



Certificación ISO 9001:2000 ‡

Análisis de especificaciones de valor de pulido para agregado

Mayra Flores Flores
Alfonso Pérez Salazar
Paul Garnica Anguas

**Publicación Técnica No. 315
Sanfandila, Qro, 2008**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Análisis de especificaciones de valor de
pulido para agregado grueso**

**Publicación Técnica No. 315
Sanfandila, Qro, 2008**

Este documento fue elaborado en la División de Laboratorios de Infraestructura por los investigadores MC Mayra Flores Flores, Alfonso Pérez Salazar y Dr Paul Garnica Anguas.

Se agradece al personal de la Unidad General de Servicios Técnicos de Coahuila la información proporcionada.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
1. Introducción	1
2. Resistencia al deslizamiento	3
2.1 Definición de la resistencia al deslizamiento	3
2.2 La medición de la resistencia al deslizamiento en campo	4
2.3 Equipo utilizado para medir la resistencia al deslizamiento en campo	5
2.4 Especificaciones de resistencia al deslizamiento en los Estados Unidos	7
3. Caracterización del agregado grueso resistente al pulido	9
3.1 Equipo de laboratorio usado para simular el desgaste-pulido del agregado	9
3.2 Factores atribuibles al agregado que afectan la fricción del pavimento	10
3.3 Métodos de prueba utilizados para evaluar las propiedades friccionantes del agregado grueso	12
3.3.1 Ensayo de residuo insoluble en ácido (AIR)	13
3.3.2 Ensayo de Pulimento Acelerado	13
3.4 Especificaciones para el agregado grueso para asegurar una adecuada fricción	5
3.4.1 Estados Unidos	15
3.4.2 Reino Unido	28
3.4.3 Nueva Zelanda	30
3.4.4 Argentina	31
3.4.5 España	32
3.5 Análisis de las especificaciones de valor de pulido	32
4. Modelos para estimar la resistencia al deslizamiento	35
5. Ejemplo de clasificación de agregado grueso resistente al pulido	41

6. Conclusiones	47
Referencias	49
Anexo	53

Resumen

Este documento presenta un panorama general de la resistencia al deslizamiento, y las especificaciones establecidas en el Reino Unido, Nueva Zelanda, España, Argentina y Estados Unidos para asegurar la utilización de agregados resistentes al pulido en la elaboración de mezclas asfálticas y tratamientos superficiales. El documento tiene como objetivo proporcionar a los profesionales relacionados con la construcción y conservación de carreteras, las bases para la comprensión y la implicación que tiene el parámetro de valor de pulido, indicador de las características friccionantes del agregado grueso, en la resistencia al deslizamiento.

Abstract

This document presents a broad view of the skid resistance and the specifications established to guarantee the employment of polish resistant coarse aggregate in the manufacture of hot mix asphalt and treatments, in the United Kingdom, New Zealand, Spain, Argentina and the United States. The document has the objective to provide professionals related with highways maintenance and construction, with the basis to understand the implications of the polish value, as an indicator of the coarse aggregate frictional characteristics in the skid resistance.

Resumen ejecutivo

Una de las funciones de la superficie de rodamiento es proporcionar una superficie cómoda y segura con una textura adecuada, de manera que proporcione una adecuada resistencia al deslizamiento.

La resistencia al deslizamiento es una característica importante del pavimento porque proporciona el agarre que los neumáticos requieren para mantener el control del vehículo en todo momento; ésta depende de la microtextura y macrotextura.

La microtextura se refiere a las irregularidades en la superficie de las partículas de agregado, y depende de la rugosidad inicial en la superficie del agregado y de la capacidad del agregado para retener su rugosidad contra el pulimento ante la acción del tránsito. La macrotextura corresponde a las irregularidades más grandes en la superficie del pavimento. Estas irregularidades más grandes son asociadas con los espacios entre las partículas de agregado. Para mantener un valor de resistencia al deslizamiento elevado, la superficie de rodamiento del pavimento debe tener una buena micro y macrotextura.

Los agregados pétreos que forman parte de la carpeta asfáltica son susceptibles al pulido o pérdida de la microtextura superficial, debido al paso de los vehículos. El grado de pulido que cada agregado en particular puede tener depende de sus características mineralógicas y del volumen de tránsito que solicita la superficie de rodamiento.

Para determinar las características friccionantes de un agregado se utiliza el ensayo de pulimento acelerado, el cual simula el desgaste que sufre el agregado debido al paso de los vehículos; el parámetro determinado, se denomina valor de pulido o coeficiente de pulimento acelerado.

A través de modelos desarrollados a partir de las características de los materiales, como el valor de pulido, se puede estimar la resistencia al deslizamiento (SN) durante la vida de diseño de la superficie de rodamiento. A nivel mundial, el valor de pulido forma parte de las especificaciones que debe cumplir el agregado grueso utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas y tratamiento superficiales. En este documento se presentan las especificaciones para el valor de pulido del Reino Unido, Nueva Zelanda, España, Argentina y Estados Unidos; de éstas, la del Reino Unido es la más estricta y considera tanto zonas urbanas como carreteras; mientras que la española y la de algunos Departamentos de Transporte de los Estados Unidos incluyen únicamente carreteras.

En México no existe una especificación de valor de pulido; por esta razón, se está recurriendo a especificaciones de otros países, sin embargo, hay que tener extrema precaución, pues fueron desarrolladas para materiales, mediciones con equipos de fricción y métodos constructivos diferentes a los utilizados en el país.

Por ejemplo, si se especifica un valor de pulido de 68 o mayor, de acuerdo con la normativa inglesa, en México difícilmente se podría encontrar un agregado que cumpliera con dicha especificación. El material empleado para tal caso es un agregado sintético llamado bauxita calcinada, y que se obtiene de la calcinación de arcilla rica en bauxita a temperaturas elevadas (aproximadamente 1600°C), y se coloca sobre la superficie con una resina epóxica especial; este tipo de tratamiento es conocido comercialmente como ShellGrip. Si se consideran las especificaciones del Departamento de Transporte de Texas, y se establece un valor de pulido de 29 y un porcentaje de pérdida de sanidad (intemperismo acelerado) menor a 12%, entonces lo que se está estimando es que la superficie de rodamiento tendrá durante su vida de diseño, una resistencia al deslizamiento (SN40) igual o mayor a 38, la cual es verificada en campo con mediciones anuales. Dicho valor se determina con el remolque ASTM E 274; mientras que en México se utiliza el Mu-meter por lo que las mediciones al no poder ser comparables, se impide determinar el comportamiento del agregado en campo.

1 Introducción

La resistencia al deslizamiento es, entre otras características de la superficie de rodamiento, la que mayor influencia tiene en la seguridad del conductor. Una buena condición de adherencia permite reducir la distancia de frenado, y mantener en todo momento la trayectoria deseada del vehículo ⁽¹⁾.

Los estudios de accidentes en diferentes países han arrojado que la proporción de percances en tiempo de lluvias se incrementa como consecuencia no solamente de la menor resistencia al deslizamiento, sino también de la menor visibilidad. Estudios realizados en Francia, Inglaterra, EUA y otros países han demostrado de manera fehaciente, que la tasa de accidentes tiende a aumentar cuando la resistencia al deslizamiento disminuye, la cual depende de la macrotextura y de la microtextura. La obtención de la microtextura se encuentra estrechamente relacionada con las características del agregado pétreo.

Los agregados pétreos que forman parte de la carpeta asfáltica son susceptibles al pulido o pérdida de la microtextura superficial, debido al paso de los vehículos. El grado de pulido que cada agregado en particular puede tener depende de sus características mineralógicas. Para determinar el grado de pulido del agregado se utiliza el ensayo de pulimento acelerado. El parámetro que se determina con este ensayo se denomina valor de pulido o coeficiente de pulimento acelerado, y es un indicador de las características friccionantes del agregado.

Existen varios modelos para estimar la resistencia al deslizamiento de la superficie de rodamiento a partir de algunas características del agregado, como el valor de pulido; sin embargo estos modelos han sido desarrollados de acuerdo a las características de los materiales, tránsito y equipos de medición de la fricción de cada país.

En México, en los estados del norte y sur, el agregado pétreo empleado para la elaboración de mezcla asfáltica en caliente y tratamientos superficiales, en su mayoría es calizo, y se sabe que por sus características mineralógicas este tipo de agregado es susceptible al pulido, por lo cual debe limitarse su empleo mediante especificaciones de valor de pulido que garanticen una adecuada resistencia al deslizamiento en campo. Por lo anterior, se considera necesario investigar acerca de las metodologías aplicadas en otros países, para asegurar una adecuada resistencia al deslizamiento en sus carreteras.

2 Resistencia al deslizamiento

2.1 Definición de la resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es la capacidad que tiene la superficie del pavimento, particularmente cuando está mojado, para resistir el deslizamiento de las ruedas de los vehículos.

La resistencia al deslizamiento tiene dos componentes: adherencia e histéresis. La primera resulta del corte de la unión molecular formado cuando el neumático es comprimido en el área de contacto con las partículas de la superficie del pavimento. En cuanto a la histéresis, resulta de la disipación de energía cuando el neumático se deforma al pasar a través de las asperezas de la superficie rugosa del pavimento. Ambos componentes de resistencia al deslizamiento se relacionan con las dos propiedades claves de la superficie del pavimento asfáltico, es decir, la macrotextura y la microtextura⁽²⁾ (Figura 2.1).

