (1999) investigador francés, comentó de la existencia de numerosos estudios de la incorporación de escoria en la capa de rodadura, donde algunos casos se ha implementado en su totalidad para caminos con bajos niveles de tránsito en zonas montañosas, o en pendientes considerables dentro de algunas carreteras en Francia. Alternativa que mitiga los problemas ocasionados en zonas con alto grado de siniestralidad ocasionados por la falta de fricción, dentro de las carreteras a nivel mundial. De la misma manera identificó un incremento de cinco veces las siniestralidades, en la carretera estando mojada ubicada en Burdeos, tal efecto se suscitó cuando el factor de fricción (μ) disminuyó de 0,60 a menos de 0,50.

Es importante aclarar que los parámetros de fricción, son valores estandarizados que tienen un valor específico; valores como el coeficiente de fricción (μ), el cual es un factor que resulta de la interacción de dos fuerzas y la relación que existe entre ellas y sus valores oscilan entre 0 y 1. Sin embargo este factor se ha implementado a nivel internacional como un coeficiente dentro de los aspectos de seguridad que provee el pavimento.

1.2.5 Escoria de alto horno: problemas de adherencia

Un problema de afinidad de algún material, se representa mediante el rechazo o la incompatibilidad de materiales que al mezclarlos se repele uno de otro.

Para el caso de la escoria con el asfalto, existe el problema de desprendimiento de la película de asfalto que cubre a la escoria cuando ha pasado determinado periodo de tiempo; esto es ocasionado porque el material (escoria) cuando es obtenido directamente del proceso de fabricación, no posee características de tipo inerte; si no, es un material activo, que provoca que el material posea cargas eléctricas dentro de su composición y al estar en contacto con otro de la misma polaridad, exhibe problemas de afinidad por el tipo de cargas repeliéndose entre sí, inhibiendo una adecuada adherencia entre el asfalto y la escoria.

En la actualidad, la inadecuada adherencia entre agregado-asfalto, ocasiona el deterioro conocido mundialmente como desprendimiento de agregado en el cual se mide su grado de severidad y unidades de medición. A consecuencia de esto se han desarrollado diversas metodologías creadas por diversos organismos sobre la medición de las condiciones de los pavimentos, con el objetivo de elaborar programas de gestión y tener un adecuado nivel de servicio. Sin embargo, la mayoría de las metodologías propuestas difieren en la manera en que se evalúa el grado de severidad de este deterioro así como las unidades de medición que se emplean. Así pues, un deterioro se considera grave cuando disminuye la calidad del servicio que brinda el pavimento y al mismo tiempo reduce su vida útil, por ejemplo, en China, el deterioro principal que exhiben la mayoría de sus autopistas, es la pérdida de agregado de la carpeta de rodadura (Feng *et al.*, 2014). Atribuyéndole principalmente a las condiciones de humedad, porque desencadenan la pérdida del enlace químico entre el agregado-asfalto principalmente por la afinidad existente entre el agregado y el agua.

Por el contrario, en el Reino Unido, al presente deterioro, le atribuyen las propiedades químicas de los agregados. Reportan que un agregado de tipo calizo opone más resistencia al agua que un basalto, debido a que la caliza es positivamente cargada, y al poseer esta propiedad se originan enlaces más fuertes entre el agregado y el asfalto, además manifiestan que las propiedades químicas del agregado, afecta la sensibilidad en el enlace químico. Así mismo reportan que

el Silicio presente en algunos agregados como el basalto o granito (Cui *et al.*, 2014) causa una reducción en las fuerzas del enlace entre el agregado y el asfalto, y se llega a la conclusión de que el agregado calizo por contener menos SiO₂ que el basalto, exhibe una mejor resistencia al agua, por lo que la mineralogía de los agregados, tiene un impacto significativo ante propiedades de adherencia.

En el mismo contexto, el Estado de Texas en EUA, considera a la pérdida de agregado, como un factor que contribuye indeseablemente a la aparición de varios deterioros en las carpetas asfálticas en caliente, por ejemplo, el agrietamiento, baches, etc. (Li *et al.*, 2014). Atribuyendo principalmente a un inadecuado enlace químico entre el agregado y el asfalto. Para mejorar esta propiedad, el departamento utiliza aditivos promotores de adherencia a base de poliamida y resina epóxica. A sí mismo, argumentan que el asfalto convencional, genera enlaces químicos débiles entre el agregado-asfalto por su composición, y cuando el agua ingresa al sistema, los enlaces se pierden originando desprendimiento. Por esta razón es necesario utilizarlos.

Algunos estudios sobre su aplicación, (Curtis *et al.*, 2010) comentan que una adecuada adherencia entre agregado y asfalto, se logra mediante el uso de productos promotores de adherencia que contribuyen a mejorar la afinidad entre sus componentes. Al aplicarlos en el asfalto, cambian principalmente su polaridad, y debido a los electrones libres de la molécula de SiO₂ presentes en algunos agregados (basalto) interaccionan con los electrones libres del producto, originando un incremento los enlaces en las cargas químicas de los agregados. Por todo lo anterior en este trabajo se realizaron pruebas de desprendimiento por fricción con base en la recomendación (AMAAC RA/08/2010) siguiendo su metodología, con el objetivo de obtener el porcentaje de la pérdida de la película de asfalto de los diferentes agregados utilizados, unos de origen basáltico y calizo así como un material de origen industrial (escoria de alto horno) (Flores *et al.*, 2010), (Garnica *et al.*, 2005) al utilizar diferentes concentraciones (0.5, 1 y 1.5% en peso sobre el asfalto) de dos aditivos promotores de adherencia. Con el objetivo de verificar la

efectividad de su utilización y comprobar si efectivamente mitigan el problema de pérdida de la película de asfalto (escoria) en el agregado utilizado en mezclas asfálticas.

1.2.6 Tópicos Económicos: Externalidades, Costos, y Estadísticas

En este sentido el IRAP (International Road Assessment Programme, por sus siglas en inglés), ha realizado estudios que revelan los costos económicos para algunos países de manera general. Sin embargo, se requiere una breve descripción de los métodos utilizados para calcular los costos económicos principalmente: En primer lugar se encuentra el método de “*Disposición a pagar*” y el segundo “*Capital humano o pérdida de productividad*”. A continuación, se describe de manera general las contemplaciones y diferencias de cada uno.

1.2.7 Método de Capital humano o de la producción bruta.

Este método en particular, asigna un determinado valor a la muerte, de acuerdo con el impacto económico, es decir, el componente principal es el descuento del “valor presente” de la producción futura de la víctima que se ha visto interrumpida debido a la muerte. A esto se le añaden los costos del mercado, como el costo de tratamiento médico, los costos de colisión y los costos de la persona accidentada, el costo administrativo y los daños a la propiedad. Sin embargo presenta desventajas evidentes porque se centra únicamente en los efectos económicos de la pérdida de vida y no toma en cuenta el valor y el goce de la vida interrumpida. Para subsanar parcialmente esta deficiencia, algunas veces se añade un componente de “dolor, profunda pena y sufrimiento”, con el propósito de representar el “costo humano”.

1.2.8 Método de disposición a pagar

El enfoque de la disposición a pagar (DAP) consiste en estimar el valor que los individuos le otorgan a las mejoras en seguridad, al estimar la cantidad de dinero que las personas estarían dispuestas a pagar para reducir el riesgo por la pérdida

de una vida. Este equilibrio entre el riesgo y los recursos económicos, concuerda con el principio fundamental del análisis de costo-beneficio social por parte del sector público, al basarse en las preferencias de aquellos que resultarán afectados por la decisión en cuestión. Sin embargo el método propone que para evitar la pérdida de una vida está influenciada por el efecto del contexto (la gravedad percibida de una colisión vial) y los efectos a escala (el número de víctimas que produce la colisión vial). Es por ello que este enfoque ha sido aceptado como el método de mayor validez para evaluar el valor de la prevención del riesgo en las carreteras. Sin embargo este método resulta conceptualmente atractivo, pero puede ocasionar problemas prácticos cuando se aplica a países en desarrollo, ya que el enfoque metodológico que se requiere para generar estimados, es costoso y requiere de técnicas de investigación sofisticadas. Para ejemplificar algunos casos de la utilización de las dos metodologías, países como estados Unidos, Nueva Zelanda, Suecia y el Reino Unido utilizan esta metodología, en cambio, países Bajos e Islandia utilizan el método de Capital Humano.

Sin embargo sería importante recalcar el o los factores que contribuyen a la aparición de una siniestralidad, porque de manera general, los datos que se presentan, son la totalidad de los accidentes y el costo económico. A continuación se muestra la tabla donde se plasman los costos económicos de algunos países basados en el enfoque de “disposición a pagar” aplicado para algunos países.

Tabla 1.- Costo anual en billones de pesos mexicanos por accidentes: Fuente The global cost of Road Crashes; irap 2008

Pais	Fatalidades anuales	Fatalidades anuales y heridos graves	Costo anual por la fatalidad y heridas graves en billones pesos (0/100 M.N)
Suecia	278	3,058	58
Australia	1,363	14,993	187
Estados Unidos	35,490	390,390	4,455
México	16,714	183,854	407
India	231,027	2,541,297	869
China	275,983	3,035,813	3,300
Sudáfrica	15,995	175,495	308
Uganda	9,655	106,205	19

De acuerdo con la Tabla 1 para el caso de México se aprecia que el costo es considerable. En México actualmente los accidentes ocurridos en las carreteras son considerados un problema de salud pública, sin embargo no existe estadístico que sustente y desglose los factores que los desencadenan, sin embargo existen estos datos para concientizar a los gobiernos sobre el grave problema que sufre el país. En el mismo sentido Estados Unidos presenta un grave problema, a pesar del el nivel de exigencia para la construcción, operación y mantenimiento de las carreteras, de la misma manera, China se lleva desgraciadamente el máximo galardón con respecto a las fatalidades anuales. De manera general, los accidentes automovilísticos ocasionan 1.24 millones de muertes así de 30 a 50 millones de heridos anualmente a nivel internacional. Sin embargo se han encontrado ciertos factores que son atribuibles para que se suscite una siniestralidad, como se menciona a continuación.

Estudios han revelado que relación entre el coeficiente de fricción y los accidentes ocurridos guardan una estrecha relación, en seguida se muestran que efectivamente los bajos niveles de fricción, ocasiona el incremento de la tasa de accidentalidad en las carreteras. Investigaciones al respecto, se han realizado en las carreteras Nórdicas (Suecia), donde los autores (Wallman and AAström, 2001) correlacionaron los números de resistencia al deslizamiento y los accidentes por falta fricción.

Dicha investigación, midió principalmente la resistencia al deslizamiento por medio del *péndulo británico* en sitios tomados al azar donde frecuentemente ocurrían derrapamiento de vehículos sobre pavimento mojado. De acuerdo a la Gráfica 3, la tasa comienza de accidentalidad comienza a incrementarse a partir del valor de 65 hacia atrás, y aumenta exponencialmente por debajo de los valores de 50 a 55.

Por otra parte, los resultados sugieren que para valores por debajo de 55, el valor puede ser aceptado sólo para carreteras con tráficos modestos, por su parte, valores debajo de 45, indican condiciones insipientes de derrapamiento con una alta probabilidad de ocurrencia.

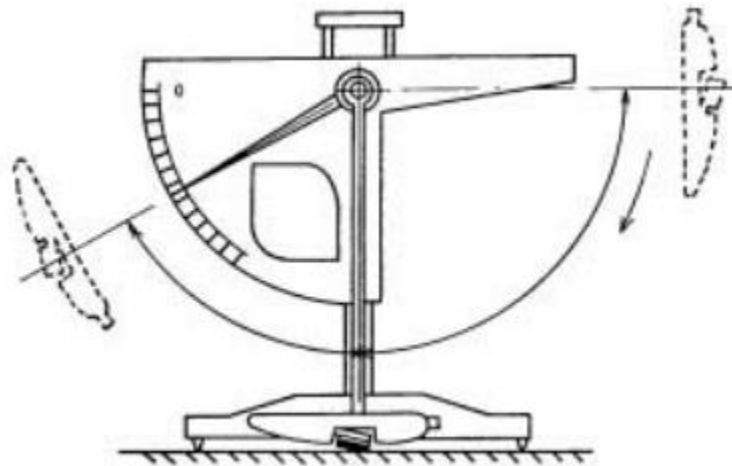
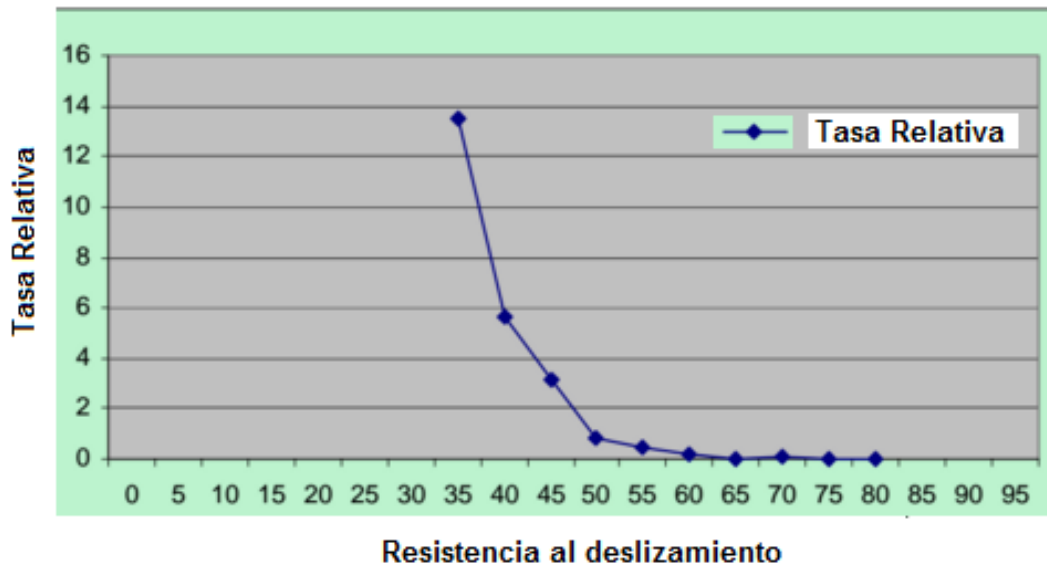


Figura 1.-Péndulo Británico Portable

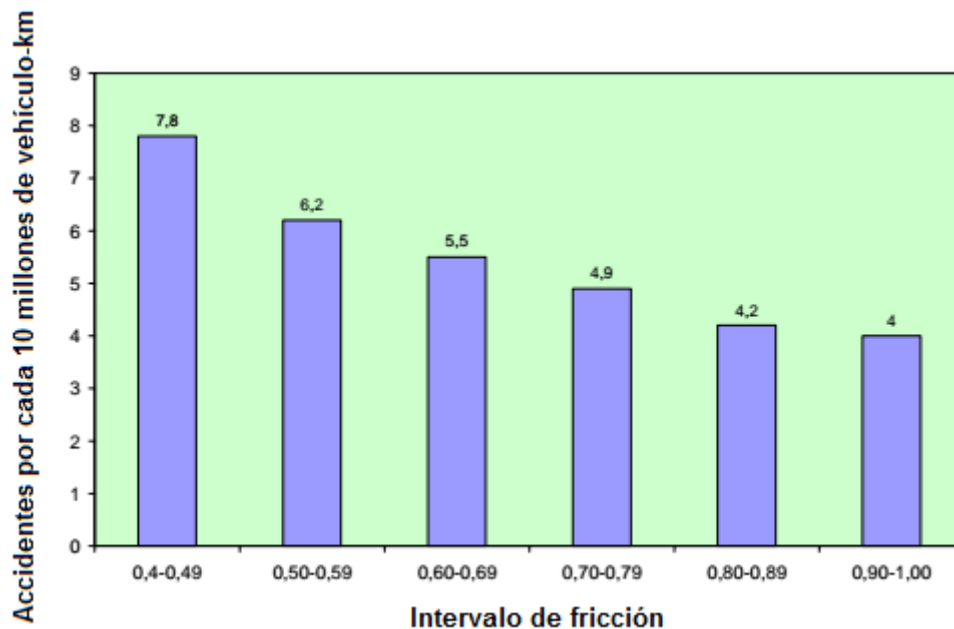
Gráfica 3.- Tasas de accidentes en función a la resistencia al deslizamiento



De la misma manera, un estudio realizado por (Hemdorff *et al.*, 1989) llamado TOVE (Estudio de seguridad vial y propiedades en los caminos, por sus siglas en Sueco). Obtuvieron los efectos de la fricción en la superficie del camino, con base en las tasas de accidentes. Sin embargo, los datos de fricción fueron obtenidos en las carreteras de Dinamarca, y medidos con el Stradograf (instrumento para medir propiedades de fricción en las carreteras), para carreteras de dos carriles y superficie de asfalto. De la misma manera que (Wallman and Åström, 2001), los resultados mostrados en la Gráfica 4 que la tendencia de la tasa de accidentes decrece al incrementar la fricción.



Figura 2.- Stradograf, funcionando. Fuente: Agencia Sueca de Transporte



Gráfica 4.- Tasas de accidentalidad dependiendo del nivel de fricción. Fuente: Carl-Gustaf Wallman et al., 2001.

Sin embargo (Wallman y Aström, 2001) homologaron los resultados aún más, porque consideraron factores para condiciones ambientales a bajas temperaturas, es decir, rocío congelado en el pavimento, pavimento seco y mojado, cubierto con hielo, etc. Así como factores sobre el conductor, por ejemplo, apariencia en el pavimento. Al aclarar que los resultados fueron obtenidos a través de una exhaustiva investigación referida a la fricción, condición del camino, así como un informe detallado de los accidentes ocurridos en diferentes puntos, principalmente se desarrollaron investigaciones de los accidentes.

Con base a los resultados obtenidos, encontraron un tasa de accidentalidad que relacionaba directamente al coeficiente de fricción para algunos puntos localizados en Suecia, al atribuir que la resistencia al deslizamiento tiene una elevada relación con los accidentes especialmente cuando existe exceso de humedad, además comentaron que la fricción es uno de los mayores factores que afecta el número de colisiones en ciertos puntos de autopistas. En seguida se muestra la Tabla 2 que resume lo anteriormente mencionado.

*Tabla 2.- Intervalo de fricción y tasa de accidentalidad .
Fuente: Carl-Gustaf Wallman et al., 2001.*

Intervalo de fricción	Tasa de accidentalidad (heridos por millon-veh-km)
<0.15	0.8
0.15-0.24	0.55
0.25-0.34	0.25
0.35-0.44	0.2

1.3 Departamentos de Transporte: Políticas de uso de agregados

Con base a la utilización de la mezcla de agregado de algunos agregados como la escoria de alto horno, se han hecho investigaciones sobre su uso a nivel internacional, específicamente en Estados Unidos, los Departamentos de Transporte de cada Estado, han realizado diferentes recomendaciones acerca de la aplicación y uso de la escoria de alto horno en las carpetas asfálticas. En estas recomendaciones se mencionan las pruebas de laboratorio necesarias para su evaluación y comportamiento, así como su valor para aceptar o en su caso rechazar dicho agregado o combinación de estos.

1.3.1 Departamento de Alabama

En este sentido, el Departamento de Transporte de Alabama, dentro de sus políticas de seguridad para sus carreteras utiliza valores obtenidos del número del péndulo británico BPN-9 (Número del péndulo británico después de 9 horas de pulimento) para calificar y obtener el porcentaje adecuado de agregado calizo empleado en la construcción de carreteras. Así mismo a los agregados de origen calizo, los llama “agregados problema” tales como calizas, dolomitas o agregados que tienden a pulirse, que son usados principalmente en la construcción de la superficie de desgaste. Este departamento emplea este tipo de agregados en capas subyacentes hombros y acotamientos. De acuerdo a la Tabla 3 los especificaciones para el uso de agregados calizos, el departamento se basa de acuerdo a los valores del Péndulo Británico después de 9 horas de pulido consecutivo, cuyo valor es adimensional y representado en una escala que va desde 0 hasta 150. El primer valor (cero) significaría que la carretera no presenta niveles de fricción, sin embargo, el 150 reflejaría una superficie muy friccionante. En el mismo sentido los valores presentes en la tabla, significa que por cada porcentaje de agregado calizo utilizado se debe cumplir con un valor de pulido residual dado. Ya que esto garantizaría un correcto funcionamiento de la estructura carretera respecto a los índices de fricción. De manra puntual el coeficiente igual que el coeficiente (μ) de fricción. Este valor

Tabla 3.- Especificaciones del Departamento de Alabama para el agregado grueso resistente al pulido
Fuente: (Flores et al., 2010)

Valor de BPN-9 del agregado	Porcentaje máximo permitido de agregado calizo
<25	30
26	35
27	40
28	45
29	50
30	55
31	60
32	65
33	70
34	75
>35	80

Comentan además que los porcentajes en la tabla anterior, no deben exceder en ningún caso para la no aparición de accidentes por falta de fricción en el pavimento. (Flores et al., 2008)

1.3.2 Departamento de Florida

Por su parte este departamento evalúa propiedades friccionantes del agregado por medio del ensayo de residuo insoluble, al especificar que el material retenido en la malla número 200 debe tener *un mínimo de 12%*. Sin embargo para ser considerado como aceptable, el departamento realiza pruebas a escala real, donde se elaboran pistas de prueba, con cargas reales expuestos a los agentes del intemperismo, hasta llegar a un nivel de tránsito acumulado de 6 millones de ejes equivalentes y si los resultados son satisfactorios, se acepta el agregado como adecuado para su utilización en capas de rodadura, así como carpetas asfálticas. Flores et al., (2008).

1.3.3 Departamento de Kentucky

Al igual que el anterior, este departamento clasifica a los agregados como clase A y B como se menciona a continuación:

Agregado tipo A.- Son agregados con porcentajes de residuo insoluble (AIR por sus siglas en inglés) \geq (mayor o igual a) 50. Respecto a los agregados calizos y dolomíticos se aceptan como agregados gruesos para todos los usos, excepto como superficies friccionantes de carreteras interestatales.

Agregado tipo B.- Son agregados que no pueden emplearse en mezclas asfálticas resistentes al pulido, cuyas características se mencionan a continuación:

Agregado calizo. Agregados con $\leq 15\%$ de AIR deben exhibir una resistencia al pulido de manera satisfactoria, antes de que su uso sea permitido en la porción resistente al pulido.

Grava. Agregado con un AIR de 15% a 50%

Dolomita.- Agregado dolomítico con al menos 37% de carbonato de Magnesio, deben exhibir una resistencia al deslizamiento satisfactoria.

1.3.4 Departamento de Lousiana

En particular este Departamento de Transporte, utiliza el ensayo de pulimento acelerado como prueba de laboratorio para controlar la calidad de agregado, medido con el péndulo británico y su uso dependerá del nivel de fricción requerido para el tipo de carretera, al considerar, dónde será utilizado específicamente en superficies friccionantes. A continuación se exhiben las especificaciones utilizadas por este departamento.

Tabla 4.- Especificaciones del Departamento de Luisiana para el agregado grueso resistente al pulido Fuente: (Flores et al, 2010)

Nivel de fricción	Valor de pulido	Descripción
I	≥ 37	Agregados que demuestran poder retener números de fricción aceptables durante la vida de servicio del pavimento
II	35-37	Agregados que demuestran poder retener números de fricción adecuados durante la vida de servicio del pavimento
III	24-30	Agregados que demuestran poder retener números de fricción adecuados durante la vida de servicio del pavimento
IV	20-24	

1.3.5 Departamento de Transporte de Minnesota

Este departamento en particular, utiliza la prueba de Residuo insoluble en Ácido (AIR, por sus siglas en inglés) para determinar las propiedades friccionantes del agregado. La Tabla 5 clasifica los agregados en cinco clases principalmente. Si cualquier agregado entra de esta clasificación podrá utilizarse.

Tabla 5.- Especificaciones del departamento de Minnesota para agregados resistentes al pulido. Fuente (Flores et al., 2010)

Clase	Uso del agregado
A	Roca triturada o roca trapa de mina , cuarcita, granito, u otras rocas ígneas o metamórficas
B	Piedra triturada o roca de mina, caliza, riolita, esquisto
C	Grava natural, o parcialmente triturada
D	Grava natural, 100 % triturada
E	Escoria de fundición, o una mezcla de dos o más agregados A,B y C La escoria se permite únicamente en carpetas de desgaste con un porcentaje máximo permisible de 35 con respecto a la masa total del agregado. El Minnesota DOT debe aprobar los agregados clase E antes de emplearse en la construcción de pavimentos

La tabla anterior, llama la atención por poner especial atención en la escoria de fundición, porque limitan el uso de la escoria al 35% como valor máximo.

1.3.6 Departamento de Mississippi

Este departamento controla la calidad del agregado a través de análisis petrográfico, y del número de caras fracturadas una vez triturados, por su parte la caliza es permitida su utilización en mezclas asfálticas y riegos superficiales. Donde el porcentaje de su utilización no debe exceder el 30% de la masa retenida en la malla número 8 de la combinación de agregado, y no debe de exceder el 30% de la masa total (Flores et al., 2010).

1.3.7 Departamento de Oklahoma

Este departamento de califica los agregados a ser usados en carpetas de fricción por medio de la prueba de la prueba de Residuo Insoluble. Especificando el valor de 30% máximo de pérdida de (AIR) y un número de resistencia al deslizamiento de campo de 35 como mínimo.

1.3.8 Departamento de Pennsylvania

Al igual que en Minnesota, este departamento clasifica los agregados en cinco grupos principales, cuya dependencia se basa en nivel de resistencia al deslizamiento, así como por la cantidad de tránsito que se generará a lo largo de la vida útil. Cabe mencionar que los resultados, de residuo insoluble, pulimento acelerado, y análisis petrográfico, son necesarios para aceptar o rechazar dicho agregado según comentan (Flores *et al.*, 2010). La Tabla 6 se muestra las especificaciones para cada uno de los agregados.

Tabla 6.- Especificaciones del Departamento de Pennsylvania para agregado resistente al pulido
Fuente: (Flores *et al.*, 2010)

Clasificación de acuerdo con el SRL	Tipo de roca
L-bajo	Calizas y algunas dolomitas de textura muy fina
M-medio	Dolomitas y algunos tipos de calizas
G-bueno	Pedernal y caliza, grava con más de 25% de carbonato
H- grado alto	Grava con más de 10% de carbonato, cuarcita, limolita, gneiss, argilita, diabasa y escoria de alto horno
E- excelente	Grava y arenisca

De la tabla anterior Tabla 6, la clasificación de los agregados se basa principalmente por medio de la resistencia al deslizamiento (SRL), por sus siglas en inglés. Además del nivel de exigencia ante la solicitud del TDPA (Tránsito diario promedio anual), para su uso en diferentes mezclas, en la Tabla 7 los tipos de agregados, requeridos para niveles de tránsito.

Tabla 7.- Niveles de tránsito, y resistencia al deslizamiento de los agregados

TDP	SRL requerido
< 1000	E,H,G,M,L
1000-3000	E,H,G,M
3000-5000	E,H,G
5000-20000	E o H
> 20000	E

1.3.9 Departamento de Texas

Este departamento en particular evalúa las propiedades friccionantes de los agregados, por medio de las pruebas de residuo insoluble (TEX 612-J Residuo insoluble para agregado) y pulimento acelerado (Tex 438-A Pulimento acelerado para agregado grueso). Gracias a estas pruebas de laboratorio, se han encontrado las alternativas de mejorar las propiedades friccionantes en los pavimentos, por medio de la combinación de mezclas de agregados con alto y bajo valor de pulido residuales.

Con relación a las implicaciones de los niveles de exigencia propios de cada Departamento, cabe señalar que la evaluación y el resultado obtenido de los agregados, depende su utilización, porque se involucra además de estos, parámetros como el TDPA (tránsito diario promedio anual) el tipo de carretera que se está proyectando, así como el nivel de fricción deseado. Sin embargo, estos departamentos prestan mayor atención en los agregados calizos, por los valores rigurosos que deben de cumplir estos agregados para ser utilizados en carreteras. Particularmente las pruebas más utilizadas son el ensayo de Residuo insoluble y el Pulimento Acelerado, el primero de ellos evalúa la cantidad de carbonatos que se encuentra dentro de los agregados, y el segundo, evalúa la pérdida de la microtextura al someter el agregado ante ambientes abrasivos.

Resulta claro, la importancia de la evaluación en los agregados respecto a sus características friccionantes, en virtud de la seguridad de los usuarios. En

particular, la utilización de agregados con alto valor de pulido, como las calizas es lo que más se ha estudiado, como resultado de esto, se ha investigado al respecto para preservar la resistencia al deslizamiento en niveles aceptables dentro de los pavimentos, al utilizar materiales con características diferentes a esos últimos tanto de origen natural, como basaltos, areniscas, reolitas, así como de origen industrial, como la escoria de alto horno, sin embargo, suele ser considerado como material de desperdicio en la industria del acero, y para utilizarlo, es necesario caracterizarlo antes de ser utilizado en la fabricación de cualquier especie de carpeta, o tratamiento superficial en los pavimentos.

En este proyecto de investigación se estudia el comportamiento de la mezcla de agregados con alto y bajo valor de pulido residual, a base de combinaciones de agregado calizo y escoria de alto horno, mezclados en diferentes porcentajes, evaluados bajo BPN-9 (Número del péndulo británico después de 9 horas de pulimento).

1.4 Descripción del Problema

En la actualidad internacionalmente, el diseño de una carpeta asfáltica involucra la combinación de dos partes fundamentalmente, agregados y asfalto, elementos que requieren caracterizarlos para obtener sus propiedades y con ello realizar un diseño adecuado. Sin embargo, cada material posee diferencias significativas, por ejemplo, los agregados por su origen, las propiedades cambian totalmente, en cambio el asfalto, varía por el grado de calidad en el proceso de refinación del petróleo.

Para el caso de la República Mexicana en la zona centro-norte, la Geología de los agregados pétreos tienen características físicas y químicas que los convierten resistentes al pulimento acelerado, principalmente por tratarse de rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Por su parte en el noreste del país y la península de Yucatán, la Geología es de tipo sedimentario, y los agregados de tipo calizo, proliferan por

todas partes, por lo tanto, los pavimentos que se construyen exhiben problemas de pulimento en su capa de rodadura.

Para visualizar la amplia gama de la Geología del país, a continuación se muestra un mapa de la República Mexicana, donde aparecen los tipos de rocas característicos de cada región, así como las principales rocas se encuentran dentro del Territorio Nacional Mexicano. Como se había mencionado anteriormente, al observar la imagen proporcionada por el INEGI (Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática), muestra claramente que el Noreste del territorio Mexicano la Geología que predomina el Agregado de tipo sedimentario, así como en la Península de Yucatán, por lo que la existencia de otro tipo de agregado (basalto) es limitada.

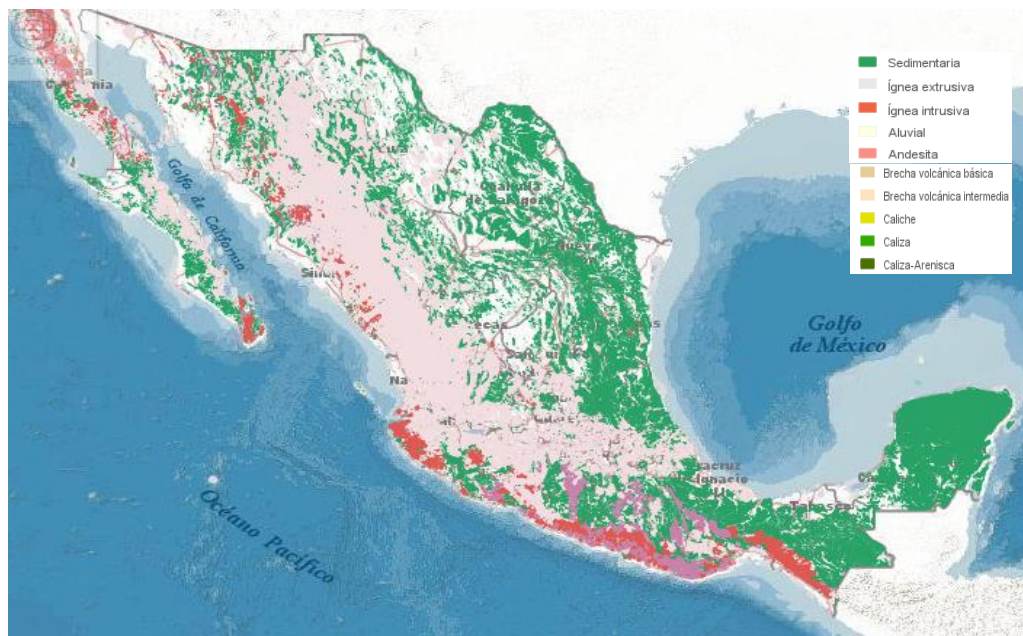


Figura 3.- Geología de La República Mexicana Fuente: INEGI (2012)

Como lo muestra la Figura 3, los estados que forman parte de la península de Yucatán principalmente, Campeche, Quintana Roo y Yucatán, así como el noreste de la República Mexicana Nuevo León, Coahuila y norte de Veracruz,

presentan en gran parte de su territorio, rocas de tipo sedimentaria típicamente caliza altamente pulimentable, en todo su territorio.

Resulta claro, que su utilización se convierte en una situación inevitable, al no encontrar otro tipo de materiales diferente como el basalto, sin embargo, por ser materiales pulimentables, provoca problemas de siniestralidades ocasionados por bajos niveles de fricción en las carreteras. Una solución que se ha encontrado para mantener la resistencia al deslizamiento dentro de niveles aceptables es incorporar un material con características de resistencia al pulido elevada, tal como la escoria de alto horno, agregado basáltico, reolitas, etc. Asimismo, resistentes ante el tránsito elevado, humedad excesiva y cualquier otro agente que pueda degradar su estructura.

Ahora bien, una de las limitantes que presenta la escoria de alto horno es la aparición del fenómeno de desprendimiento de agregado a mediano y largo plazo, por tal efecto, es necesario generar una solución por medio de algún tratamiento químico, o adición de un producto promotor de adherencia que contrarreste dicho fenómeno, y evaluar su desempeño. En este trabajo de investigación se utilizaron dos productos promotores de adherencia aplicados a dos tipos de escorias. Su desempeño se evaluará una fase experimental inicial por medio de la prueba de desprendimiento por fricción, en segundo lugar se evaluará ante condiciones de abrasión adversa por medio de la prueba de Microdeval para arenas y gravas. Por último los agregados se someterán a pruebas de pulimento acelerado. .

En síntesis, el empleo de agregados calizos en regiones donde proliferan, es un caso especial, gracias a la imposibilidad de no utilizarlos, aunado a esto, el no encontrar otro agregado diferente, se hace uso de ellos, aun sabiendo de los problemas que se suscitarán en el futuro, sin embargo, la escoria de alto horno, por ser un agregado de desperdicio industrial de la fabricación de acero, presenta características con características resistentes al pulido, convirtiéndose en un material adecuado, para incorporarlo en el diseño de carpetas asfálticas que

presentes problemas de pulimento de sus agregados. Sin embargo en algunos casos, presenta problemas de adherencia con el asfalto y por esta razón es necesario utilizar productos promotores de adherencia para contrarrestar dicho efecto.

1.5 Justificación

La adición de escoria de alto horno en el diseño de las carpetas asfálticas es una posible solución en zonas donde predominan agregados de tipo calizo, donde la falta de fricción entre el vehículo y el pavimento es una constante.

Los beneficios del presente trabajo de investigación se concentraron en elaborar una metodología que incluyera la escoria de alto horno en las carpetas asfálticas que utilizan agregados calizos altamente pulimentables, como una alternativa de solución para aquellas carpetas que sufren de problemas de pulimento de sus agregados. De la misma manera, se analizó el desempeño que brinda la escoria frente a los problemas de pulimento como material alternativo para mantener la fricción en la capa de rodadura, al comprobar y verificar los resultados del BPN-9 (Valor de pulido residual pasadas 9 horas de pulimento) y con base a los resultados, se recomendó cuál de los porcentajes de escoria aplicados a la mezcla presentó mejores resultados.

Importa y por muchas razones que los resultados de la investigación, se divulguen para que autoridades gubernamentales o privadas, implementen políticas de diseño de mezclas con base a esta metodología, porque no solo es aplicable exclusivamente para la escoria, sino, para agregados con diferentes características a los de los calizos, es decir, se puede usar para agregado ígneo, reolitas, basaltos, etc. Asimismo, por los gastos que se generan al tratar de proveer una textura adecuada a través del tiempo, es decir, organismos gastan una cantidad de dinero considerable en “fresar la carpeta asfáltica” (quitar pocos centímetros de espesor) constantemente, sin embargo este trabajo provee una solución a corto plazo, porque el agregado que está dentro de la carpeta es el mismo, mismo que perdió anteriormente sus propiedades.

Por último, es necesario resaltar la importancia que tiene la fricción y la adherencia en la carretera, porque gracias a la primera forma parte de la seguridad, porque mantiene la trayectoria deseada por el usuario en cualquier momento y la segunda mantiene se mantiene la estructura de la capa de rodadura estable, y no se ve afectada a lo largo del tiempo. Es decir, contener la estructura de los agregados y el asfalto a través del tiempo implica que no exista alguna degradación dentro de su estructura, que la puede desencadenar algún factor adverso como la lluvia, hielo, humedad, etc. Con respecto a lo anterior, y poderlo llevar a cabo, es necesario utilizar productos o aditivos promotores de adherencia, sin embargo es importante encontrar la proporción adecuada de este material en las carpetas asfálticas, para lo cual se usó una fase experimental, donde se contempló y evaluó en diferentes porcentajes, y con base a los resultados se encontró el grado de la significancia respecto al problema desprendimiento de asfalto.

1.6 Hipótesis

Mediante un enfoque metodológico, la escoria de alto horno al incluirla en el diseño de carpetas asfálticas que presentan pérdida de microtextura, eleva el valor de pulido residual. De la misma manera, el uso de productos promotores de

adherencia reduce el problema del desprendimiento de la película de asfalto en la escoria de alto horno.

1.7 Objetivo General

Diseñar la cantidad adecuada de escoria de alto horno aplicada a las carpetas asfálticas con agregado predominantemente calizo altamente pulimentable, que garanticen las condiciones friccionantes necesarias en la capa de rodadura. Evaluar y verificar si el uso de productos promotores de adherencia en la escoria disminuye el problema de desprendimiento de asfalto.

1.8 Objetivos particulares

- Determinar el efecto que provoca la incorporación de escoria de alto horno en las características friccionantes de una mezcla asfáltica.
- Evaluar la escoria de alto horno, con y sin el tratamiento, basado en la reducción de la reacción álcali-sílice, y verificar si el desprendimiento de asfalto se logra mitigar.
- Proporcionar una metodología de dosificación de escoria de alto horno en mezclas asfálticas para ser utilizadas en carreteras que presenten problemas de pulimento en su capa de rodadura.

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta apartado de la investigación, se da a conocer de manera puntual la importancia que tiene la fricción en las carreteras, así como la importancia de la adherencia entre el agregado y el asfalto. La primera parte se dan a conocer el principio fundamental de la fricción en las carreteras, puntos y características que se exhiben cuando un vehículo entra en contacto con el pavimento, así como los problemas que se exhiben cuando estas características descienden a niveles fuera de lo recomendado. De la misma manera que la fricción se estudia la importancia de la adherencia dentro de las carpetas, algunos problemas relacionados con los agregados, la importancia de los productos promotores de adherencia, etc.