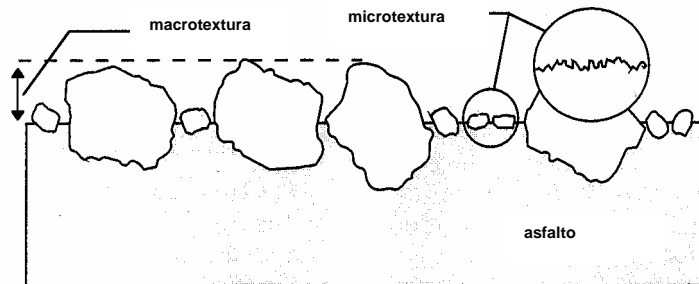


Figura 2.1
Características de textura de la superficie de rodamiento⁽³⁾

La microtextura se refiere a las irregularidades en la superficie de las partículas de agregado (textura en escala fina) que afectan la adherencia. Estas irregularidades son las que hacen que las partículas de agregado se sientan lisas o ásperas al tacto. La magnitud de la microtextura depende de la rugosidad inicial en la superficie del agregado y de la capacidad del agregado de retener su rugosidad contra el pulimento debido a la acción del tránsito. Por tanto, la microtextura es una propiedad del agregado que puede controlarse a través de la selección de agregados con características de resistencia al pulido adecuadas. La microtextura y la adherencia contribuyen a la resistencia al deslizamiento para todas las velocidades e influyen predominantemente en velocidades menores a 50 km/h⁽²⁾, las cuales se especifican en zonas urbanas.

La macrotextura se refiere a irregularidades más grandes en la superficie del pavimento, que afecta la histéresis. Esta clase de irregularidades se asocian con los espacios entre las partículas de agregado. La magnitud de esta componente dependerá de varios factores. La macrotextura inicial en la superficie del pavimento será determinada por el tamaño, forma y granulometría del agregado grueso usado en la construcción del pavimento, así como también de las técnicas

de construcción empleadas en la colocación de la superficie de rodamiento del pavimento. La macrotextura es también esencial para proporcionar canales de salida al agua en la interacción neumático-pavimento, para de esta manera reducir el hidroplaneo. La macrotextura y la histéresis son menos importantes para velocidades bajas, pero a medida que se incrementa la velocidad se requiere una mayor macrotextura⁽²⁾. Para velocidades mayores a 50 km/h, la resistencia al deslizamiento depende principalmente del espaciamiento proporcionado por el agregado, es decir, de la macrotextura⁽³⁾.

La figura 2.2 ilustra el efecto de la macro y microtextura en la resistencia al deslizamiento como una función de la velocidad. Se puede observar que para mantener un valor de resistencia al deslizamiento alto en varios niveles de velocidad, la superficie de rodamiento del pavimento obliga a una buena micro y macrotextura⁽³⁾.

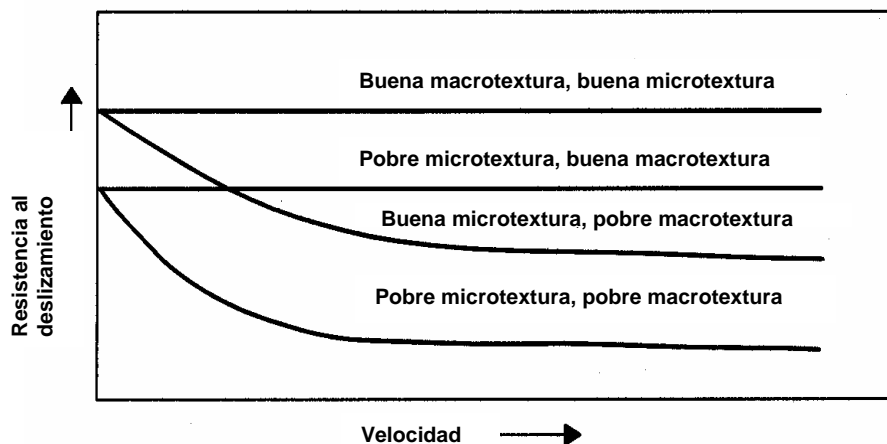


Figura 2.2
Correlación entre la macrotextura, microtextura, resistencia al deslizamiento y velocidad⁽³⁾.

2.2 La medición de la resistencia al deslizamiento en campo

El propósito principal de medir la fricción en un pavimento es para controlar su calidad durante la construcción, y como un medio para su posterior administración. Los valores de fricción son usados en la administración de pavimentos; evaluación de la restauración de la superficie de rodamiento; especificaciones para construcción, investigación de accidentes, y conservación de carreteras, entre otras. La resistencia al deslizamiento, también se emplea en aeropuertos en lo que respecta a evaluar las condiciones de la pista, y determinar las necesidades para actividades de mantenimiento y para asesorar a los pilotos durante el aterrizaje.

Las mediciones de resistencia al deslizamiento también se llevan a cabo cuando un sitio manifiesta problemas potenciales de seguridad, y cuando la superficie de

rodamiento ha sido tratada recientemente para corregir problemas de resistencia al deslizamiento ⁽²⁾.

2.3 Equipo utilizado para medir la resistencia al deslizamiento en campo

Los equipos utilizados para medir la fricción en campo se agrupan en cuatro categorías:

- Equipos de rueda bloqueada: Surface Friction Tester (ASTM E-274), Adhera
- Equipos de rueda oblicua: Mu-meter y SCRIM
- Equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento fijo: Griptester y Norsemeter
- Equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento variable: BV12 sueco, ROAR

Las mediciones de los equipos se relacionan con diferentes escenarios; los equipos de rueda bloqueada simulan situaciones de frenado de emergencia sin sistemas antibloqueo o ABS; los equipos de rueda oblicua miden la capacidad para mantener el control en las curvas; y los equipos de rueda parcialmente bloqueada simulan situaciones de frenado con sistemas antibloqueo ⁽⁴⁾.

En Estados Unidos, el remolque (ASTM E-274) es el que se utiliza habitualmente para medir la fricción en carreteras; y para medir la fricción en aeropuertos se recurre al Mu-meter (ASTM E 670). En Europa, el equipo más ampliamente empleado para medir la fricción en carreteras es el SCRIM; el Reino Unido y España utilizan este equipo. Asimismo, en Nueva Zelanda se usa el SCRIM; otros equipos comunes en dicho país son el péndulo británico de fricción, el Griptester y el Mu-meter.

- **Equipos de rueda bloqueada**

Las mediciones de fricción se realizan de acuerdo con el método de prueba ASTM E-274. En este método, la velocidad relativa entre el neumático y la superficie del pavimento es igual a la velocidad del vehículo ($S=V$). Generalmente, las mediciones se efectúan en la rodera interna del carril. El freno se aplica y se mide la fuerza durante un segundo después de que el neumático es completamente bloqueado; luego se calcula el valor de fricción correspondiente. El neumático utilizado durante el ensayo es el neumático con huella, aunque el uso del neumático liso se ha incrementado ⁽²⁾.

- **Equipos de rueda oblicua**

Los equipos de rueda oblicua mantienen el neumático en un cierto ángulo (α) con respecto a la dirección de la marcha; de esta manera, la rueda gira libremente. La fuerza lateral se mide perpendicular al plano de rotación. La velocidad de deslizamiento está dada por $S=V \text{ sen}\alpha$, por tanto, estos equipos producen mediciones a velocidades bajas, incluso aunque la velocidad del vehículo sea alta. Debido a que la velocidad de deslizamiento es relativamente baja, tales equipos son sensibles a la microtextura.

- **Equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento fijo**

Dichos equipos operan con un deslizamiento comprendido entre el 10 y 20 % (d entre 0,1 y 0,2). La velocidad de deslizamiento viene dada por $S=Vd$. Por ello, aunque el vehículo se desplace a gran velocidad, la medida de la fricción corresponde a una velocidad de deslizamiento baja; y, por tanto, al igual que los equipos de rueda oblicua, está influenciada principalmente por la microtextura.

- **Equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento variable**

Los equipos de deslizamiento variable miden a través de un grupo predeterminado de relaciones de deslizamiento. Algunos pueden operar de modo que capture la fricción a medida que la rueda procede de una condición de giro libre hasta completamente bloqueada. Estos equipos se suelen emplear únicamente para estudios especiales ⁽⁴⁾.

Debido a diferencias en el principio de medida; la velocidad de medida; el espesor de la película de agua; la carga sobre la rueda de ensayo; y el tipo de neumático de ensayo, no existe una comparación directa entre los valores de fricción con los diferentes equipos ⁽²⁾.

Al analizar los resultados que proporcionan dichos equipos, hay que considerar además de la velocidad de deslizamiento, otros factores que influyen de manera significativa en la medición, y que deben de tenerse en cuenta para su interpretación.

Uno de ellos es la temperatura de medida, que hace que la resistencia al deslizamiento sea inferior en verano que en invierno. Pero el que tiene mayor influencia es el pulimento del pavimento durante períodos prolongados de humedad y sequedad. En los periodos secos, el pulimento del agregado es más elevado, al actuar sobre la superficie mayor número de partículas de polvo finísimas que se comportan como un abrasivo, bajo la acción de las cargas de los vehículos pesados. Otro son las variaciones estacionales; el valor de resistencia al deslizamiento presenta variaciones por temperatura y sequedad (siempre que la intensidad del tránsito sea constante). Las fluctuaciones interanuales dependen de las variaciones de humedad de un año a otro.

En un pavimento nuevo, una vez que se ha eliminado la película superficial de asfalto, el valor de resistencia al deslizamiento desciende rápidamente en los primeros meses de servicio tendiendo a fluctuar a lo largo de los años alrededor de un valor prácticamente constante, y con variaciones estacionales por temperatura y sequedad (Figura 2.3) ⁽⁵⁾. En esta etapa se llega a la fase de pulido o equilibrio; algunos investigadores asumen que la fase de pulido del pavimento ocurre después de 1 millón de ejes equivalentes de vehículos pesados o después de dos años de servicio, lo que ocurra primero; y la caída típica entre los valores de fricción inicial y de equilibrio de resistencia al deslizamiento es de aproximadamente 40% ⁽⁶⁾.