2.1 Mecanismos y problemas de fricción

Las propiedades friccionantes en las carreteras, son parámetros de seguridad que deben cumplir los pavimentos, gracias a que proveen a sus usuarios, la seguridad al transitar por ellos. Sin embargo estas características son proporcionadas principalmente por los agregados y éstos a su vez por sus propiedades mineralógicas que presentan. Por el contrario resulta necesario conocer los fenómenos que se presentan por la interacción entre el vehículo y neumático, en seguida se mencionan algunos

(Henderson *et al.*, 2006). Han comentado acerca de la fricción en el pavimento, la cual resulta de una interacción compleja entre las dos componentes principalmente: la adhesión y la histéresis. La primera de ellas, resulta de la interacción entre los neumáticos y las partículas de agregado. En cambio la segunda, resulta de la deformación del neumático cuando está en contacto con las asperezas de la macrotextura, incrementándose con la irregularidad del agregado, por ejemplo, el agregado angular causa más deformación del neumático que el agregado redondeado

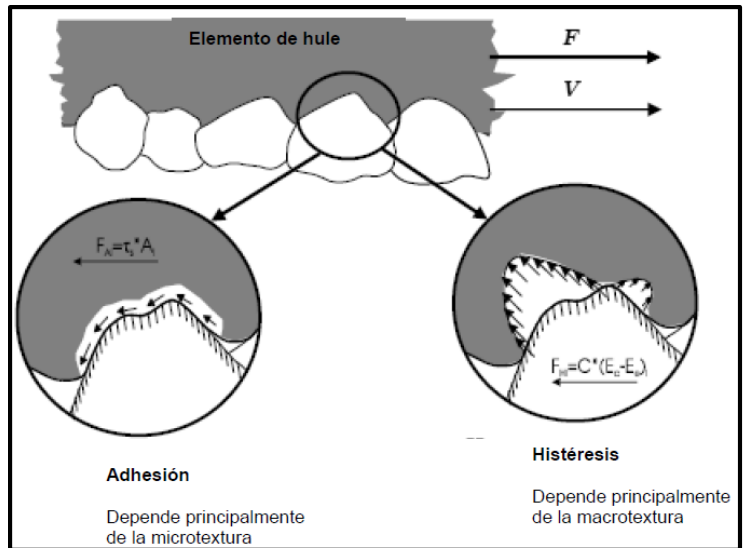


Figura 4.- Niveles de Textura en el Pavimento Fuente: (Hall et. al., 2009.)

Puntualmente, la adherencia aparece en las irregularidades de los bordes de los agregados, y la histéresis en el área expuesta a la deformación por el paso del neumático, por tales fenómenos, es necesario visualizar escalas de texturas en los pavimentos, que contemplen sus características y fenómenos que se suscitan, A continuación se presenta un esquema visualiza de manera general, lo mencionado con antelación.

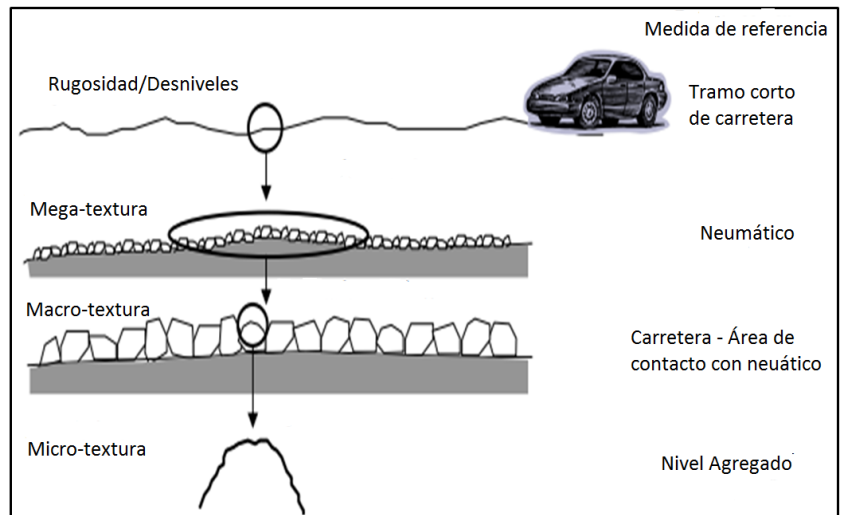


Figura 5.- Niveles de textura en un pavimento.

Fuente: (Hall et al., 2009).

De acuerdo a la Figura 5 se muestra de manera explícita las escalas a nivel del pavimento:

La primera es la *microtextura*, principal característica de los agregados que proporcionan la resistencia al deslizamiento, tema principal del presente trabajo de investigación, debido a la importancia en temas de fricción en las carreteras, implicaciones y consecuencias por su desaparición en los agregados. Algunos autores afirman que esta característica de los agregados se localiza en su superficie y su durabilidad depende tanto de su irregularidad así como su capacidad de retenerla. Por su parte, la *macrotextura* son las oquedades generadas debido a la distribución del agregado expuesto en la superficie, considerada como responsable de proveer la fricción en el pavimento para velocidades mayores a 50 km/hr (kilómetros por hora).

No obstante, conocer las fuerzas originadas cuando un vehículo circula por una sección de pavimento es imprescindible, así como los fenómenos ocurridos, focalizados especialmente en la interacción entre neumático-agregado. A continuación se ilustra un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas resultantes, producto de esta interacción.

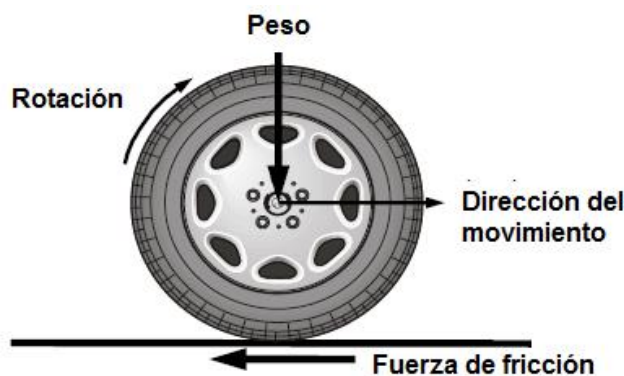


Figura 6.- Fuerzas resultantes en el movimiento de un vehículo. Fuente: (Hall et al., 2009)

Para ilustrar la aportación e importancia de los agregados en el pavimento, el siguiente diagrama ejemplifica la importancia de la resistencia al deslizamiento. En primer lugar es necesario imaginar cuando un vehículo transita por una curva, al focalizar el vehículo cuando está sobre la curva, la fuerza centrípeta ocasionaría su salida por la tangente si no existiera la fricción necesaria, sin embargo, gracias a la micro y macrotextura que proveen los agregados, impiden que salga disparado por la tangente. En segundo lugar cabe aclarar que además de los agregados, el diseño geométrico cumple su función, al proveer una adecuada sobreelevación en las curvas, porque gracias a este parámetro (ángulo) los vehículos se mantienen estables dentro de la curva.

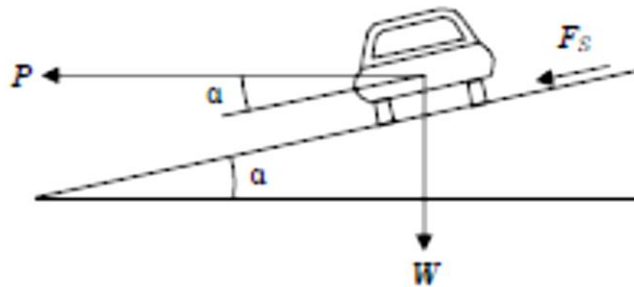


Figura 7.- Fuerzas resultantes de un vehículo al transitar por una curva, Fuente; (Hall, et al., 2009)

Donde:

P: Fuerza centrípeta (horizontal)

Fs: Fuerza de fricción entre el neumático y la superficie del pavimento

W: Peso del vehículo

α : Sobreelevación de la curva.

2.2 Agregados: propiedades friccionantes

El diseño por fricción en carpetas asfálticas, implica comprender y estudiar factores que influyen directamente en su comportamiento, conocimiento de cual es necesario implica conocer materiales y técnicas constructivas (incluyendo el equipo) según su diseño, Hall *et al.* (2009).

Cabe mencionar que además de los factores anteriores, la microtextura es la propiedad a priori que determina el comportamiento friccionante de una superficie de concreto asfáltico. Sin embargo, esta propiedad su durabilidad a largo plazo porque depende de la capacidad del agregado de retenerla así como resistir el pulido, desgaste bajo acciones de sollicitación de tránsito y agentes ambientales.

Ante esta característica, la composición mineralógica juega el papel más importante, porque el uso de agregados calizos genera problemas de pulimento, provoca pulimento de agregado en los primeros años de servicio de la carretera. Generalmente la fracción gruesa de los agregados pétreos, controla las propiedades friccionantes en las mezclas asfálticas.

Algunos estudios realizados por la FHA (Administración Federal de Carreteras, por sus siglas en inglés) respecto a la innovación de los materiales, considera a la escoria de altos horno como un producto producido durante la separación de impurezas del acero considerado como desperdicio. Según este organismo (FHA) comenta que en Estados Unidos la utilización de la escoria oscila entre 7.7 y 8.3 millones de toneladas especialmente en bases granulares, material de embarcamientos, material de relleno, hombros de carretera y mezclas de asfalto en caliente.

Con respecto a sus características físicas, la escoria de alto horno posee alta angularidad, así como una alta rugosidad. Además posee propiedades de absorción mayores a 3%, a continuación se presentan las características físicas y mineralógicas. Con respecto a esta última, cabe mencionar que su composición está

basada en óxidos simples determinados mediante el análisis de rayos X. (FHWA – 97)

Tabla 8 Propiedades típicas de las escorias

Propiedades físicas de las escorias (FHA)	
Propiedad	Valor
Peso Volumétrico (ton/m ³)	3.2 a 3.6
Absorción	> 3 %

Tabla 9.- Mineralogía típica de las escorias

Mineralogía de los agregados (FHA)	
Compuestos	Composición %
CaO	40-52
SiO ₂	10-19
FeO	10-40 (70-80% FeO, 20-30% Fe ₂ O ₃)
MnO	5-8
MgO	5-10
Al ₂ O ₃	1-3
P ₂ O ₅	0.5 - 1
S	< 0.1
Hierro (FE)	0.5-10

2.2.1 Ensayos para resistencia al pulido de los agregados

Los ensayos recomendados para evaluar la resistencia al pulido de los agregados son el residuo insoluble en ácido (ASTM D 3042) y valor de pulido o pulimento acelerado (ASTM D 3319). En el caso del agregado fino no hay un ensayo para evaluar de manera directa las características de pulido y, por lo tanto, se utiliza el ensayo de residuo insoluble en ácido (AIR, por sus siglas en inglés), el cual indica el porcentaje de carbonatos presentes en los agregados. Para el caso de la fracción gruesa de los materiales, tanto el ensayo de residuo insoluble en ácido como el

ensayo de pulimento acelerado (PSV, por sus siglas en inglés) son usados Hall et al. (2009).

2.3 Índice de fricción

Este parámetro ha sido usado durante mucho tiempo, en 1965 la ASTM por primera vez lo llamo “número de deslizamiento” (SN) por sus siglas inglés (ASTM E274) posteriormente lo adoptó como una alternativa para el coeficiente de fricción, sin embargo la AASHTO años atrás lo adoptó y cambió su terminología por Número de Fricción, por último la PIARC (Asociación Mundial de la Carretera, por sus siglas en inglés) en los años 90's, lo nombró Índice Internacional de Fricción (IFI), gracias a la armonización que se realizó a nivel internacional, basado en modelos, valores y umbrales a través de correlaciones.

Cabe decir que esta metodología contemplaba algunos factores que se mencionan a continuación;

1. Número de siniestralidades, tasa de accidentalidad y nivel de severidad.
2. Nivel de Tráfico (TDPA).
3. Tipo de carretera.
4. Zona climática.
5. Edad de la carpeta o la capa de rodadura.

Con base a estos factores, la accidentalidad y el nivel de severidad es principalmente la causa de mayor impacto. Sin embargo, un adecuado diseño geométrico ayuda a reducir las siniestralidades, por ejemplo, el alineamiento horizontal requiere en ciertas partes un incremento de fricción ocasionada por su complejidad, por ejemplo en las transiciones de las curvas (cambio de tangente a curva horizontal), pendientes pronunciadas, etc.

Aunque el diseño de la fricción implica el considerar parámetros mencionados con antelación, debe ser considerado a lo largo de todo el proceso de diseño, particularmente por cuestiones de seguridad para los usuarios, que son proporcionadas a su vez por las propiedades de los agregados, particularmente por la micro y macrotextura.

Resulta claro que las características anteriores, requieren de calidad de los agregados pétreos, que cumplan con calidades específicas para que con base a sus resultados y características principales proporcionen tal efecto dentro de los pavimentos; a continuación se enlistan que se emplean actualmente:

- Dureza
- Mineralogía
- Forma
- Textura
- Angularidad
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia al pulimento
- Durabilidad

De las características anteriores, cabe señalar que la dureza del agregado y la mineralogía están gobernadas por la durabilidad y el pulimento, sin embargo es necesario que los agregados exhiban un alto nivel de fricción principalmente, lo suficientemente duros y fuertes, así como la resistencia a la abrasión. Con respecto a este último parámetro, es un indicador de resistencia mecánica de los materiales frente a la degradación, pero si se realiza en condiciones húmedas es aún mejor, porque en ocasiones los agregados no presentan problema alguno cuando está expuesto al aire libre, sin embargo cuando entra en contacto con el agua su estructura comienza a degradarse.

Con respecto a la característica de la resistencia a ser pulidos, se refiere a la condición o propiedad del agregado de mantener la microtextura a través del tiempo, sin importar las acciones repetidas por el tráfico, así como factores ambientales.

Por su parte la durabilidad, se refiere a la habilidad o propiedad que poseen los agregados de resistir la degradación causada por el tipo de clima, y efectos ambientales por estar mojado, seco, efectos de congelación y descongelación del

agua. Con respecto a la durabilidad, como propiedad de los agregados es importante para evitar su degradación, particularmente finos y gruesos cuando son utilizados en climas extremos. Sin embargo, al evaluar estas propiedades principalmente, a continuación se mencionan algunas pruebas llevadas a cabo.

- Rayado de agregado (medida bajo la escala de Mohs)
- Análisis Petrográfico (ASTM C 295)
- Vacíos sin compactar para agregados gruesos y finos (AASHTO T 304 o ASTM C 1252)
- Análisis UV para agregado grueso (AASHTO T 326)
- Micro-Deval para agregado fino (ASTM D7428-08)
- Micro-Deval para agregado grueso (ASTM D6928-08)
- Residuo insoluble en ácido (ASTM D 3042)
- Pulimento acelerado (ASTM E 303).

De todo esto se desprende, la necesidad de investigar las recomendaciones que se han llevado a cabo, con el objetivo de cumplir con un adecuado desempeño de fricción en las carreteras, es decir, a continuación se muestra la Tabla 10 donde se ilustra varias recomendaciones. La primera de ellas habla acerca de la composición que debe cumplir la combinación de una mezcla de agregado duro embebido dentro de una composición de agregado “suave”, además las condiciones de abrasión por medio de la vías húmeda, los valores de microdeval que deben presentar los agregados, así como los valores principales para esta investigación, es decir, las características que deben presentar los agregados frente al problema de pulimento acelerado.

Tabla 10. Recomendaciones; pruebas de laboratorio y umbrales necesarios para un adecuada fricción,
Fuente: (Hall et al 2009)

RECOMENDACIONES DEL GRADO DE DESEMPEÑO DE LA FRICCIÓN EN EL PAVIMENTO, RESPECTO A PRUEBAS DE LABORATORIO				
Propiedad del agregado	Fracción	Prueba implementada	Rango de propiedades para un buen desempeño	Fundamento
Composición y estructura de agregado	Gruesa	Examinación visual (observación de contenidos de una mezcla de agregado)	Porcentajes: Agregado Natural: 50 a 70%. Agregado Artificial: 20 a 40%	Según (Dahir y Henry, 1978) comentan que una mezcla ideal de agregado podría estar compuesta de 50 a 70% de un material duro enbebido en una matriz de 30 a 50% en uno suave
Abrasión	Fina	Pérdida de masa. (Microdeval para agregados fino)	≤ 17 a 20%	Comentarios hechos por (Kandhal y Parker en 1998) recomiendan que el 18% de pérdida de masa en los agregados es el valor máximo permitido para utilizarlos
	Gruesa	Pérdida de masa. (Microdeval para agregados grueso)	≤ 17 a 20%	
Resíduo insoluble	Fina	Porcentaje de residuo insoluble	≥ 50 a 70%	(Dahir y Henry en 1978, hacen una recomendación que 50 a 70 % como valor mínimo para pavimentos con un alto nivel de tránsito. Liang por su parte (2003) especifica el valor como mínimo de 50%. En cambio (Liang y Chyi 2000) reportan que el departamenteo de Nueva York requiere un mínimo de 15% para un tdpamayor a los 3000 vh/días
	Gruesa	Porcentaje de residuo insoluble	≥ 50 a 70%	
Pulimeto Acelerado	Gruesa	Valor de pulido residual (PSV, por sus siglas en inglés)	≥ 30 a 35%	Según (Liang and Chyi, 2000): el Departamento de Transporte del Estado de Texas hace las recomendaciones basado en el TDPA: pro ejemplo: TDPA < 750 no requiere especificación, TDPA entre 750 y 2,000: 28 mínimo TDPA entre 2,000 y 5,000: 30 mínimo TDPA > 5,000: 32 min. Por su parte (Liang 2003) comenta que el departamento estableció valores de cuatro niveles: Grado de Fricción 1: PSV > 37 Grado de fricción 2.- PSV entre 35 y 37 Grado de fricción 3.- PSV entre 24 y 30 Grado de fricción 4: PSV entre 20 y 29

Respecto a los valores anteriores, cabe mencionar que para la República Mexicana se han hecho esfuerzos por estudiar estos comportamientos e implementar valores que sean obtenidos en campo para aceptar o en su defecto rechazar los valores de fricción en las carreteras mexicanas, en la Tabla 11 se muestran los valores mencionados anteriormente.

Tabla 11.- Criterio para evaluar los valores d fricción en la superficie de pavimento Fuente: López et al., 2002

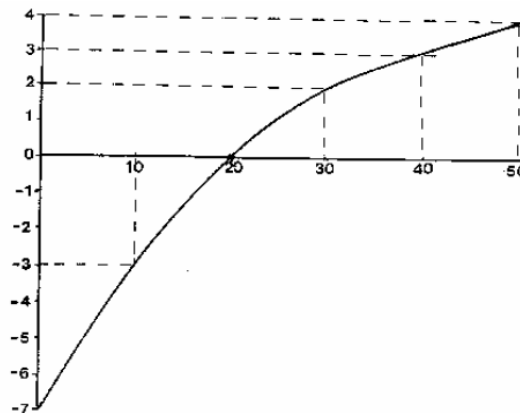
Fricción, Valor de CDR, adimensional	Calificación
< 0.5	Malo (derrapamiento del vehículo)
0.51 – 0.6	De regular a bueno
0.61 – 0.8	Bueno
0.81 – 0.9	De bueno a regular
> 0.91	Malo (desgaste de neumáticos)

Donde el CDR es el coeficiente de resistencia al deslizamiento obtenido a través del péndulo británico y se calcula de la siguiente manera:

$$c. d. r = \frac{\text{Lectura Efectiva (péndulo británico)}}{100}$$

Sin embargo existe un factor de corrección por temperatura aplicable por el gradiente de temperatura. Por ejemplo, si se obtiene una lectura promedio de 76 y se presentó una temperatura de 30 °C, se adiciona a los 76 el factor de 2 y la lectura será 78.

Gráfica 5.- Factor de corrección por temperatura



Visto de esta forma, los valores que se utilizan en la República Mexicana, comparados con los de la literatura americana son más conservadores, porque simplemente el valor de resistencia al deslizamiento medido con el péndulo británico y cuyo valor es mayor a 37, se considera como un nivel de fricción adecuado y suficiente, sin embargo en la literatura Mexicana no se ha considerado

el nivel del TDPA que es uno de los factores más importantes dentro de las proyecciones de las carreteras.

2.4 Adherencia

El tema de la adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado es complejo, en el cual existen un sin número de variables que pueden afectar este proceso. La adherencia se define como la capacidad de un ligante asfáltico para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento por el efecto del agua, el tránsito y/o los cambios bruscos de temperatura. Con respecto a la durabilidad es un tema crítico tanto en ambientes fríos y calientes, actualmente ha sido tema de numerosos análisis enfocados hacia solucionar o disminuir los deterioros originados en los pavimentos provocado por este fenómeno.

Según, (Botasso, *et al.* 2005) han encontrado que tal efecto provoca desprendimientos de agregado grueso en la superficie de rodadura. Por tanto es necesario utilizar productos conocidos como “Aditivos mejoradores de adherencia” que al ser productos (tenso-activos) incorporados al asfalto, mejoran la adherencia entre el asfalto y los agregados utilizados

El fenómeno de desprendimiento de agregado, implica estudiar el fenómeno por medio de ensayos y metodologías que en principio, evidencien los problemas ocasionados por una inadecuada adherencia entre agregado y ligante asfáltico. Así como la implementación de diferentes soluciones que mejoren esta propiedad

2.4.1 Adherencia: importancia e implicaciones

Como se mencionó anteriormente, esta característica es importante dentro del comportamiento de las carpetas asfálticas, porque gracias ella, la estructura de capa de rodadura se mantiene estable, es decir, no sufre de degradación alguna, gracias a las fuerzas de adherencia que posee el asfalto con el agregado, sin

importar factores ambientales que debiliten o degraden esta característica. Sin embargo, en algunas ocasiones se presentan algunos inconvenientes, principalmente por la incompatibilidad entre ellos, es decir, existe una mala adherencia entre el asfalto y el agregado, ocasionando rápidamente el desprendimiento de agregado en la carretera al poco tiempo de ser abierta hacia los usuarios, actualmente es considerada como un deterioro importante, que no debe pasar por desapercibido.

Sin embargo con base a la literatura consultada, se ha argumentado que en el momento que aparece cualquier deterioro sea cual sea su índole, el desencadenamiento de otros se potencializa exponencialmente, porque en ese momento ha iniciado la fase de degradación primaria del pavimento. Por un lado es necesario erradicar este problema y por el otro buscar la manera de hacerlo, y para ello se pueden utilizar aditivos promotores de adherencia a bajas concentraciones que ayuden a maximizar esta propiedad.

Con respecto a esta característica (falta de adherencia) dentro de la capa de rodadura, (Li et al., 2014) han comentado que la mala adherencia entre el agredo se debe principalmente por la mala afinidad provocada principalmente por el óxido de silicio o presencia de silicio en los agregados. De la misma similar, (Curtis *et al.*, 2010), han encontrado y atribuido que la falta adherencia entre el asfalto y el agregado, se debe a la gracias a una inadecuada adherencia entre ellos. No obstante, han propuesto una solución al respecto, mediante la utilización de aditivos promotores de adherencia que mitiguen el problema de desprendimiento de agregado.

Además, han comentado que la adecuada selección del aditivo, así como la proporción, garantizan un mejor desempeño comportamiento a los largo del tiempo. Sin embargo, gracias a las características que posee el agregado (escoria) provoca cierta incompatibilidad con el asfalto, ocasionada principalmente por la composición de los elementos presentes en matriz mineralógica. Por esta razón, el

buscar y utilizar diferentes productos promotores de adherencia a bajas concentraciones, se llevó a cabo para mitigar o reducir tal fenómeno, y con base a al análisis de los resultados obtenidos, se decidió que aditivo así como su concentración, debe aplicarse a la escoria de alto horno para que no existan problemas de desprendimiento de agregado, una vez incorporada en la carpeta asfáltica.

De la misma manera, que la adherencia, la fricción en las carpetas asfálticas es un parámetro imprescindible para la seguridad, porque la accidentalidad en las carreteras es un problema de salud pública a nivel internacional y México no es la excepción. En primer lugar, las siniestralidades dejan fatalidades, y en segundo pérdidas materiales así como los heridos, a los que se deben brindar atención médica inmediata, de calidad, y especializada dependiendo del grado de severidad. Por otra parte, casos donde es necesario brindar y llevar a cabo un tratamiento de por vida a las personas que sufrieron las lesiones y secuelas, ocasionados por el accidente tras ocurrir esta externalidad. Algunos autores han atribuido que las condiciones de humedad en el pavimento es principalmente factor de accidentes en las carreteras (Hall *et al.*, 2009), sin embargo algunos otros atribuyen que las características friccionantes de las carreteras (Flores *et al.*, 2010).

En otras palabras, la importancia de estos dos aspectos son necesarios para que las condiciones de seguridad de los usuarios en las carreteras no se vea afectada por alguna ausencia de alguno de estos dos, sin embargo para concientizar acerca de problema de salud pública que aqueja al país, así como a las autoridades y concesionarias encargadas de las carreteras, es necesario hacer estudios que revelen las cuantificaciones los costos económicos ocasionados por la falta de fricción en las carreteras. Para ello, organismos como el IRAP, se ha dado a la tarea de cuantificar los costos de accidentes a nivel internacional, con base en dos modelos principal mente donde se toman en cuenta factores económicos, el total de heridos muertes y el costo económico. Así como la generación de

estadísticos para cotejar la problemática de un país con respecto a otro, al considerar tópicos económicos.

2.5 Tipos y uso de Micro-carpetas como alternativa

Capa de rodadura de mezcla asfáltica en caliente: se define como la capa superficial del pavimento que está sometida a las cargas directas de tránsito y expuesta a la acción de los agentes climáticos. La capa de rodadura proporciona una superficie segura, confortable y estética, es por ello que se justifica el uso de asfaltos y agregados de alta calidad. Estas capas de rodadura se construyen en **espesores menores de 4 cm** y se considera que no tienen aporte estructural.

2.6 Capa asfáltica de granulometría abierta (OGFC)

Es una mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal de 12,5 milímetros. Generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad de permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la **fricción de las llantas** con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes, reduce el ruido y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal.

Cabe destacar que la granulometría tiene una gran importancia en las mezclas de **Granulometría Abierta**. Dentro de las cuales se recomienda que el tamaño nominal de la mezcla abierta guarde una relación mínima de 1:3 con respecto al espesor de la capa donde será colocada la mezcla. En este caso 1 corresponde al tamaño nominal y 3 al espesor.

Además es importante considerar lo siguiente: durante el proceso de diseño de la mezcla se debe hacer la selección de la granulometría de acuerdo al espesor de la capa donde se va a colocar la mezcla cumpliendo con los límites granulométricos especificados.

2.7 SMA

Mezcla asfáltica en caliente (Stone Mastic Asphalt - SMA): Es la combinación de cemento asfáltico, agregados de granulometría discontinua con gran cantidad de gruesos, poco tamaño medio y gran cantidad de finos, con fibras y eventualmente aditivos. Este tipo de mezclas se caracterizan por ser uniformes y homogéneas con tamaño nominal entre 12,5 mm y 9,5 mm, se utilizan normalmente para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas estructurales de carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura, su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional.

Al igual que la anterior la granulometría en las mezclas **SMA** tiene una gran importancia. Se recomienda que el tamaño nominal (TN) de la mezcla SMA guarde una relación mínima de aproximadamente 1:3 con respecto al espesor de la capa donde será colocada la mezcla. Es importante considerar que durante el proceso de diseño de la mezcla deberá hacerse una selección de la granulometría óptima que este dentro de los límites granulométricos especificados.

Para la selección de la granulometría óptima, se suele iniciar con tres granulometrías de ensayo, una cercana al límite superior, otra cercana al límite inferior y una más entre ambos límites. Con cada una de estas granulometrías se realizan series de probetas (al menos 2 probetas por serie), con un contenido de asfalto del 6,5% respecto al peso de los agregados (aunque este contenido inicial puede variar en función de la densidad de los agregados utilizados) y un contenido de agente estabilizador, normalmente es de 0,3% sobre la masa de la mezcla.

2.8 CASAA Capa asfáltica superficial altamente adherida (CASAA)

Consiste en una membrana homogénea de emulsión asfáltica polimerizada, como elemento para garantizar la impermeabilización y la alta adherencia, seguida de una capa delgada de concreto asfáltico polimerizado de granulometría discontinua escalonada con alta fricción interna y resistente a deformaciones, que provee una excelente macrotextura y capacidad drenante, para proporcionar una fricción adecuada y reducir el fenómeno de acuaplaneo; reduce el nivel del ruido y pulverización de agua durante la lluvia, es una aplicación rápida y de pronta apertura al tránsito, tendida con equipo sincronizado, no es susceptible a delaminaciones. Proporciona una apariencia estética y uniforme, de alta seguridad y confort para el usuario, con alto nivel de servicio y durabilidad.

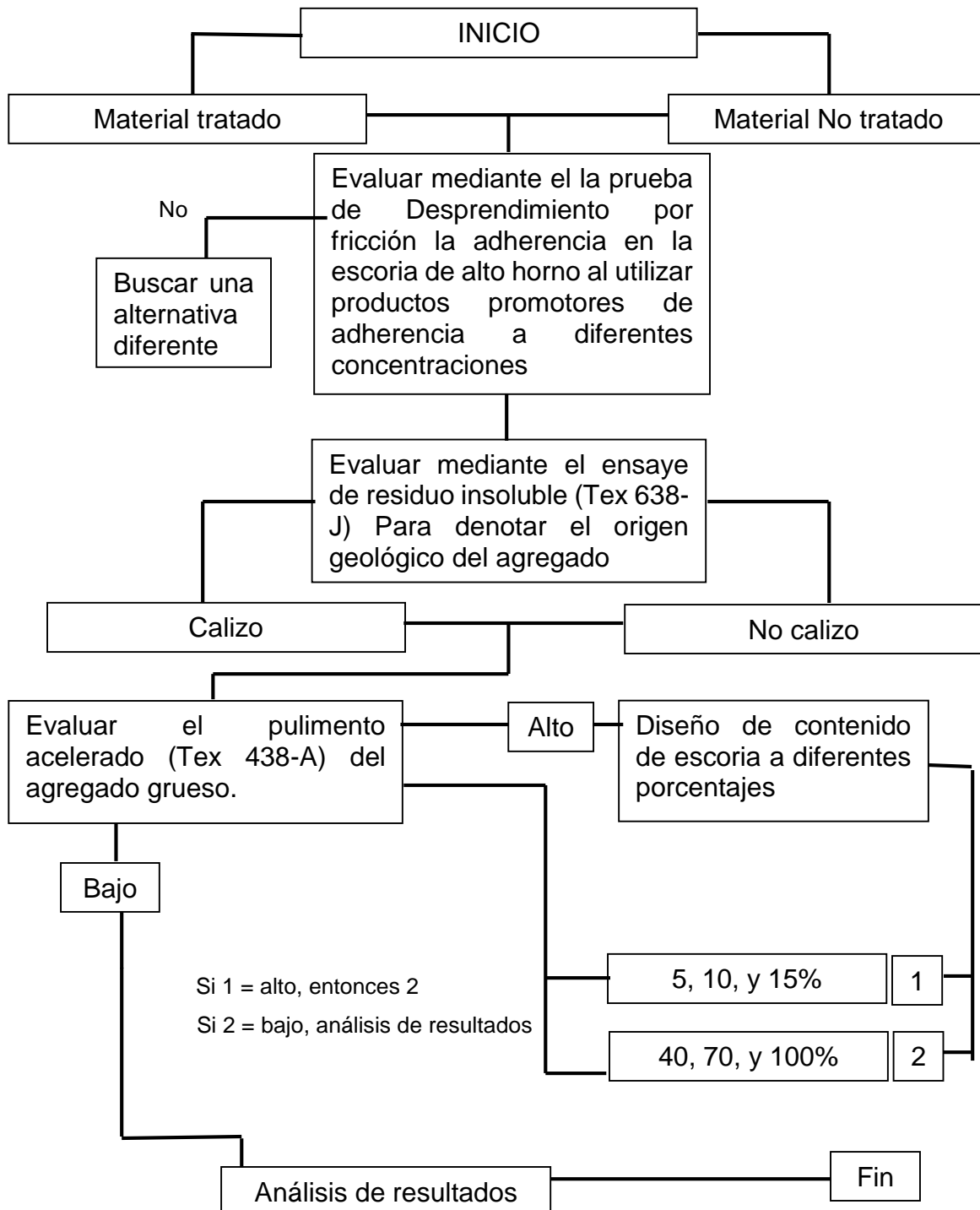
La granulometría del agregado para la mezcla tipo **CASAA** deberá satisfacer lo que se especifica. Es recomendable que el tamaño nominal de la mezcla guarde una relación mínima de 1:2.5 con relación al espesor de la capa. En este caso 1 corresponde al tamaño máximo nominal y 2.5 al espesor. Con base a las características de cada una de los tipos de capas de rodadura, el tipo más adecuado para esta investigación es la Open Grade, que es de granulometría abierta. Este tipo de granulometría que presenta se adecua más a las propiedades de clima de las zonas donde se pretende implementar, ya que una de las características primordiales es que desalojan el agua casi de manera inmediata, y sobre todo por poseer grandes cantidades de vacíos, el ruido de los vehículos se disipa por este mismo efecto, haciendo que el tránsito por este tipo de texturas de pavimento sea silenciosos.

3 METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos particulares de este proyecto de investigación se desarrollará la siguiente metodología:

- Se determinó el residuo insoluble de los dos agregados calizos (Yucatán y Monterrey) a utilizar en el ensayo (Tex 638-J) para identificar su origen geológico.
- Se evaluó mediante el ensayo de desprendimiento por fricción (AMAAC RA 08/2010) la afinidad que existe entre asfalto y escoria de alto horno para un asfalto convencional y uno aditivado con agente promotor de adherencia.
- Mediante los ensayos de Microdeval para agregado grueso y fino (D6928-08 y D7428-08) se evaluaron los agregados a discusión.
- Mediante el ensayo de pulimento acelerado (Tex 438-A) se clasificó los agregados de acuerdo a su susceptibilidad al pulido y los resultados serán la base para establecer la metodología para la dosificación de escoria de alto horno.
- Se desarrolló una metodología de dosificación de escoria de alto horno con base en los resultados obtenidos en las etapas anteriores.

3.1 Desarrollo del Experimento



3.2 Introducción

De manera general, los estudios que se realizaron en la primera fase experimental dentro de esta investigación fueron la selección de los agregados calizos. Uno de ellos es procedente de Nuevo León y el segundo de Nuevo León. Por su parte, de igual manera se escogieron dos tipos de escorias. La primera de ellas es proveniente de San Luis Potosí y la segunda de Nuevo León. Posteriormente se aditivó dos asfaltos a bajas concentraciones y con base a los mejores resultados respecto a la adherencia, se escogió la proporción y tipo de aditivo para llevarlo a cabo en la aplicación en la escoria de alto horno.

Posteriormente se realizaron las pruebas de residuo insoluble aplicados sólo a los agregados calizos, para encontrar el valor de carbonatos solubles dentro de su estructura mineralógica. Posteriormente se implementó la prueba de Micro-Deval, aplicada tanto para la fracción gruesa y fina de los dos calizos y escorias.

Para finalizar se llevó a cabo la última fase experimental mediante la prueba de pulimento acelerado, en la cual se encontró el BPN-9 (Valor de pulido residual pasadas nueve horas de pulido, medido con el péndulo inglés) para cada una de los porcentajes incluidos en el desarrollo del experimento. Sin embargo es necesario resaltar que los valores de pulido fueron obtenidos por cada hora, con el objetivo de visualizar la evolución del pulido en tiempo.

3.3 Pruebas realizadas con base a la experimento

De acuerdo al desarrollo del experimento a continuación se hace referencia a las diferentes pruebas que se realizarán para este proyecto de investigación:

- Desprendimiento por Fricción (Recomendación AMAAC RA 08/2010).
- Prueba de Residuo Insoluble (Texas Department of Transportation (2006), Tex-612-J Acid Insoluble Residue for Fine Aggregate, 600-J Chemical Test Procedure).
- Prueba de Microdeval para agregado grueso (ASTM D 7428-08).
- Prueba de Microdeval para agregado fino (ASTM D 6928-08).

- Prueba de Pulimento Acelerado (Texas Department of Transportation (2005), Tex-438-A Accelerated Polish Test for Coarse Aggregate, 400-A Concrete Test Procedure).

3.3.1 Selección de agregados y caracterización de propiedades físicas

En primer lugar, en el presente trabajo de investigación se ha hablado acerca de la importancia de los factores de fricción dentro de las carreteras, así como sus valores recomendados. Además, los problemas ocasionados por la disminución de esta característica, atribuida principalmente en lugares donde la falta de fricción es una constante, originadas por la utilización de agregados de tipo calizo. Con el objetivo de comparar resultados de diferentes partes de la república, se decidió utilizar dos tipos de agregados de distintas características, es decir, lugares donde proliferan agregados de tipo calizo, el primero de ellos proviene del Estado de Querétaro, el segundo del Estado de Nuevo León y otro del Estado de Yucatán. Cabe aclarar que el agregado de Querétaro se utilizó sólo para las pruebas de desprendimiento por fricción, como se comenta más adelante en el apartado de “aditivado y desprendimiento por fricción”. Su caracterización básicamente fue obtener parámetros como peso volumétrico, y absorción

Además, con respecto a la utilización de materiales como la escoria de alto horno, y gracias a sus propiedades la convierten en un material apropiado para afrontar tal efecto, de la misma manera que el calizo se decidió utilizar dos tipos de escoria de alto horno cuya procedencia son del Estado de San Luis Potosí y Nuevo León.

3.3.2 Aditivado de asfalto

Con el objetivo de contrarrestar el desprendimiento de agregado en la carpeta que sufre la escoria de alto horno, se decidió utilizar dos tipos de asfalto, uno procede del estado de Querétaro y el segundo del Estado de Yucatán, así como dos aditivos promotores de adherencia, AS-100 y AS-500. Cabe decir que el primer asfalto (Querétaro) se aditivó con ambos productos al 0.5, 1 y 1.5%

respectivamente, con el objetivo de obtener los mejores resultados de adherencia para posteriormente aplicarlo a la escoria de alto horno, por su parte el segundo asfalto (Yucatán) se aditivó respecto al porcentaje y tipo de aditivo que presentaron los mejores resultados del primero. En resumen, se utilizó agregado de la región de Querétaro para obtener el porcentaje y tipo de aditivo que cumpliera la mejor adherencia entre los agregados.

3.3.3 Prueba de Desprendimiento por Fricción

En este ensayo se realizó el procedimiento de prueba para determinar el desprendimiento por fricción de la película de asfalto que envuelve el agregado grueso utilizado en una mezcla asfáltica en caliente. La prueba consistió en someter a la acción del agua y a varios ciclos de agitado dentro de un frasco de vidrio, una muestra de mezcla asfáltica elaborada con agregado grueso, para evaluar visualmente el estado físico una vez concluido este tratamiento. Por medio de este ensayo se puede determinar la conveniencia de la utilización de aditivos promotores de adherencia y la dosificación de los mismos con base en pruebas comparativas. En total se realizaron 160 muestras de desprendimiento para hacer el análisis de cual aditivo promotor de adherencia presentaba mejores resultados.

Procedimiento general

El proceso de preparación de las muestras para esta prueba consta de tres pasos. En primer lugar, se debe de obtener el agregado grueso necesario para la prueba el cual se debe lavar y secar completamente. En segundo lugar se debe calentar el asfalto y el agregado para mezclarlos y obtener la muestra que se va a someter al ensayo. Por último se somete al agitado durante tres horas consecutivas y se evalúa.

Se debe obtener una porción de agregado que pasa el tamiz de 3/8" y se retiene en el de 1/4", de donde se obtienen dos muestras de 50 gr cada una, gracias a que el resultado es el promedio aritmético de resultado de estas dos porciones.

Posteriormente se calienta el asfalto y el agregado a 135° C, y una vez alcanzada esta temperatura, se añade 2.5 gr de asfalto a los 50 gr de la muestra y se envuelve el agregado por completo, dentro de una fuente de calor controlable, de lo contrario, se debe de hacer en pequeños lapsos de tiempo, evitando que la muestra esté expuesta al fuego directamente. Culminado el cubrimiento, se deja reposar la mezcla y se introduce en los frascos de vidrio con 200 ml de agua (potable o destilada) a 25 °C por un lapso de 15 h. Concluido este lapso de tiempo, se desaloja el agua de los frascos y nuevamente se adicionan 200 ml de agua para someterse en agitación consecutivas por un lapso de 3 h inmediatamente. Terminado el agitado, la muestra se deja secar a temperatura ambiente sin exposición al sol y se evalúa el desprendimiento dependiendo del porcentaje de desprendimiento que presente.

3.3.4 Prueba de Residuo Insoluble

Con el objetivo de caracterizar los materiales calizos y obtener el valor de residuo insoluble, se utilizó la prueba de Residuo Insoluble en ácido, para conocer el porcentaje de carbonatos solubles dentro de su matriz mineralógica.

Este ensayo proporcionó el porcentaje de material sin carbonatos (residuo insoluble) en agregados calizos y sirve para identificar de manera rápida, el contenido de carbonatos dentro de los agregados que serán utilizados en las carpetas asfálticas, en particular esta prueba puede ser utilizada en todo tipo de agregado sea basalto, etc.

Este método de prueba tiene bajo designación ASTM D 3042 y consiste en colocar en un recipiente una muestra representativa de 500 gr. de agregado que pasa la malla de 3/8"; previamente lavado y secado, se agrega 1000 ml de ácido clorhídrico de denominación 6N (6 moles) para que el agregado reaccione; una vez que la reacción ha terminado, se adiciona 300 ml de ácido clorhídrico más para asegurar que la reacción ha terminado completamente, una vez que esta ha

concluido, el residuo de agregado se lava y seca en el horno, luego se determina su masa. El residuo insoluble en ácido se expresa como la relación entre la masa del residuo de agregado y la masa inicial, en porcentaje. Este ensayo se recomienda como una prueba preliminar para evaluar las propiedades de desgaste-pulido del agregado.

Es importante señalar que existen variantes entre el método de prueba ASTM D 3042 y los métodos de prueba de los diferentes Departamentos de Transporte de los Estados Unidos. Estas variantes se refieren a la cantidad de muestra de agregado, tipo y cantidad de solución (ácido clorhídrico concentrado o solución de ácido clorhídrico), y la manera de reportar el resultado (masa del residuo o pérdida de masa -solubilidad del material).

3.3.5 Microdeval para arenas y gravas

Con respecto a las pruebas de abrasión que deben contener los agregados respecto al tema de fricción, en el presente trabajo de investigación se desarrolló la prueba de Microdeval aplicada tanto para la fracción gruesa y fina de los agregados, para la escoria de alto horno y calizas.

3.3.6 Prueba de Pulimento Acelerado (TEX 438-A)

Al igual que las pruebas de abrasión, la prueba de pulimento acelerado es utilizada para evaluar sus características respecto al tema de fricción. Inicialmente se elaboraron las muestras de los agregados calizos, cuyo objetivo fue de obtener valores de referencia, así mismo, el evaluar el impacto que pudiera tener la escoria de alto horno, se elaboraron las mezclas de escoria en 5, 10 y 15% respecto al **volumen de la mezcla**, contemplándose los dos tipos de escoria, es decir, por cada calizo utilizado, se mezclaron dos tipos de escorias a los porcentajes respectivos. En la segunda fase experimental, se elaboraron porcentajes de 40, 70 y 100% de escoria respectivamente. A continuación se presenta de manera general el procedimiento que se llevó a cabo para la realización de esta prueba.

El ensayo de pulimento acelerado es utilizado para clasificar a los agregados de acuerdo a su susceptibilidad al pulido. El ensayo consta de tres pasos principales: la preparación de los especímenes, el pulido de los especímenes en la máquina de pulimento acelerado y el ensaye de fricción con el péndulo británico.

El ensayo de pulimento acelerado, de acuerdo con la norma Tex 438-A, consiste en elaborar pastillas con agregado que pasa la malla de 3/8" y se retiene en la malla de 1/4". Se elaboran cuatro pastillas por cada tipo de agregado a evaluar y dos con agregado de referencia, un ensayo requiere la fabricación de catorce pastillas; es decir, se pueden evaluar tres diferentes agregados y el de referencia. El agregado se coloca en moldes, previamente cubiertos con un agente desmoldante (gel lubricante a base de agua), y los huecos que quedan entre las partículas de agregado, de manera opcional son llenados con arena de Ottawa, que pase la malla del No. 20 y se retenga en la malla No. 30, hasta una profundidad entre 6 y 12 mm (1/4 y 1/2 pulgada). Los moldes con agregado son llenados con una resina epoxica y se dejan fraguar por, aproximadamente, cuatro horas. Una vez que la resina fragua las pastillas son retiradas del molde, se cepillan y lavan con agua para retirar los residuos de arena, con una lija se talla la parte trasera del espécimen para ajustarlos y que entren en la rueda metálica.

Se enciende la máquina, se alimenta de abrasivo de carburo de silicio, tamaño No. 150, en una cantidad de 6 ± 2 g por minuto y un flujo de agua de 50 a 75 ml por minuto, y se pulen los especímenes durante 9 horas continuas con el neumático liso de hule macizo. Transcurridas las nueve horas los especímenes son retirados de la rueda metálica y lavados para eliminar el abrasivo. Se sumergen en agua por lo menos una hora. Después se determina el valor de pulido de la siguiente manera, se coloca un espécimen en el péndulo británico, con el lado marcado hacia atrás, con un aspersor se aplica suficiente agua para cubrirlo y se realiza el deslizamiento; se continúan realizando deslizamientos hasta que se obtengan cuatro lecturas consecutivas iguales y el promedio de éstas se registra como el valor de pulido residual del agregado (Tex 438-A, Abril 2006).

4 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

De manera general en este capítulo, se exhiben los resultados de toda la fase experimental. En primer lugar, es necesario caracterizar de manera física los agregados, para conocer su densidad así como su absorción, posteriormente por medio de la prueba de residuo insoluble, se caracterizaron principalmente los agregados calizos para conocer el porcentaje de carbonatos solubles dentro de su estructura. Así mismo, por la necesidad de conocer la adherencia que poseen los agregados con respecto al asfalto se realizaron pruebas de desprendimiento por fricción a la totalidad de los agregados, al utilizar diferentes asfaltos aditivados con dos productos promotores de adherencia. De la misma manera, se aplicó la prueba de Microdeval aplicada a la fracción gruesa y fina de los agregados utilizados, por último, el pulimento acelerado donde se realizaron mezclas de agregado calizo con escoria de alto horno a diferentes porcentajes en volumen.

Tabla 12.- Propiedades físicas de los agregados

Propiedades físicas de los agregados		
Tipo de prueba	% de absorción	Densidad (ton/m ³)
Agregado Queretaro	1.8	2.7
Agregado Calizo Monterrey	1.2	2.4
Agregado Calizo Yucatán	3.6	2.4
Escoria San Luis Potosí	2.8	3.3
Escoria Monterrey	3.2	3

De acuerdo con la Tabla 12 de las propiedades de las escorias, en primer lugar tal como se mencionó la densidad de las dos, superan las 3 ton/m³, así mismo el parámetro de absorción es similar para ambas con respecto a los calizos, las densidades de ambos son iguales, en cambio respecto a la absorción, el agregado de Yucatán presenta mayor porcentaje que el de Nuevo León.

4.1 Mineralogía de escorias

4.1.1 Escoria Tipo I, (Nuevo León)

Considerada como un requisito tomado en cuenta para temas de fricción, fue necesario conocer principalmente la mineralogía que contienen ambas escorias, por medio de un barrido de espectrofotómetro de masas, a continuación se muestran los principales resultados de la escoria Tipo I.

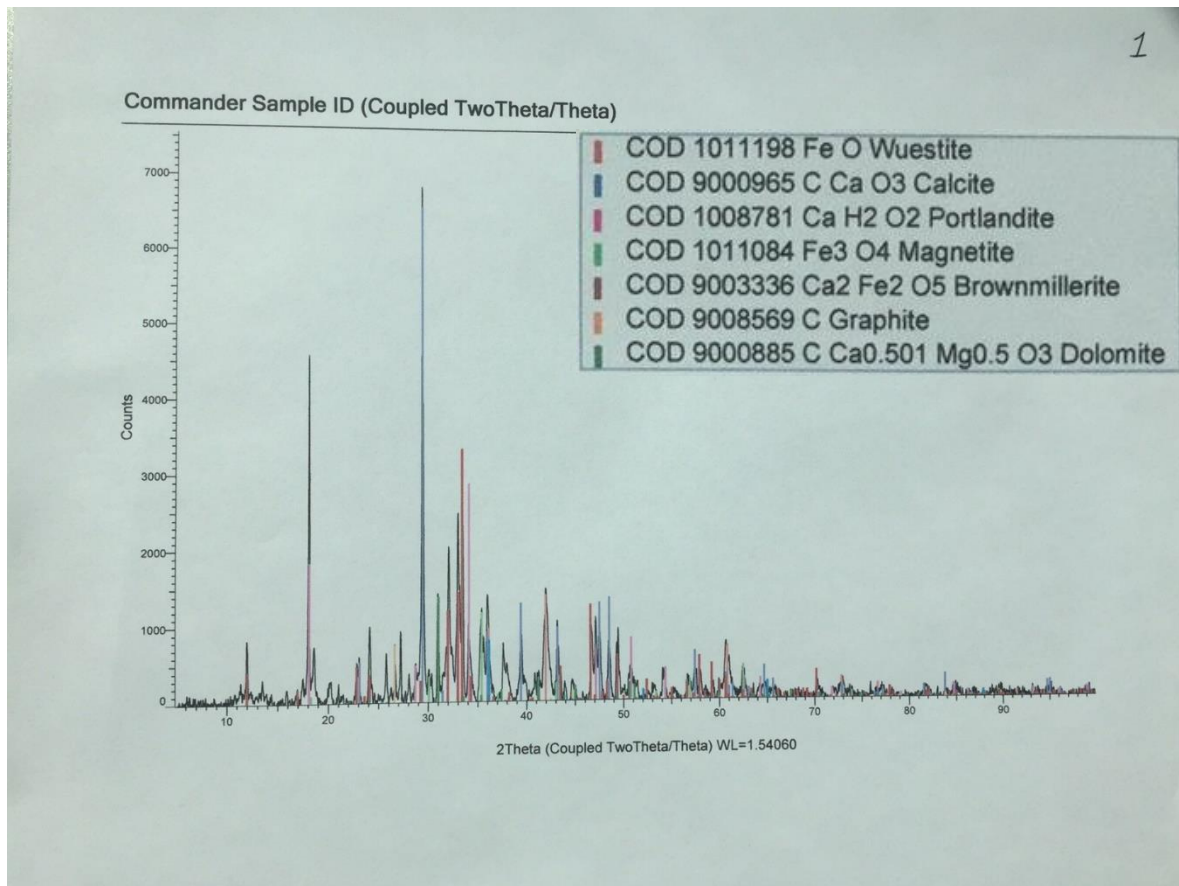


Figura 8.- Mineralogía de la escoria Tipo I (NuevoLeón)

De acuerdo a la Figura 8, los resultados muestran claramente que existe gran cantidad de óxido de calcio dentro de su composición principalmente tal como se argumentó anteriormente en la fundamentación teórica, en segundo lugar, el óxido de hierro, en cambio, la magnetita y el grafito se encuentran en menor porcentaje.

4.1.2 Escoria Tipo II, (San Luis Potosí)

Al igual que los primeros resultados de la escoria Tipo I. La se ilustra por medio de un barrido de espectrofotómetro de masas el contenido de los principales compuestos que forman la mineralogía de la escoria tipo II.

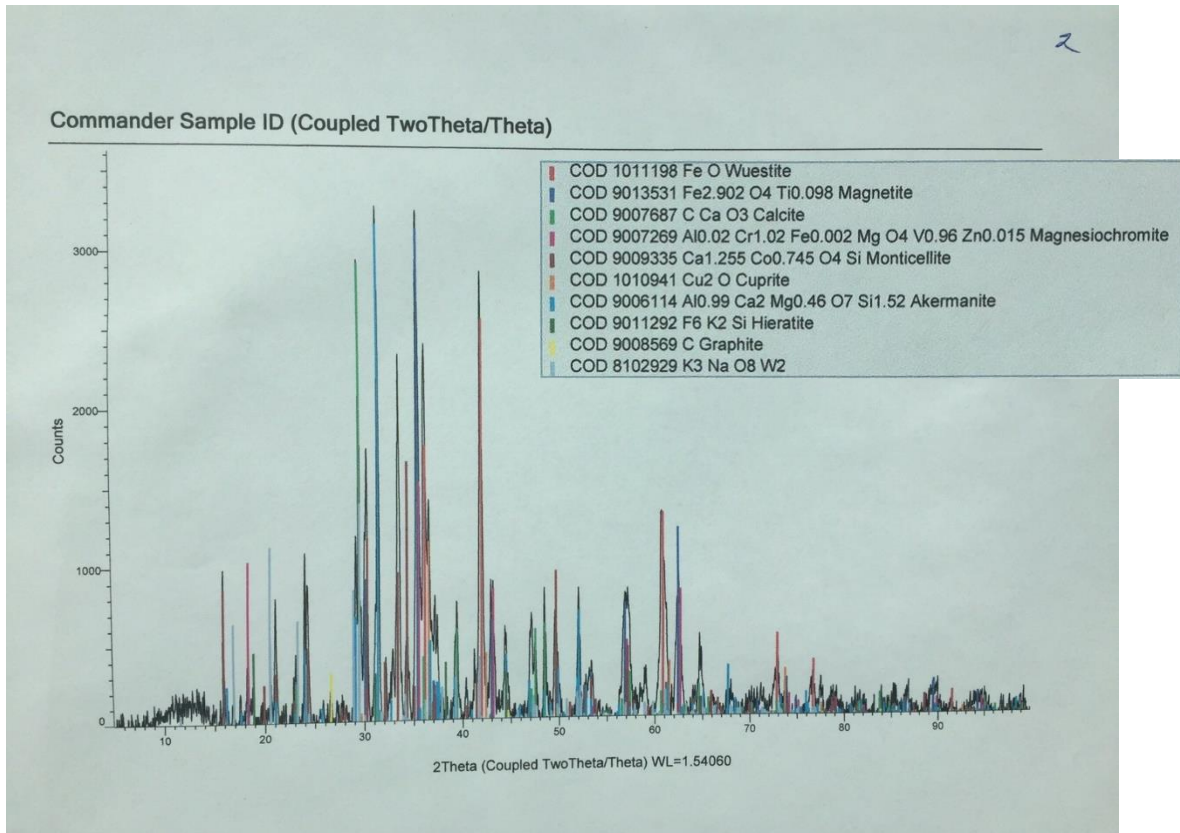


Figura 9.- Mineralogía de la escoria Tipo II (San Luis Potosí)

Al igual que la escoria Tipo I, esta escoria (Tipo II) contiene gran cantidad de óxido de hierro, magnetita, calcita entre otros compuestos, de estos resultados se puede observar que el proceso de fabricación del acero es diferente, y gracias a esto las propiedades de estos agregados cambian radicalmente al no coincidir sus contenidos así como tipo de compuestos.

En la Tabla 13 se muestra los contenidos de los principales compuestos de la escoria Tipo I. Sin embargo la empresa mostró en un estudio que realizó para conocer sus principales elementos

Tabla 13.- Resultados de la escoria Tipo 1 (resultados de la empresa)

FECHA DE CARGA EN PLANTA	TOLVAS	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%P ₂ O ₅	%S	%MnO	%FeO	%TiO ₂	%Fe ₂ O ₃
02/05/2015	7	11.64	4.80	22.06	6.58	0.33	0.05	7.92	35.12	0.79	38.98
04/05/2015	4	11.41	5.04	21.29	6.45	0.32	0.06	7.27	34.78	0.79	38.61
05/05/2015	6	11.51	5.11	22.06	6.73	0.31	0.05	7.52	33.52	0.80	37.21
06/05/2015	6	11.65	5.13	21.69	7.48	0.31	0.06	7.25	35.75	0.85	39.68
07/05/2015	5	11.40	5.41	23.19	6.05	0.33	0.06	7.21	35.57	0.84	39.49
09/05/2015	5	11.56	4.99	21.48	6.42	0.33	0.06	7.39	35.66	0.81	39.58
11/05/2015	5	11.77	5.18	23.78	6.60	0.32	0.07	6.93	33.96	0.79	37.70
12/05/2015	4	11.11	5.08	22.32	6.53	0.31	0.06	6.82	34.78	0.79	38.61
13/05/2015	4	11.50	5.11	21.82	6.91	0.33	0.06	7.06	36.13	0.80	40.11
14/05/2015	6	11.47	4.68	21.66	6.39	0.34	0.05	7.23	35.45	0.81	39.34

En la industria cementera, la escoria de alto horno sirve como un elemento más en la producción del cemento portland, sin embargo especificaciones demuestran que el contenido de óxido de hierro (Fe) no debe sobrepasar de 35% porque no es recomendable porque posee elevados porcentajes de reactividad al considerarlo como fundente, por lo que este tipo de empresas cuidan principalmente este parámetro. En segundo lugar, este compuesto proporciona a la escoria su rugosidad, gracias a que el óxido de hierro es poroso.

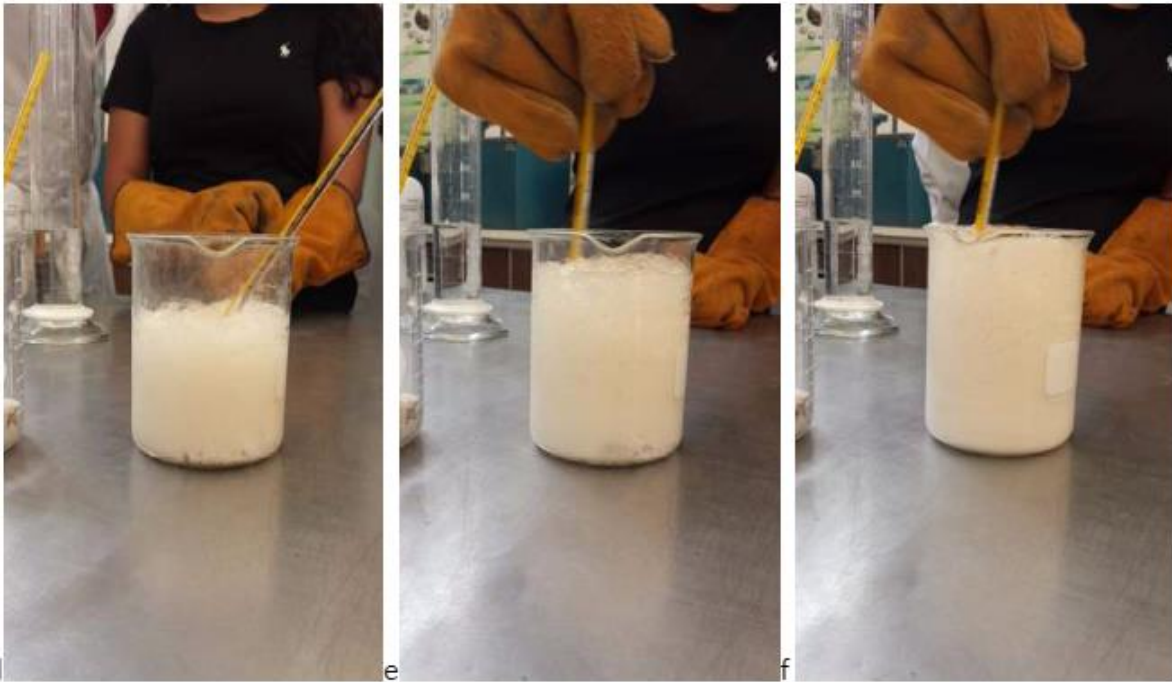
Respecto al proceso de cuantificación de los elementos presentes en la escoria se llevó a cabo por medio de la vía húmeda basado en la norma mexicana (NMX-B438-438-1970) "Método de análisis químico para la determinación de fierro total de minerales de fierro por educación con cloruro estaño y titulación con bicromato de potasio".

4.2 Residuo insoluble: Agregados Calizos

Antes de comenzar la explicación de los resultados es necesario explicar la finalidad y la reflexión de los valores que se suelen obtener mediante esta prueba. En primer lugar, esta prueba fue utilizada para identificar agregados que presentan carbonatos dentro de su matriz mineralógica de manera rápida, cuyos valores dependen de la solubilidad de estos. Por su parte los materiales pétreos que presentan valores bajos de residuo insoluble tienen en si estructura mineralógica una gran cantidad de carbonatos, en consecuencia, estos materiales suelen tener problemas de pulimento, en cambio, existen otros que el valor de residuo insoluble es el 100%, es decir, no sufren degradación por medio de esta prueba, tal es el caso de los agregados de origen ígneo, por ejemplo el basalto y algunas reolitas, etc.

En seguida se muestra el procedimiento general llevado a cabo mediante la prueba de residuo insoluble.





Los resultados obtenidos durante la prueba se muestran a continuación:

Tabla 14.- Resultados de Residuo insoluble para los agregados calizos

Prueba de residuo insoluble	
Agregado	Valor
Calizo Nuevo León	10.00%
Calizo Yucatán	8.00%

De acuerdo a la (Tabla 14) es fácil observar que los resultados de residuo insoluble de ambos calizos son bajos, por lo que estos agregados no pueden ser utilizados en su totalidad en el diseño y fabricación de carpetas asfálticas en caliente, porque algunas especificaciones señalan que un agregado calizo puede ser utilizado en las carpetas asfálticas siempre y cuando presente un valor mínimo de residuo insoluble mínimo del 50%. Sin embargo existen recomendaciones que

se hacen al respecto, principalmente de buscar la combinación de agregado calizo con otro de características diferentes que ayuden a mantener las condiciones de fricción adecuadas dentro de las carreteras.

4.3 Desprendimiento por fricción

Para conocer el porcentaje del desprendimiento de la película de asfalto con el agregado, y así mismo, conocer la adherencia que poseen, existen rangos y procedimientos descritos en la metodología “Recomendación AMAAC RA 08/2010”. Por ejemplo, valores menores al 10% respecto a la pérdida de película de asfalto, se considera que los materiales poseen *buena adherencia*, en cambio, valores que oscilan entre el 10% al 25% poseen una *adherencia intermedia*, por último valores *mayores* al 25%, los materiales poseen una baja adherencia.

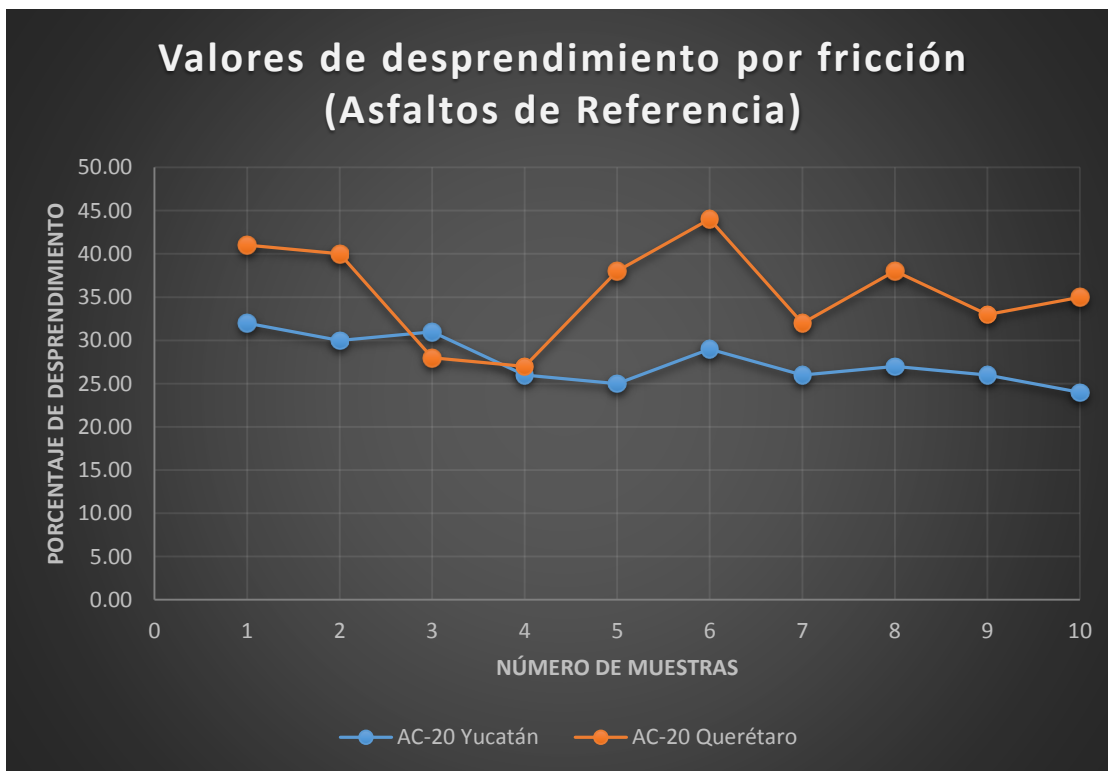
4.3.1 Desprendimiento por fricción: Aditivo AS-100

De acuerdo a los resultados mostrados en la (Tabla 16), las variables se agrupan por cada columna, cuyo valor es el porcentaje de desprendimiento de la película de asfalto en la muestra de agregado. Ahora bien, la estructura de esta tabla se conforma por 6 (seis) columnas principales, de las cuales, las primeras dos son los resultados de asfaltos convencionales (Querétaro y Yucatán) que se utilizaron. Evidentemente son valores de referencia, cuyo objetivo principal es verificar si el aditivado del asfalto con productos promotores de adherencia cumplió su función. De acuerdo a los resultados de los asfaltos convencionales, poseen baja adherencia respecto a la evaluación de la metodología, sin embargo nuevamente se reafirma que son utilizados como valores de referencia. En seguida se muestra la tabla así como la gráfica de los valores obtenidos.

Tabla 15.- Valores de desprendimiento por fricción de los asfaltos convencionales

VALORES DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN		
Asfaltos	AC-20 Yucatán	AC-20 Querétaro
No. De pruebas		
1	32.00%	41.00%
2	30.00%	40.00%
3	31.00%	28.00%
4	26.00%	27.00%
5	25.00%	38.00%
6	29.00%	44.00%
7	26.00%	32.00%
8	27.00%	38.00%
9	26.00%	33.00%
10	24.00%	35.00%
PROMEDIOS	28%	36%

Gráfica 6.- Valores de desprendimiento por fricción de los asfaltos convencionales



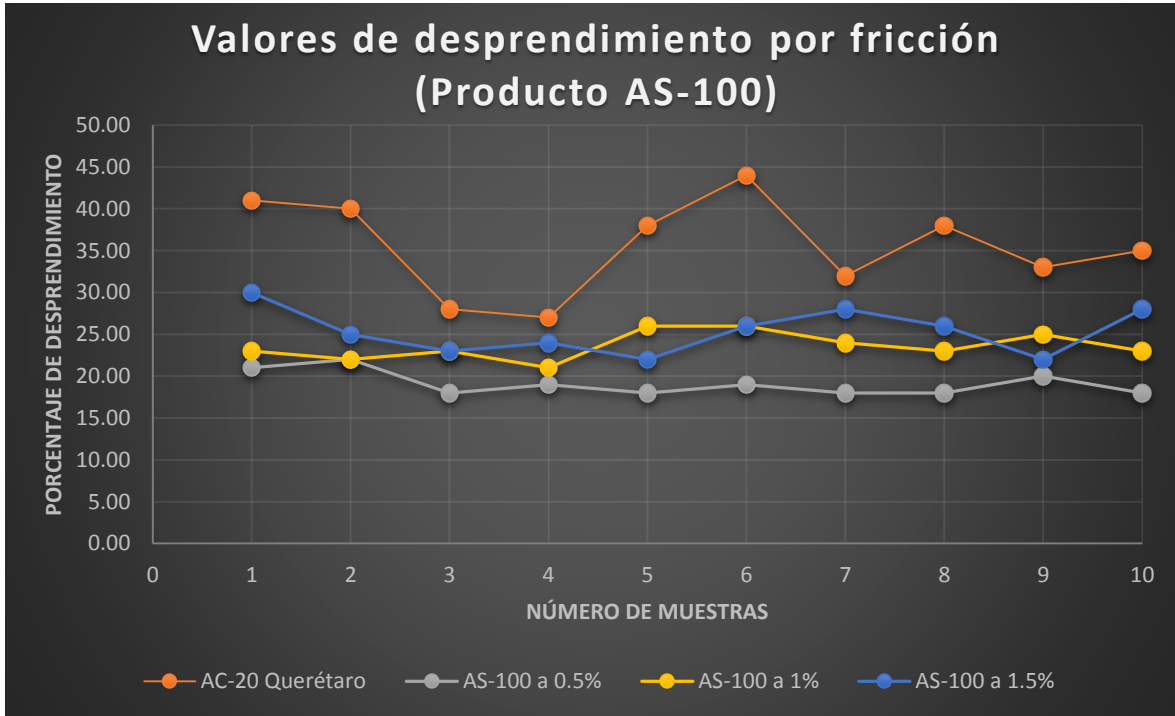
Así mismo la Tabla 16 de izquierda a derecha, se ilustran los resultados de la aplicación del aditivo AS-100, donde cada columna son las concentraciones respectivas (0.5, 1 y 1.5%) en peso del asfalto. Con respecto a los resultados obtenidos, el primer porcentaje de aditivo, presentó una reducción de valor de la pérdida de película de asfalto comparado con el asfalto convencional, al disminuir del desprendimiento hasta en un 20%. Así mismo al realizar la comparación de los resultados de las concentraciones de 1 y 1.5%, el desprendimiento es mayor comparado con el primer porcentaje, esto es de esperarse, porque es sabido que la adición de aditivos promotores de adherencia en condiciones óptimas es benéfico pero en exceso es perjudicial.

Tabla 16.- Valores de desprendimiento por fricción del AC-20 vs AS-100

VALORES DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN					
Asfaltos	AC-20 Yucatán	AC-20 Querétaro	AC-20 Querétaro con AS-100		
No. De pruebas			0.5%	1%	1.5%
1	32.00%	41.00%	21.00%	23.00%	30.00%
2	30.00%	40.00%	22.00%	22.00%	25.00%
3	31.00%	28.00%	18.00%	23.00%	23.00%
4	26.00%	27.00%	19.00%	21.00%	24.00%
5	25.00%	38.00%	18.00%	26.00%	22.00%
6	29.00%	44.00%	19.00%	26.00%	26.00%
7	26.00%	32.00%	18.00%	24.00%	28.00%
8	27.00%	38.00%	18.00%	23.00%	26.00%
9	26.00%	33.00%	20.00%	25.00%	22.00%
10	24.00%	35.00%	18.00%	23.00%	28.00%
PROMEDIOS	28%	36%	19%	24%	25%

Para comprender mejor el funcionamiento de los aditivos promotores de adherencia, es necesario visualizar los resultados mediante gráficos, para ello se muestra la Gráfica 7 donde se muestra los resultados de cada una de las variables así como su tendencia. Nuevamente se reafirma que la concentración del 0.5% del aditivo AS-100 es la que mejores resultados reporta.

Gráfica 7.- Valores de desprendimiento por fricción del AC-20 vs AS-100



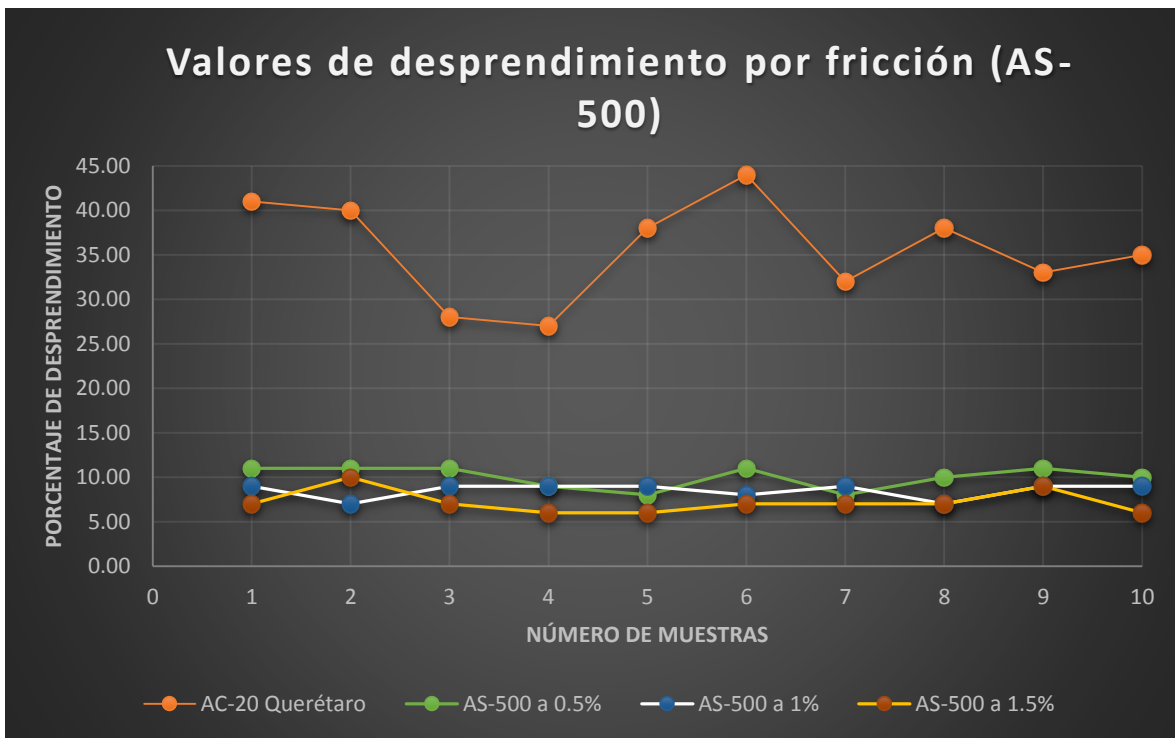
4.3.2 Desprendimiento por Fricción: Aditivo AS-500

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 17, las primeras columnas de resultados se tomaron como referencia para observar la influencia del aditivo en el asfalto convencional. Con base a los resultados del asfalto aditivado con el producto AS-500, el desprendimiento de la película de asfalto disminuye gradualmente conforme aumenta la concentración de aditivo, es decir, la concentración de 0.5% mejora el desprendimiento de la película de asfalto hasta un 20% comparado con el asfalto convencional. Ahora bien, la concentración del 1%, muestra un desprendimiento aún menor que la anterior y así sucesivamente hasta llegar al valor de 1.5%, porcentaje que arrojó valores mucho menores que las anteriores. Considerado como la concentración adecuada para aditivar el asfalto y mitigar el problema a discusión.

Tabla 17.- Valores de desprendimiento por fricción del AC-20 vs AS-500

VALORES DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN					
Asfaltos	AC-20 Yucatán	AC-20 Querétaro	AcC-20 Querétaro con AS-500		
No. De pruebas			0.5%	1%	1.5%
1	32.00%	41.00%	11.00%	9.00%	7.00%
2	30.00%	40.00%	11.00%	7.00%	10.00%
3	31.00%	28.00%	16.00%	9.00%	7.00%
4	26.00%	27.00%	9.00%	9.00%	6.00%
5	25.00%	38.00%	8.00%	9.00%	6.00%
6	29.00%	44.00%	11.00%	8.00%	7.00%
7	26.00%	32.00%	8.00%	9.00%	7.00%
8	27.00%	38.00%	10.00%	12.00%	7.00%
9	26.00%	33.00%	11.00%	9.00%	9.00%
10	24.00%	35.00%	10.00%	9.00%	6.00%
PROMEDIOS	28%	36%	11%	9%	7%

Gráfica 8.- Valores de desprendimiento por fricción del AC-20 Vs AS-500



4.3.3 Desprendimiento por fricción: Resultados de las escorias

Al igual que las tablas anteriores las primeras dos columnas de la Tabla 18 son resultados que muestran el desprendimiento de la película de asfalto del agregado tomados en cuenta como valores de referencia. Posteriormente en las siguientes dos columnas, se comparan los resultados del uso del primer agregado (escoria de alto horno de Nuevo León (DM)) al utilizar asfalto convencional y uno aditivado, por su parte respecto al asfalto aditivado, se seleccionaron los mejores resultados del producto AS-500, para este caso fue la concentración del 1.5%.

Con base a la afirmación anterior, los resultados de la primera escoria muestran efectivamente que el uso de este aditivo reduce la pérdida de película de asfalto hasta un 4%, comparado con los resultados del asfalto convencional. Asimismo, los valores del segundo material (Escoria San Luis Potosí) presentan baja adherencia comparado con el anterior (Escoria DM) al utilizar el mismo asfalto. Evidentemente para el asfalto convencional presenta valores por encima de la propia prueba, es decir porcentajes por encima del 25% de desprendimiento, y gracias a esto, se considera que el material posee baja adherencia. Asimismo al utilizar asfalto aditivado, los valores se reducen alrededor de 10%, sin embargo, esta reducción no es significativa, porque el material sigue presentando problemas de adherencia, por lo que es necesario comprobar otro tipo de aditivo diferente a estos.

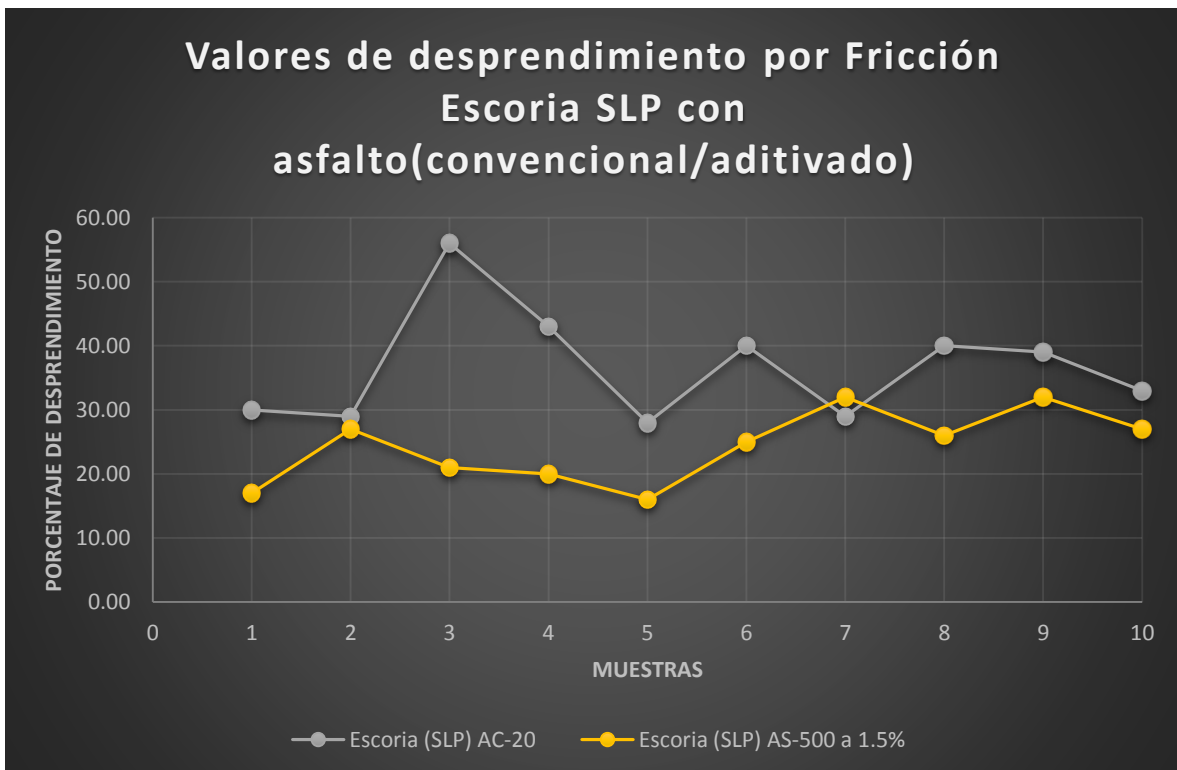
En particular, el comportamiento de este tipo de materiales industriales, es inadecuado respecto a temas de adherencia, gracias a que existen numerosos factores que lo afectan, por ejemplo, su mineralogía, afectada principalmente por la forma de producción del acero, el proceso de enfriado de la escoria, el lugar donde se dispone, el clima, la temperatura ambiente, etc. En resumen, la escoria que exhibe mejores propiedades de adherencia es la proveniente del Estado de Nuevo León.