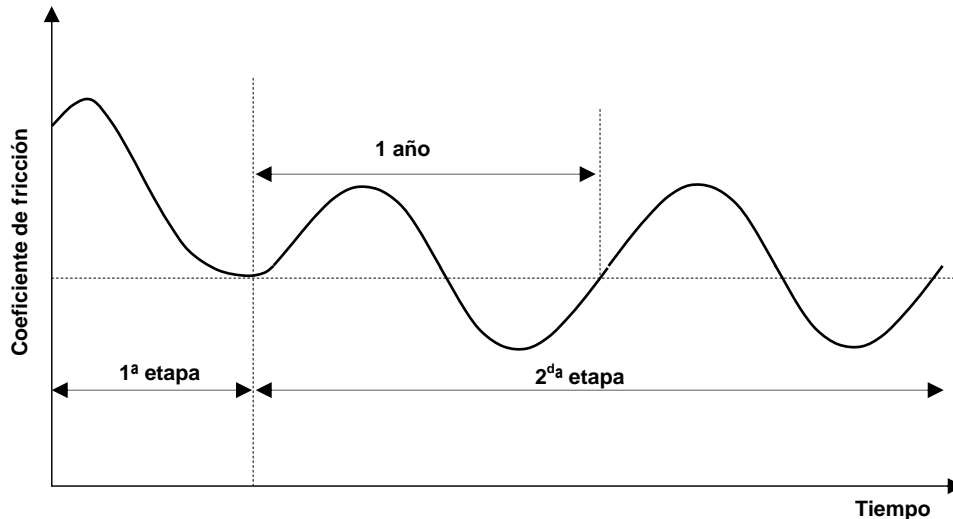


Figura 2.3
Evolución del coeficiente de fricción con el tiempo

El valor final al que tiende el coeficiente de fricción es función tanto del valor de pulido del agregado como del tránsito de vehículos pesados en la carretera (mayor coeficiente de fricción para valores de pulido más elevados, y menor valor de pulido para intensidades de tránsito pesado elevados). Esto hace que no se pueda pretender tener en las carreteras en servicio, un coeficiente de fricción tan alto como al principio de su vida; y que, por tanto, en ellas no sean aplicables los valores mínimos establecidos para pavimentos nuevos ⁽⁵⁾.

2.4 Especificaciones de resistencia al deslizamiento en los Estados Unidos

Sin tener en cuenta la metodología usada, el valor numérico de resistencia al deslizamiento asociado con un pavimento en particular, es usualmente presentado como una constante con dos dígitos se determina multiplicando el coeficiente de fricción medido por 100 (aunque algunas veces el número está a la izquierda como un decimal). Este número es descrito como el número de fricción (FN), o número de resistencia al deslizamiento (SN). El FN es usualmente seguido por el valor de la velocidad a la cual la medición de fricción fue realizada, y el tipo de

neumático (por ejemplo, FN50S, representa la fricción medida a 50 mph con un neumático liso) ⁽²⁾.

La Tabla 2.1 muestra los valores de resistencia al deslizamiento aceptables para carreteras en servicio establecidos por algunos Departamentos de Transporte de los Estados Unidos. Tales valores fueron obtenidos con el remolque ASTM E274 a excepción del Arizona DOT que utiliza un equipo Mu-meter.

Tabla 2.1 Valores de resistencia al deslizamiento mínimos aceptables para pavimentos en servicio ⁽⁴⁾

Departamento de Transporte	Tipo de carretera			
	Autopista	Primaria	Secundaria	Local
Arizona	34 (mu meter)	34 (mu meter)	34 (mu meter)	
Idaho	SN40S >30	SN40S >30	SN40S >30	
Illinois	SN40R >30	SN40R >30	SN40R >30	
Kentucky	SN40R >28	SN40R >25	SN40R >25	SN40R >25
Nueva York	SN40R >32	SN40R >32	SN40R >32	SN40R >32
Carolina del Sur	SN40R >41	SN40R >37	SN40R >37	
Texas	SN40R >30	SN40R >26	SN40R >22	
Utha	SN40R >30-35	SN40R >35	SN40R >35	
Washington	SN40R >30	SN40R >30	SN40R >30	SN40R >30
Wyoming	SN40R >35	SN40R >35	SN40R >35	
Puerto Rico	SN40R >40	SN40R >40		

Por su parte, la Tabla 2.2 contiene los valores mínimos de resistencia al deslizamiento para pavimentos nuevos.

Tabla 2.2 Valores de resistencia al deslizamiento aceptables para pavimentos nuevos ⁽⁴⁾

Departamento de Transporte	Valor mínimo de resistencia al deslizamiento
Maine	SN40R > 35
Minnesota	SN40R > 45; SN40S > 37
Washington	SN40R > 30
Wisconsin	SN40R > 38

La Tabla 2.3 corresponde a los valores de fricción para pistas de aterrizaje recomendados por la Agencia Federal de Aviación (FAA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos ⁽²⁾. Dichos valores son recomendados para mediciones con el equipo Mu-meter.

Tabla 2.3 Valores de resistencia al deslizamiento para pistas de aterrizaje

Requisito	64 km/h	96 km/h
Mínimo	0,42	0,26
Planear mantenimiento	0,52	0,38
Diseño nuevo/construcción	0,72	0,66

3 Caracterización del agregado grueso resistente al pulido

3.1 Equipo de laboratorio usado para simular el desgaste-pulido del agregado

Para simular el desgaste que sufre el agregado en el campo, se han diseñado varios aparatos para medir las propiedades de desgaste-pulido del agregado en muestras de laboratorio, o en muestras de pavimento.

En el Reino Unido fue diseñada la máquina de pulimento acelerado. Consta de una rueda metálica de 41 cm de diámetro y 6 cm de ancho que gira a 320 rpm, un neumático liso de hule macizo de aproximadamente 20 cm de diámetro, un contrapeso de 725N. Dos mecanismos de alimentación de abrasivo; uno, de abrasivo grueso, y otro de abrasivo fino; y un mecanismo de alimentación de agua. La figura 3.1 muestra la máquina de pulimento acelerado.



Figura 3.1
Máquina de pulimento acelerado

En Estados Unidos se desarrolló la máquina de pulimento de pista circular (ASTM E 660). Esta máquina es similar a la de pulimento acelerado, pero la pista está en un plano horizontal y se pueden ensayar 12 especímenes circulares de 15 cm de diámetro. La pista de prueba es de 91 cm de diámetro, y tiene cuatro neumáticos lisos que giran a una velocidad de 30 rpm alrededor de la pista de prueba. Los neumáticos se ajustan a cierta distancia desde el centro del eje, plano de rotación

(curvatura) y huella interna o externa para proporcionar la acción de pulido sin la ayuda de agua o abrasivo.

El Laboratorio de Caminos del Ministerio de Transporte de Quebec y el Laboratorio de Puentes y Caminos de Francia desarrollaron un nuevo método de pulimento usando agua a alta presión (10 MPa) y abrasivo. Consiste en lanzar agua y el abrasivo fino en un ángulo de 40° sobre la superficie del pavimento. La muestra se coloca en una tabla, que es controlada por computadora para moverla en incrementos de 0,25 mm en la dirección XY. La muestra es de 150 mm y 100 mm, y puede ser fabricada mecánicamente mediante un compactador de rodillo o un compactador de amasado. El ensayo dura 3 horas por muestra. La muestra es retirada y sus propiedades de fricción son determinadas usando el péndulo británico. Las propiedades de fricción obtenidas de este equipo son expresadas como el coeficiente de proyección de pulido (C_{pp})⁽³⁾.

3.2 Factores atribuibles al agregado que afectan la fricción del pavimento

Las propiedades de resistencia al deslizamiento de pavimentos asfálticos dependen principalmente del agregado grueso. Los agregados de la superficie de rodamiento deben cumplir tres funciones principales:

- Mantenerse en su lugar, o sea tener una buena adhesividad con el ligante asfáltico
- Asegurar buenas características antiderrapantes, es decir, poseer una adecuada composición granulométrica para asegurar la macrotextura, y una buena resistencia al pulimento para brindar microtextura
- Mantener su integridad y conservar sus propiedades el mayor tiempo posible, lo cual se relaciona con la resistencia mecánica del agregado (resistencia al desgaste y a la fragmentación).

Muchos aspectos son considerados al momento de analizar la evolución de un agregado sometido al contacto con los neumáticos:

- El desgaste reduce progresivamente la angularidad, y aumenta las superficies susceptibles de ser pulidas.
- La dureza de los minerales condiciona el tiempo que tardará el agregado en pulirse. Las calcitas se pulen más rápidamente que el feldespato y el cuarzo. El tiempo en que este pulido se alcance depende del nivel de tránsito que la solicita, fundamentalmente el número de vehículos pesados.
- La fragmentación de las partículas puede generar angularidad los nuevos granos originados por la fragmentación poseen la angularidad de los agregados originales; restituir la microtextura (al fragmentarse una superficie

ya pulida deja expuesta una nueva superficie con microtextura adecuada); y generar problemas de seguridad por la presencia de agregados sueltos en la superficie.

Por lo anterior, se deben utilizar agregados que posean las siguientes características:

- Tener una proporción importante de cuarzo (aproximadamente el 50%)
- Poseer una adecuada resistencia al desgaste
- Poseer una estructura fina para que el pulimento se desarrolle lo más lentamente posible⁽⁷⁾

El Instituto de Transporte de Pennsylvania llevó a cabo análisis petrográficos para indicar la susceptibilidad del agregado al desgaste y pulido. Se encontró que las propiedades de los minerales constitutivos y la cementación son los que principalmente determinan el comportamiento del agregado. Minerales bien cementados y duros resultaron resistentes al desgaste pero eventualmente pulidos, aunque a una velocidad más lenta que los minerales más suaves. Minerales duros, de grano grueso y débilmente cementados resisten el pulido, pero se desgastan a una velocidad que no los hace durables. Para resistir tanto el desgaste como el pulido, un agregado debe idealmente contener un porcentaje alto de cristales gruesos y duros bien cementados en una matriz más suave, de grano fino; o cristales duros bien cementados en una estructura porosa, de manera que la fractura irregular, gradual y lenta de los cristales ocurrirá⁽⁸⁾.