Tabla 18.- Valores de desprendimiento por fricción en la escoria de alto horno

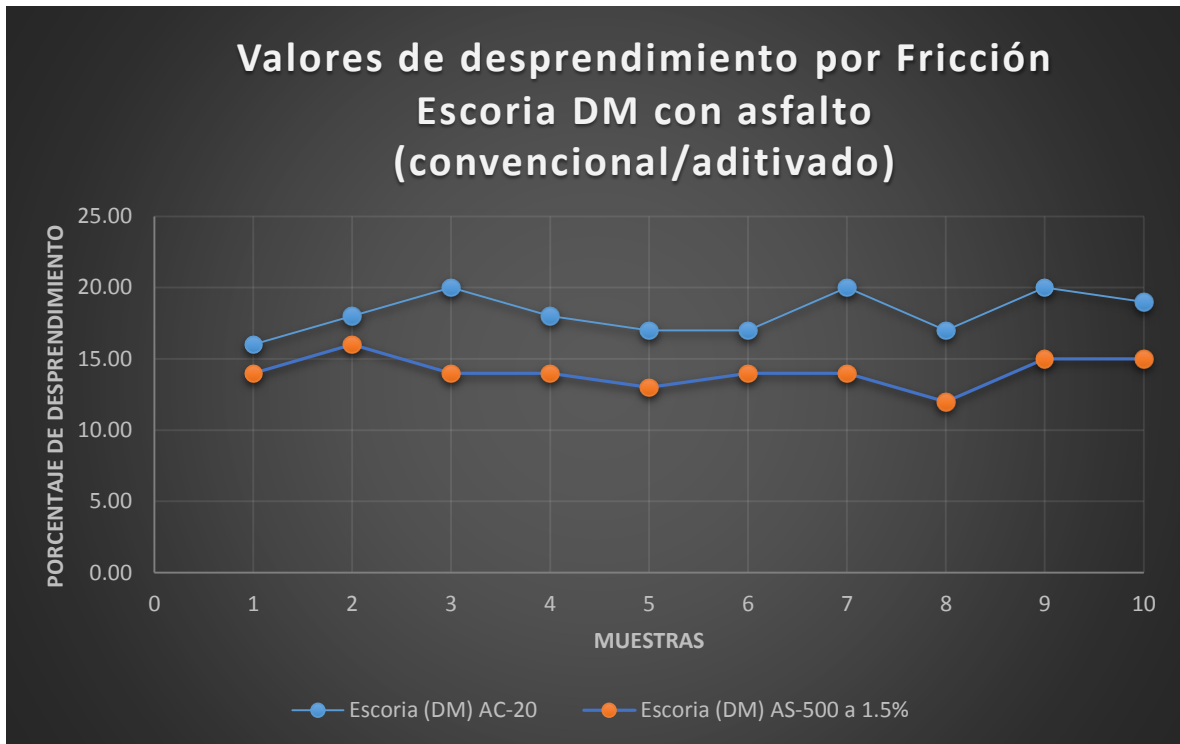
VALORES DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN						
Asfaltos	AC-20 Yucatán	AC-20 Querétaro	Escoria DM		Escoria S.L.P	
No. De pruebas			AC-20 Yucatán	AS-500 1.5%	AC-20 Yucatán	AS-500 1.5%
1	32.00%	41.00%	16.00%	14.00%	30.00%	17.00%
2	30.00%	40.00%	18.00%	16.00%	29.00%	27.00%
3	31.00%	28.00%	20.00%	14.00%	56.00%	21.00%
4	26.00%	27.00%	18.00%	14.00%	43.00%	20.00%
5	25.00%	38.00%	17.00%	13.00%	28.00%	16.00%
6	29.00%	44.00%	17.00%	14.00%	40.00%	25.00%
7	26.00%	32.00%	20.00%	14.00%	29.00%	32.00%
8	27.00%	38.00%	17.00%	12.00%	40.00%	26.00%
9	26.00%	33.00%	20.00%	15.00%	39.00%	32.00%
10	24.00%	35.00%	19.00%	15.00%	33.00%	27.00%
PROMEDIOS	28%	36%	18%	14%	37%	24%

De acuerdo a la (Gráfica 9) se observa que el valor de desprendimiento por fricción en la escoria de San Luis Potosí es alto, además existe variabilidad a los datos al utilizar el mismo asfalto.

Gráfica 9.- Valores de desprendimiento por fricción de la escoria Tipo I



Gráfica 10.- Valores de desprendimiento de la escoria Tipo II



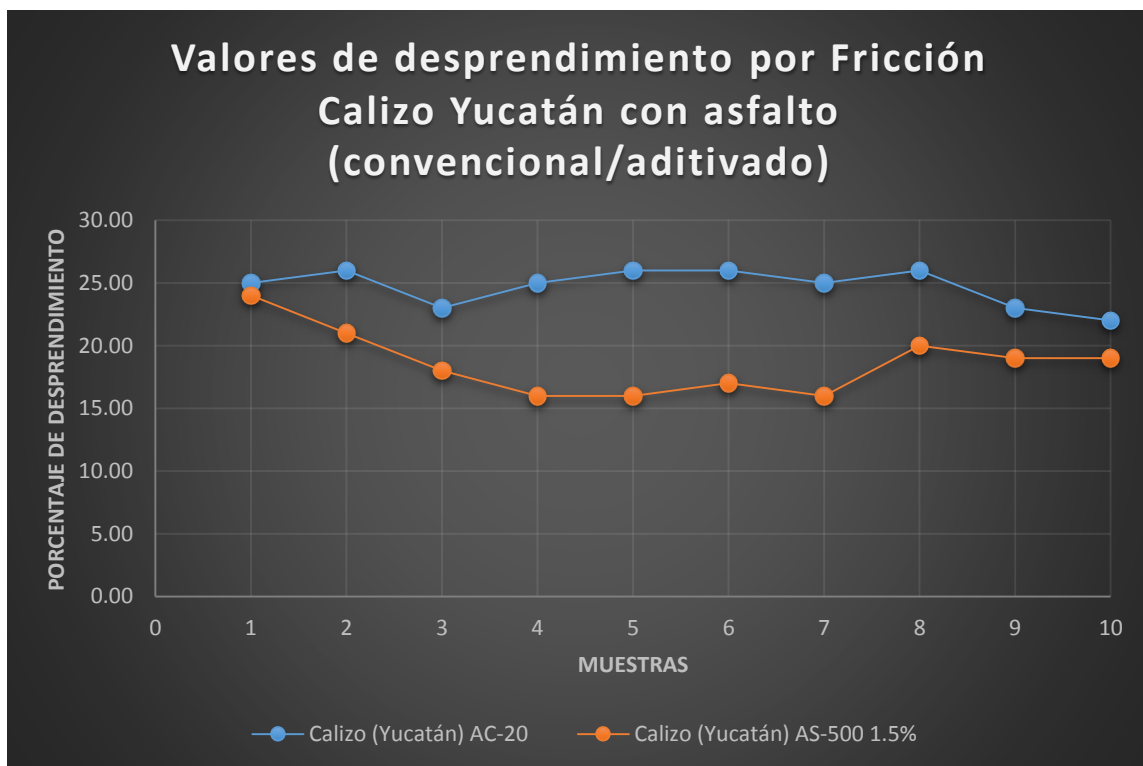
4.3.4 Resultados de desprendimiento por fricción de las Calizas

Al igual que los materiales anteriores, el conocer la adherencia que poseen los agregados calizos, está enfocada principalmente de identificar el porcentaje de la pérdida de la película de asfalto en los agregados, sin embargo los resultados mostrados en la (Tabla 19) muestran diferencias significativas entre ellos. Ocasionado por las propiedades de cada uno e inclusive, por su composición mineral, por ejemplo, en el caso del agregado de Yucatán es de tipo calizo, en cambio el de Nuevo León es una dolomita.

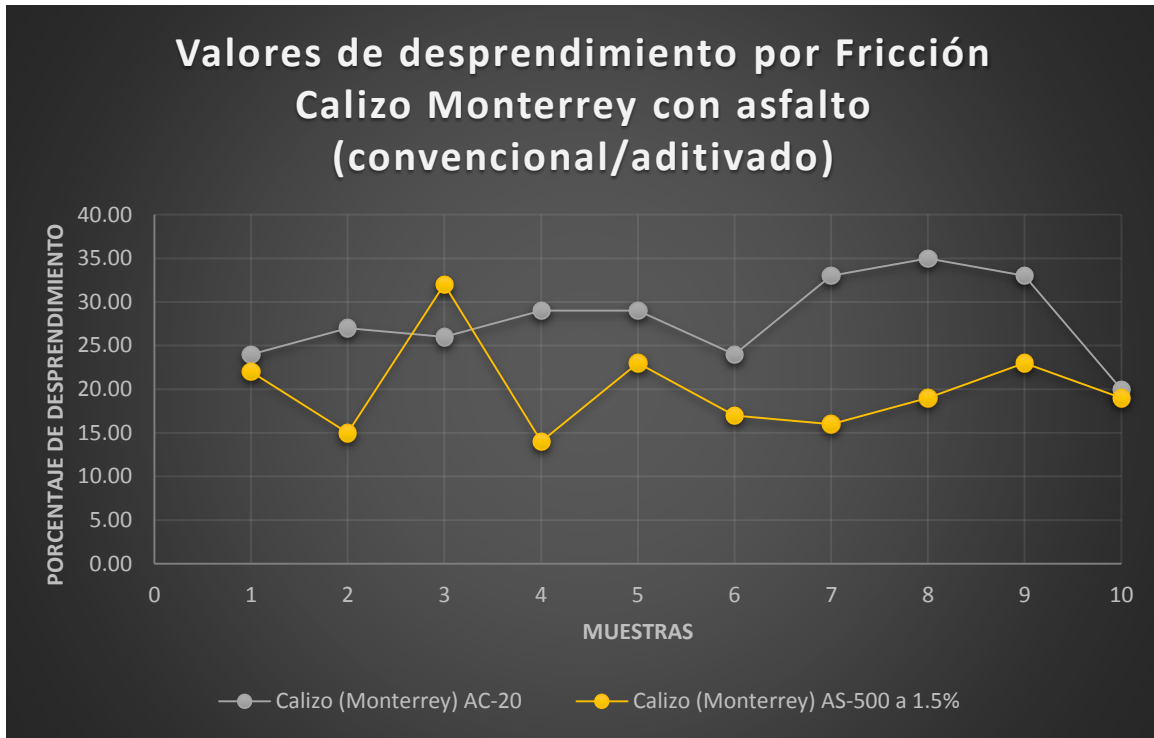
Tabla 19.-Resultados de desprendimiento por fricción de los calizos.

VALORES DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN						
Asfaltos	AC-20 Yucatán	AC-20 Querétaro	Calizo Yucatán		Calizo Nuevo León	
No. De pruebas			AC-20 Yucatán	AS-500 1.5%	AC-20 Yucatán	AS-500 1.5%
1	32.00%	41.00%	25.00%	24.00%	24.00%	22.00%
2	30.00%	40.00%	26.00%	21.00%	27.00%	15.00%
3	31.00%	28.00%	23.00%	18.00%	26.00%	32.00%
4	26.00%	27.00%	25.00%	16.00%	29.00%	14.00%
5	25.00%	38.00%	26.00%	16.00%	29.00%	23.00%
6	29.00%	44.00%	26.00%	17.00%	24.00%	17.00%
7	26.00%	32.00%	25.00%	16.00%	33.00%	16.00%
8	27.00%	38.00%	26.00%	20.00%	35.00%	19.00%
9	26.00%	33.00%	19.00%	19.00%	33.00%	23.00%
10	24.00%	35.00%	22.00%	19.00%	20.00%	19.00%
PROMEDIOS	28%	36%	24%	19%	28%	20%

Gráfica 11.- Valores de desprendimiento por fricción del agregado calizo de Yucatán



Gráfica 12.- Resultados de desprendimiento por fricción del Calizo Monterrey



Para comprobar la manera en que fueron realizados correctamente los experimentos, se hace uso del control estadístico de los datos, de donde se obtienen medidas de dispersión, simetría y apuntalamiento que son herramientas que ayudan a comprobar la efectividad de la buena realización de los experimentos, es decir, con ayuda de estas medidas se comprueba la efectividad y la aceptación o rechazo de los resultados de los experimentos. De las tablas que se muestran a continuación, contienen el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas para la prueba de desprendimiento por fricción. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma. El particular interés dentro de este estudio es el sesgo estandarizado y curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Sin embargo valores fuera de rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales podrían invalidar los procedimientos estadísticos que se aplican a este tipo de datos.

4.3.5 Análisis Estadístico de los Datos

A continuación se muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. Visto de esta forma, las pruebas de desprendimiento por fricción, se afirma que los experimentos están realizados adecuadamente. Al no presentar valores fuera de rango de +2,-2 de cada una de las variables estudiadas al respecto

En la (Tabla 20) se muestra el resumen estadístico de cada una de las variables involucradas a continuación se exhibe la explicación de su denominación:

1. La denominación de AC-20 se refiere a los asfaltos convencionales
2. Así mismo el AS-100 y AS-500 es la utilización de los productos promotores de adherencia seguido de su porcentaje, es decir, el 05 significa el 0.5%, el 10 el 1%, por último el 15 el 1.5%.

Tabla 20.- Análisis Estadístico de valores de desprendimiento por fricción del AC-20, AS-100 y AS-500 en agregado de la región

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (PRUEBA DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN)								
Resumen Estadístico	AC20_QUI	AC20_YUC	AS100_05	AS100_10	AS100_15	AS500_05	AS500_10	AS500_15
Recuento	10	10	10	10	10	10	10	10
Promedio	35.60	27.60	19.10	23.60	25.40	10.00	8.50	7.20
Desviación Estándar	5.60	2.72	1.45	1.65	2.72	1.25	0.85	1.32
Coficiente de Variación	15.73%	9.84%	7.59%	6.98%	10.69%	12.47%	10.00%	18.29%
Mínimo	27	24	18	21	22	8	7	6
Máximo	44	32	22	26	30	11	9	10
Rango	17	8	4	5	8	3	2	4
Sesgo Estandarizado	-0.28	0.58	1.49	0.32	0.34	-1.11	-1.75	1.77
Curtosis Estandarizada	-0.61	-0.78	0.13	-0.44	-0.62	-0.59	0.07	0.87

En la (Tabla 21) se exhibe el resumen estadístico de cada una de las variables así como su denominación, para ejemplificar cada una de las variables utilizadas a continuación se mencionan las características paso por paso.

1. La denominación de ESCDMAC20 significa que el material utilizado es una escoria Tipo II, mezclada con AC-20.
2. Así mismo el AS500_15, significa que se utilizó el producto promotor de adherencia a 1.5%.
3. Para el caso de los calizos la denominación CALMONTAC20 significa que el material es un tipo calizo de Monterrey mezclado con AC-20.

Tabla 21.- Análisis Estadístico de valores de desprendimiento por fricción en los dos tipos de escoria de alto horno.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (PRUEBA DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN)				
<i>Resumen Estadístico</i>	<i>ESCDMAC20</i>	<i>ESCDMAS500_15</i>	<i>ESCSLPAC20</i>	<i>ESCSLPAS500_15</i>
Recuento	10	10	10	10
Promedio	18.20	14.10	36.70	24.30
Desviación Estándar	1.48	1.10	8.77	5.66
Coefficiente de Variación	8.11%	7.81%	23.89%	23.28%
Mínimo	16	12	28	16
Máximo	20	16	56	32
Rango	4	4	28	16
Sesgo Estandarizado	0.12	-0.31	1.49	-0.12
Curtosis Estandarizada	-0.97	0.59	0.90	-0.71

Tabla 22.- Análisis Estadístico de valores de desprendimiento por fricción de los dos tipos de calizos.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (PRUEBA DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN)				
<i>Resumen Estadístico</i>	<i>CALMONTAC20</i>	<i>CALMONTAS500_15</i>	<i>CALYUCAC20</i>	<i>CALYUCAS500_15</i>
Recuento	10	10	10	10
Promedio	28.00	20.00	24.70	18.60
Desviación Estándar	4.74	5.31	1.49	2.59
Coefficiente de Variación	16.92%	26.56%	6.05%	13.93%
Mínimo	20	14	22	16
Máximo	35	32	26	24
Rango	15	18	4	8
Sesgo Estandarizado	-0.09	1.62	-1.11	1.21
Curtosis Estandarizada	-0.49	1.30	-0.50	0.42

No obstante, además del análisis estadístico, el control de calidad de la experimentación se lleva a cabo mediante gráficos estadísticos. Por un lado, es necesario determinar las características que distinguirá de un material a otro, para hacer la evaluación, por el otro, es necesario obtener mediante pruebas o experimentación, los valores que presentan dichas características. En seguida se menciona la importancia y estructura de una carta de control

4.4 Carta de control estadístico de la calidad.

Según Rascón 1998 comenta que cualquier proceso de manufactura, aun cuando sea muy bueno, se encuentra siempre caracterizado por una cierta variación de naturaleza aleatoria, es decir, existen pequeñas variaciones entre ellos, además su naturaleza no puede ser limitada. Sin embargo, cuando esta variabilidad está presente en un proceso de producción y únicamente presenta variación aleatoria se dice que el proceso se encuentra en un *estado de control estadístico*. Tal estado se puede alcanzar cuando se eliminan aquellos problemas que ocasionan otro tipo de variación, llamada variación sistemática, atribuible principalmente, a malas prácticas de construcción, la mano de obra no calificada, calidad de los materiales, máquinas en mal estado, etc. Resumiendo lo tratado un método confiable para detectar dichas desviaciones consiste en el empleo de una herramienta estadística denominada *Carta de Control*

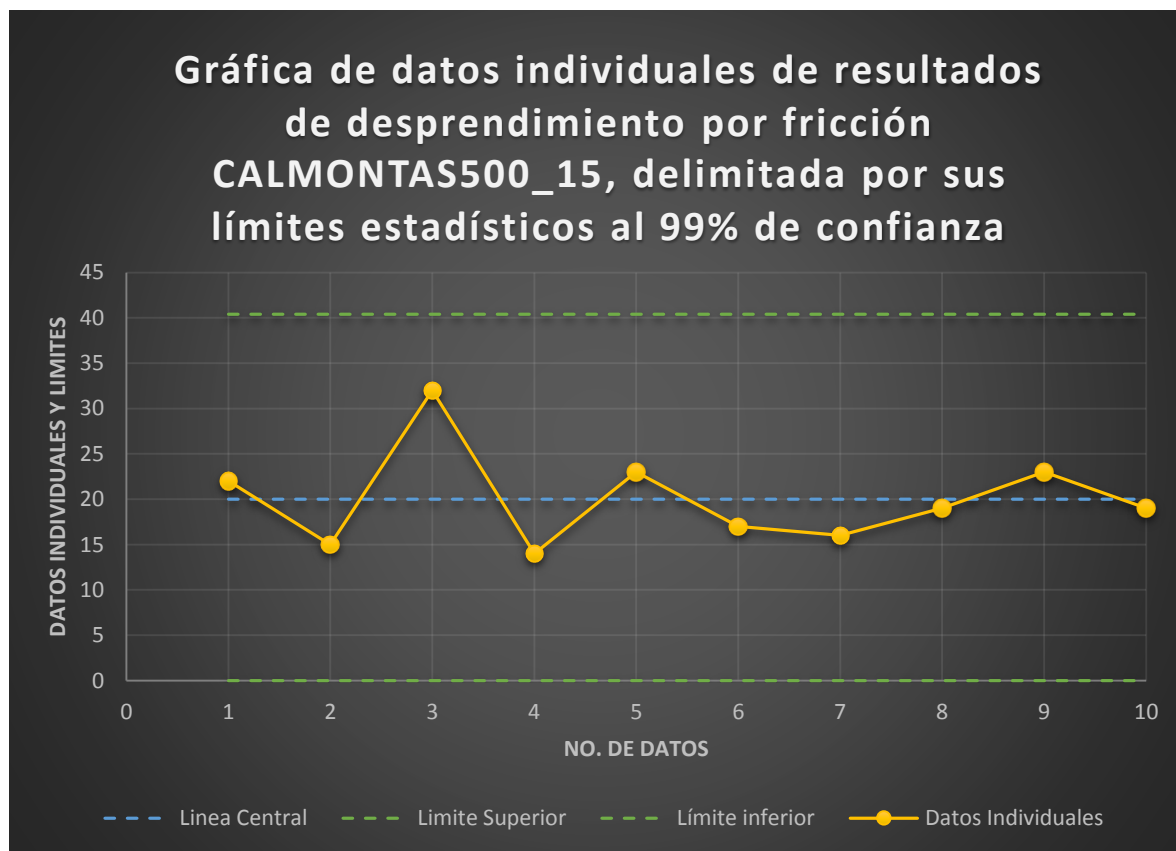
Una carta de control consiste de una Línea Central, correspondiente a la calidad media a la que el proceso debe funcionar, y dos líneas que corresponden al Límite Superior de Control (LSC) y al Límite Inferior de Control (LIC), los cuales se fijan respecto a intervalos de confianza.

De la misma manera los diagramas de caja y bigotes, son herramientas que ayudan a visualizar gráficamente el comportamiento de los datos, en seguida se muestra un ejemplo de cada uno de estos gráficos.

Con el objetivo de visualizar y comprender el comportamiento de las cartas de control y diagramas de caja y bigote, se muestra a continuación los datos del desprendimiento por fricción para la variable (CALMONTAS500_15). Se escogió esta variable porque posee un coeficiente de variación alto (25.56%) encontrado en el análisis estadístico Tabla 22, en consecuencia, es necesario exhibir los dos tipos de gráficos para validar. Sin embargo es necesario recalcar que con base al análisis estadístico los resultados de los experimentos no presentaron problema alguno.

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	22.00	
2	15.00	7.00
3	32.00	17.00
4	14.00	18.00
5	23.00	9.00
6	17.00	6.00
7	16.00	1.00
8	19.00	3.00
9	23.00	4.00
10	19.00	4.00

Elementos individuales	
R	7.67
Media	20.00
E2	2.66
n	2
LS	40.3933333
LI	0

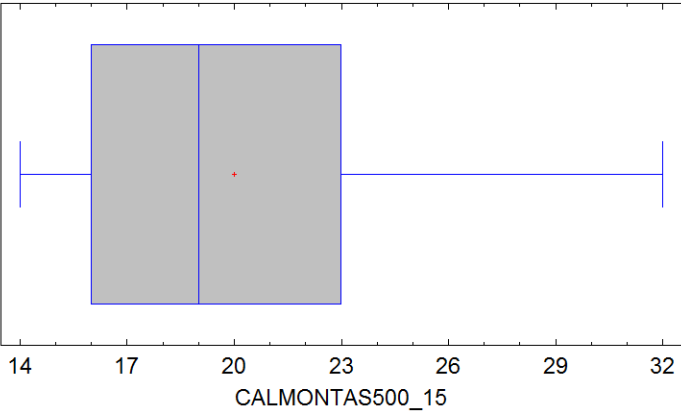


Con respecto a la gráfica anterior se puede observar que efectivamente existe variabilidad de los datos respecto al porcentaje de desprendimiento por fricción, pero a pesar de ello, el experimento está bajo control estadístico, es decir, ninguno de los valores (Puntos de la línea amarilla) están fuera de las líneas verdes que son los límites estadísticos. Cabe aclarar que si alguno de estos valores estuviera fuera de éstos, es necesario hacer pruebas estadísticas que ayuden a rechazar por completo ese determinado punto.

4.5 Diagrama de caja y bigote

Un gráfico de caja y bigote es un buen instrumento para mostrar varias características de una muestra de datos. La parte rectangular del diagrama se extiende desde el cuartil inferior hasta el cuartil superior, cubriendo la mitad de muestra. La línea del centro dentro de la caja indica la localización de la **mediana de la muestra**, el signo **más** indica la localización de la media muestral. Los bigotes se extienden desde la caja hasta los *valores mínimo y máximo* de la muestra, excepto por cualquier punto alejado o muy alejado, los cuales serán graficadas por separado. Puntos alejados son aquellos que se encuentran a más de 1.5 veces el rango intercuartílico por arriba o por debajo de la caja y se muestra como puntos fuera de los bigotes. En este caso, no hay puntos alejados ni muy alejados respecto a los valores de (CALMONTAS500_15) con coeficiente de variación de (25.56%) obtenido en el análisis estadístico

Gráfico de Caja y Bigotes



<i>Calizo Nuevo León</i>	
<i>AC-20 Yucatán</i>	<i>AS-500 1.5%</i>
24.00%	22.00%
27.00%	15.00%
26.00%	32.00%
29.00%	14.00%
29.00%	23.00%
24.00%	17.00%
33.00%	16.00%
35.00%	19.00%
33.00%	23.00%
20.00%	19.00%
28%	20%

Con respecto a los resultados a los dos gráficos de control (carta y diagrama de caja) se observa en primer lugar que ninguno de los resultados está fuera de rango, o presenta problemas para ser aceptado dentro de la fase experimental. Así mismo, nuevamente se confirma que la fase experimental fue realizada de manera correcta, al comprobarse por medio de estos dos gráficos, además en el diagrama de caja y bigote se visualiza la concentración de datos en el segundo percentil, tal comportamiento es el valor del sesgo positivos, y quiere decir que tal concentración de los datos está a la derecha.

Se explica entonces, que el análisis estadístico contempla las variaciones de los datos nuevamente se reafirma que los parámetros más importantes dentro de este tipo estudio, son el sesgo y la curtosis que son medidas de apuntalamiento, basadas en un comportamiento “normal”.

En cambio, aquellos que sobrepasan estos rangos, son resultados que están afectados por factores que modifican el comportamiento, para el caso del desprendimiento por fricción la influencia de la temperatura de mezclado por ejemplo, de la misma manera, el tiempo de saturación, etc. Asimismo de la persona que elaboró las pruebas, al utilizar agregado de más en las pruebas, o la cantidad de asfalto insuficiente para cubrir por completo el agregado. Todos estos factores provocan una variabilidad de los datos tal que muchos de los casos, la parte experimental suele ser desecha.

En seguida se muestran algunas imágenes respecto a la obtención de la muestra de la primera escoria (San Luis Potosí) donde en la planta de fabricación de acero, la escoria pasa por un proceso de separación de metales pesados por medio de una trituradora y a la vez se separan metales diferentes a la escoria, en seguida se muestra el procedimiento en general de la primera fase de la experimentación de la investigación al respecto. El procedimiento descrito en la metodología a grandes rasgos consistió, en aditivar el asfalto, después se

seleccionaron los agregados, elaborar las muestras para finalmente evaluar e identificar cuál de los aditivos y concentración se comportó de mejor manera.



Para visualizar de una manera adecuada la separación de metales pesados de la escoria de alto horno, a continuación se muestran la trituradora así como la separadora instalada en la planta de fabricación de acero.



Las imágenes anteriores muestran principalmente la preparación de las muestras utilizadas en la prueba de desprendimiento es un agitador mecánico tipo SCT (Secretaría de comunicaciones y Transportes), en resumen se realizaron 160 pruebas de desprendimiento por fricción, de las cuales las primeras 80 fueron para determinar el tipo y concentración de un producto promotor de adherencia y dependiendo de sus resultados, se seleccionaron los mejores resultados y con ello mezclar las escorias y los calizos con estos materiales.

4.6 Microdeval para arenas y gravas aplicado a diferentes agregados

Con el objetivo de conocer la resistencia a la abrasión de los materiales que se utilizarán en la fabricación de las mezclas asfálticas y dada su importancia en los temas de fricción, se implementó la prueba de Microdeval aplicada a los agregados involucrados tanto en la fracción gruesa y fina de los agregados utilizados, del mismo modo, así mismo su evaluación se llevó a cabo con respecto a la metodología para ambos casos (arenas y gravas).

Tabla 23.- Valores de Microdeval para los diferentes agregados

VALORES DE DESGASTE UTILIZANDO MICRODEVAL A DIFERENTES AGREGADOS								
Agregados	Microdeval para gravas				Microdeval para arenas			
No. De pruebas	Escoria San Luis	Escoria DR	Caliza Yucatán	Caliza Nuevo León	Escoria San Luis	Escoria DR	Caliza Yucatán	Caliza Nuevo León
1	6.00	9.00	14.40	9.50	10.00	11.50	19.80	15.00
2	6.70	9.70	14.40	9.30	10.10	11.60	21.20	15.33
3	6.60	8.50	14.60	9.50	10.50	11.00	22.70	15.47
4	6.30	9.40	13.40	9.60	10.40	11.80	21.50	15.54
5	6.00	8.30	13.90	9.20	10.20	11.00	21.50	16.10
6	6.60	8.60	13.60	9.50	10.70	11.10	22.10	15.00
7	6.00	9.30	13.90	9.70	11.00	11.20	20.40	16.68
8	6.50	9.20	13.90	9.90	10.40	10.70	21.60	14.57
9	6.60	8.70	13.80	9.50	10.70	11.00	21.70	14.81
10	6.20	9.80	14.60	9.70	10.00	10.60	22.50	14.08
PROMEDIOS	6	9	14	10	10	11	22	15

Como lo muestra la Tabla 23 los agregados calizos tanto para arenas y gravas muestran un valor importante de desgaste, parámetro importante

considerado en el diseño de las mezclas asfálticas. Además por los temas sobre la importancia que tiene el factor de fricción en las carreteras. Nuevamente se reafirma y se comprueba que debido a la rápida degradación del material, se suscitan siniestralidades, ocasionadas por la pérdida de la microtextura de los agregados que se utilizan en la capa de rodadura. Sin embargo para el caso de arenas el valor de desgaste mucho mayor porque oscila entre el 20%, mientras que en las gravas es del 15% aproximadamente. Por su parte, las escorias presentan un desgaste significativo, pero a pesar del porcentaje de pérdida de masa respecto a la abrasión, exhiben diferencias significativas al respecto, por ejemplo, la escoria de San Luis Potosí, se comporta de mejor manera que la proveniente de Nuevo León, tanto en la fracción gruesa y fina de ambas escorias.

Por su parte la denominación de las variables involucradas en el resumen estadísticos se menciona a continuación:

1. La letra M seguida ya sea de la letra A o G, significa el tipo de material (Arenas o Gravas).
2. De la misma manera, CAL significa o E, significa el tipo de material, (Calizo o Escoria).
3. Por último la terminación MONT, YUC, SLP o DM significa (Monterrey, Yucatán, San Luis Potosí, Nuevo León).

4.7 Análisis Estadístico de los datos de Microdeval

Al igual que los resultados de desprendimiento por fricción Los resultados de particular interés es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. Visto de esta forma, nuevamente se reafirma que al igual de las pruebas de

Desprendimiento por fricción, los experimentos están realizados adecuadamente. Al no presentar valores fuera de rango de +2,-2 de cada una de las variables estudiadas al respecto

Tabla 24.- Análisis estadístico de la prueba de Microdeval

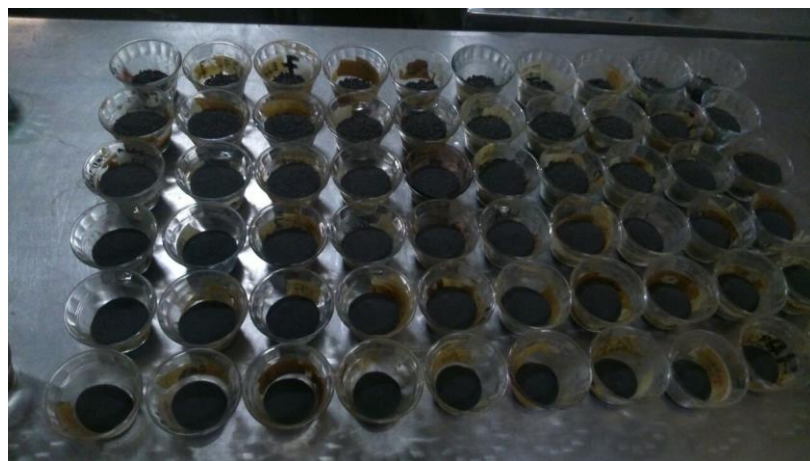
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE MICRODEVAL OBTENIDOS DE LOS DIFERENTES AGREGADOS								
	MACALMONT	MACALYUC	MAEDM	MAESLP	MGCALMONT	MGCALYUC	MGEDM	MGESLP
Recuento	10	10	10	10	10	10	10	10
Promedio	15.26	21.50	11.15	10.40	9.54	14.05	9.05	6.35
Desviación Estándar	0.75	0.88	0.38	0.33	0.20	0.42	0.51	0.28
Coefficiente de Variación	4.91%	4.11%	3.44%	3.21%	2.11%	3.01%	5.69%	4.47%
Mínimo	14.08	19.8	10.6	10	9.2	13.4	8.3	6
Máximo	16.68	22.7	11.8	11	9.9	14.6	9.8	6.7
Rango	2.6	2.9	1.2	1	0.7	1.2	1.5	0.7
Sesgo Estandarizado	0.60	-0.86	0.45	0.52	0.04	0.06	0.05	-0.31
Curtosis Estandarizada	0.23	0.20	-0.41	-0.44	0.20	-0.86	-0.84	-1.22

Para efectos de esta investigación, en seguida se ilustran imágenes respecto a la realización de pruebas de Microdeval aplicada a la fracción gruesa de los materiales que se han mencionado al respecto. Se realizaron comparaciones de los valores que cada material presentó conforme a sus características, es decir se compararon los valores de los calizos y las escorias respectivamente. Las primeras imágenes muestran el procedimiento para el Microdeval para la fracción gruesa de los materiales y la segunda para la fracción fina. Para la primera parte, la elaboración de las muestras se llevó a cabo por separado y al completar el material necesario se procedió a la evaluación.





Por su parte la sección fina de los materiales se decidió fraccionar cada uno de los diámetros del agregado en flaneras, tal como lo muestran las imágenes. Por cada columna que se formaba, se obtuvo una muestra del material al combinarla.



4.8 Pulimento Acelerado

En este apartado se muestran los resultados de la prueba de pulimento acelerado de todas y cada una de las variables involucradas, así como su comportamiento frente a la prueba de pulimento acelerado. En primer término cabe puntualizar que al igual que las pruebas de desprendimiento así como de microdeval, se utilizaron agregados de referencia, cuyo objetivo fue comprobar la efectividad que tiene la escoria de alto horno frente al problema de pulimento así como su aportación a los temas de fricción. Sin embargo es importante puntualizar la manera con que se llevó a cabo esta parte de la experimentación, porque gracias a las bondades de la prueba al respecto, se pudo obtener de forma directa la evolución de pulimento en tiempo, así mismo una tasa de pulimento acelerado gracias a la obtención de estos datos. Además nuevamente se reitera que las combinaciones de la escoria se realizaron con base al volumen de agregado, es decir, los porcentajes de escoria de alto horno se realizaron con base al número de partículas.

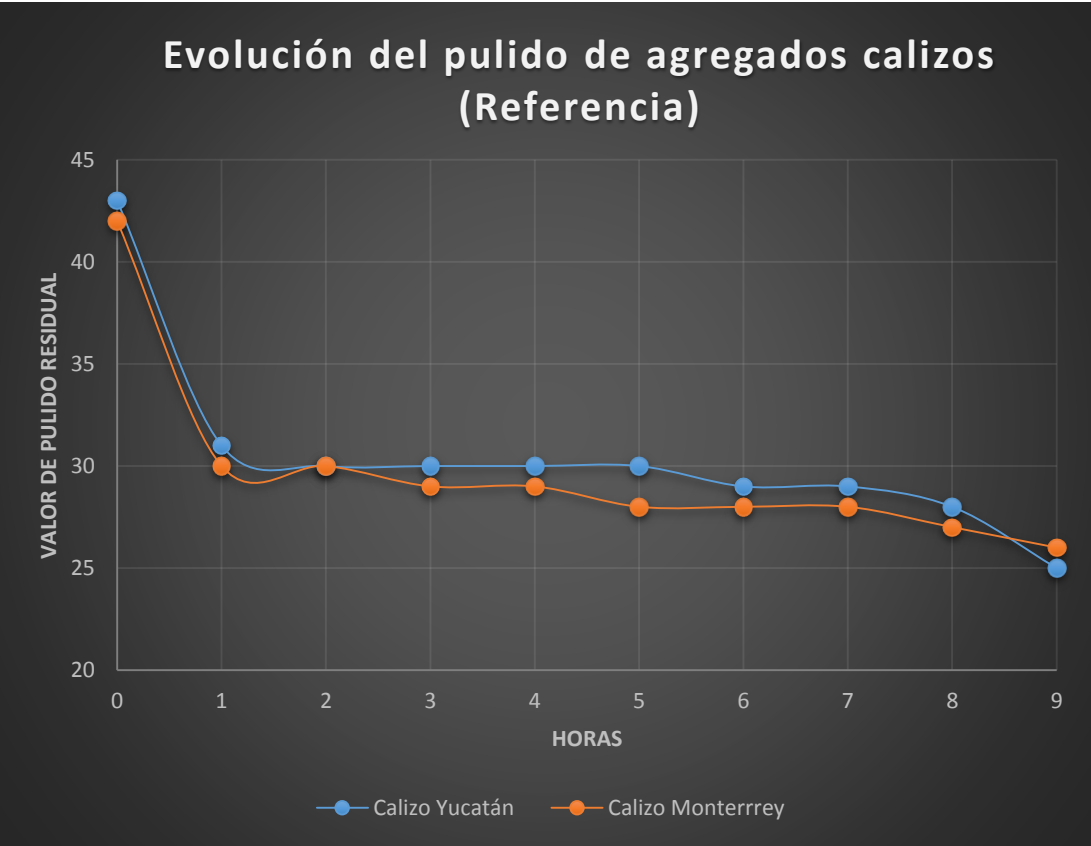
4.8.1 Pulimento de agregado: Agregados de referencia

Las pruebas de pulimento, se diseñaron respecto al apartado de la Normativa Texana correspondiente a la combinación de agregado, es decir, se consideraron 4 pastillas por cada mezcla de agregado. En primer lugar fue necesario contemplar los agregados de referencia tal como se muestra en el diseño del experimento visto en la Metodología de la presente investigación. En segundo lugar, los porcentajes de 5, 10 y 15% de la mezcla de agregado se sometieron al pulimento acelerado en la primera etapa de la experimentación, a continuación se presentan los valores obtenidos de los agregados de referencia (calizos) en esta primera fase.

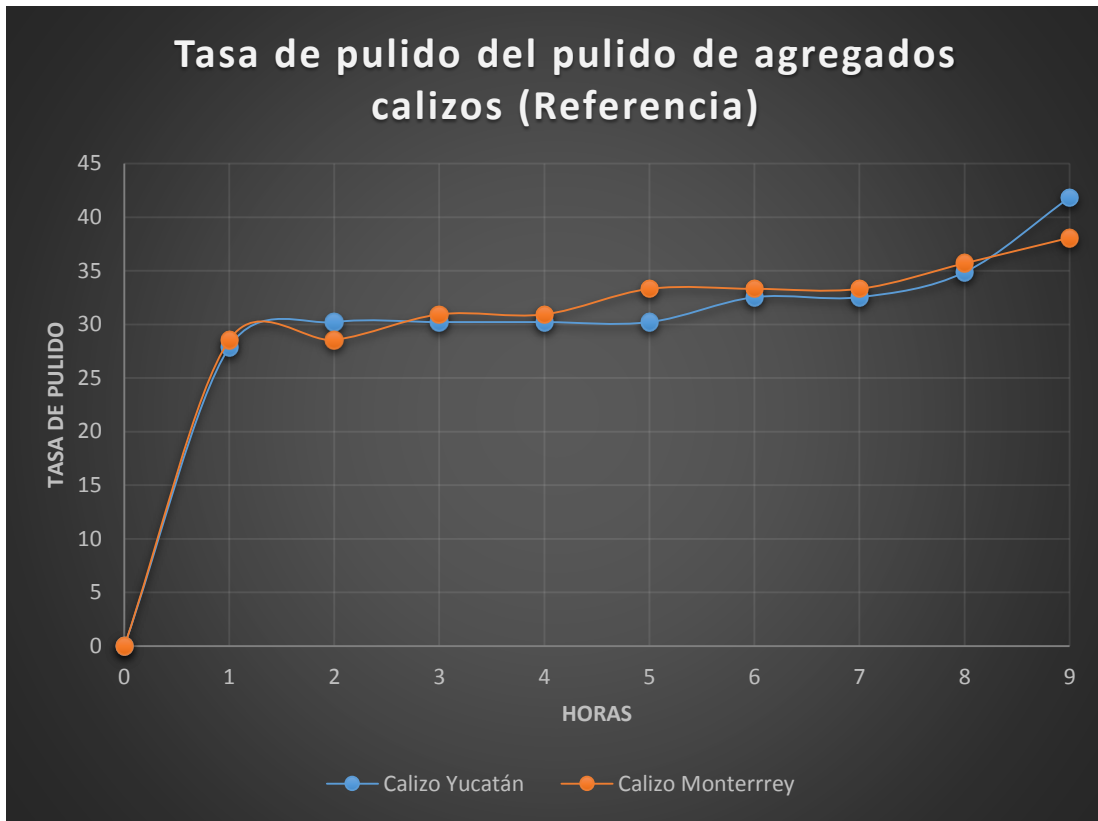
Como se puede observar en la (Gráfica 13), el valor de pulido residual (VPR) de ambos calizos es demasiado alto comparado con la bibliografía consultada en la parte de fundamentación, por ejemplo, los valores de VPR son de 25 para el calizo de Yucatán y 26 para el calizo de Monterrey, valores que al ser

comparados con el Departamento de Transporte de Texas no cumplen con lo mínimo recomendado, gracias a que este organismo presenta un valor mínimo que sea mayor o igual a 29. En otras palabras el valor de pulido residual de ambos agregados calizos superan esta especificación, es por ello que no pueden ser utilizados en el diseño de las capas de rodadura en donde únicamente se contemple este tipo de agregado. Por el contrario, el buscar otro material con características resistentes al pulido, hacen de combinación de agregado una solución al respecto, al encontrar los porcentajes adecuados que brinden valor de pulido residual suficiente para mantener las propiedades de fricción en las carreteras. De acuerdo a lo antes mencionado, se obtuvieron las tasas de pulimento para cada mezcla en particular para visualizar de mejor manera el comportamiento de los materiales, tal como se muestra a continuación.