En resumen, una roca con minerales duros toma mayor tiempo para pulirse que una con minerales blandos. Así resulta que los agregados ricos en carbonatos se pulen muy rápidamente; los agregados ricos en feldespatos a una velocidad media; y los ricos en cuarzo, lentamente. Si un agregado posee minerales de diferentes durezas, y todos tienen un desgaste diferente, con el tiempo resultarán los más duros en relieve y los más blandos en los huecos, con lo cual se obtendrá un agregado con una buena microtextura superficial.

Desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento, el agregado ideal sería aquel compuesto por un 50% de minerales duros (cuarzo), y un 50% de minerales blandos (carbonatos). La figura 3.2 muestra la variación del valor de pulido según la combinación de minerales duros y blandos en el agregado.

En general, existe una contradicción entre la resistencia al pulimento y la resistencia mecánica. La presencia de minerales blandos mezclados con minerales duros, hace crecer la resistencia al pulido y disminuir la resistencia mecánica.

Son raros los agregados con excelente resistencia mecánica y excelente resistencia al pulido. En general, las cuarcitas tienen una muy buena resistencia a la fragmentación y los basaltos al pulido. En líneas generales, los agregados con

estructura fina ($\leq 0,1$ mm) y baja porosidad poseen una resistencia mecánica fuerte.

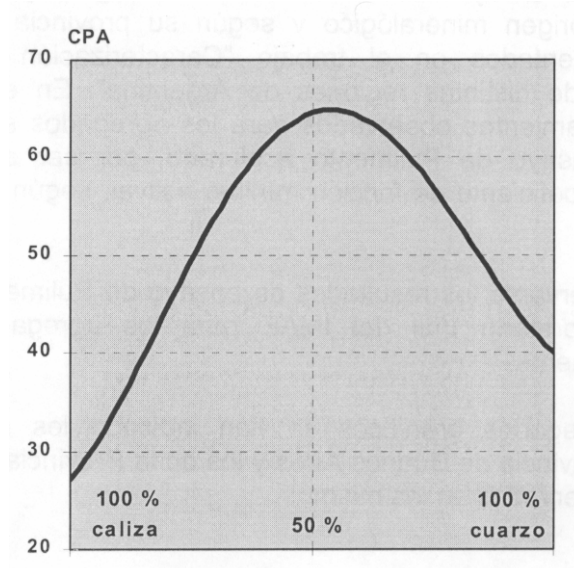


Figura 3.2
Variación del Valor de pulido en función de la proporción de carbonatos y cuarzo ⁽⁶⁾

Una fuerte resistencia al desgaste conduce a un mantenimiento más durable de las aristas vivas, que se compensa en parte con una resistencia al pulimento media. Pero para los agregados con fuerte resistencia mecánica y pobre contraste de dureza de minerales se arriba a un mal estado de pulido final ⁽⁷⁾.

3.3 Métodos de prueba utilizados para evaluar las propiedades friccionantes del agregado grueso

En Estados Unidos, los ensayos más ampliamente usados por los Departamentos de Transporte para evaluar las propiedades friccionantes del agregado son el ensayo de Residuo Insoluble en Ácido (AIR por sus siglas en inglés), pulimento acelerado y análisis petrográfico entre otros.

En el Reino Unido, son utilizados los ensayos de pulimento acelerado y de valor de abrasión del agregado para determinar las propiedades friccionantes del agregado. Mientras que en Nueva Zelanda se utiliza únicamente el ensayo de pulimento acelerado. A continuación se describe brevemente algunos de los ensayos mencionados.

3.3.1 Ensayo de residuo insoluble en ácido (AIR)

Este ensayo proporciona el porcentaje de material sin carbonatos (residuo insoluble) en agregados calcáreos y sirve para caracterizar el desgaste-pulido característico de dichos agregados, los cuales pueden presentar rangos de resistencia al deslizamiento desde extremadamente resbaladizos hasta muy buenos, debido a sus propiedades mineralógicas y de textura.

Este método de prueba tiene la designación ASTM D 3042 y consiste en colocar en un recipiente una muestra representativa de agregado que pasa la malla de 3/8"; previamente lavado y secado, se agrega cierta cantidad de ácido clorhídrico para que el agregado reaccione; una vez que la reacción ha terminado, se adiciona otra cantidad de ácido clorhídrico 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 ⁽³⁾.

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)).

3.3.2 Ensayo de pulimento acelerado

El ensayo de pulimento acelerado fue desarrollado por el Laboratorio de Investigación en Carreteras del Reino Unido. Es una medida de la susceptibilidad al pulimento del agregado, debido a la acción del tránsito cuando forma parte de la superficie de rodamiento de una carretera.

El método de prueba consiste en someter al pulido pastillas elaboradas con agregado que pasa la malla de 3/8" y se retiene en la malla de 1/4". Las pastillas se montan alrededor de la periferia de la rueda metálica de la máquina de pulimento acelerado y se someten al pulido, durante determinado número de horas (dependiendo el método de prueba utilizado); el pulido se logra mediante el empleo de un neumático liso de hule macizo, abrasivo, y agua. Luego se mide el grado de pulido de las pastillas con el péndulo de fricción. El resultado se expresa como el Valor de Pulido (PV por sus siglas en inglés), o Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA).

El ensayo esta normalizado en la Unión Europea, bajo la designación BS EN 1097-8; en el Reino Unido como BS812:Part114; en España como NLT 174; en Estados Unidos, como ASTM D 3319 y AASHTO T 278. En particular, el

Departamento de Transporte de Texas (TXDOT) tiene su propia adaptación del método de prueba ASTM D 3319, denominado TEX 438-A el cual comprende la determinación del valor de pulido para un sólo agregado y mezclas de agregado.

En este método, también existen variantes como las mostradas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1
Diferencias entre los métodos de prueba de pulimento acelerado

Requerimiento	TXDOT 438-A	ASTM D 3319	BS 812-114	NLT 174
Dureza del hule del deslizador del péndulo (escala Shore A)	71 ± 3	58 ± 2	55±5	55±5
Abrasivo	Abrasivo de carburo de silicio (tamaño 150)	Abrasivo de carburo de silicio (tamaño 150)	Fino: polvo de esmeril pasa la malla de 50 µm Grueso: arena sílica que pasan la malla de 600 µm (No.30) y se retiene en la malla de 300 µm (No. 50)	Fino: polvo de esmeril pasa la malla de 50 µm Grueso: arena sílica pasa la malla de 600 µm y se retiene en la malla de 315 µm
Fuerza aplicada sobre las probetas	391,44 ± 4,45 N	391,44 ± 4,45 N	725 ± 10 N	725 ± 10 N
Neumático utilizado	De huella Presión de inflado de 241 ± 14 kPa	De huella Presión de inflado de 241 ± 14 kPa	Liso de hule macizo	Liso de hule macizo
Escala de lectura empleada	Permanente 0 a 150	Permanente 0 a 150	Auxiliar 0 a 1 (Escala F)	Auxiliar 0 a 1 (Escala F)
Tiempo de pulido	9 horas	10 horas	3 horas con abrasivo grueso 3 horas con abrasivo fino	3 horas con abrasivo grueso 3 horas con abrasivo fino
No.de especímenes de ensayo	7	5	4	4
Parámetro	Valor de pulido residual (RPV)	NPB	Valor de pulido (PSV)	Coefficiente de Pulimento Acelerado (CPA)

Cabe señalar que el método de prueba de pulimento acelerado Tex 438-A indica el uso de un neumático con huella. Sin embargo, en un estudio de investigación realizado por Fu y Hua (1998) se encontró que el empleo del neumático con huella produce un desgaste diferencial en los agregados calizos blandos, lo que contribuye a sobreestimar su resistencia al deslizamiento y a una alta variabilidad en los resultados del valor de pulido, por lo que recomendaron recurrir al

neumático de hule macizo para realizar el ensayo de pulimento acelerado ⁽⁹⁾. Por lo anterior, el TX DOT actualmente utiliza el neumático de hule macizo para llevar a cabo el ensayo, aunque en su método de prueba no se especifica.

3.4 Especificaciones para el agregado grueso para asegurar una adecuada fricción

3.4.1 Estados Unidos

Los Departamentos de Transporte de los estados de los Estados Unidos tienen diferentes especificaciones para asegurar una adecuada resistencia al deslizamiento en sus carreteras; algunos limitan el uso de agregados calizos, otros utilizan el ensayo de pulimento acelerado o residuo insoluble en ácido, o ambos para evaluar las propiedades friccionantes del agregado. A continuación se mencionan los ensayos y criterios de aceptación empleados.

3.4.1.1 Departamento de Transporte de Alabama

El Departamento de Transporte de Alabama (Alabama DOT) usa los valores del Número del Péndulo Británico (BPN-9 Número del péndulo británico después de 9 horas de pulimento) para calificar y determinar el porcentaje permisible de agregado calizo empleado en la construcción de carreteras. Los valores de BPN-9 también son para clasificar los bancos de agregado.

Alabama considera la fricción en el diseño de pavimentos nuevos. Se identifican los agregados calizos como agregados problemáticos, y se evalúan sus propiedades friccionantes antes de especificar un porcentaje permisible de agregados calizos que pueden ser usados en la construcción de la superficie de desgaste. Los agregados son sometidos a nueve horas de pulimento acelerado mediante la máquina de pulimento acelerado (ASTM D 3319) y luego se determina el BPN-9 con el péndulo británico (ASTM E 303).