Gráfica 13.- Evolución del VPR de los agregados de referencia



Gráfica 14.- Tasa de pulido del agregado de referencia



4.8.2 Mezcla de agregado; Calizo Monterrey - Escoria San Luis Potosí

Respecto al aporte que presenta las la escoria de alto horno, la Tabla 25 muestra el resumen de los resultados de pulimento acelerado respecto al tiempo, para el agregado calizo procedente de Monterrey en combinación con las dos escorias, adicionadas a diferentes porcentajes.

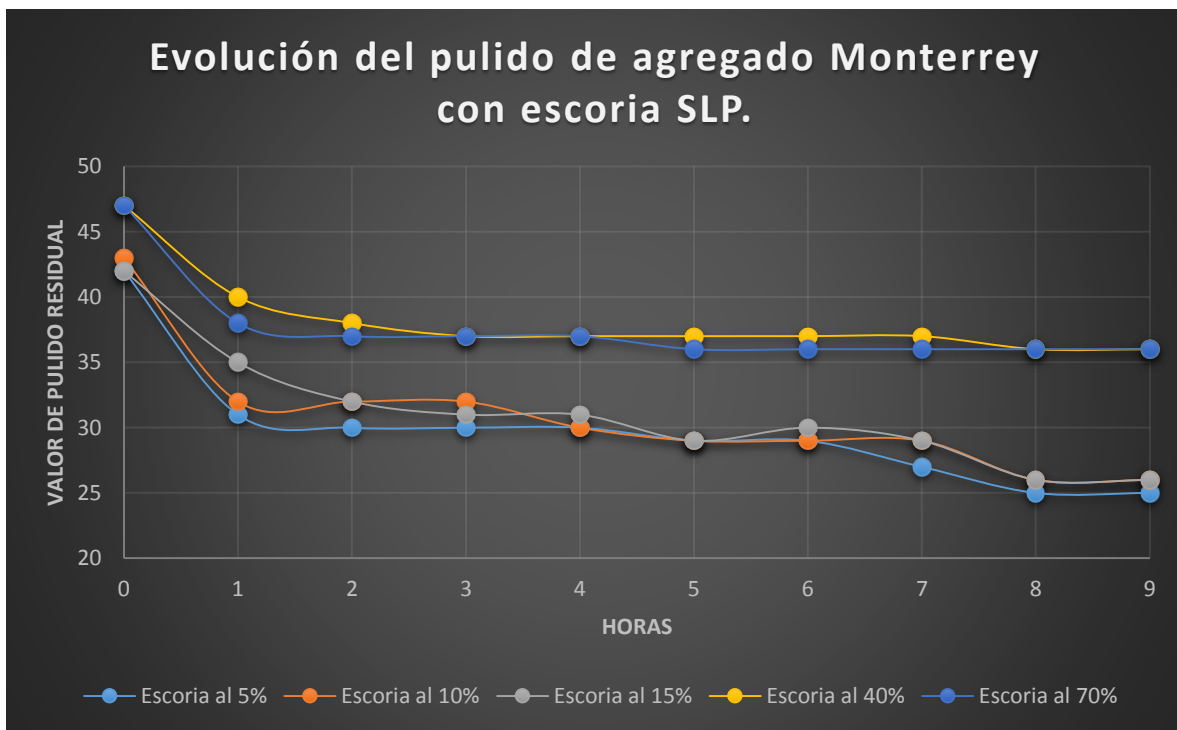
Tales efectos demuestran su aporte frente a la valor de pulido residual (VPR), por ejemplo, para los primeros porcentajes de mezcla de agregado (5, 10 y 15%), los valores VPR no cumplen con los especificado para la normativa mexicana, porque exhiben valores por debajo, es decir, para ambos casos de las escorias con porcentajes hasta 15%, el valor de pulido residual prácticamente son iguales. Sin embargo, para los porcentajes de 40 y 70% el aporte de ambas escorias se hace evidente, al mejorar el VPR de 36 para la escoria de San Luis Potosí y 34 para la

de Monterrey. Valores que pueden ser tomados en cuenta para el diseño de las capas de rodadura.

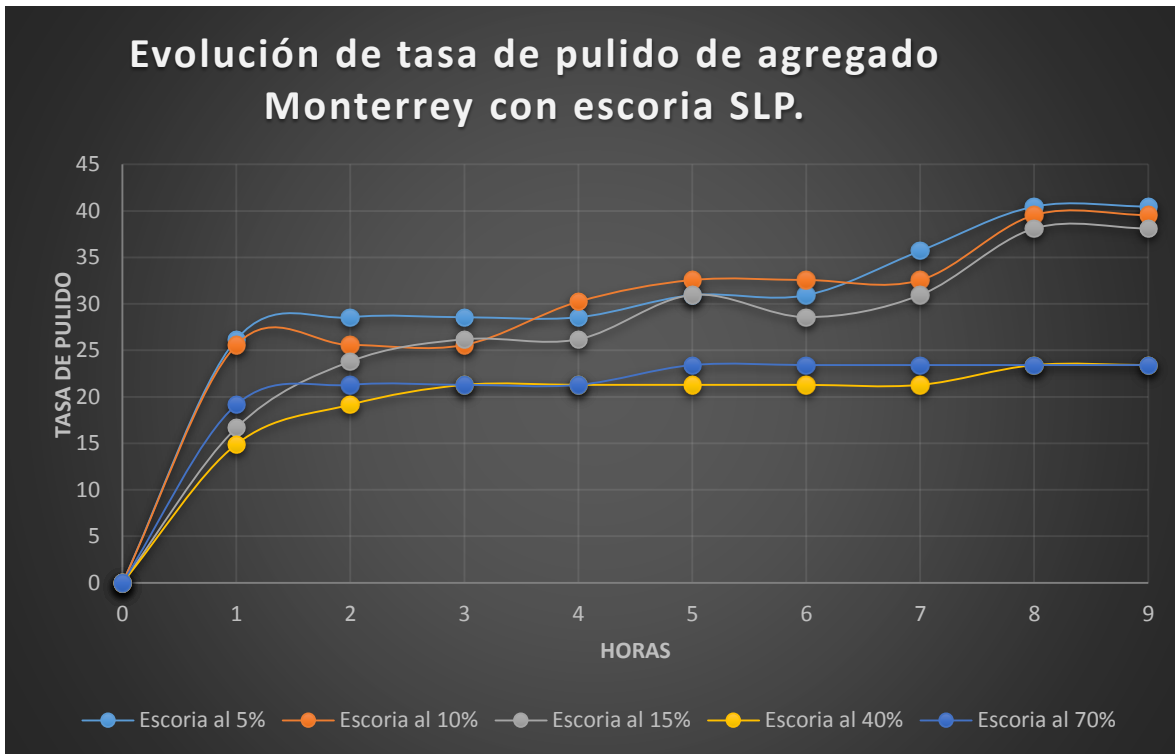
Tabla 25.- Evolución del VPR respecto al tiempo del Calizo Monterrey

Evolución del VPR respecto al tiempo	Valores de Referencia		Calizo Monterrey													
			Escoria San Luis Potosí						Escoria Nuevo León							
			5%	10%	15%	40%	70%	100%	5%	10%	15%	30%	40%	70%	100%	
Horas	Cal. Yuc	Cal. Mont														
0	43	42	42	43	42	47	47	51	40	42	42	42	44	48	45	
1	31	30	31	32	35	40	38	40	33	33	34	34	38	39	36	
2	30	30	30	32	32	38	37	40	33	33	34	34	37	36	36	
3	30	29	30	32	31	37	37	39	31	32	32	32	35	36	36	
4	30	29	30	30	31	37	37	39	27	28	28	29	35	36	36	
5	30	28	29	29	29	37	36	38	27	28	28	29	35	36	35	
6	29	28	29	29	30	37	36	37	27	28	28	28	35	35	35	
7	29	28	27	29	29	37	36	37	25	26	26	27	34	34	35	
8	28	27	25	26	26	36	36	37	25	26	26	27	34	34	35	
9	25	26	25	26	26	36	36	37	25	26	26	27	34	34	35	

Gráfica 15.- Evolución del pulido de agregado Calizo Monterrey con la escoria San Luis



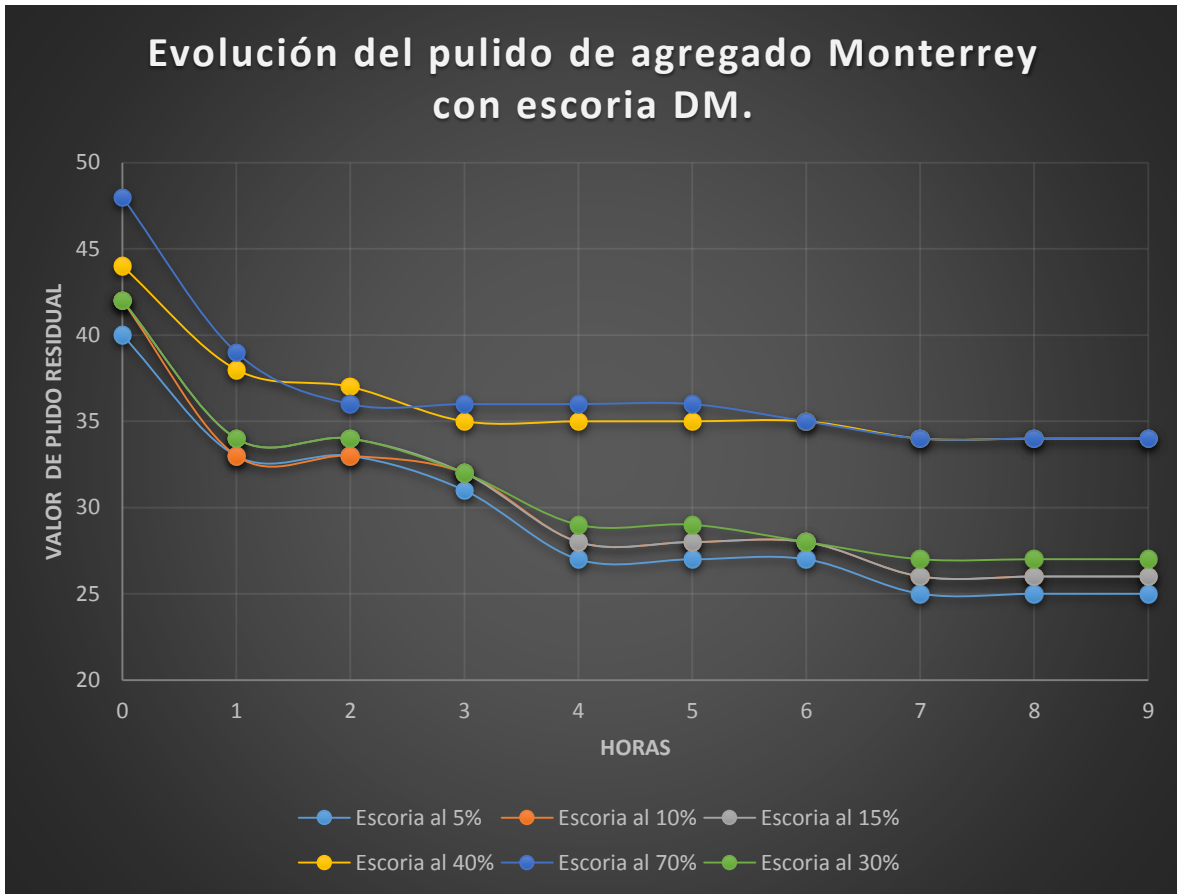
Gráfica 16.- Evolución de la tasa de pulido del agregado calizo con la Nuevo León



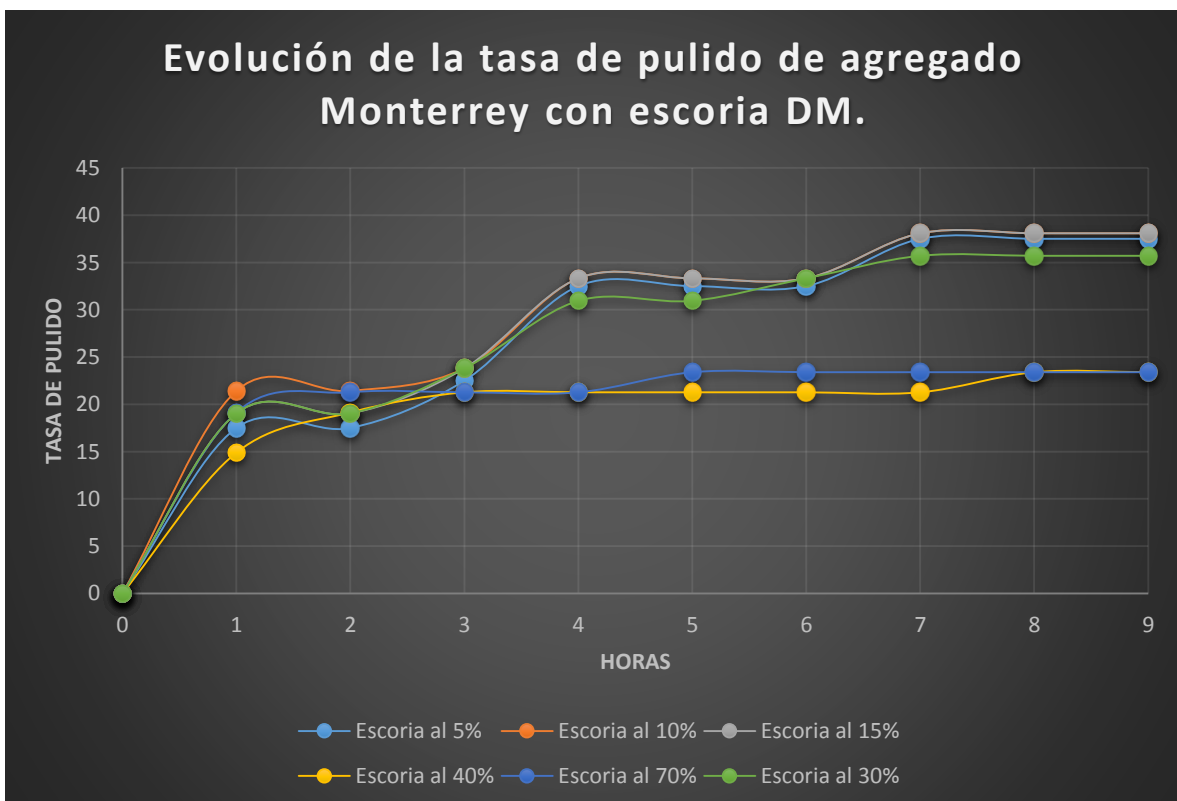
4.8.3 Mezcla de agregado: Calizo Monterey y Escoria Nuevo León

La Gráfica 17 muestra la evolución del pulimento a través del tiempo ahora con los la mezcla de escoria de Nuevo León. Anteriormente se había comentado que el comportamiento de las escorias varía respecto al valor de pulimento acelerado, para este caso la Escoria procedente de Nuevo León, presenta un valor menor de pulimento acelerado, comparado con la escoria de San Luis Potosí, porque para esta última el Valor de Pulido Residual (VPR) es de 36 comparado con esta que el valor es de 34.

Gráfica 17.- Evolución del pulido del Calizo Monterrey con escoria 1



Gráfica 18.- Tasa de pulimento del Calizo Monterrey con escoria 1



4.8.4 Mezcla de agregado: Calizo Yucatán y Escoria San Luis Potosí

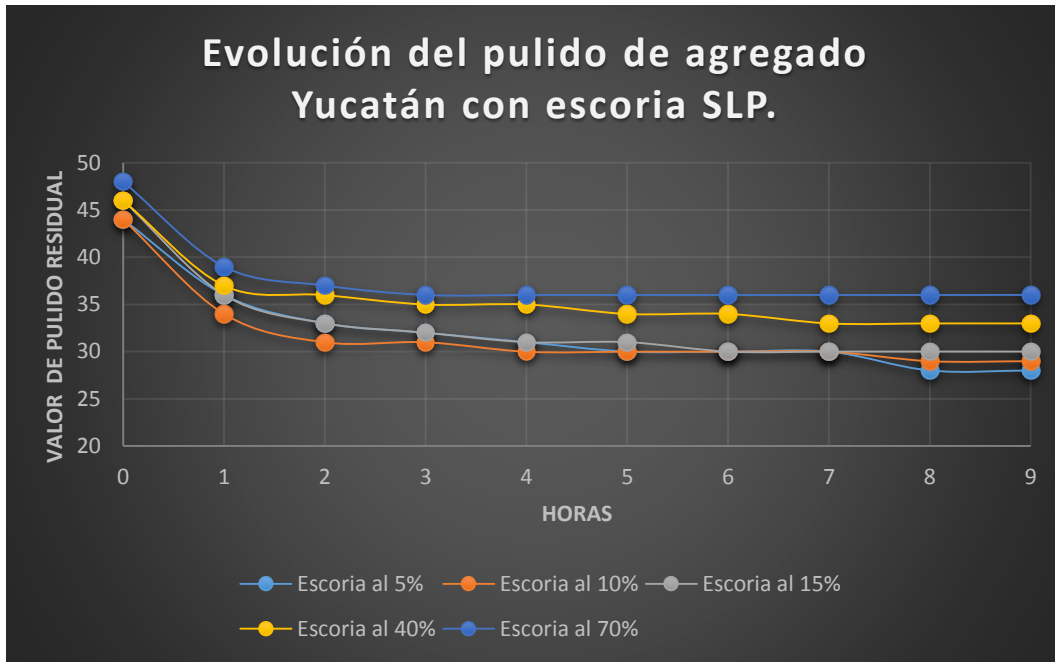
La (Tabla 26), muestra la influencia de ambas escorias en el calizo de Yucatán, cabe decir que tales efectos demuestran su aporte frente al valor de pulido residual (VPR), por ejemplo, para porcentajes del 15% de ambas escorias, se cumplen con las recomendaciones de los agregados para un buen desempeño frente a la fricción, al presentar un VPR igual a 30. Ahora bien, para los porcentajes del 40 y 70%, los resultados mejoran aún más, al elevarse el valor de pulido residual para ambos casos. Por otro lado, llama la atención el comportamiento de las escorias en sus diferentes porcentajes, al existir diferencias entre ellas, por ejemplo, para la combinación del 70% de ambas escorias los valores de VPR son de 36 para el caso de la procedente de San Luis Potosí y 34 para la de Nuevo León.

Tabla 26.- Evolución del VPR respecto al tiempo Calizo Yucatán

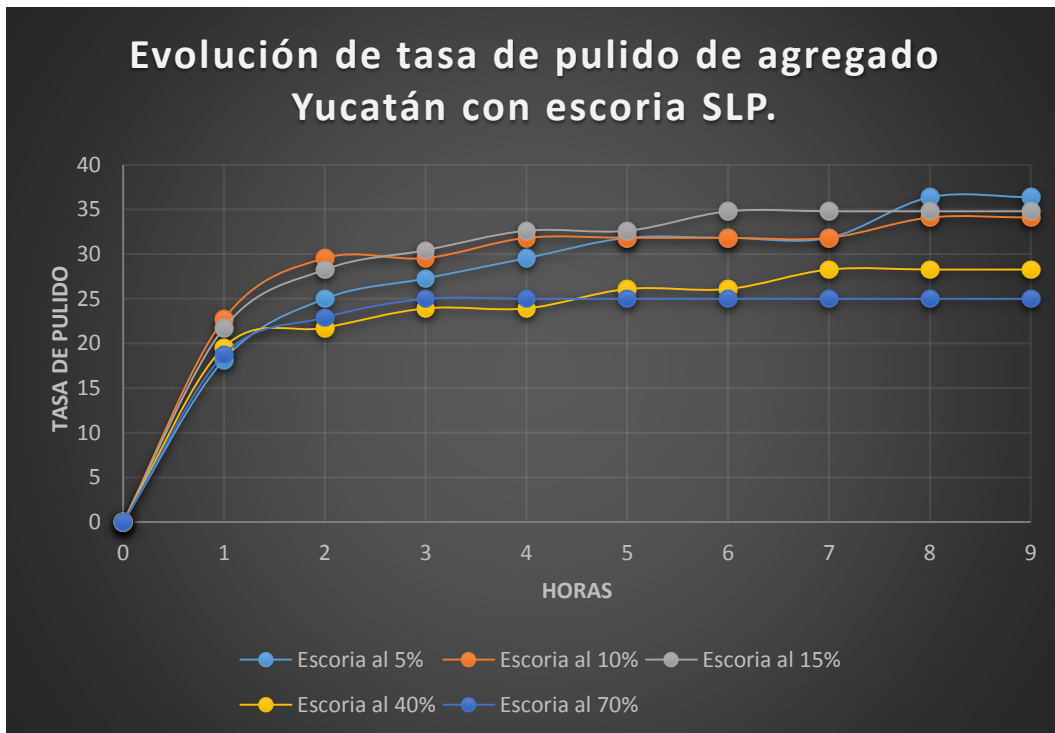
Evolución del VPR a través del tiempo	Calizo Yucatán												
	Escoria de San Luis Potosí						Escoria Nuevo León						
	5%	10%	15%	40%	70%	100%	5%	10%	15%	30%	40%	70%	100%
0	44	44	46	46	48	51	44	46	44	44	44	45	45
1	36	34	36	37	39	40	35	35	35	34	34	37	36
2	33	31	33	36	37	40	31	34	34	34	34	35	36
3	32	31	32	35	36	39	30	33	33	33	34	35	36
4	31	30	31	35	36	39	30	32	32	33	33	35	36
5	30	30	31	34	36	38	30	32	31	33	33	34	35
6	30	30	30	34	36	37	30	31	31	32	32	34	35
7	30	30	30	33	36	37	30	31	30	31	32	34	35
8	28	29	30	33	36	37	30	30	30	31	32	34	35
9	28	29	30	33	36	37	29	30	30	30	32	34	35

En seguida se muestra el comportamiento del valor de pulido residual (VPR) del calizo procedente de Yucatán en combinación con la escoria de San Luis Potosí.

Gráfica 19.- Evolución el pulido del Calizo Yucatán con la escoria



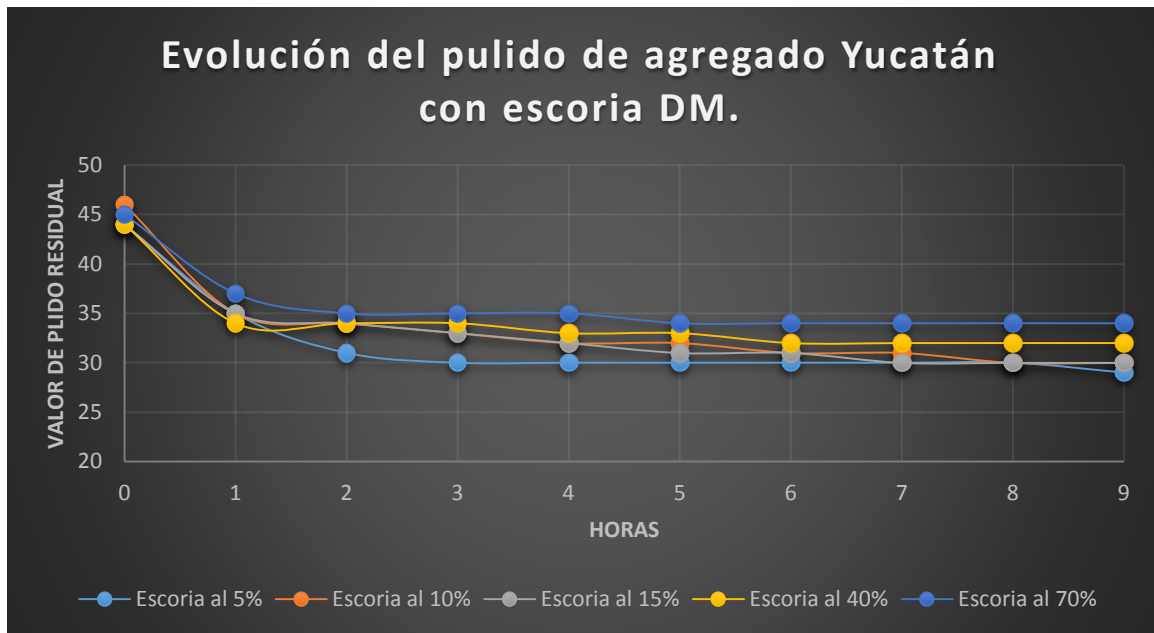
Gráfica 20.-Tasa de pulido del Calizo Yucatán y escoria 2



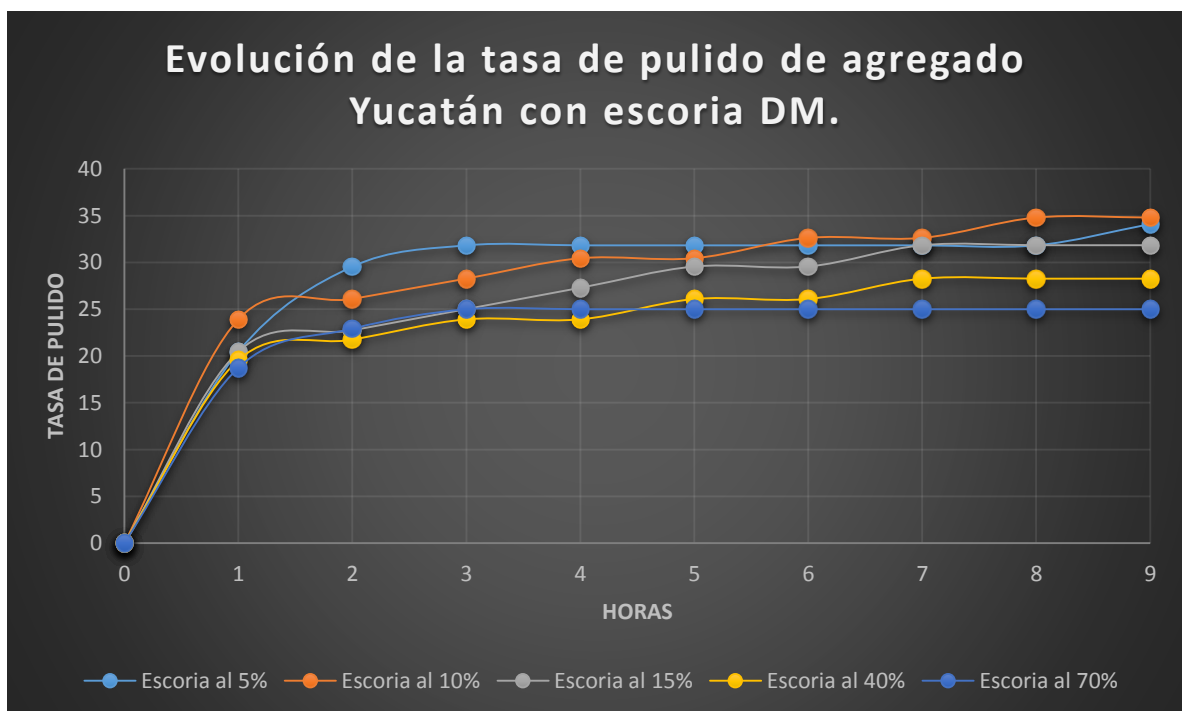
4.8.5 Mezcla de agregado: Calizo Yucatán y Escoria Nuevo León

En seguida se muestra el comportamiento del valor de pulido residual (VPR) del calizo procedente de Yucatán en combinación con la escoria de Monterrey.

Gráfica 21.- Evolución del pulido del Calizo Yucatán con la escoria 1



Gráfica 22.- Tasa de pulido del Calizo Yucatán y escoria 1



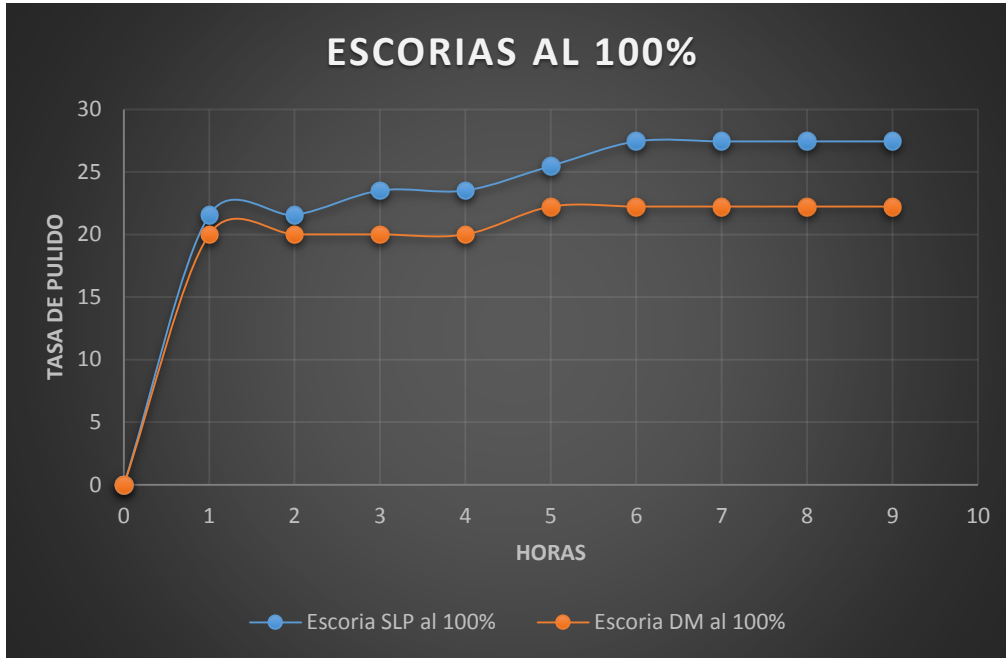
Por último, de la misma manera que se tomaron en cuenta los agregados calizos, se realizaron las pruebas de pulido acelerado a los materiales de ambas escorias contempladas al 100%, es decir, se utilizó exclusivamente escoria de alto horno para ambos casos. Evidentemente existieron diferencias entre ellas desde el inicio de la prueba, por ejemplo, antes de comenzar el pulido de agregado, los valores medidos con el péndulo británico arrojaron 51 para el caso de la escoria de San Luis Potosí y 45 para la de Nuevo León. Este comportamiento llama la atención porque efectivamente existen diferencias entre los materiales, concluyendo de alguna manera que el primer material posee más rugosidad en su estructura, comparado con el segundo. Por otra parte, los valores de pulido residual son diferentes entre sí, porque para el primer material fue de 37 y para el segundo de 35, confirmando una vez más las diferencias entre ellas.

4.8.6 Pulimento de agregado: Uso de las escorias (100%)

Gráfica 23.- Evolución de las dos tipos de escorias



Gráfica 24.- Tasa de pulido de los dos tipos de escorias



De las tablas anteriores se exponen los resultados obtenidos de la mezcla de agregados de los dos calizos así como las dos escorias, inicialmente se exponen los valores del comportamiento del pulido de los agregados de referencia así como los diferentes porcentajes (5, 10, 15, 40, 70 y 100%) de combinación de agregados calizos con escoria de alto horno, en las gráficas de la evolución del pulimento en el tiempo, es importante recalcar que las líneas obtenidas, entre más arriba esté una de otra, la resistencia al deslizamiento será mucho mejor que la anterior, por ejemplo en los porcentajes de 5, 10 y 15% prácticamente se llegó al mismo valor, concluyendo que esos porcentajes no son significativos para mantener en condiciones mínimas aceptables de fricción en las carreteras, Sin embargo, se decidió adicionalmente incrementar los porcentajes hasta contemplar de forma gradual hasta la contemplación de la totalidad de escoria en la capa de rodadura. En donde se puede concluir que las propiedades de la escoria es importante considerando valores de microdeval, porque fue notorio observar que la escoria tipo 2 (Escoria procedente de San Luis Potosí es más resistente que procedente de Coahuila), reflejándose directamente en los resultados de pulimento al 100% de ellas.

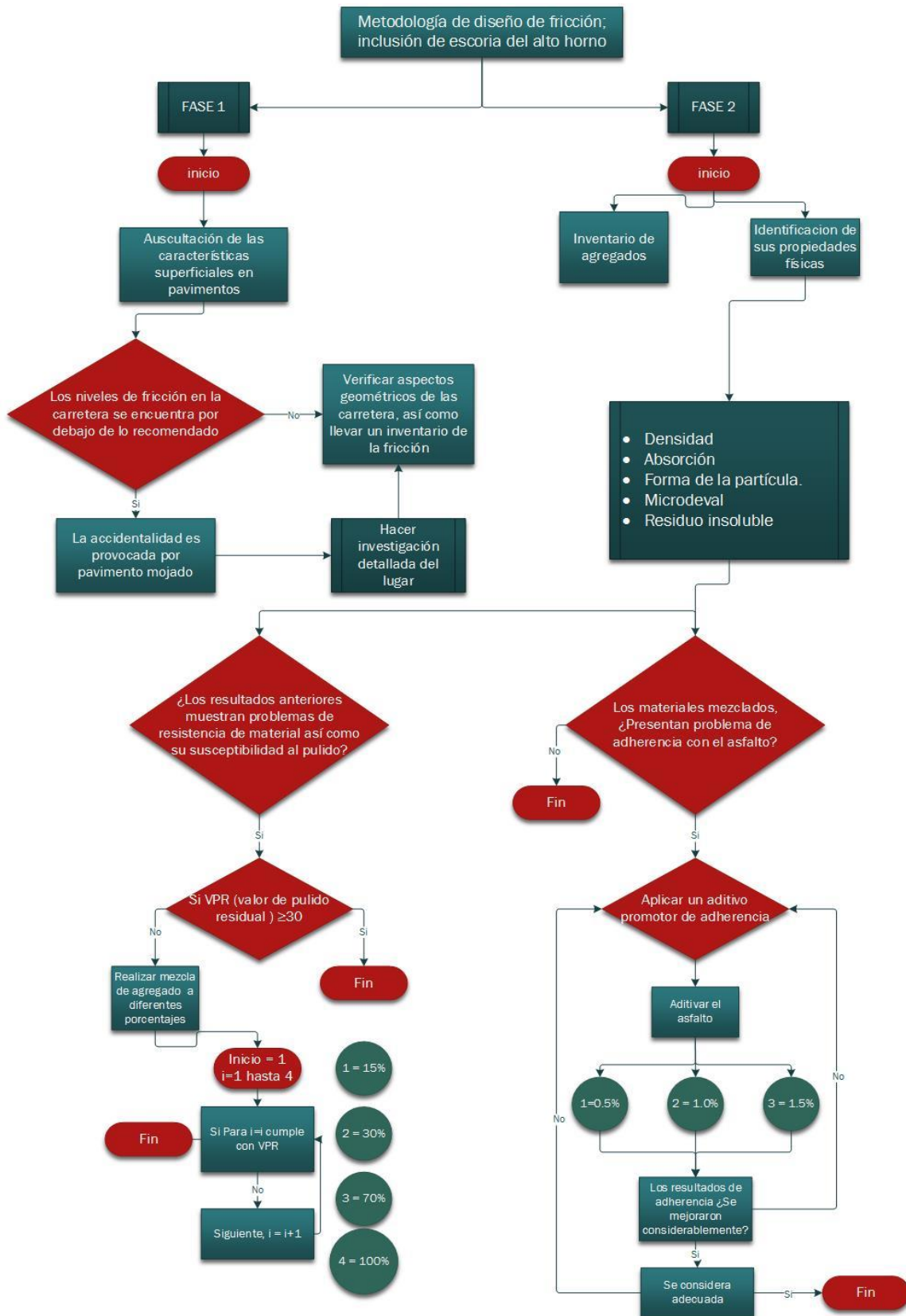
Para efectos de la variable en estudio (pulimento), a continuación se exhiben algunas imágenes acerca del procedimiento general de la prueba de pulimento acelerado y la obtención del Valor de Pulido Residual (VPR) medido con el Péndulo Británico. De manera resumida, el procedimiento consistió inicialmente con la elaboración de las probetas, para posteriormente obtener las lecturas iniciales (valor de referencia) culminado este proceso se sometieron al proceso de pulido y por cada hora se obtenían las lecturas mediadas con el péndulo británico, hasta culminar las (9) nueve horas tal como se mencionó en la parte de la metodología.







5 PROPUESTA DE METODOLOGÍA



6 CONCLUSIONES

En primer lugar, con respecto a las propiedades físicas de los agregados en estudio, existieron diferencias significativas, por ejemplo para el caso de las escorias, evidentemente la manera de fabricación, disposición y factores ambientales cambian sus propiedades. De la misma manera, sus propiedades mineralógicas exhiben diferencias respecto al contenido y número de elementos que las constituyen. Por ejemplo, la cuantificación de óxido de hierro es un parámetro importante porque de ello depende su utilización, gracias a la gran reactividad que posee cuando su concentración sobrepasa el 30%. Cabe señalar que este óxido provoca la porosidad presente en algunas escorias, porque este es su comportamiento principal.

Respecto al tema de adherencia, se ha comentado que el aditivado de asfalto con productos promotores de adherencia, no necesariamente mejora el incremento de la adherencia entre el asfalto y el agregado. Porque se comprobó con el producto AS-100, a una concentración del 0.5%, demuestra mayor efectividad que las mayores (1 y 1.5%). En cambio para el caso del AS-500 es todo lo contrario, porque conforme aumenta la concentración, los resultados mejoraron considerablemente, en otras palabras, la concentración del 1.5% mostró mejor adherencia que las anteriores. En este mismo sentido, los calizos presentan ciertos problemas de adherencia cuando es utilizado asfalto convencional, en cambio, cuando se utiliza un producto promotor de adherencia a una concentración adecuada, presentan una adherencia intermedia. Por último, la escoria procedente de San Luis Potosí, presenta problemas considerables de adherencia con base a su comportamiento de los datos.

En segundo lugar respecto a los calizos, las pruebas de residuo insoluble, revelaron que existe gran cantidad de carbonatos solubles dentro de su estructura, para el primer caso (calizo Nuevo León) se obtuvo el 10% y 8% para el calizo de Yucatán. Resulta claro que valores bajos de residuo insoluble, indican la existencia

de grandes cantidades de carbonatos, en consecuencia, no deben ser utilizados por completo en el diseño de capas de rodadura, porque indudablemente suscitarán problemas de pulimento de agregado en la superficie del pavimento.