De acuerdo con la sección 410.1 de la especificación del Alabama DOT, los agregados calizos tales como calizas, dolomitas o agregados, los cuales tienden a pulirse bajo la acción del tránsito son permitidos únicamente en capas subyacentes, hombros y acotamientos. Sin embargo, el documento provisional especial No. 1303, acepta el uso de agregados calizos en superficies de desgaste con un porcentaje máximo de agregado basado en el valor del BPN-9 del agregado. Los porcentajes permitidos de agregados calizos se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2
Especificaciones del Alabama DOT para el agregado grueso resistente al pulido

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

Los porcentajes máximos permitidos no deben excederse en ningún caso. También en las superficies de desgaste se usan los agregados silicios como la grava, granito, escoria, arenisca o una combinación de estos. Para un diseño de mezcla adecuado los agregados deben cumplir los requerimientos de cantidad de sustancias deletéreas, porcentaje de desgaste de los Ángeles, porcentaje de sanidad, granulometría, etc, de agregados silicios gruesos y agregados finos ⁽⁸⁾.

3.4.1.2 Departamento de Transporte de Florida

La calidad del agregado se controla especificando el tipo de agregado y limitando su uso en carpetas friccionantes de granulometría abierta. El Departamento de Transporte de Florida evalúa las propiedades friccionantes del agregado por medio del ensayo de residuo insoluble en ácido (AIR). El material retenido en la malla No. 200 debe tener un mínimo de 12% de AIR determinado con el método de prueba FM 5 510.

Para la aprobación de los bancos de materiales, una sección experimental con una longitud mínima de 150 m es construida usando el agregado que se desea sea aprobado. Se determinan las características de fricción de la sección experimental mediante un equipo de rueda bloqueada de acuerdo con el método de prueba ASTM E 274. Si los resultados del ensayo son satisfactorios, entonces se construye una sección de prueba, la cual debe tener un límite de velocidad mínimo de 80 km/hr con un TDP de 14,000. La sección de prueba se construye de tal manera que tenga un mínimo de cuatro carriles, una longitud de 300 m, sin intersecciones, rampas o curvas. A la vez, se construye una sección de control con un agregado aprobado. Los ensayos de fricción se llevan a cabo en la sección de prueba y de control a una velocidad de 65 km/h de acuerdo con ASTM E274, empleando tanto el neumático liso como el neumático con huella. Si se considera

necesario se realizan ensayos adicionales a 95 km/h. Los ensayos de fricción se continúan realizando hasta que se alcanza un tránsito acumulado de 6 millones de vehículos y/o hasta que se estabiliza el número de fricción. Luego los resultados de las secciones de prueba y de control se comparan. El banco de agregado se aprueba cuando la comparación es favorable ⁽⁸⁾.

3.4.1.3 Departamento de Transporte de Indiana

El Departamento de Transporte de Indiana (INDOT) utiliza agregado dolomítico para obtener una fricción alta en carpetas de mezcla asfáltica en caliente en carreteras con menos de 10 millones de ejes equivalentes (ESALs). Este agregado debe tener un contenido de magnesio de al menos 10,3% ⁽¹¹⁾. El agregado que no es dolomita debe ser aprobado antes de emplearse en la construcción de pavimentos. El agregado se aprueba con base en los resultados del valor de pulido y mediciones de fricción en campo.

El procedimiento de aprobación del agregado consta de dos partes. La primera consiste en realizar ensayos de pulimento acelerado de acuerdo con la norma ASTM D 3319. Si los resultados de la comparación indican que el agregado a ser aprobado tiene un Valor de Pulido Residual (RVP-10 por sus siglas en inglés, el 10 indica que el ensayo de pulimento dura diez horas) igual o mayor que el valor RVP-10 obtenido del agregado dolomítico de referencia, se pasa a la segunda parte. El valor promedio de RVP-10 del agregado dolomítico de referencia es de 28 a 30. La segunda parte consiste en la construcción de un tramo de prueba de mezcla asfáltica en caliente con el agregado a ser aprobado, y otro tramo de prueba con el agregado dolomítico de referencia; los tramos se abren al tránsito, y se efectúan mediciones de fricción. Si después de dos años de exposición, al tránsito los valores de fricción del agregado a ser aprobado son iguales o mayores que los valores de fricción del agregado dolomítico de referencia, el agregado se aprueba como un agregado resistente al pulido ⁽¹²⁾.

3.4.1.4 Departamento de Transporte de Iowa

El Departamento de Transporte de Iowa (Iowa DOT) clasifica los agregados en niveles de fricción, como se indica en la Tabla 3.3 ⁽²⁾.

Tabla 3.3
Especificaciones del lowa DOT para el agregado grueso resistente al pulido

Clasificación de fricción	Descripción
L-2	Al menos el 80% del agregado combinado retenido en la malla No 4 (4,75 mm) debe ser del tipo 4, o agregado con una mejor fricción; y al menos el 25% de agregado combinado retenido en la malla No 4 (4,75 mm) debe ser tipo 2, o un agregado de mejor fricción.
L-3	Al menos el 80% del agregado combinado retenido en la malla No 4 debe ser tipo 4, o un agregado de mejor fricción; y al menos el 45% del agregado combinado retenido en la malla No 4 debe ser del Tipo 3, o un agregado de mejor fricción. Si el tipo 2 se aplica en lugar del tipo 3, el mínimo debe ser de 30% de agregado combinado retenido en la malla No 4
L-4	Al menos el 50% del agregado combinado retenido en la malla No 4 debe ser del tipo 4, o un agregado de mejor fricción.

Los tipos de agregados son mostrados en la siguiente tabla.

Clasificación	Descripción
Tipo 1	Agregados, los cuales son generalmente una combinación heterogénea de minerales con microestructura granular gruesa de partículas muy duras (rango de dureza en la escala de Mohs de 7 a 9), ligados por una matriz ligeramente más suave. Estos agregados son tipificados por quienes lo desarrollaron, para y usado por los fabricantes de abrasivos, como bauxita calcinada (sintético); no están disponibles en bancos de agregado de lowa. Debido a su alto costo son especificados únicamente para situaciones extremadamente críticas.
Tipo 2	Agregados naturales de esta clase corresponden a la cuarcita y granito triturado. Los granos minerales en estos materiales, generalmente tienen una dureza en la escala de Mohs en un rango de 5 a 7. Los agregados sintéticos de esta clase son algunas escorias de fundición de aire frío, y otras con características similares.
Tipo 3	Agregados naturales en esta clase son las rocas ígneas trituradas, y/o gravas trituradas. Las gravas trituradas deben contener 40% o más de partículas ígneas y metamórficas. Los agregados sintéticos de esta clase son el esquisto expandido con desgaste en la máquina de los Ángeles menores a 35%
Tipo 4	Agregados triturados de dolomita o caliza en las cuales el 80 % de los granos tienen un tamaño de 20 micras o mayor. Los granos minerales, generalmente son de una dureza de Mohs en un rango de 3 a 4. Las gravas naturales, las partículas de carbonato del tipo 5, como una fracción total del material, no deben exceder más del 20% de partículas sin carbonato.
Tipo 4D	Un subgrupo del tipo 4, que comprende a los agregados cerca, pero que exceden, un tamaño de grano de al menos 20 micras. Los agregados tipo 4D no pueden usarse en superficies friccionantes que requieren el uso de material Tipo 4 o mejor.
Tipo 5	Agregados triturados de caliza o dolomita, en los cuales el 20% o más de los granos tienen un tamaño de 30 micras, o más pequeños.

El nivel de fricción del agregado es relacionado con respecto al volumen de tránsito diario promedio, como se muestra en la siguiente tabla.

TDP Total	TDP vehículos pesados	Nivel de fricción
0-2 000	0-300	No hay requerimientos de fricción especiales
2 000-5 000	300-500	L-4
5 000-10 000	500-2 000	L-3
>10 000 todas las interestatales	> 2 000 todas las interestatales	L-2

3.4.1.5 Departamento de Transporte de Kentucky

El Departamento de Transporte de Kentucky (Kentucky DOT) determina la resistencia al pulido del agregado a ser usado en carpetas friccionantes por medio de la prueba de Residuo Insoluble en Ácido (AIR), de acuerdo con el método de prueba KM 64 223; y clasifica a los agregados con base en los resultados de dicha prueba y en el historial de comportamiento en campo del agregado. Los agregados que demuestran una resistencia al pulido satisfactoria, se clasifican como clase A o B.

Agregado clase A. Agregados con porcentajes de AIR ≥ 50 . Un agregado también se considera clase A con base en el comportamiento satisfactorio de resistencia al deslizamiento en otro estado, pruebas de laboratorio, y ensayos de campo en secciones experimentales. Los agregados calizos y dolomíticos se aceptan como agregados gruesos para todos los usos, excepto como superficies friccionantes de carreteras interestatales.

Agregados clase B. Agregados que no pueden emplearse en mezclas asfálticas resistentes al pulido. Los agregados clasificados como clase B se permiten emplearse únicamente si se indica en el proyecto y de acuerdo con la Nota especial: “Requerimientos para agregados resistentes al pulido de las secciones 804 y 805”.

Las especificaciones para un agregado clase B son las siguientes:

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

Grava. Agregados con un AIR de 15 a 50%

Dolomita. Agregado dolomítico con al menos 37% de $MgCO_3$; también deben presentar una resistencia al deslizamiento satisfactoria. Además no deben tener porcentajes de absorción mayores al 3% ⁽⁸⁾.

3.4.1.6 Departamento de Transporte de Lousiana

El Departamento de Transporte de Lousiana (Lousiana DOT) utiliza el ensayo de pulimento acelerado como un medio de control de la calidad del agregado que es usado en superficies friccionantes. Los agregados son clasificados en niveles de fricción los cuales determinan el porcentaje máximo permisible de agregado que puede ser usado en una mezcla. La Tabla 3.4 presenta los niveles de fricción del agregado.

Tabla 3.4
Especificaciones del Lousiana DOT para el agregado grueso resistente al pulido

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	

Con base en los niveles de fricción, los agregados se emplean en cierto tipo de mezclas, como se aprecia en la siguiente tabla.

Nivel de fricción	Uso permitido
I	Todas las mezclas
II	Todas las mezclas
III	Todas las mezclas, excepto el tipo 8F WC
IV	Todas las mezclas excepto los tipos 3WC, 8WC de 8F WC

Para las mezclas tipo 8 F WC, al menos el 30% en masa del agregado total por volumen requiere un nivel de fricción I; o al menos el 50% en masa del agregado total por volumen debe tener un nivel II. Además, no más del 10 % de este material debe pasar la malla No. 10.

Para mezclas tipo 3 WC, cuando el TDP/carril sea mayor de 1 000 vehículos por día, un mínimo de 50% en masa del agregado grueso usado en estas mezclas puede aplicarse en la construcción de hombros, retornos ⁽⁸⁾.

3.4.1.7 Departamento de Transporte de Michigan

Los agregados empleados en la construcción de carpetas friccionantes deben cumplir los requerimientos de Índice de Desgaste del Agregado (AWI, por sus siglas en inglés). A cada agregado se le asigna un AWI con base en los resultados del ensayo de pista de desgaste (método de prueba MTM 111), y/o análisis petrográfico (método de prueba MTM 112) de muestras representativas de agregado. Únicamente se acepta el uso de agregados con un AWI apropiado. La mezcla de agregados es permitida, y ésta debe cumplir con los requerimientos de AWI.

Los requerimientos de AWI se basan en el Tránsito Diario Promedio y se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5
Requerimientos de AWI para el agregado grueso

TDP	AWI (mínimo)
Menor que 100 por carril	No hay requisito
100-500 por carril	220
≥ 500 por carril	260

3.4.1.8 Departamento de Transporte de Minnesota

El Minnesota DOT utiliza la prueba de Residuo Insoluble en Ácido (AIR) para determinar las propiedades friccionantes del agregado. Los agregados utilizados en mezclas asfálticas se clasifican en cinco clases; si cae en cualquiera de estas cinco clases, puede ser utilizado. La Tabla 3.6 muestra la clasificación del agregado.

Tabla 3.6
Especificaciones del Minnesota DOT para agregados resistentes al pulido

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

Los agregados utilizados en carpetas de desgaste deben ser roca triturada de clase A, D, o una combinación de ambas. No se permite el uso de roca caliza en superficies de desgaste ⁽⁸⁾.

3.4.1.9 Departamento de Transporte de Mississippi

El Departamento de Transporte de Mississippi controla la calidad del agregado a través del análisis petrográfico, y del número de caras fracturadas de agregados triturados. La caliza triturada es permitida para utilizarse en mezclas asfálticas y riegos superficiales. No debe exceder el 30 % de la masa retenida en la malla No 8 de la combinación de agregado, y/o no debe exceder el 30 % de la masa total de la combinación de agregado que pasa la malla No 8. El análisis petrográfico se lleva a cabo únicamente cuando se considera necesario ⁽⁸⁾.

3.4.1.10 Departamento de Transporte de Missouri

El Departamento de Transporte de Missouri (Mo DOT) limita el uso de agregado grueso calizo en la elaboración de mezcla asfáltica. Recurre al ensayo de desgaste de los Ángeles para determinar el tipo y cantidad de agregado no calizo requerido, como es mostrado en la tabla de abajo. El valor del desgaste de los Ángeles debe determinarse en una muestra reciente procedente del banco aprobado. El agregado no calizo requiere un Residuo Insoluble en Acido (AIR) de al menos 85% ⁽⁸⁾.

Tabla 3.7
Especificaciones del MoDOT para el agregado grueso resistente al pulido

Agregado grueso (retenido malla No 4)	Porcentaje mínimo por volumen de agregado sin carbonatos
Caliza, LA ≤ 30	30% retenido malla No 4
Caliza, LA > 30	20% pasa malla No 4
Dolomita	No hay requisito

3.4.1.11 Departamento de Transporte de Nueva Jersey

El Departamento de Transporte de Nueva Jersey precalifica sus agregados usados en la construcción de pavimentos con base en sus propiedades friccionantes. La agencia de investigación del NJ DOT llevó a cabo estudios para desarrollar un procedimiento con base en el valor de pulido del agregado. Se realizaron mediciones de resistencia al deslizamiento en campo, a 64 km/h de acuerdo con la ASTM E-274.

El modelo desarrollado para determinar la resistencia al deslizamiento final es:

$$SN_{40} = SN_{final} + 3 \sin(0,986 * \text{Día } J)$$

Donde

SN_{40} número de resistencia al deslizamiento medido a 64 km/h

SN_{final} valor final de resistencia al deslizamiento

Día J día del calendario Juliano

La resistencia al deslizamiento final esperada de un pavimento es el valor de la constante de resistencia final, después de aproximadamente 2 millones de pasadas de vehículos sobre una superficie de pavimento.

Asimismo, se desarrolló un modelo de regresión lineal para determinar la resistencia al deslizamiento final por medio del valor de pulido (PV)

$$SN_{final} = 1,37PV - 0,5$$

Donde

PV es el valor de pulido del agregado determinado en laboratorio

La ecuación de arriba se obtuvo del análisis de regresión lineal de los datos de resistencia al deslizamiento final, y de los datos de ensayos de pulimento acelerado realizados a muestras de agregado obtenidas de núcleos de pavimento de 26 sitios.

El procedimiento para evaluar los agregados consiste en seleccionar un valor de resistencia al deslizamiento final deseado para la superficie del pavimento. Este valor de resistencia al deslizamiento final se sustituye en la ecuación anterior para determinar el valor de pulido mínimo esperado que debe tener el agregado. Se realizan ensayos de pulimento acelerado en siete especímenes de agregado de acuerdo con la Norma ASTM D 3319. Los valores de pulido de los especímenes se miden a 0,1,2 y 4 horas después de iniciado el ensayo. Se obtiene la línea de regresión para los cuatro valores de pulido. La línea obtenida es de la siguiente forma:

$$Y = A + BX$$

Donde

Y promedio de los valores de pulido medidos en el laboratorio

X $1/(t+1)$, $t=0,1,2,4$ es la duración del ensayo en horas

A constante obtenida del análisis de regresión

B coeficiente de regresión

El agregado es aprobado si el valor de la constante A es mayor al valor de pulido mínimo esperado del agregado, y éste es comparado contra el valor de pulido de

un agregado de control. El procedimiento de evaluación es efectivo para un 50 % de nivel de confianza ⁽⁸⁾.

3.4.1.12 Departamento de Transporte de Oklahoma

El Departamento de Transporte de Oklahoma califica los agregados a ser usados en carpetas de fricción por medio de la prueba de Residuo de Acido Insoluble (AIR). Se especifica un 30% máximo de pérdida de AIR, y un número de resistencia al deslizamiento de campo de 35 como mínimo ⁽⁸⁾.

3.4.1.13 Departamento de Transporte de Pennsylvania

El Departamento de Transporte de Pennsylvania (Penn DOT) clasifica los agregados en cinco grupos de acuerdo con su Nivel de Resistencia al Deslizamiento (SRL, por sus siglas en inglés). Esta clasificación gobierna el uso de los agregados en diferentes secciones, dependiendo de la cantidad de tránsito en cada sección. Los agregados se clasifican con base en los resultados de análisis petrográfico, las prueba de pulimento acelerado, y de residuo insoluble en ácido (AIR). Las tres pruebas son un medio para controlar la calidad del agregado empleado en la construcción de pavimentos. El Penn DOT también utiliza el historial de comportamiento en campo de los agregados como una técnica para la clasificación del agregado.

Tabla 3.8
Especificaciones del Penn DOT para agregado resistente al pulido

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

El nivel de resistencia al deslizamiento (SRL) del agregado se relaciona con respecto al volumen de tránsito diario promedio, como se aprecia en la siguiente tabla.

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

El análisis petrográfico se emplea como el principal indicador del SRL. Los resultados del ensayo de pulimento acelerado se usan como un suplemento al análisis petrográfico. El AIR se emplea para evaluar las propiedades friccionantes del agregado cuando es difícil evaluar las propiedades friccionantes por medio de análisis petrográfico.

Un agregado es ascendido de clase dependiendo de su historial de comportamiento. El historial de comportamiento debe ser de al menos 10 proyectos y por un periodo de al menos dos años. Los agregados de bancos nuevos se ensayan en el laboratorio, y dependiendo de los resultados son aprobados. Los pavimentos construidos con agregados de fuentes nuevas, se monitorean con ensayos de resistencia al deslizamiento para asegurar un comportamiento adecuado con respecto a la resistencia al deslizamiento ⁽⁸⁾.

3.4.1.14 Departamento de Transporte de Tennessee

El Departamento de Transporte de Tennessee (TDOT) evalúa las propiedades friccionantes de los agregados por medio de las pruebas de pulimento acelerado (AASHTO T 278, T 279), residuo insoluble en ácido (AIR, ASTM D 3042), porcentaje de dióxido de sílice (ASTM C 25), y un procedimiento desarrollado en la Universidad Tecnológica de Tennessee (TTU) llamado método de condición textural final (T³CM). Los agregados se clasifican en cuatro grupos (Tabla 3.9) ⁽¹⁰⁾.