Con respecto a las pruebas de microdeval, es necesario aclarar que los resultados obtenidos exhiben el porcentaje de degradación de un material en estudio, cuando es sometido a un proceso de abrasión en condiciones húmedas. Frente a este escenario, fue necesario obtener porcentajes de abrasión, tanto de los agregados calizos como las escorias, para conocer su grado de desempeño. Evidentemente al ser comparados los resultados, existen evidencias significativas entre ellos, por ejemplo para el caso de las escorias, el agregado procedente de San Luis Potosí presentó mejor comportamiento que el de Nuevo León en su fracción gruesa, es decir, el primero de ellos presentó una pérdida de masa alrededor del 6% comparado con el 9% de segundo, sin embargo en su fracción fina cambió su comportamiento, por ejemplo, para el caso de la escoria de San Luis Potosí pasó del 6% en fracción gruesa al 10% en la fracción fina, en cambio para la procedente de Nuevo León pasó del 9% al 11% en la fracción fina. Por lo que es necesario considerar este parámetro en el diseño de capas de rodadura.

Con respecto a los calizos, cabe señalar que el agregado procedente de Yucatán presentó un desgaste promedio del 14%, comparado con el 10% del de Nuevo León en su fracción gruesa, sin embargo en su fracción fina, cambiaron aún más su comportamiento, por ejemplo para el caso de la primera caliza, pasó del 14% en la fracción gruesa al 22% en la fracción fina, en cambio para la segunda, pasó del 10% al 15% en la fracción fina. Cabe señalar que con base a las recomendaciones hechas por el protocolo AMAAC (Asociación Mexicana del Asfalto A.C) es admisible un desgaste máximo de los agregados del 18%. Sin embargo la utilización de este tipo de agregado calizo es inevitable porque no existe otro material con diferentes características que lo hagan resistente a la abrasión

Con respecto a los resultados de pulimento acelerado, en primer lugar, los resultados de ambos calizos fueron tomados como valores de referencia. Sin embargo, al compararlos con las recomendaciones que se han hecho hasta este momento, se rechazarían totalmente por el incumplimiento de requisitos mínimos, al ser utilizados en el diseño de capas de rodadura, con propiedades de fricción adecuadas, es por ello que gracias a las características de la escoria de alto horno, fue necesario evaluar su comportamiento en una primera fase experimental donde se contempló el 5, 10 y 15 % de mezcla de agregado respecto a su volumen, sin embargo el aporte de las escorias no fue evidente, se explica entonces, que el volumen de agregado (escoria) fue insuficiente para contrarrestar tal efecto (pérdida de microtextura). Dado que los valores del VPR (valor de pulido residual) fueron insuficientes se consideró aumentar los porcentajes al 40, 70 y 100% para dar cumplimiento a los valores de pulido residual recomendados.

Partiendo de los supuestos anteriores, al evaluar nuevamente el aporte de la escoria de alto horno en los agregados calizos, se encontraron los siguientes resultados. En primer lugar, para la escoria procedente de San Luis Potosí, el valor del 40%, mostró una evidente aportación frente al valor de pulido residual, en seguida, así mismo, el valor del 70% presentó el mismo valor que el anterior. Dado que los resultados son prácticamente los mismos, la aportación de la escoria se hace evidente a partir del 40% y al aumentar el porcentaje, su nivel de significancia no es tan relevante. Por su parte el porcentaje del 100%, comparado con los últimos dos, el valor del pulido residual se incrementa en poco porcentaje por lo que se concluye que el porcentaje adecuado para mantener una adecuada fricción en las carreteras por medio de la inclusión de escoria de alto horno es el de 40% de ambos materiales.

Una vez comprobado la efectividad de la escoria de alto horno respecto al valor del pulido residual y su aporte a los temas de fricción, se comprobó que efectivamente la escoria de alto horno eleva el valor de pulido residual a valores

aceptables, de manera que se comprueba satisfactoriamente la hipótesis planteada en este trabajo de investigación, así mismo es importante recalcar un aspecto relevante. Con base a los resultados de pulimento, la escoria que opone mayor resistencia es la de San Luis Potosí, porque al ser comparada con la de Nuevo León en el mismo proporción, el valor de pulido residual es diferente, por ejemplo, para el porcentaje del 40% de ambas escorias en combinación del agregado de Monterrey, los valores de VPR son 36 para la primera y 34 para la segunda respectivamente, así mismo, 33 y 32 en combinación con la caliza de Yucatán. Además para el 70% de ambas escorias reportan 36 y 34 para la combinación de la caliza de Yucatán, en cambio para el agregado de Monterrey reportan el mismo resultado que las anteriores.

Por último es necesario recalcar que gracias a las características de la escoria del alto horno, la hacen un material adecuado para preservar niveles de fricción en las carreteras cuidadosamente diseñado, sin embargo los materiales a pesar de ser de desperdicio industrial en la fabricación de acero, presentan diferencias significativas, visualizadas y afirmadas ya sea por una simple prueba de desprendimiento por fricción o por el cálculo de su densidad. Otro aspecto que debe ser considerado son los resultados de la prueba de microdeval, mediante la cual se visualiza el comportamiento de determinado material, y dependiendo del porcentaje entre más bajo sea, el material presenta mayor resistencia a la abrasión.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 7428-08. 2009. Standard Test Method for Resistance of Fine aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-deval Apparatus.
- ASTM D 6928-08, 2009. Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-deval Apparatus.
- Botasso Hugo Gerardo; Balige Marcela; Osmar González Rubén; Bisio Alejandro 2005, "Nueva metodología para la valoración de la adherencia árido ligante", LEmac.
- Comisión Permanente del Asfalto. 2005. Especificaciones técnicas de mezclas asfálticas en caliente de bajo espesor para carpetas de rodamiento, Versión 3.
- Crespo del Río, Ramón; Garagorri Yarza, José M; Viguera González Juan F. 1992. La adherencia neumático-pavimento, Revista Carreteras, No. 59 Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera.
- Cui, S., Blackman, B.R.K., Kinloch, A.J., Taylor, A.C., 2014. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters. Int. J. Adhes. Adhes. 54, 100–111. doi:10.1016/j.ijadhadh.2014.05.009
- Dahir, S.H. and J.J. Henry. 1978. Alternatives for the Optimization of Aggregate and Pavement Properties Related to Friction and Wear Resistance, Report No. FHWA-RD-78- 209, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C.
- Feng, M., Zhen, F., Lilong, W., 2014. Asphalt-Aggregate Adhesion Work of Natural Asphalt Modified Asphalt. Int. J. Pavement Res. Technol. 7, 456.
- Flores Flores Mayra; Gómez López José Antonio, Garnica Anguas Paul. 2010. Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por medio de mezclas de agregado. Publicación Técnica No. 340, Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila, Qro.
- Flores Flores Mayra; Pérez Salazar Alfonso; Garnica Anguas Paul. 2008. Análisis de especificaciones de valor de pulido para agregado. Publicación Técnica No. 315, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro.
- Garnica Anguas Paul; Flores Flores Mayra; Gómez López José Antonio; Delgado Alamilla Horacio. 2005. Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas. Publicación Técnica No 267. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro,
- Goyat Yann, and Delanne Yves. 2006 Adherencia y seguridad vial, Revista Carreteras No 145, Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera.
- Henderson R; Cook G; Cenek P; Patrick J. Potter S. 2006. The effect of crushing on the skid resistance of chipseal roads, Opus Central Laboratories, Land Transport New Zealand Research Report 295.
- Hemdorff S; Leden L; Sakshaug K; Salusjärvi M & Schandersson R. 1989. Trafiksäkerhet och vägytans egenskaper (TOVE). Slutrapport. Tiedotteita 1075. VTT.

- Hall, J.W., Smith, K.L., Titus-Glover, L., Wambold, J.C., Yager, T.J., Rado, Z., 2009. Guide for pavement friction. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.
- Kandhal, P.S; F. Parker Jr; and R.B. Mallick. 1997. Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of the Practice, NCAT Report No. 97-6, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn, Alabama.
- Kuemmel, D.A; J.R. Jaeckel, and A. Satanovsky. 2000. Investigative Study of the ItalgripSystem: Noise Analysis, Report No. WI/SPR-02-00Wisconsin Department of Transportation, Madison, Wisconsin.
- Kuttesch, J. S. 2004. "Quantifying the Relationship Between Skid Resistance and Wet Weather Accidents for Virginia Data," M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Larson, R.M. (1999). "Consideration of Tire/Pavement Friction/Texture Effects on Pavement Structural Design and Materials Mix Design," Federal Highway Administration (FHWA), Office of Pavement Technology, Washington, D.C.
- Li, J., Zhang, W., Jia, W., Walubita, L.F., Liu, G., 2014. Quantitative evaluation and enhancement of adhesion between bitumen and aggregates. J. Chem. Pharm. Res. 6, 1737–1742.
- Liang, R.Y. and L.L. Chyi. 2000. "Polishing And Friction Characteristics Of aggregates Produced in Ohio," Report No. FHWA/OH-2000/001, Ohio Department of Transportation, Columbus, Ohio.
- Liang Robert Y. 2003. Blending Proportions of High Skid and Low Skid Aggregate, FinalReport, Department of Civil Engineering, University of Akron, OhioDepartment of Transportation.
- Liang Robert Y. 2009. Continuing Investigation of Polishing and Friction Characteristics of Limestone Aggregate in Ohio, Report No. OH-2009/10, University of Akron, Akron Ohio.
- López Valdés Diana Berenice y Garnica Anguas Paul. 2002. Consideraciones para la aplicación del índice de fricción internacional en carreteras de México. Publicación técnica No. 170. Instituto Mexicano del Transporte.
- Masad Eyad; Arash Rezaei; Arif Chowdhury; and Pat Harris. 2009. Predicting asphaltmixture skid resistance based on aggregate characteristics, Reporte No.05627-1, Texas Transportation Institute.
- McCullough, B.V. and K.D. Hankins. 1966. "Skid Resistance Guidelines for Surface Improvements on Texas Highways," In Transportation Research Record: Journal of theTransportation Research Board (TRB), No. 131, TRB, Washington, D.C.
- Méndez Piña Ana; Gómez García Manuel José, 2009. "Proyecto Sobre Residuos: Utilización de Escorias como sustitutos de Áridos". Gestión Medio ambiental.
- Noyce David A; Bahia Hussain U; Yambó Josué M; Guisk Kim. 2005. Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements, Midwest Regional University Transportation Center , Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory

- Noyce, D.A; H.U. Bahia; J.M. Yambo, and G. Kim. 2005. Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements,” Draft Literature Review and State Surveys, Midwest Regional University Transportation Center (UMTRI), Madison, Wisconsin.
- Recomendación AMAAC RA 08. 2010. “Desprendimiento por Fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Asociación Mexicana del Asfalto. A.C.
- Rico y Del Castillo. 1998. La Ingeniería de Suelos Aplicada a las Vías Terrestres, Volumen 2, Editorial Limusa.
- ASTM D3042-09. 2009. Insoluble Residue in Carbonates aggregates.
- Texas Department of Transportation (2004), Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets and Bridges.
- Texas Department of Transportation .2005., Tex-438-A Accelerated Polish Test for Coarse Aggregate, 400-A Concrete Test Procedure, Texas Department of Transportation.
- Texas Department of Transportation, Pavement Design Manual. (2004).
- Curtis Berthelot; Ania Antony; Wandzura Colin, Marjerison Brent. 2010. Triaxial Frequency Sweep Characterization of Asphalt-Aggregate Adhesion in Saskatchewan Asphalt Mixes.
- Wallman, C.-G., \AAström, H., 2001. Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety: A literature review.

8 ANEXOS

8.1 Cartas de control para valores individuales, rangos móviles y diagramas de caja y bigote de los resultados de desprendimiento por fricción

8.1.1 AC-20 Querétaro

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	41.00	
2	40.00	1.00
3	28.00	12.00
4	27.00	1.00
5	38.00	11.00
6	44.00	6.00
7	32.00	12.00
8	38.00	6.00
9	33.00	5.00
10	35.00	2.00
Sumas	356.00	56.00

Elementos individuales	
R	6.22
Media	35.60
E2	2.66
n	2
LS	52.1511111
LI	19.0488889

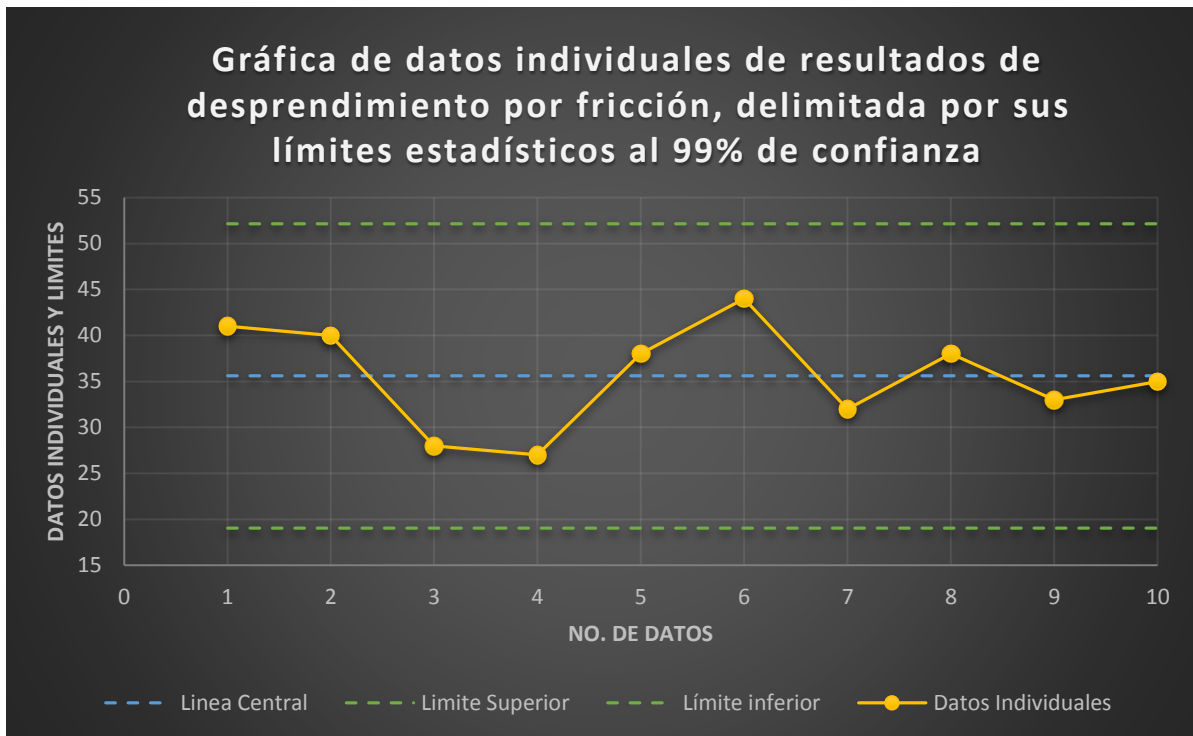
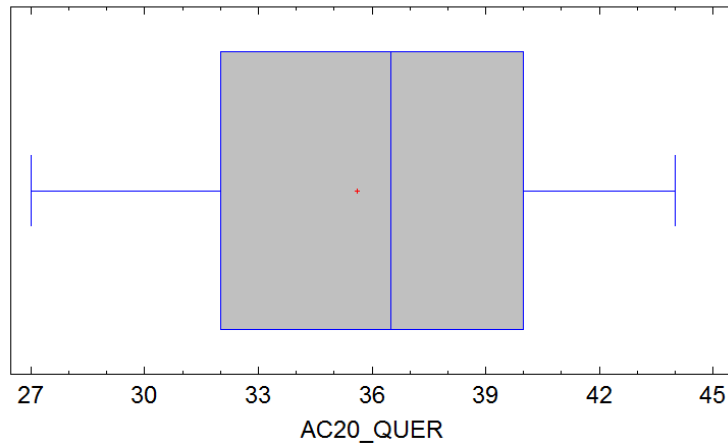


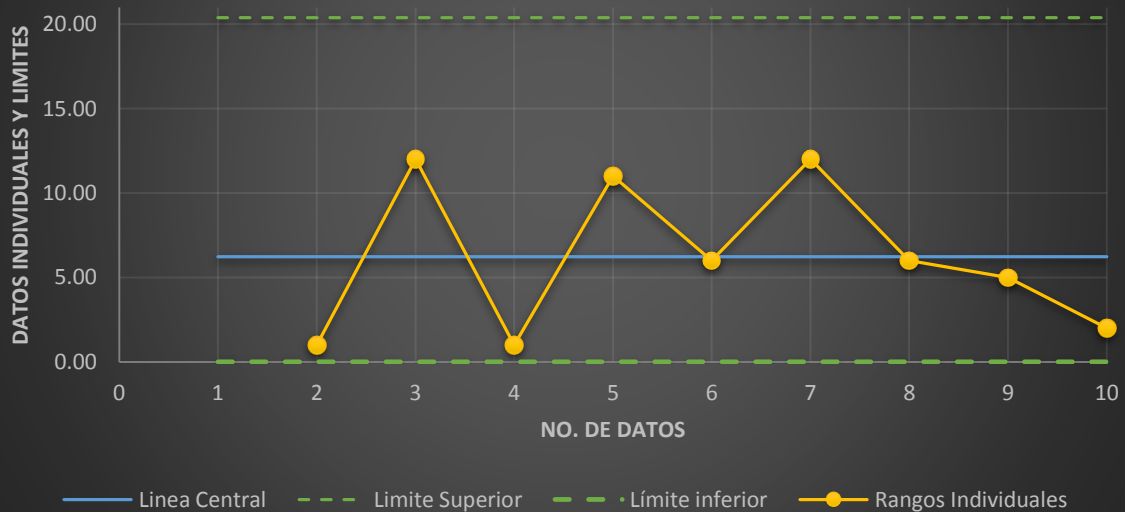
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	41.00	
2	40.00	1.00
3	28.00	12.00
4	27.00	1.00
5	38.00	11.00
6	44.00	6.00
7	32.00	12.00
8	38.00	6.00
9	33.00	5.00
10	35.00	2.00
Sumas	356.00	56.00

Carta R (Móviles)	
R	6.22
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	20.384
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.1.2 AC-20 Yucatán

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de desprendimiento	Rango móvil
1	32.00	
2	30.00	2.00
3	31.00	1.00
4	26.00	5.00
5	25.00	1.00
6	29.00	4.00
7	26.00	3.00
8	27.00	1.00
9	26.00	1.00
10	24.00	2.00
Sumas	276.00	20.00

Elementos individuales	
R	2.22
Media	27.60
E2	2.66
n	2
LS	33.5111111
LI	21.6888889

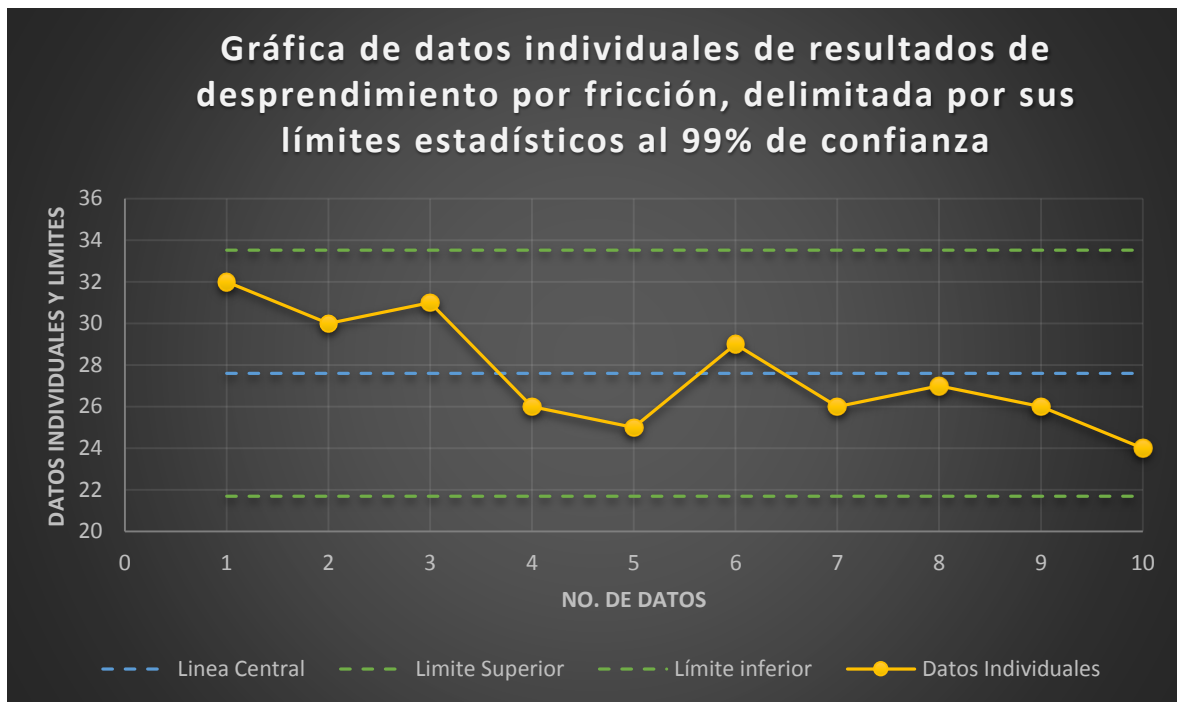
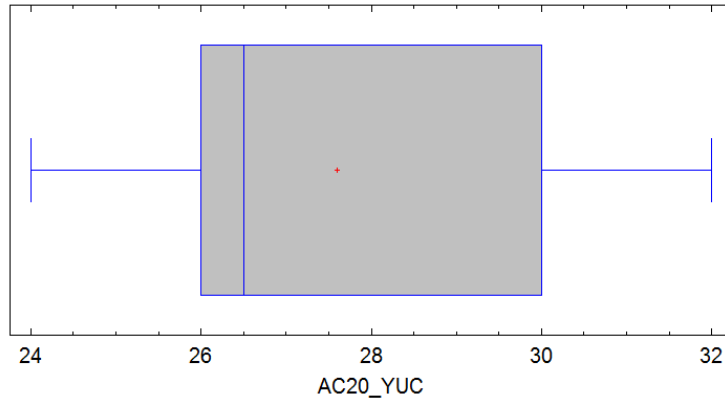


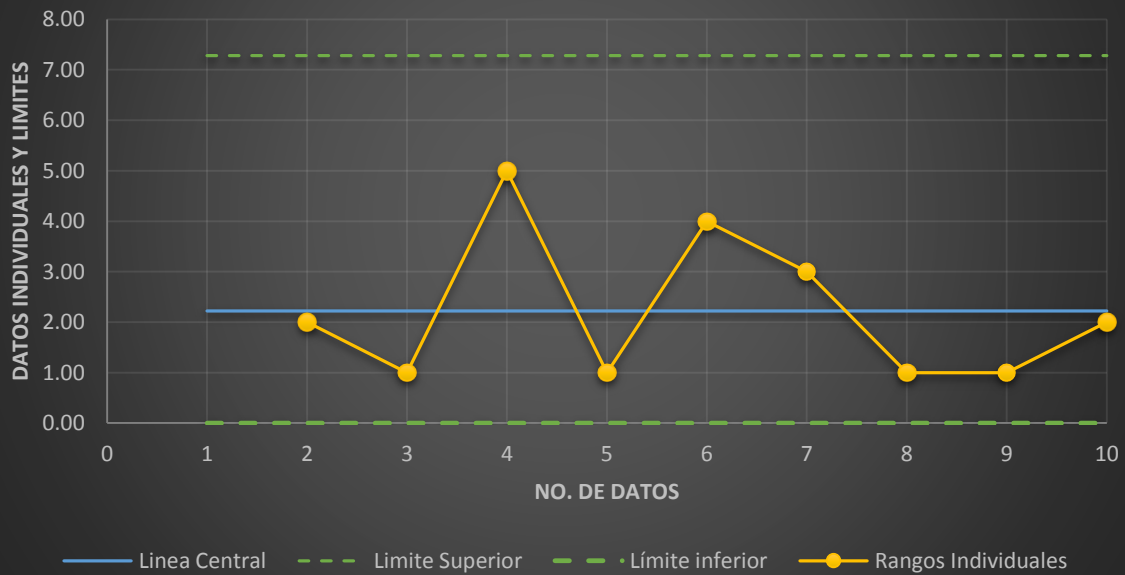
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de desprendimiento	Rango móvil
1	32.00	
2	30.00	2.00
3	31.00	1.00
4	26.00	5.00
5	25.00	1.00
6	29.00	4.00
7	26.00	3.00
8	27.00	1.00
9	26.00	1.00
10	24.00	2.00
Sumas	276.00	20.00

Carta R (Móviles)	
R	2.22
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	7.28
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.2 AS-100

8.2.1 AC-20 aditivado a 0.5% de AS-100

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	21.00	
2	22.00	1.00
3	18.00	4.00
4	19.00	1.00
5	18.00	1.00
6	19.00	1.00
7	18.00	1.00
8	18.00	0.00
9	20.00	2.00
10	18.00	2.00
Sumas	191.00	13.00

Elementos individuales	
R	1.44
Media	19.10
E2	2.66
n	2
LS	22.9422222
LI	15.2577778

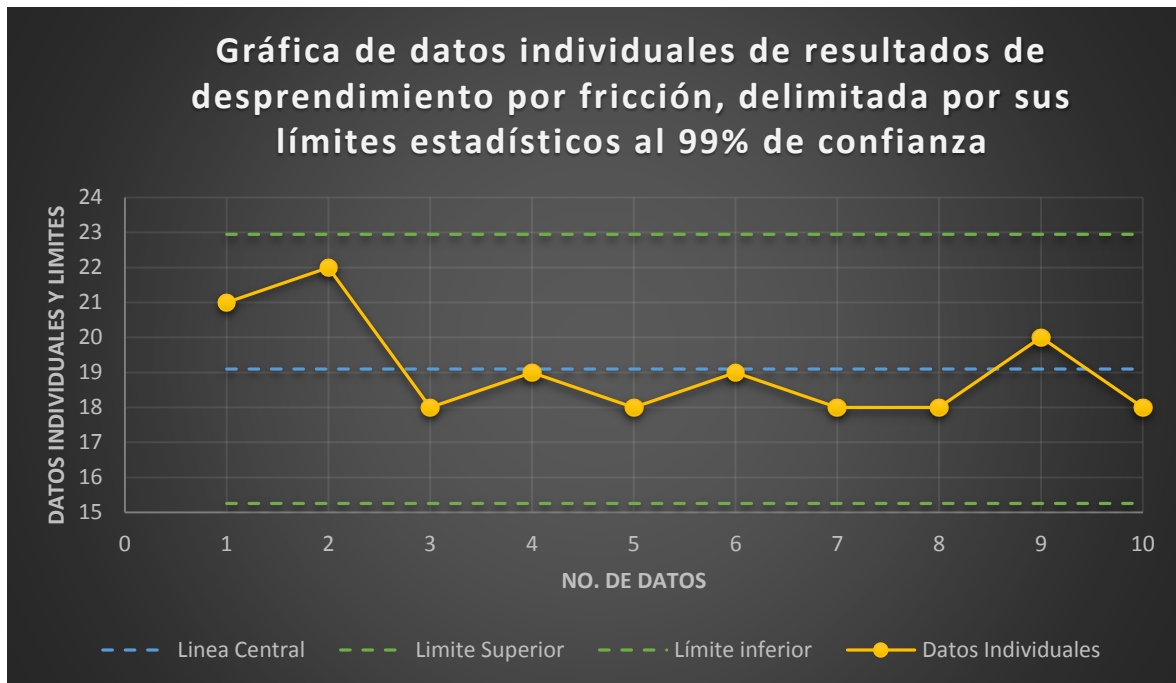
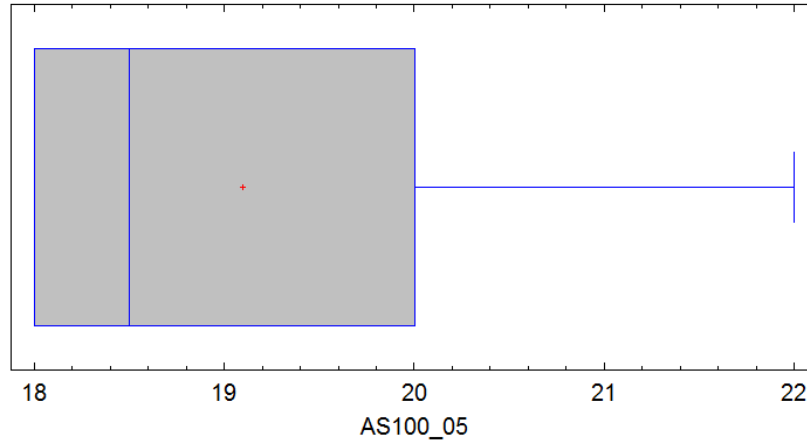


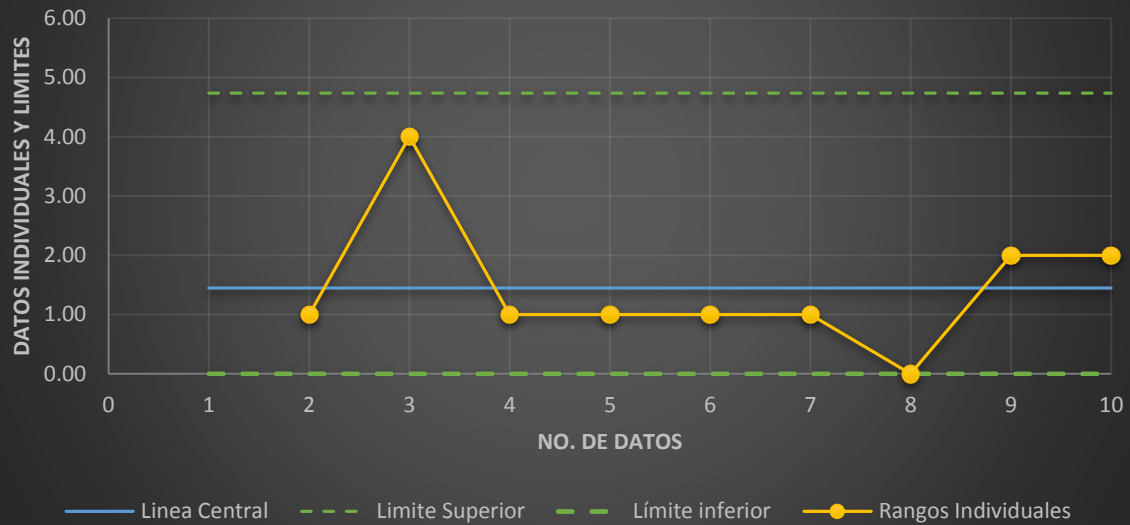
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	21.00	
2	22.00	1.00
3	18.00	4.00
4	19.00	1.00
5	18.00	1.00
6	19.00	1.00
7	18.00	1.00
8	18.00	0.00
9	20.00	2.00
10	18.00	2.00
Sumas	191.00	13.00

Carta R (Móviles)	
R	1.44
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	4.732
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.2.2 AC-20 aditivado a 1% de AS-100

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	23.00	
2	22.00	1.00
3	23.00	1.00
4	21.00	2.00
5	26.00	5.00
6	26.00	0.00
7	24.00	2.00
8	23.00	1.00
9	25.00	2.00
10	23.00	2.00
Sumas	236.00	16.00

Elementos individuales	
R	1.78
Media	23.60
E2	2.66
n	2
LS	28.3288889
LI	18.8711111

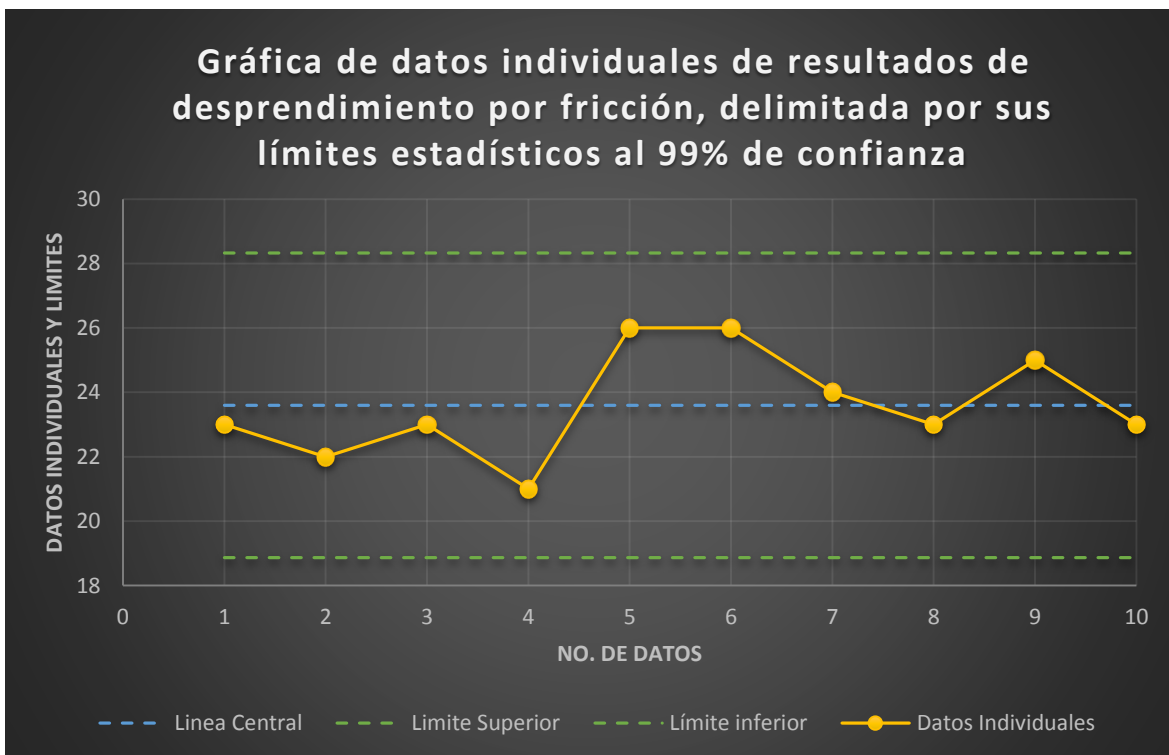
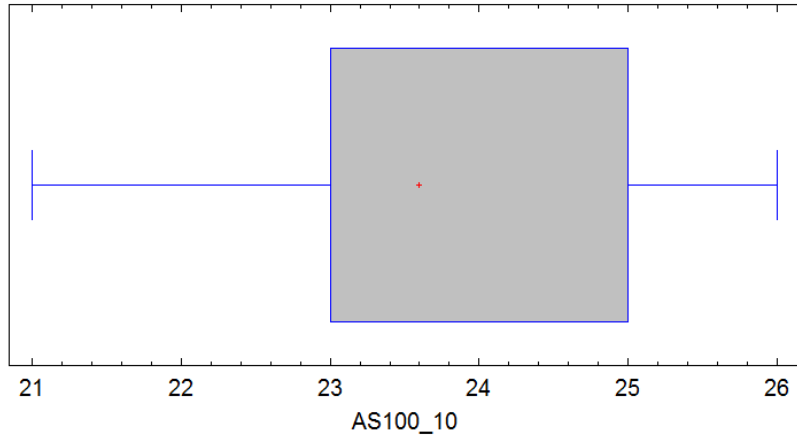


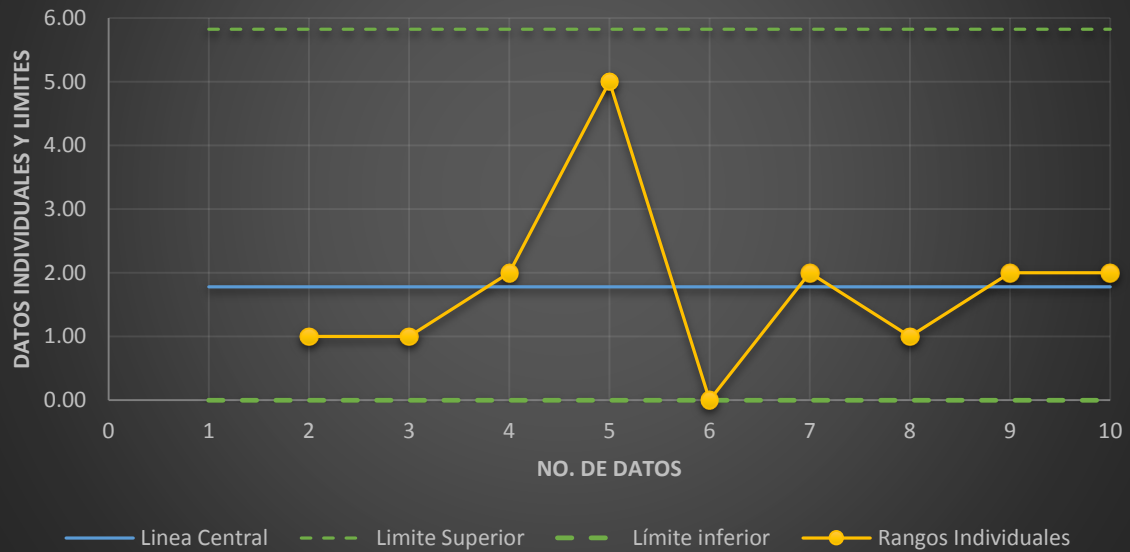
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	23.00	
2	22.00	1.00
3	23.00	1.00
4	21.00	2.00
5	26.00	5.00
6	26.00	0.00
7	24.00	2.00
8	23.00	1.00
9	25.00	2.00
10	23.00	2.00
Sumas	236.00	16.00

Carta R (Móviles)	
R	1.78
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	5.824
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.2.3 AC-20 aditivado a 1.5% de AS-100

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	30.00	
2	25.00	5.00
3	23.00	2.00
4	24.00	1.00
5	22.00	2.00
6	26.00	4.00
7	28.00	2.00
8	26.00	2.00
9	22.00	4.00
10	28.00	6.00
Sumas	254.00	28.00

Elementos individuales	
R	3.11
Media	25.40
E2	2.66
n	2
LS	33.6755556
LI	17.1244444