Tabla 3.9
Especificaciones del TDOT para agregado grueso resistente al pulido

Clasificación	AIR* mínimo	BPN 9 mínimo	T ³ CM (Método TTU) Mínimo	Carbonato de calcio máximo	Dióxido de silicio mínimo	Usos	Sección de prueba para aprobación
Tipo I	50 %	30		32%	40%	Todas las carreteras	
Tipo II	35 %	30			30%	Todas las carreteras	20,000 TDP mín durante 2 años, o 7,3 millones de pasadas de vehículos por carril de prueba por al menos 2 años (4- carril interestatal rural, máx TDP 35,000 permitido)
Tipo III	25 %	25			20%	15,000 TDP máx	20,000 TDP mín durante 2 años, o 7,3 millones de pasadas de vehículos por carril de prueba por al menos 2 años (interestatal no)
Tipo IV		22	42,5		10%	5,000 TDP máx	10,000 TDP mín durante 2 años, o 3,65 millones de vehículos por carril de prueba por al menos 2 años (interestatal no)

3.4.1.15 Departamento de Transporte de Texas (TX DOT)

El Departamento de Transporte de Texas (TX DOT) evalúa las propiedades friccionantes de los agregados, por medio de las pruebas de residuo insoluble en ácido (método de prueba Tex 612-J Acid Insoluble Residue for Fine Aggregate), pulimento acelerado (Tex 438-Accelerated Polish Test for Coarse Aggregate), y sanidad del agregado usando sulfato de magnesio (Tex 411-A). Recientemente, el TXDOT encontró que el ensayo de pulimento acelerado no es un buen indicador de las propiedades friccionantes del agregado, por lo que los agregados se clasifican con base en los resultados de las pruebas mencionadas y el historial de comportamiento en campo del agregado⁽⁹⁾.

La metodología del TX DOT para evaluar las propiedades friccionantes del agregado a utilizar en mezclas asfáltica en caliente, consiste en lo siguiente:

- Determinar el porcentaje de residuo insoluble en ácido del agregado grueso de acuerdo con la Norma Tex 612-J y el porcentaje de sanidad del agregado grueso por el uso de sulfato de magnesio de acuerdo con la Norma Tex 411-A. Si el porcentaje de AIR es $\geq 70\%$ y la pérdida de sanidad por el uso de sulfato de magnesio es $\leq 25\%$, el agregado se clasifica como tipo A y no es necesario realizar otros ensayos, ya que se considera que tienen bajo contenido de carbonato de calcio.
- Si el agregado grueso no cumple con el criterio anterior, se realiza el ensayo de pulimento acelerado de acuerdo con la Norma Tex 438-A, y se clasifica con base en el Valor de Pulido Residual (RPV, por sus siglas en inglés) y la pérdida de sanidad por el uso de sulfato de magnesio. Estos agregados se clasifican en cuatro categorías (A,B,C o D) como se aprecia en la Figura 3.3.

Para mejorar las características friccionantes se permite mezclar agregados gruesos de clase A y B. Cuando un agregado de clase A es requerido en las especificaciones, al menos el 50% (por masa) del material retenido en la malla de 4,75 mm (No 4) debe ser clase A. Los agregados deben ser mezclados por volumen si la gravedad específica neta de la clase A y la clase B, difieren más de 0,30. No se permite mezclas agregados clase C y D⁽⁹⁾.

La clasificación del agregado es de acuerdo con su nivel de resistencia al deslizamiento. Esta clasificación rige el uso de los agregados dependiendo del volumen de tránsito esperado durante la vida de diseño de la superficie de rodamiento.

El nivel de resistencia al deslizamiento requerido durante la vida de diseño de la superficie está en función de la demanda de fricción, la cual depende del volumen de tránsito, características geométricas, velocidad de circulación, y precipitación, entre otras.

La Tabla 3.10 muestra las clases de agregado requerido dependiendo del número de vehículos por carril durante la vida de diseño de la superficie de rodamiento.

En la Figura 3.3, los valores de pulido y sanidad del agregado grueso representan un valor de SN40 estimado para la vida de diseño de la superficie. Las líneas horizontales corresponden a los límites de pérdida de sanidad para los diferentes volúmenes de tránsito.

Tabla 3.10 Clases de agregado resistente al pulido

Número de vehículos por carril (millones)	Clase de agregado
≥ 20	A
12- 20	B
8-12	C
< 8	D

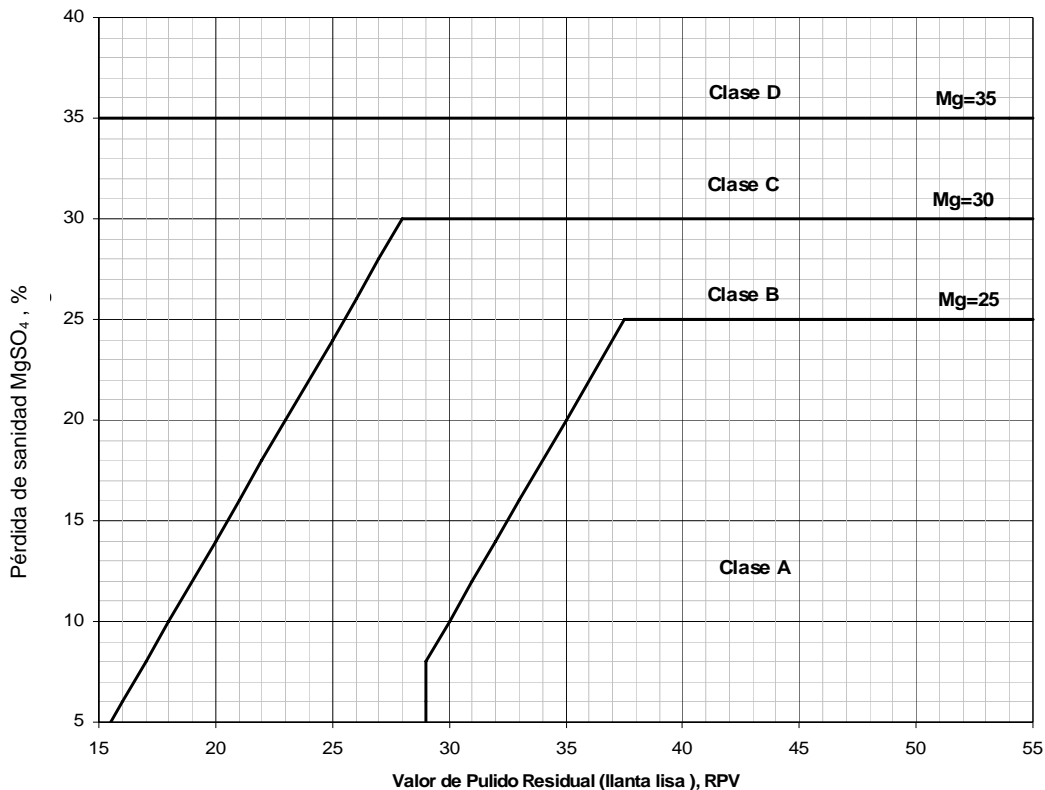


Figura 3.3
Clasificación del agregado superficial (mezcla asfáltica en caliente)

3.4.1.16 Departamento de Transporte de Utha

El Departamento de Transporte de Utah (Utah DOT) controla la calidad del agregado usado en carpetas de desgaste por medio del ensayo de pulimento acelerado; el valor de pulido especificado es de 38. Sin embargo, la experiencia del Utah DOT ha demostrado que el valor de pulido no es un indicador confiable de las propiedades friccionantes del agregado. Algunas veces, los agregados con bajo valor de pulido se han comportado mejor en campo. Por lo que, el Utah DOT está considerando optar por un análisis químico para determinar la cantidad de carbonatos en el agregado ⁽⁸⁾.

3.4.2 Reino Unido

En el Reino Unido (U.K) se desarrolló una política para establecer niveles de fricción 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 ⁽¹³⁾.

Para determinar las características friccionantes del agregado se utilizan las pruebas de pulimento acelerado, y Valor de Abrasión del Agregado (AAV, por sus siglas en inglés). La Tabla 3.11 resume los valores del coeficiente de fricción transversal (CFT) y el valor de pulido mínimo (PV) especificados en el UK para diferentes carreteras y volúmenes de tránsito; y la Tabla 3.12 resume los valores de AAV ⁽¹⁴⁾.

Tabla 3.11
Niveles de fricción de alerta en el Reino Unido, y valores de pulido según el tipo de carretera o zona

Tipo de carretera o zona	N.I*	CFT	Valor de pulido									
			Tránsito para la vida de diseño (vehículos comerciales pesados/carril/día)									
			0-250	250-500	501-750	751-1000	1001-2000	2001-3000	3001-4000	4001-5000	5001-6000	Más de 6000
A Autopista	I	0,35	50	50	50	50	50	55	60	60	65	65
A1 Autopista con una salida peligrosa a 300m aproxim.	Ia	0,35	50	50	50	55	55	60	60	65	65	65
B Tramos de carretera con cuerpos separados	I	0,35	50	50	50	50	50	55	60	60	65	65
C Tramos de carretera con un sólo cuerpo	II	0,40	50	50	50	55	60	65	65	65	65	68+
D Tramos de carretera con cuerpos separados que cruzan pequeñas intersecciones	II	0,40	50	50	50	55	60	65	65	65	65	68+
E Tramos de carretera con un sólo cuerpo que cruzan pequeñas intersecciones	III	0,45	55	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	70+