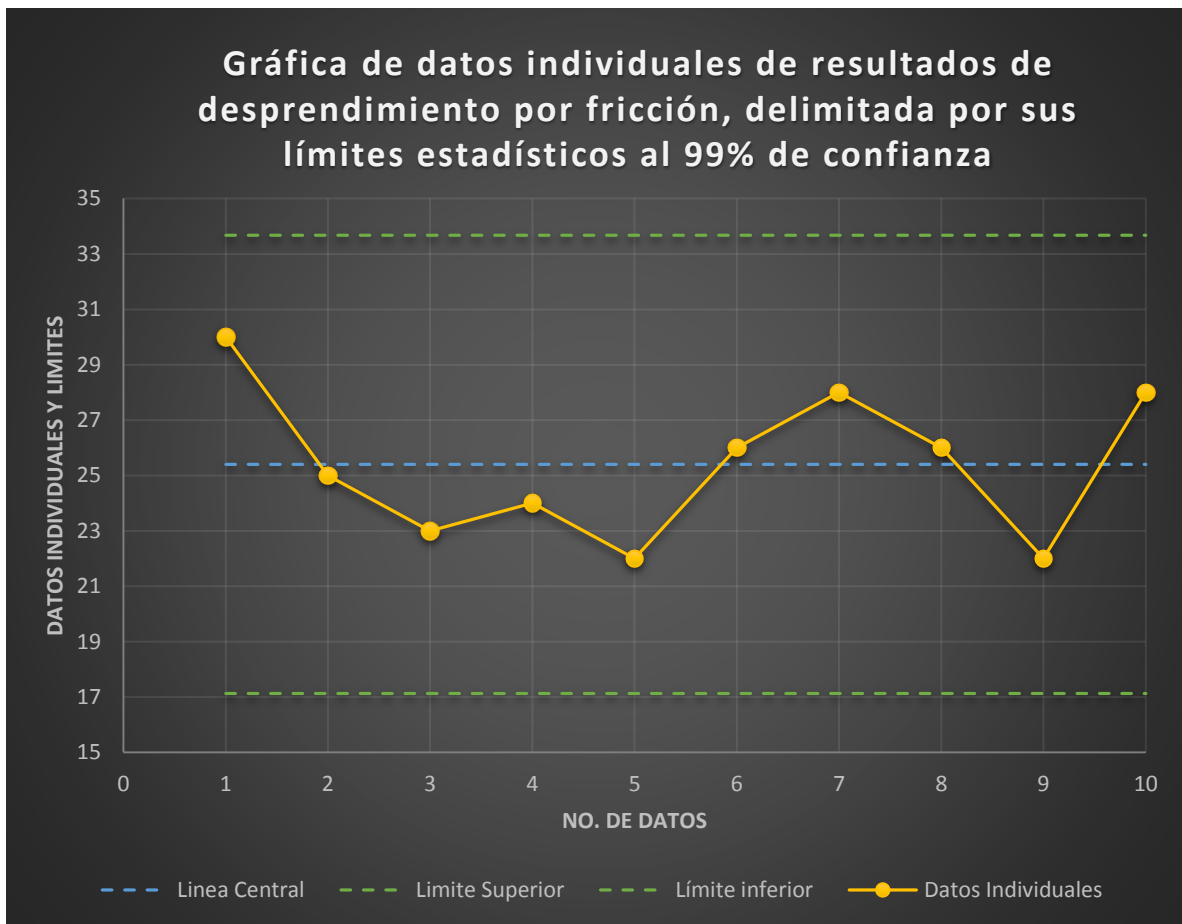
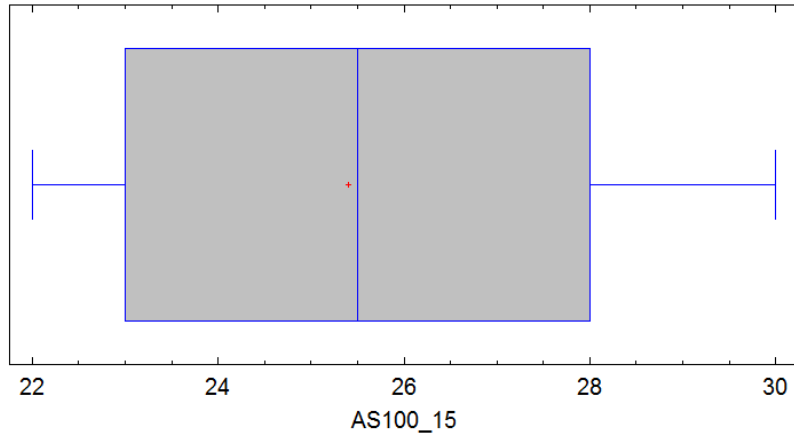


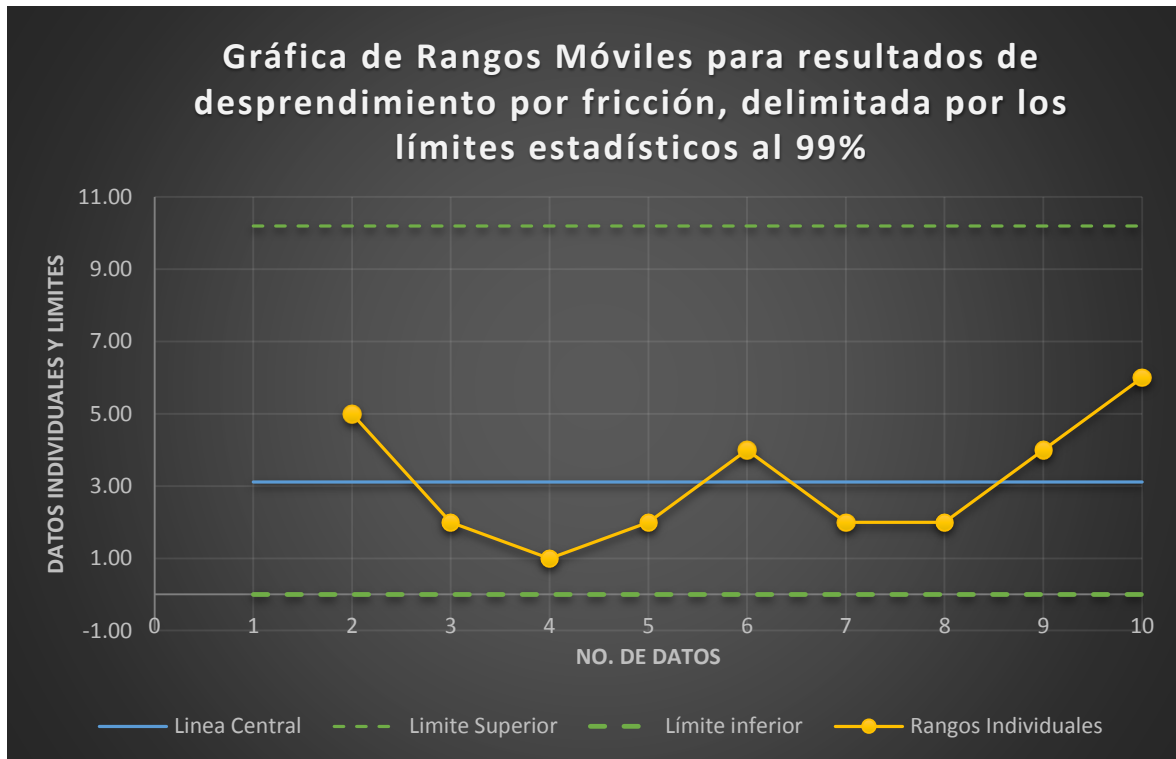
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	30.00	
2	25.00	5.00
3	23.00	2.00
4	24.00	1.00
5	22.00	2.00
6	26.00	4.00
7	28.00	2.00
8	26.00	2.00
9	22.00	4.00
10	28.00	6.00
Sumas	254.00	28.00

Carta R (Móviles)	
R	3.11
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	10.192
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.3 AS-500

8.3.1 AC-20 aditivado a 0.5% de AS-500

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	11.00	
2	11.00	0.00
3	11.00	0.00
4	9.00	2.00
5	8.00	1.00
6	11.00	3.00
7	8.00	3.00
8	10.00	2.00
9	11.00	1.00
10	10.00	1.00
Sumas	100.00	13.00

Elementos individuales	
R	1.44
Media	10.00
E2	2.66
n	2
LS	13.8422222
LI	6.1577778

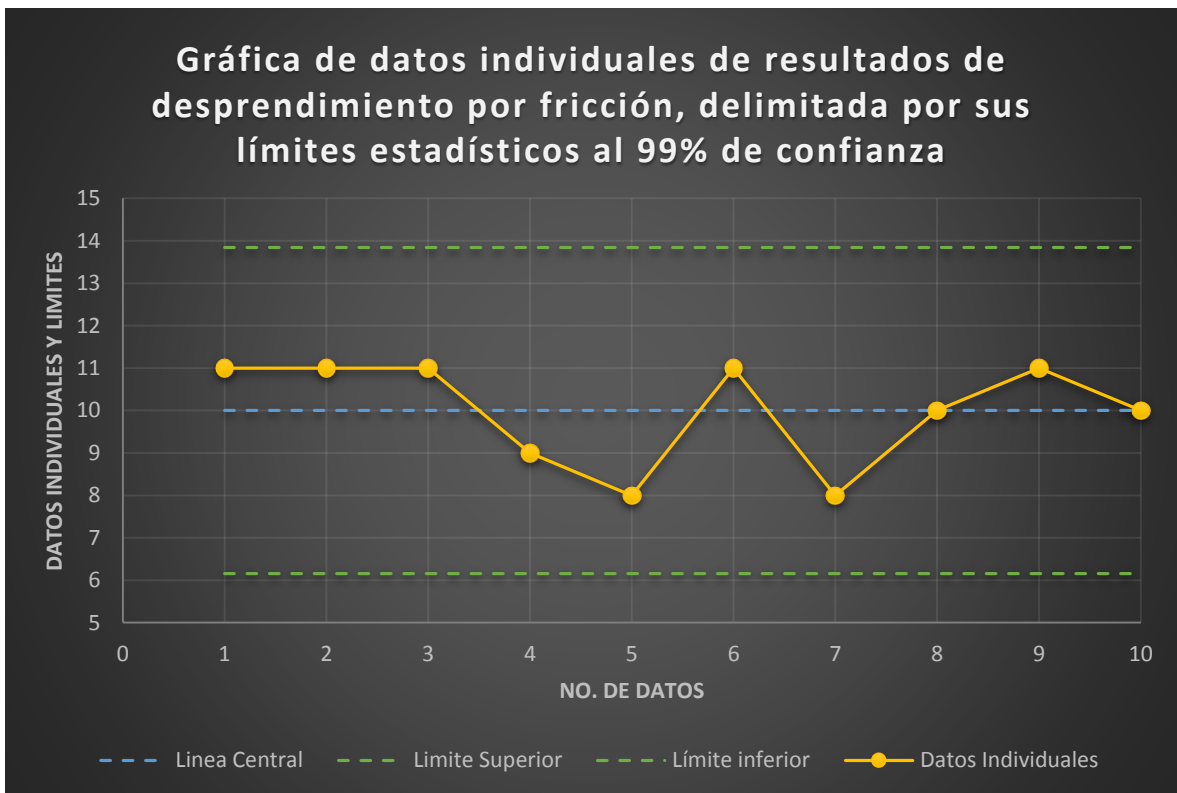
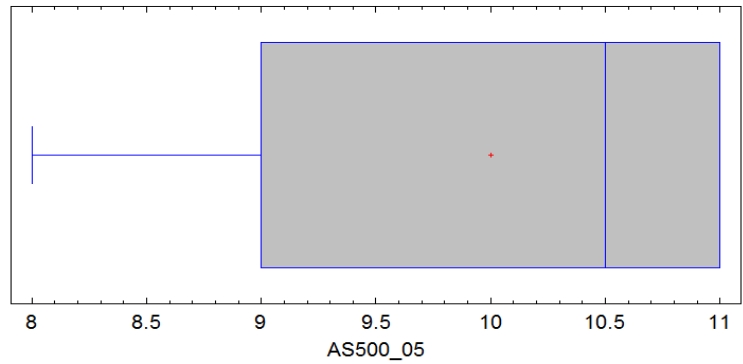


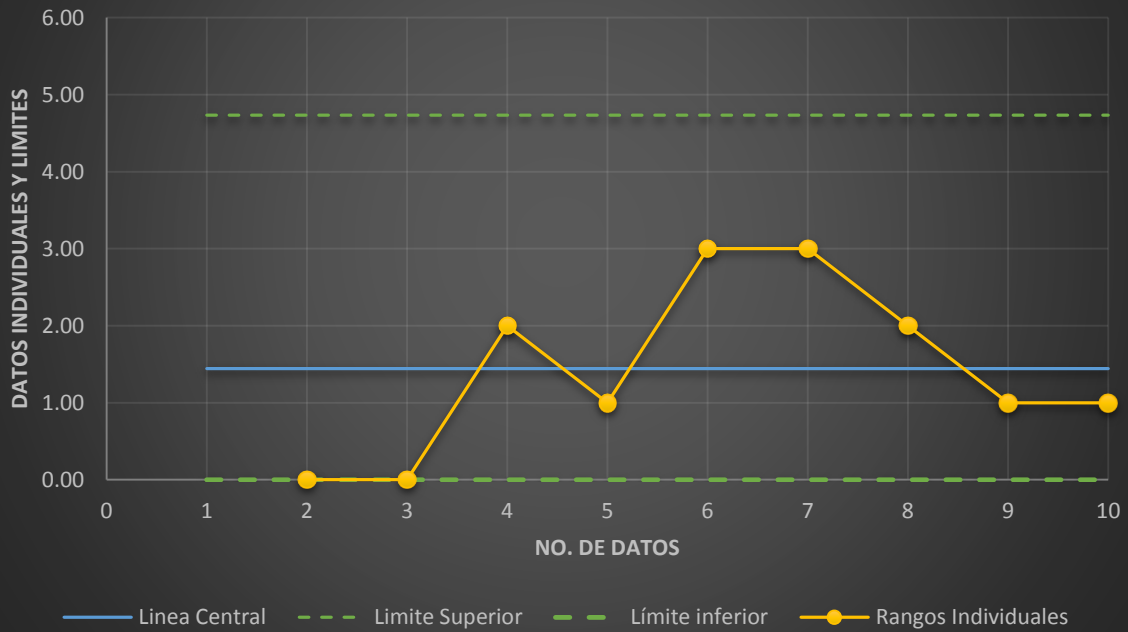
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	11.00	
2	11.00	0.00
3	11.00	0.00
4	9.00	2.00
5	8.00	1.00
6	11.00	3.00
7	8.00	3.00
8	10.00	2.00
9	11.00	1.00
10	10.00	1.00
Sumas	100.00	13.00

Carta R (Móviles)	
R	1.44
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	4.732
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.3.2 AC-20 aditivado a 1% de AS-500

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	9.00	
2	7.00	2.00
3	9.00	2.00
4	9.00	0.00
5	9.00	0.00
6	8.00	1.00
7	9.00	1.00
8	7.00	2.00
9	9.00	2.00
10	9.00	0.00
Sumas	85.00	10.00

Elementos individuales	
R	1.11
Media	8.50
E2	2.66
n	2
LS	11.4555556
LI	5.54444444

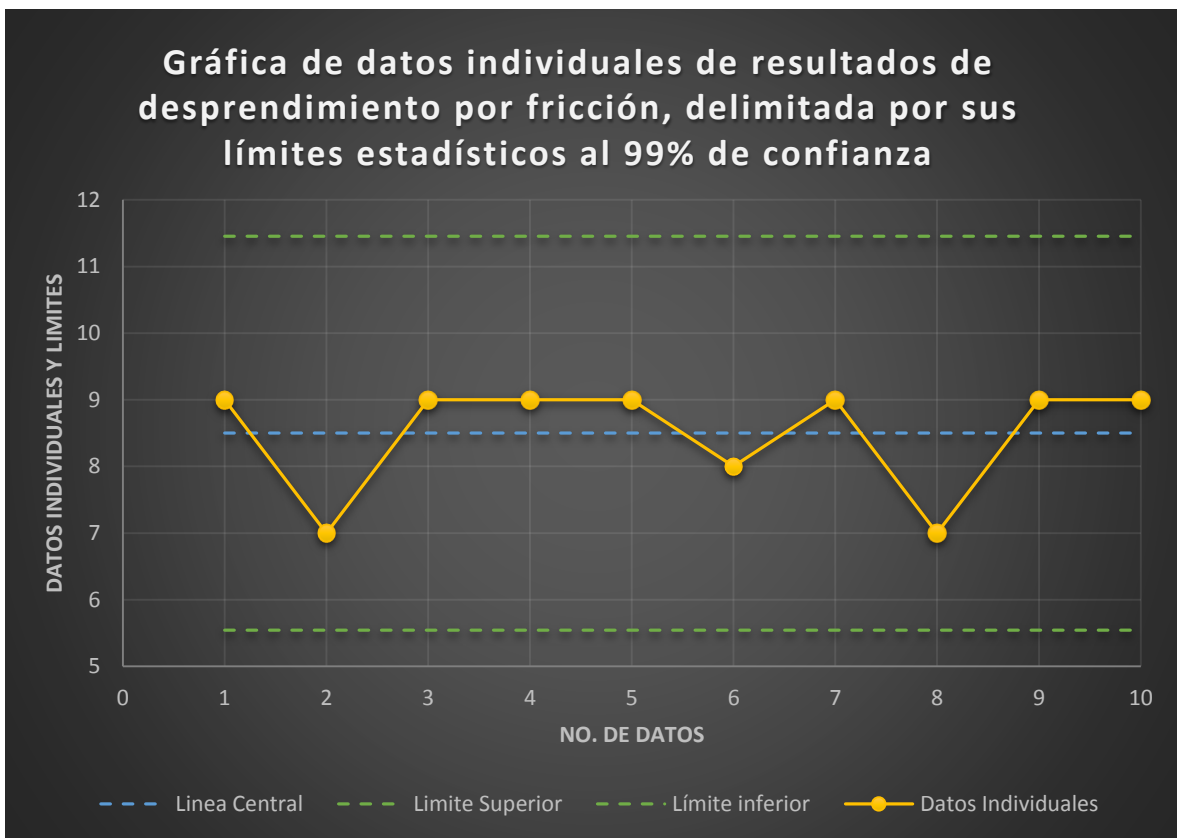
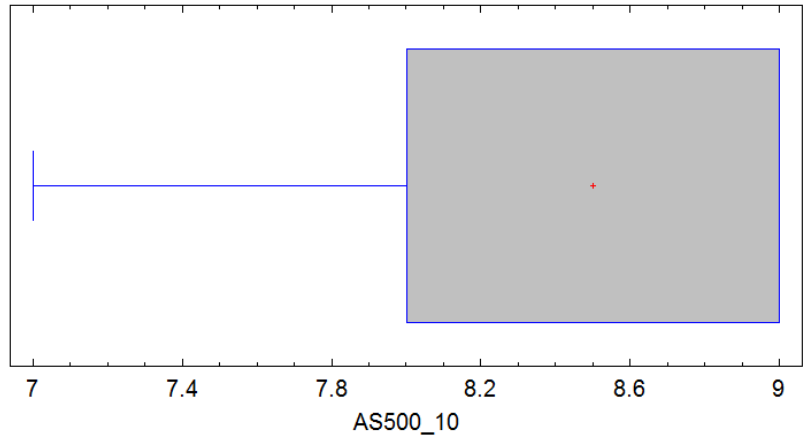


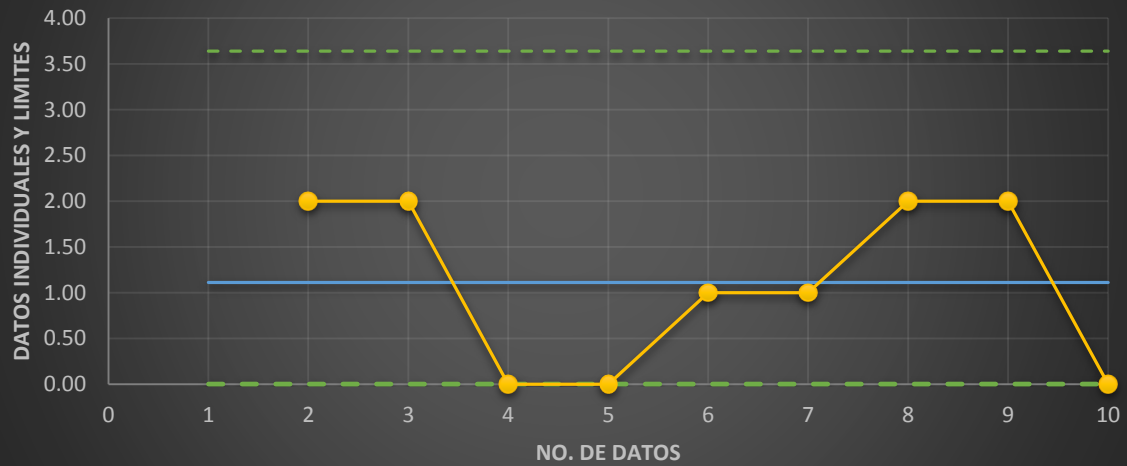
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	9.00	
2	7.00	2.00
3	9.00	2.00
4	9.00	0.00
5	9.00	0.00
6	8.00	1.00
7	9.00	1.00
8	7.00	2.00
9	9.00	2.00
10	9.00	0.00
Sumas	85.00	10.00

Carta R (Móviles)	
R	1.11
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	3.64
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



— Linea Central - - - Limite Superior - - - Límite inferior ● Rangos Individuales

8.3.3 AC-20 aditivado a 1.5% de AS-500

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	7.00	
2	10.00	3.00
3	7.00	3.00
4	6.00	1.00
5	6.00	0.00
6	7.00	1.00
7	7.00	0.00
8	7.00	0.00
9	9.00	2.00
10	6.00	3.00
Sumas	72.00	13.00

Elementos individuales	
R	1.44
Media	7.20
E2	2.66
n	2
LS	11.0422222
LI	3.3577778

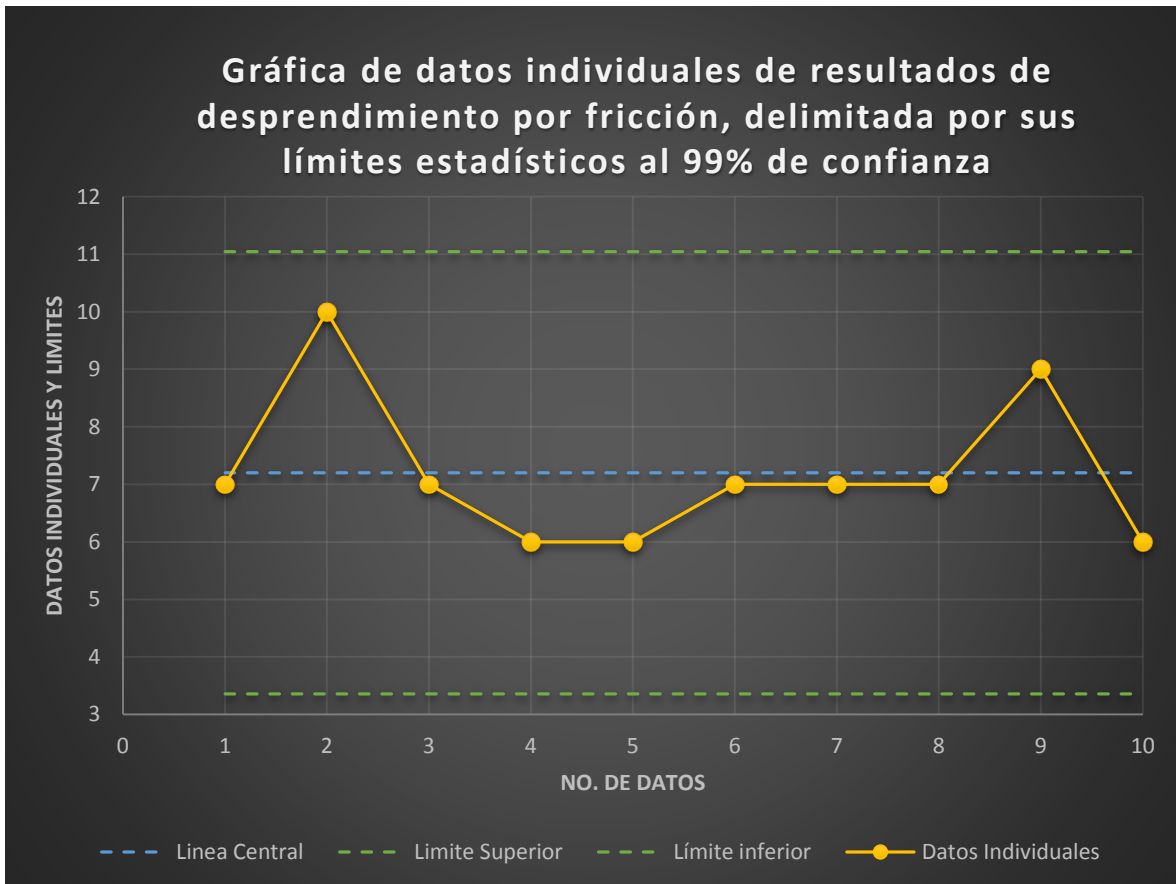
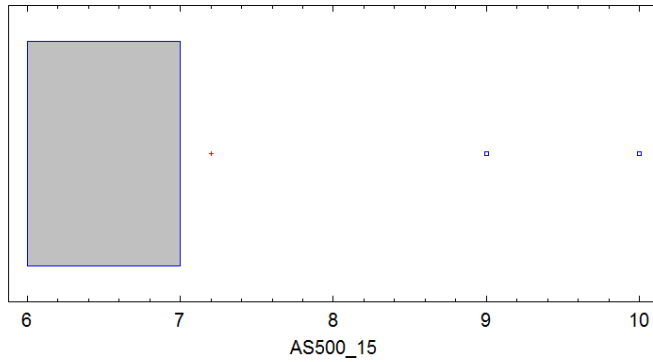


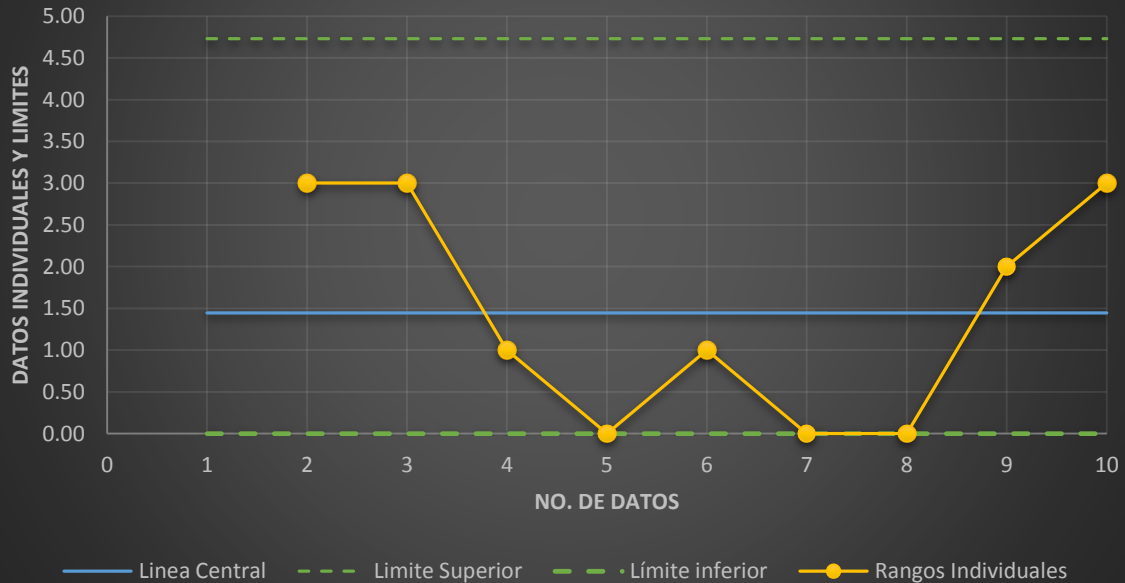
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	7.00	
2	10.00	3.00
3	7.00	3.00
4	6.00	1.00
5	6.00	0.00
6	7.00	1.00
7	7.00	0.00
8	7.00	0.00
9	9.00	2.00
10	6.00	3.00
Sumas	72.00	13.00

Carta R (Móviles)	
R	1.44
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	4.732
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.4 Escorias

8.4.1 Escoria DM con AC-20

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	16.00	
2	18.00	2.00
3	20.00	2.00
4	18.00	2.00
5	17.00	1.00
6	17.00	0.00
7	20.00	3.00
8	17.00	3.00
9	20.00	3.00
10	19.00	1.00
Sumas	182.00	17.00

Elementos individuales	
R	1.89
Media	18.20
E2	2.66
n	2
LS	23.2244444
LI	13.1755556

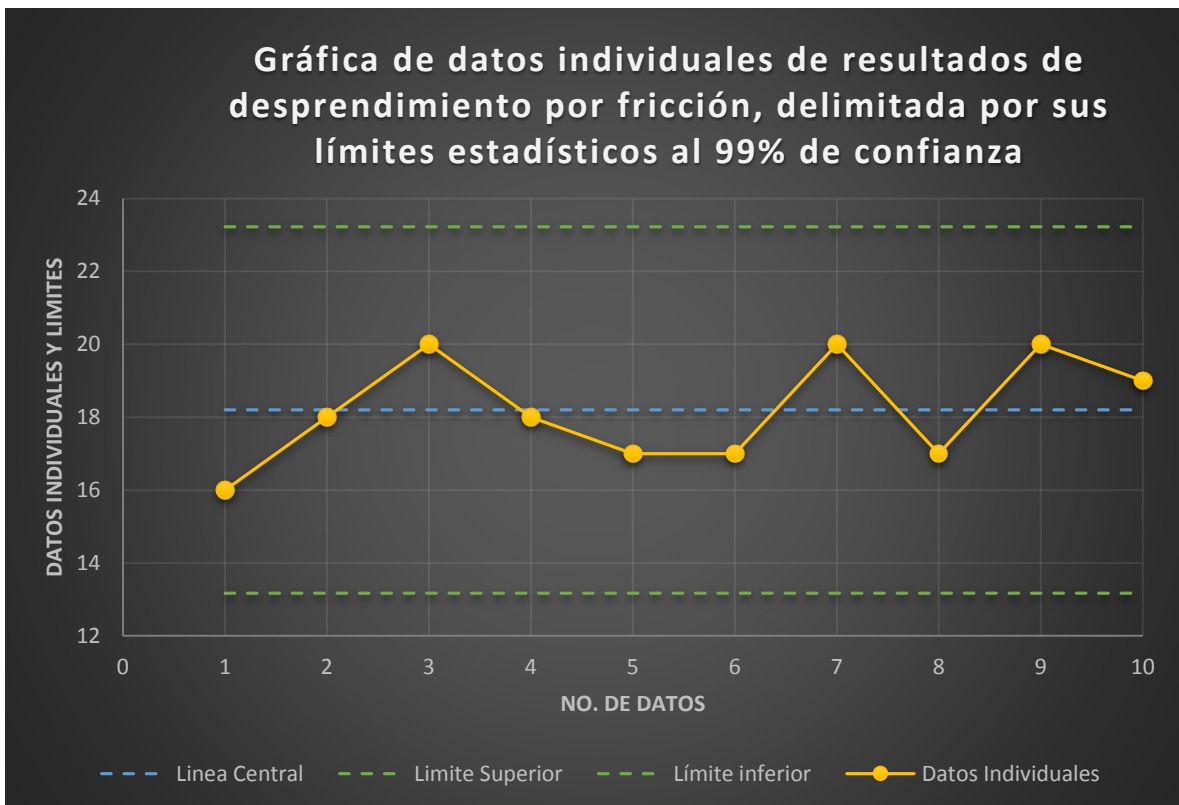
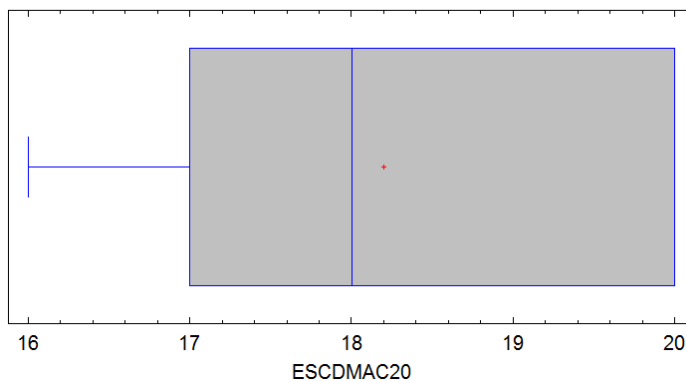


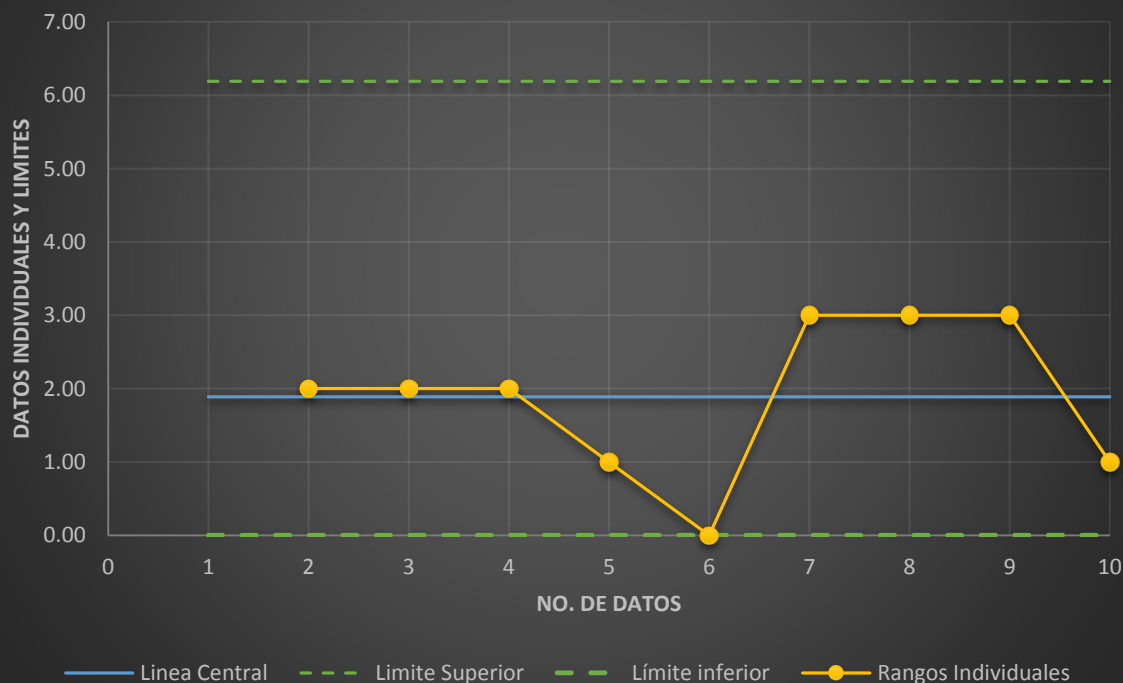
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	16.00	
2	18.00	2.00
3	20.00	2.00
4	18.00	2.00
5	17.00	1.00
6	17.00	0.00
7	20.00	3.00
8	17.00	3.00
9	20.00	3.00
10	19.00	1.00
Sumas	182.00	17.00

Carta R (Móviles)	
R	1.89
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	6.188
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.4.2 Escoria DM con AC-20 Aditivado a 1.5% de AS-500

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	14.00	
2	16.00	2.00
3	14.00	2.00
4	14.00	0.00
5	13.00	1.00
6	14.00	1.00
7	14.00	0.00
8	12.00	2.00
9	15.00	3.00
10	15.00	0.00
Sumas	141.00	11.00

Elementos individuales	
R	1.22
Media	14.10
E2	2.66
n	2
LS	17.3511111
LI	10.8488889

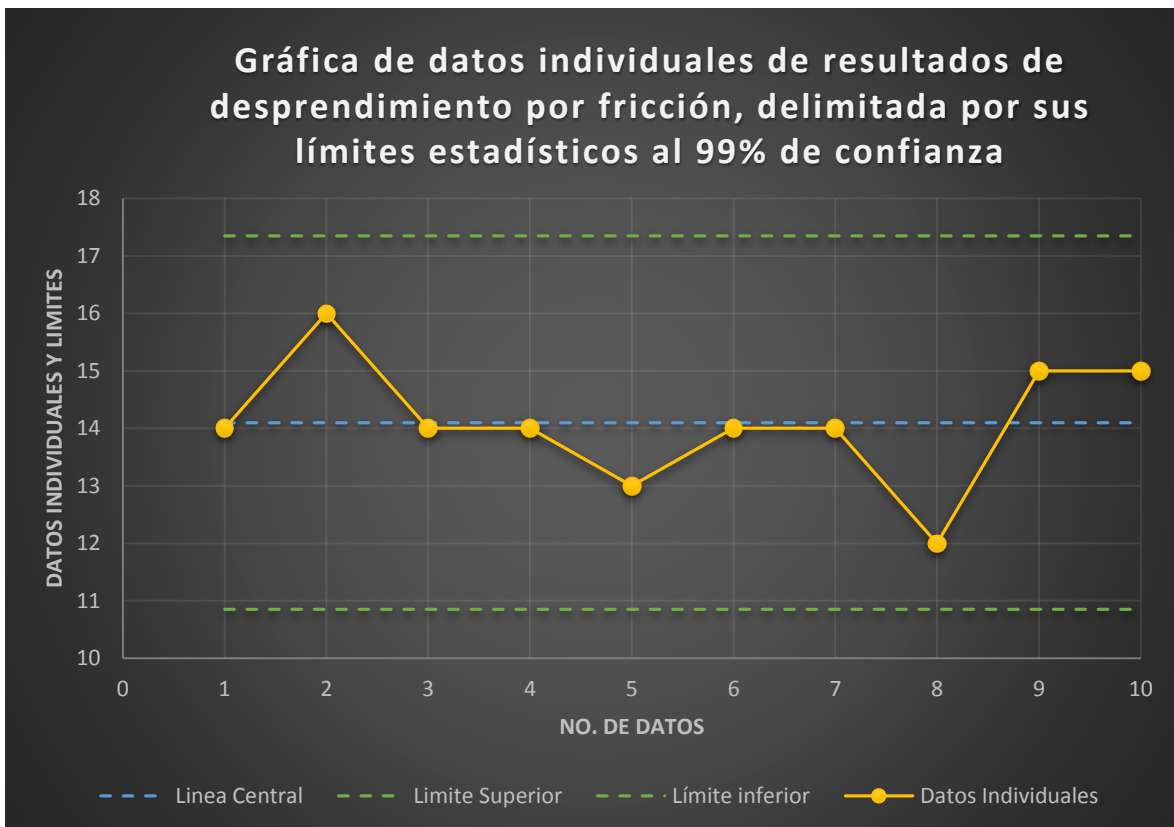
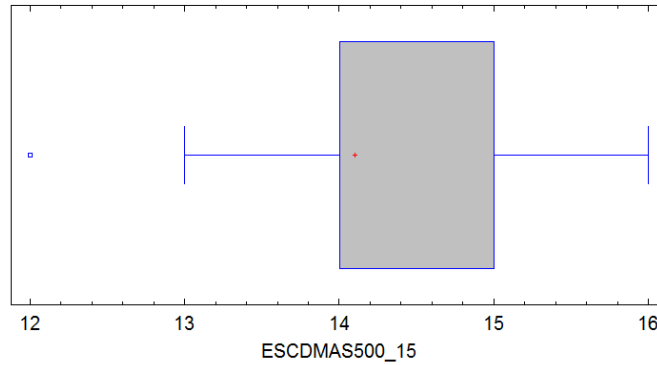


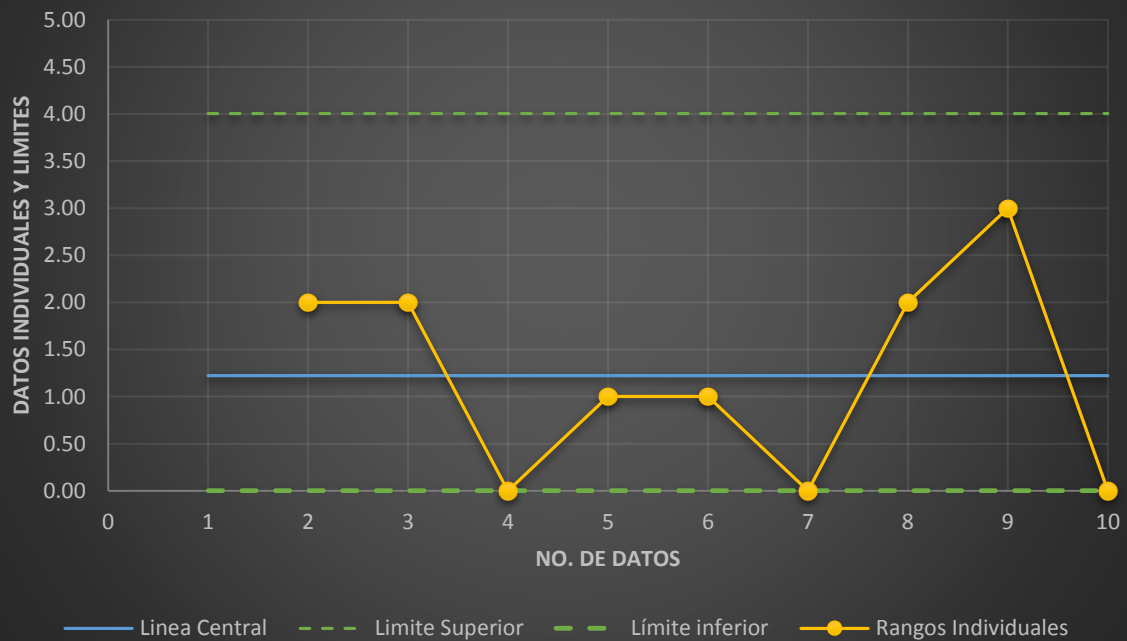
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	14.00	
2	16.00	2.00
3	14.00	2.00
4	14.00	0.00
5	13.00	1.00
6	14.00	1.00
7	14.00	0.00
8	12.00	2.00
9	15.00	3.00
10	15.00	0.00
Sumas	141.00	11.00

Carta R (Móviles)	
R	1.22
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	4.004
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.4.3 Escoria SLP con AC-20

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	30.00	
2	29.00	1.00
3	56.00	27.00
4	43.00	13.00
5	28.00	15.00
6	40.00	12.00
7	29.00	11.00
8	40.00	11.00
9	39.00	1.00
10	33.00	6.00
Sumas	367.00	97.00

Elementos individuales	
R	10.78
Media	36.70
E2	2.66
n	2
LS	65.3688889
LI	8.03111111

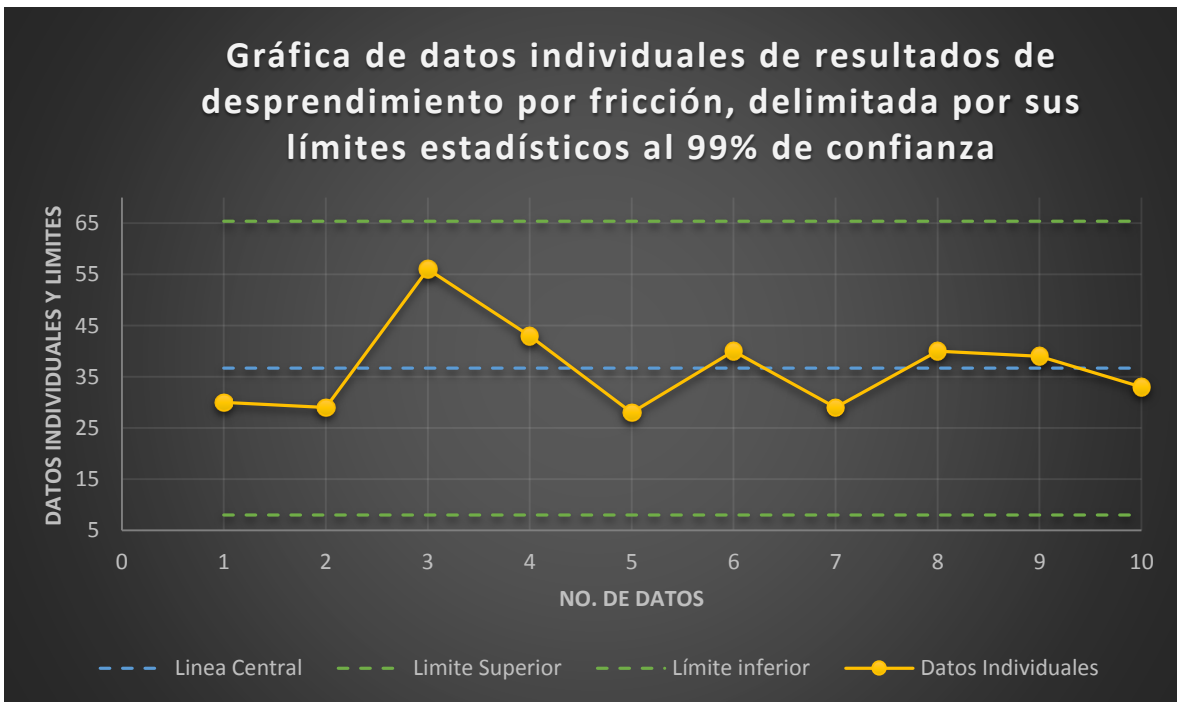
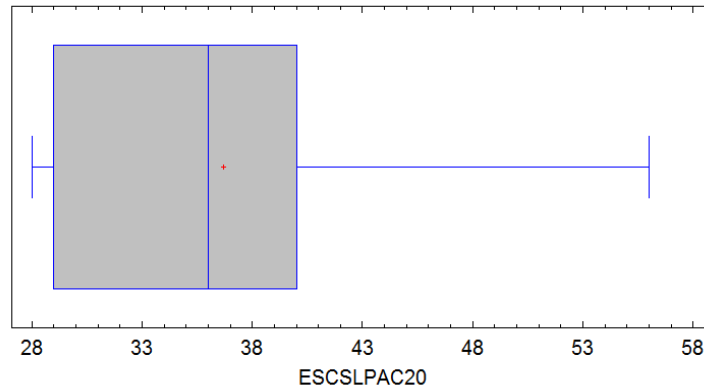


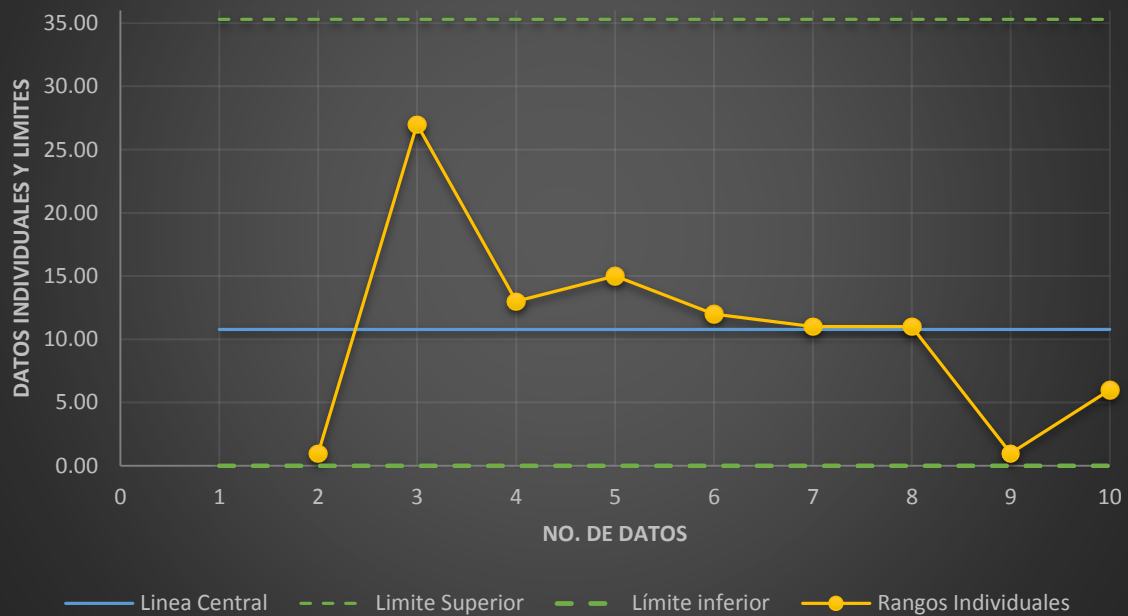
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	30.00	
2	29.00	1.00
3	56.00	27.00
4	43.00	13.00
5	28.00	15.00
6	40.00	12.00
7	29.00	11.00
8	40.00	11.00
9	39.00	1.00
10	33.00	6.00
Sumas	367.00	97.00

Carta R (Móviles)	
R	10.78
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	35.308
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.4.4 Escoria SLP con AC-20 aditivado a 1.5% de AS-500

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	17.00	
2	27.00	10.00
3	21.00	6.00
4	20.00	1.00
5	16.00	4.00
6	25.00	9.00
7	32.00	7.00
8	26.00	6.00
9	32.00	6.00
10	27.00	5.00
Sumas	243.00	54.00

Elementos individuales	
R	6.00
Media	24.30
E2	2.66
n	2
LS	40.26
LI	8.34

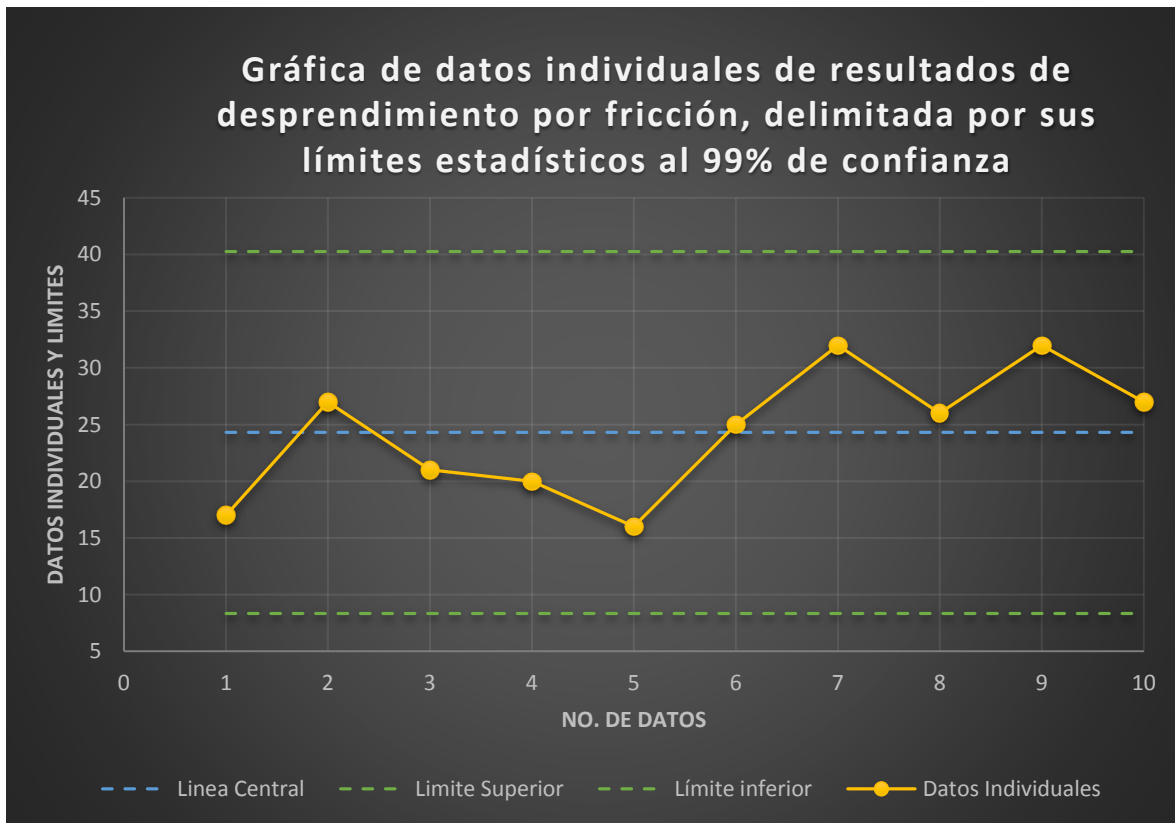
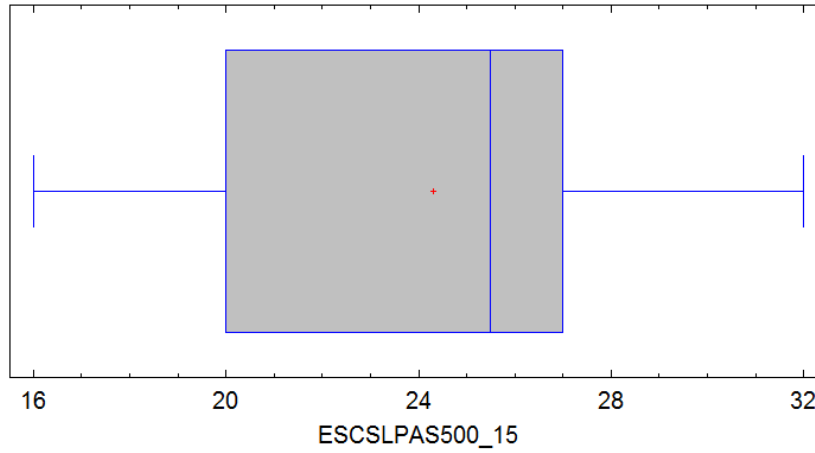


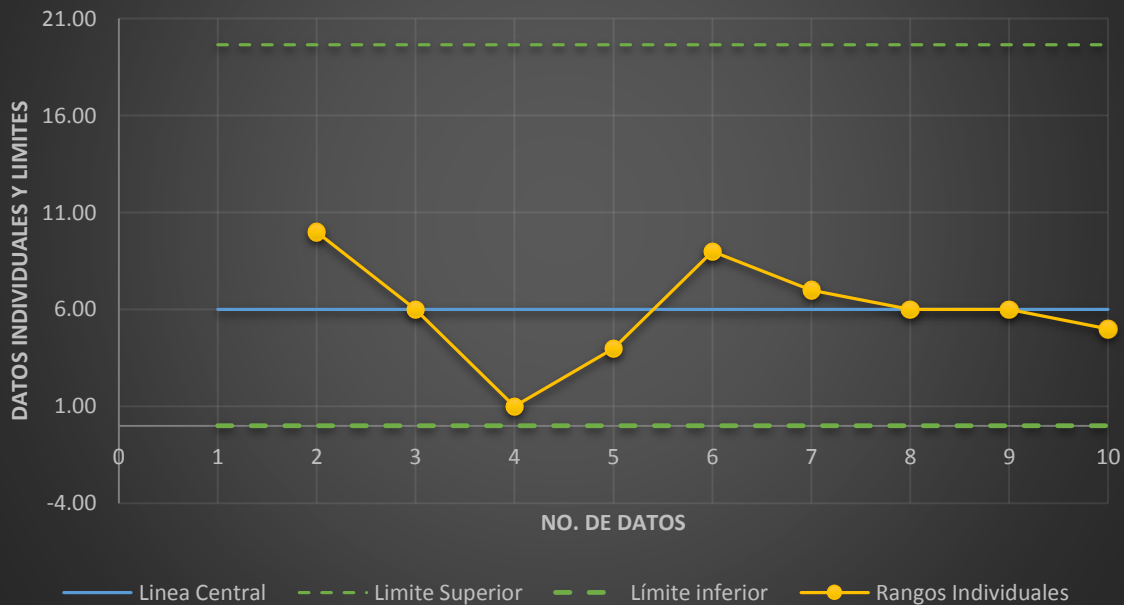
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	17.00	
2	27.00	10.00
3	21.00	6.00
4	20.00	1.00
5	16.00	4.00
6	25.00	9.00
7	32.00	7.00
8	26.00	6.00
9	32.00	6.00
10	27.00	5.00
Sumas	243.00	54.00

Carta R (Móviles)	
R	6.00
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	19.656
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.5 Caliza Yucatán.

8.5.1 Caliza Yucatán con AC-20

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	25.00	
2	26.00	1.00
3	23.00	3.00
4	25.00	2.00
5	26.00	1.00
6	26.00	0.00
7	25.00	1.00
8	26.00	1.00
9	23.00	3.00
10	22.00	1.00
Sumas	247.00	13.00

Elementos individuales	
R	1.44
Media	24.70
E2	2.66
n	2
LS	28.5422222
LI	20.8577778

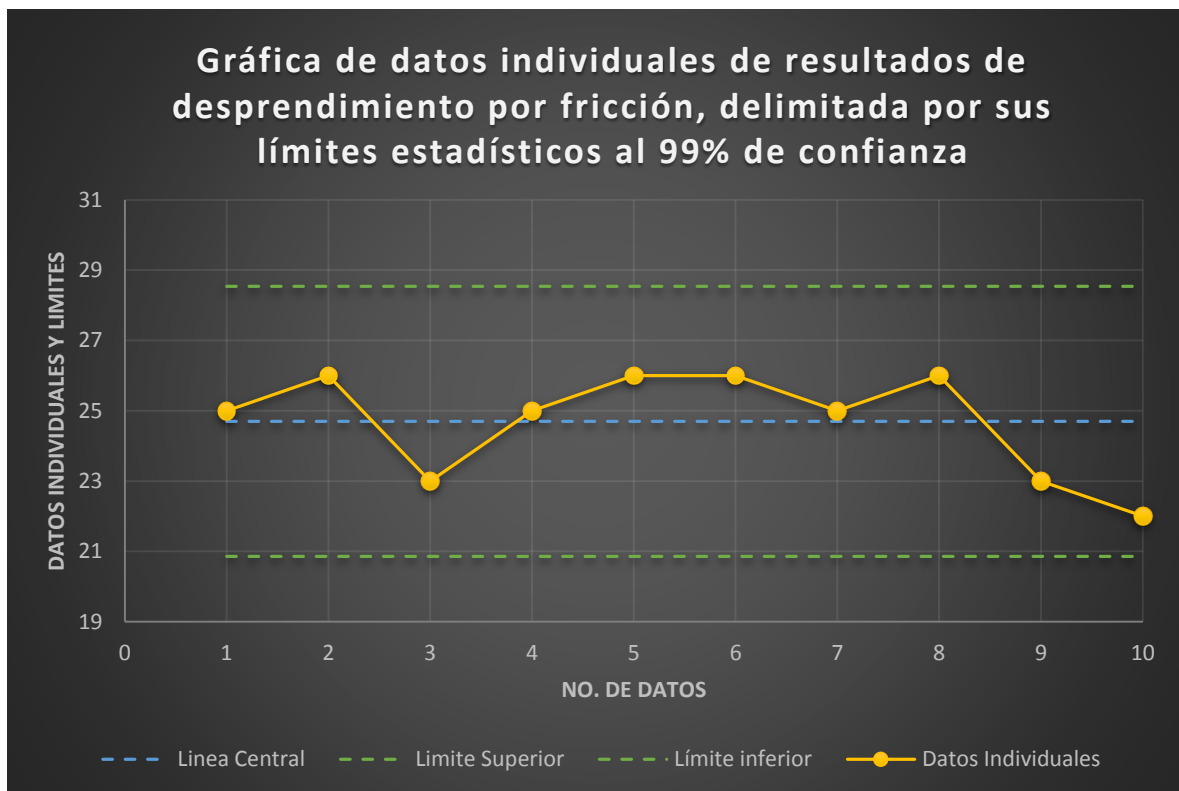
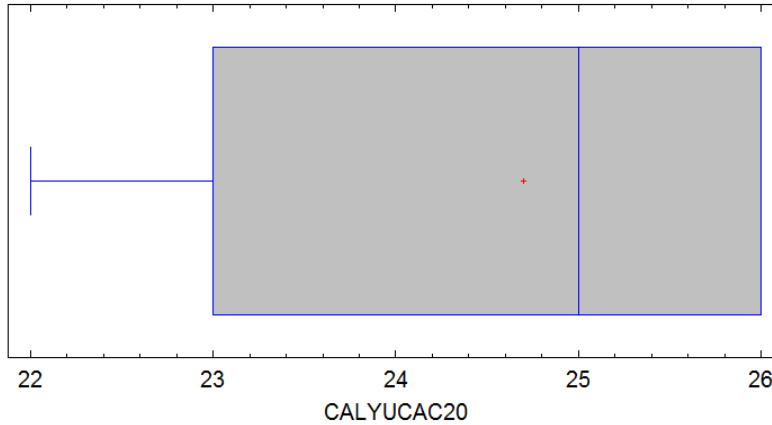


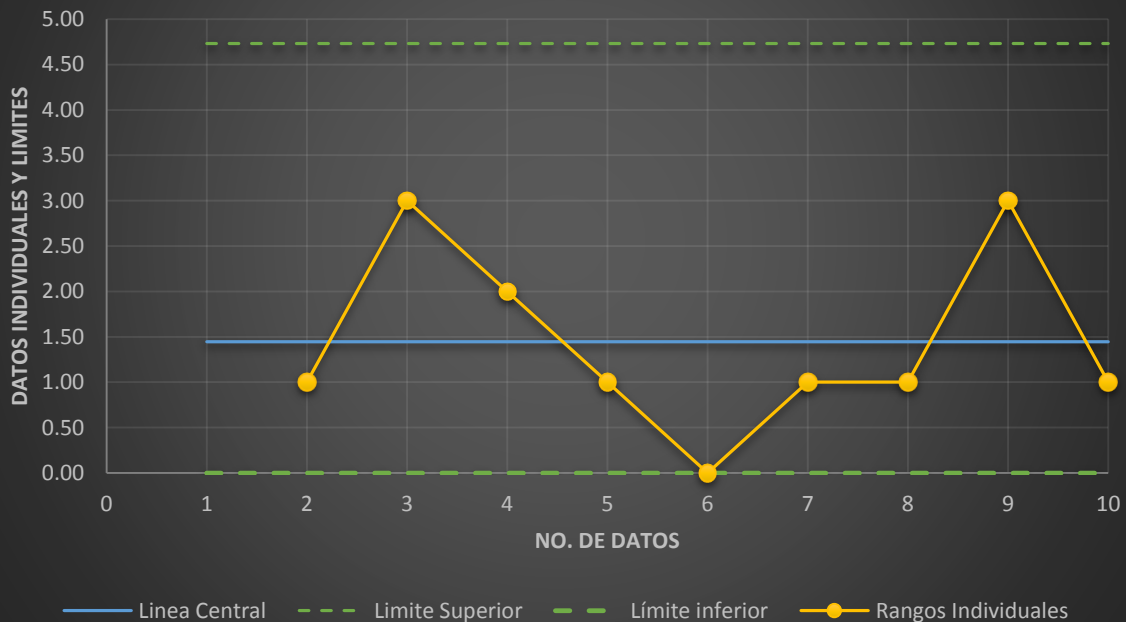
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	25.00	
2	26.00	1.00
3	23.00	3.00
4	25.00	2.00
5	26.00	1.00
6	26.00	0.00
7	25.00	1.00
8	26.00	1.00
9	23.00	3.00
10	22.00	1.00
Sumas	247.00	13.00

Carta R (Móviles)	
R	1.44
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	4.732
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.5.2 Caliza Yucatán con AC-20 aditivado a 1.5%

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	24.00	
2	21.00	3.00
3	18.00	3.00
4	16.00	2.00
5	16.00	0.00
6	17.00	1.00
7	16.00	1.00
8	20.00	4.00
9	19.00	1.00
10	19.00	0.00
Sumas	186.00	15.00

Elementos individuales	
R	1.67
Media	18.60
E2	2.66
n	2
LS	23.0333333
LI	14.1666667

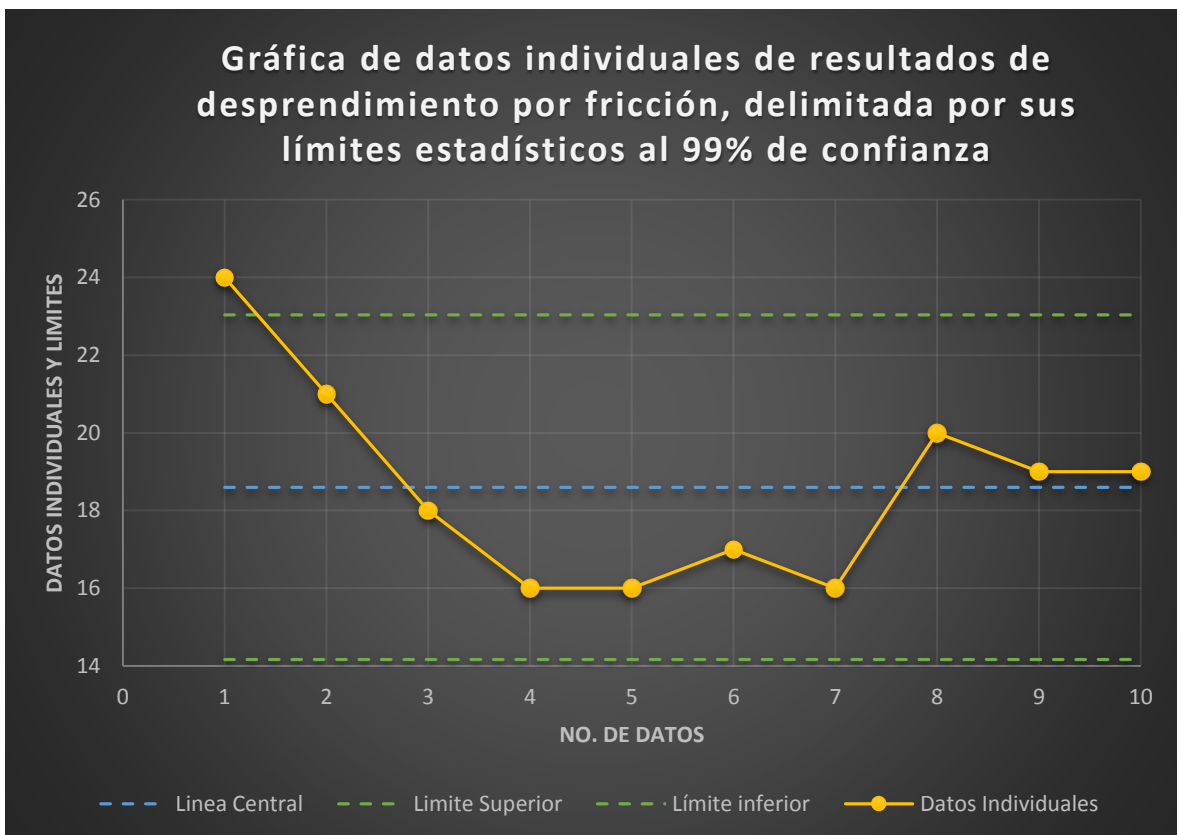
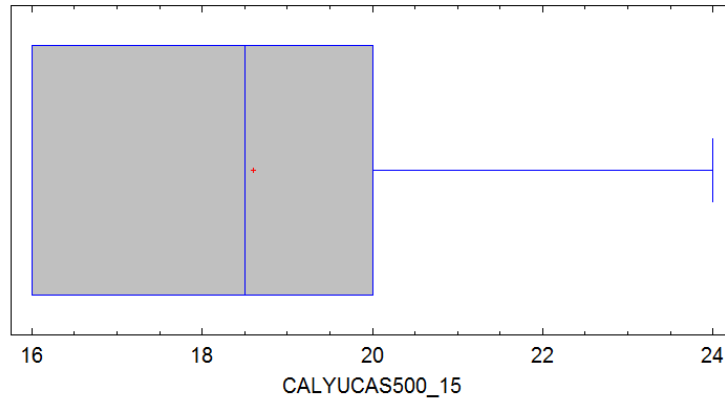


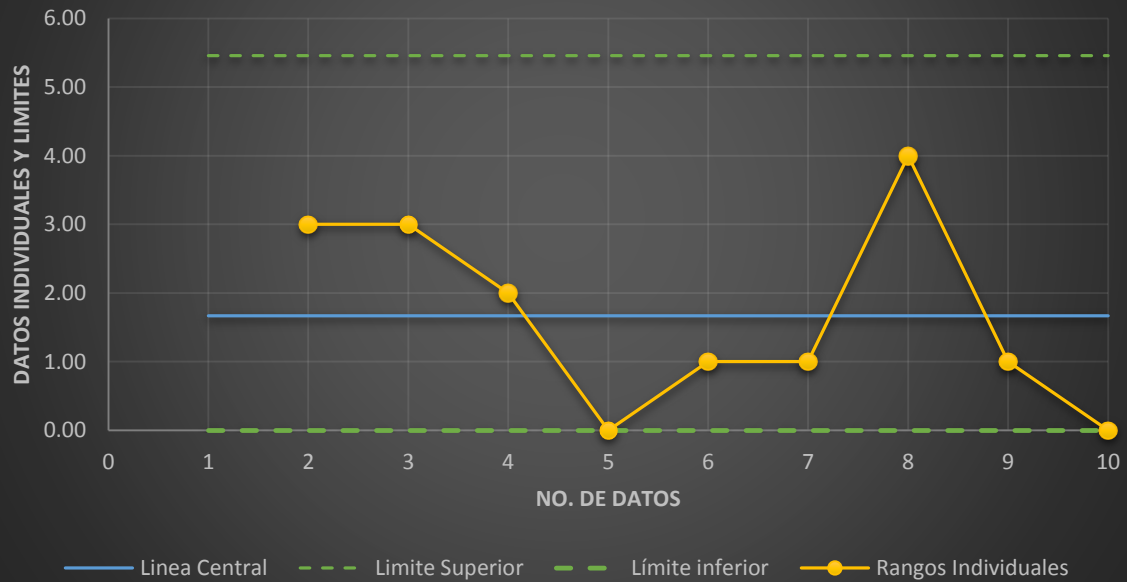
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	24.00	
2	21.00	3.00
3	18.00	3.00
4	16.00	2.00
5	16.00	0.00
6	17.00	1.00
7	16.00	1.00
8	20.00	4.00
9	19.00	1.00
10	19.00	0.00
Sumas	186.00	15.00

Carta R (Móviles)	
R	1.67
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	5.46
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.6 Caliza Monterrey

8.6.1 Caliza Monterrey con Ac-20

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	24.00	
2	27.00	3.00
3	26.00	1.00
4	29.00	3.00
5	29.00	0.00
6	24.00	5.00
7	33.00	9.00
8	35.00	2.00
9	33.00	2.00
10	20.00	13.00
Sumas	280.00	38.00

Elementos individuales	
R	4.22
Media	28.00
E2	2.66
n	2
LS	39.2311111
LI	16.7688889

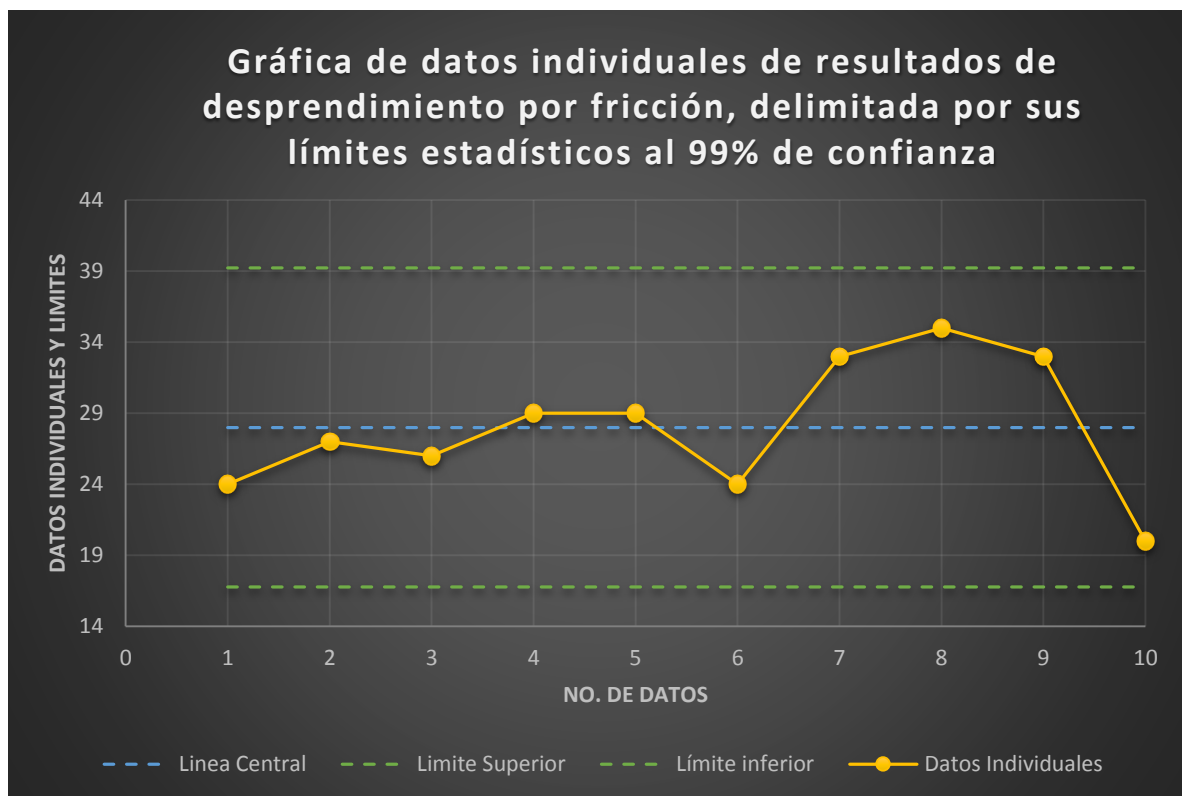
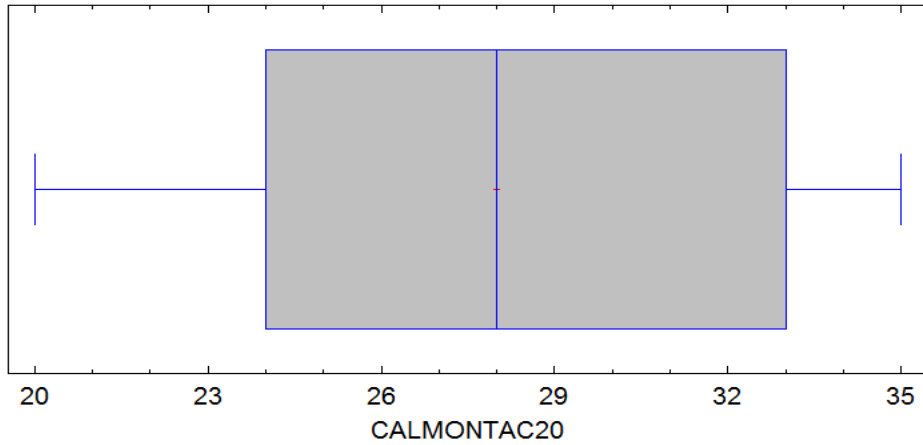


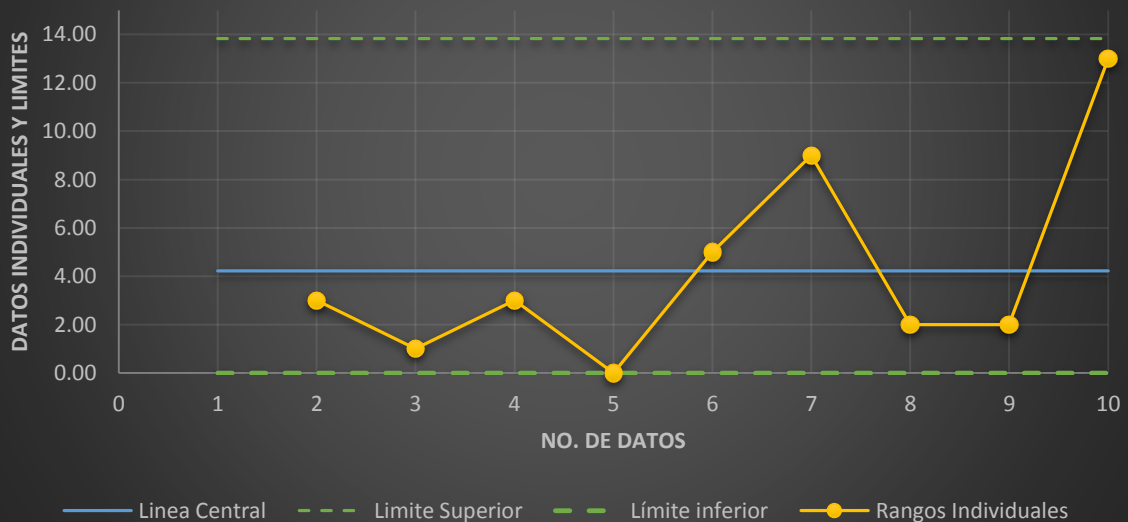
Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	24.00	
2	27.00	3.00
3	26.00	1.00
4	29.00	3.00
5	29.00	0.00
6	24.00	5.00
7	33.00	9.00
8	35.00	2.00
9	33.00	2.00
10	20.00	13.00
Sumas	280.00	38.00

Carta R (Móviles)	
R	4.22
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	13.832
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%



8.6.2 Caliza Monterrey AC-20 Aditivado a 1.5% con AS500

Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	22.00	
2	15.00	7.00
3	32.00	17.00
4	14.00	18.00
5	23.00	9.00
6	17.00	6.00
7	16.00	1.00
8	19.00	3.00
9	23.00	4.00
10	19.00	4.00
Sumas	200.00	69.00

Elementos individuales	
R	7.67
Media	20.00
E2	2.66
n	2
LS	40.3933333
LI	0

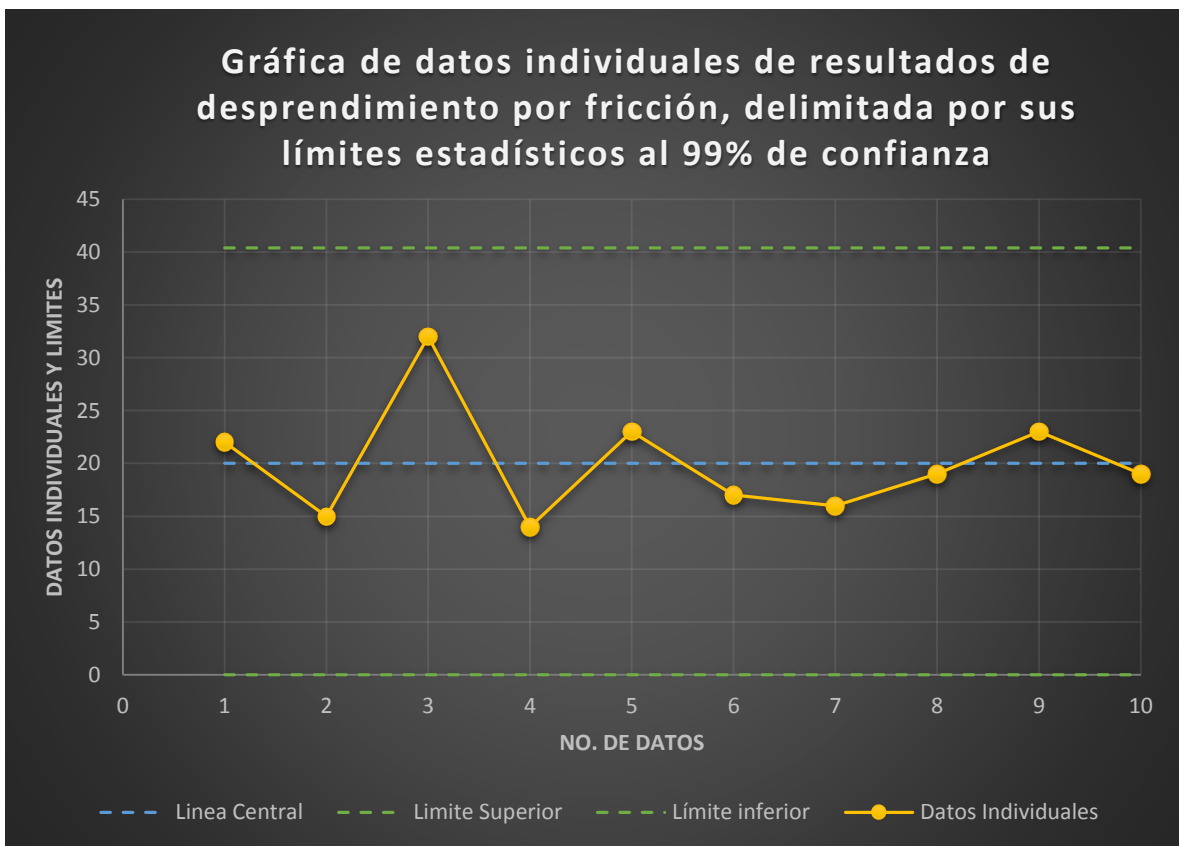
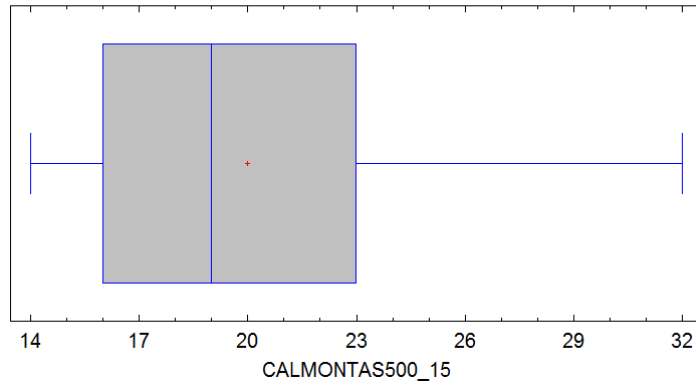


Gráfico de Caja y Bigotes



Valores de desprendimiento por fricción		
No.	% de Desprendimiento	Rango móvil
1	22.00	
2	15.00	7.00
3	32.00	17.00
4	14.00	18.00
5	23.00	9.00
6	17.00	6.00
7	16.00	1.00
8	19.00	3.00
9	23.00	4.00
10	19.00	4.00
Sumas	200.00	69.00

Carta R (Móviles)	
R	7.67
D4	3.276
D3	0
n	2
LS	25.116
LI	0

Gráfica de Rangos Móviles para resultados de desprendimiento por fricción, delimitada por los límites estadísticos al 99%