Continuación Tabla 3.11

3. Caracterización del agregado grueso resistente al pulido

Tipo de carretera o zona	N.I*	CFT	Valor de pulido										
			Tránsito para la vida de diseño (vehículos comerciales pesados/carril/día)										
			0-250	250-500	501-750	751-1000	1001-2000	2001-3000	3001-4000	4001-5000	5001-6000	Más de 6000	
F	Cercanía de una intersección con una vía principal	III	0,45	55	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	70+
G1	Pendiente longitudinal de 5-10% en una longitud superior a 50m	III	0,45	55	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	70+
G2	Pendiente longitudinal superior al 10% en una longitud superior a 50m	IV	0,50	60	68+	68+	70+	70+	70+	70+	70+	70+	70+
H1	Curvas de radio inferior a 250m y velocidad reglamentaria superior a 65 km/h	III	0,45	55	60	60	65	65	68+	68+	68+	68+	70+
H2	Curvas de radio inferior a 100m	VIII	0,60 (20km/hr)	55-70+	60-70+	60-70+	65-70+	65-70+	65-70+	65-70+			
J	Cercanías de una glorieta	V	0,55	68+	68+	68+	70+	70+	70+	70+	70+	70+	70+
K	Cercanías de un paso de peatones y otros lugares de alto riesgo	V	0,55	68+	68+	68+	70+	70+	70+	70+	70+	70+	70+
L	Glorieta	VI	0,55 (20km/hr)	50-70+	55-70+	60-70+	60-70+	65-70+	65-70+	65-70+			

Notas:

- 1 Donde sea especificado material 68+, ninguno de los tres resultados más recientes de ensayos consecutivos del agregado que sea suministrado debe estar por debajo de 68.
 - 2 En toda la tabla 70+ significa que las superficies especiales con alta resistencia al deslizamiento deben cumplir con la cláusula 924 del MCHW1.
 - 3 Para sitios de categoría L y H2, se da un rango para el valor de pulido, y éste debe ser seleccionado con base en la experiencia local del comportamiento del material. En ausencia de dicha información, el valor más alto debe ser utilizado.
- * Nivel de investigación

El CFT se mide con el equipo SCRIM, y el valor de pulido se determina en muestras representativas de agregados de acuerdo con el método de prueba British Standar 812 Part 114 Determination of Polish Stone Value.

Tabla 3.12
Requisitos de valor de abrasión del agregado según el tipo de tratamiento

Tipo de tratamiento	Valor de abrasión del agregado máximo permisible					
	Tránsito para la vida de diseño					
	<250	251-1000	1001-1750	1751-2500	2501-3250	> 3250
Sello para asfalto compactado en caliente y tratamientos superficiales, y para agregado en slurry y microcarpetas	14	12	12	10	10	10
Capas delgadas de desgaste, superficies de concreto de agregado expuesto, y superficies de desgaste macadam	16	16	14	14	12	12

3.4.3 Nueva Zelanda

Nueva Zelanda tiene en marcha un proyecto similar al de los ingleses, definiendo niveles de investigación de fricción, e indicando valores por debajo de los cuales hay que efectuar un análisis a profundidad de la superficie de la zona en cuestión.

Para determinar las características friccionantes del agregado recurre a la prueba de pulimento acelerado (BS 812, Part:114). La especificación TNZ 10:2002 indica que los agregados usados para la construcción de superficies nuevas o tratamientos superficiales de pavimentos existentes, debe tener un PSV como se calcula con la ecuación mostrada abajo, o como es especificado en el contrato, el que sea más alto.

En el caso de mezcla asfáltica en caliente, al menos el 85% (o el porcentaje especificado en el contrato, el que sea más alto) de la fracción del agregado grueso debe tener un PSV, como se calcula con la ecuación de abajo ⁽¹⁵⁾.

$$PSV=100*SR+0,00663*CVD+2,6$$

Donde

SR nivel de investigación del sitio, según la Tabla 3.13, en decimales

CVD flujo de vehículos comerciales pesados por carril por día

PSV valor de pulido del agregado

El CVD es el flujo de tránsito esperado al final de la vida de diseño. Si las tasas de crecimiento del tránsito son conocidas, la siguiente fórmula es conveniente:

$$CVD_F = \left(1 + \frac{i}{100}\right)^n \times CVD_p$$

Donde

i tasa de crecimiento del tránsito esperado

n número de años de la vida de diseño

CVD_F CVD futuro. El flujo esperado de vehículos comerciales pesados por carril por día al final de la vida de diseño

CVD_p CVD actual. El flujo actual de vehículos comerciales pesados por carril por día donde un vehículo comercial es un MCV, o más pesado

El valor de CVD_p se calcula de la siguiente manera:

$$CVD_p = \frac{\%CVD}{100} \times ADDT$$

Donde

%CVD flujo de vehículos comerciales clasificados como MCV o más pesados, por carril por día (usando los datos actuales)

AADT tránsito diario promedio anual por carril por día (usando los datos actuales)
(16)

Tabla 3.13
Niveles de investigación de resistencia al deslizamiento

Tipo de zona	Nivel de investigación (CFTx100)	Nivel mínimo (CFTx100) ^(a)
Zonas próximas a: <ul style="list-style-type: none"> • Vías ferroviarias • Semáforos • Pasos de peatones • Glorietas Intersecciones (vías secundarias) Puente de un sólo cuerpo	55	45
Radios de giro < 250 m Pendiente >10%	50	40
Intersecciones (vías principales) Pendientes entre 5 y 10% Accesos a autopistas	45	35
Tramos de carretera con un sólo cuerpo	40	30
Tramos de carretera con cuerpos separados ^(b)	35	25

^(a) Se refiere al "Threshold Level TL": nivel que requiere un tratamiento prioritario. A menudo se fija por un valor 0,1 inferior al Nivel de investigación, "Investigatory Level IL"

^(b) En el caso de carreteras con geometría simple, que no necesiten zonas de frenado importantes

Actualmente, esta en desarrollo una nueva especificación para agregados con PSV altos, y se encuentra en la fase de prueba.

3.4.4 Argentina

En Argentina, las características de fricción del agregado se determinan 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, de bajo espesor para carpetas de rodamiento, especifican un coeficiente de pulimento acelerado mayor o igual a 0,40 para mezclas asfálticas en caliente densas; mezclas drenantes; microconcretos asfálticos de granulometría discontinua, y mezclas SMA⁽¹⁷⁾.

3.4.5 España

En España, las características de fricción del agregado se determinan mediante el ensayo de pulimento acelerado de acuerdo con la Norma NLT 174.

La orden circular 5/2001 de la Dirección General de Carreteras españolas, que fija las especificaciones de los agregados señala los valores de coeficiente de pulimento acelerado de la Tabla 3.14 para pavimentos nuevos ⁽¹⁸⁾.

Tabla 3.14
Requerimientos de coeficiente de pulimento acelerado mínimo en España para pavimentos nuevos

Tipo de riego o mezcla	Tránsito de vehículos pesados						
	T00	T0	T1	T2	T3	T4	Acotamiento
Lechada asfáltica		≥0,50			≥0,45		≥0,40
Mezcla asfáltica en caliente densa	≥0,55	≥0,50		≥0,45	≥0,40		
Mezcla asfáltica en caliente discontinua	≥0,55	≥0,50			≥0,45		
Tratamientos superficiales		0,50	0,45		0,40	No aplica	
Concreto vibrado		0,50			-		

Tabla 3.15
Categorías de tránsito en España ⁽¹⁹⁾

Categoría de tránsito	Intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDV)
T00	≥ 4000
T0	2000-4000
T1	800-2000
T2	200-800
T3	50-200
T4	< 50

3.5 Análisis de las especificaciones de valor de pulido

La especificación de valor de pulido del Reino Unido considera tanto zonas urbanas como carreteras. Establece valores de pulido dependiendo de la demanda de fricción. En zonas de alto riesgo donde la demanda de fricción es alta, como es el caso de los pasos peatonales, curvas de radio inferior a 100 m, pendientes; intersecciones y gloriets, establecen valores de pulido altos en un rango entre 55 y 70, debido a que la resistencia al deslizamiento depende principalmente de la microtextura del agregado. En carreteras, la especificación de valor de pulido es inferior, está comprendida en un rango entre 50 y 65, y se

incrementa a medida que se incrementa el volumen de tránsito pesado y dependiendo de las características de la carretera (un sólo cuerpo o dos cuerpos). En este caso, las velocidades de circulación son altas (mayor a 60 km/h), y la resistencia al deslizamiento depende principalmente de la macrotextura.

La especificación de valor de pulido de Nueva Zelanda es muy parecida a la del Reino Unido; consideran las mismas zonas y valores de pulido.

En España, la especificación de valor de pulido es únicamente para carreteras, y ésta depende del volumen de tránsito pesado y del tipo de riego o mezcla. A mayor volumen de tránsito pesado, valores de pulido más altos. El rango de valores de pulido está entre 0,4 y 0,55. Dichos valores son inferiores a los establecidos en el Reino Unido para carreteras con volúmenes de tránsito pesado muy semejante.

La especificación argentina sólo establece un valor de pulido mínimo de 0,40 para diferentes tipos de mezclas.

En los EUA, el Departamento de Transporte de cada estado define las especificaciones para asegurar el uso de agregados resistentes al pulido con base en pruebas de laboratorio como pulimento acelerado, el comportamiento del agregado en campo, tramos de prueba o una combinación de éstos. La especificación de valor de pulido depende del volumen de tránsito (TDP) a mayor volumen de tránsito, valores de pulido más altos. El rango de valores de pulido es de 25 a 35.

De lo anterior, la especificación del valor de pulido del Reino Unido es la más estricta de todas; la española y la de algunos Departamentos de Transporte de los Estados Unidos son inferiores, y únicamente consideran carreteras. Por otra parte, la especificación de pulimento acelerado se define con base en el valor de resistencia al deslizamiento, o coeficiente de fricción requerido para la superficie de rodamiento durante la vida de diseño y el volumen de tránsito.

4 Modelos para estimar la resistencia al deslizamiento

Una manera de calcular la fricción es a través de modelos desarrollados para estimar el número de resistencia al deslizamiento (SN), o el número de fricción (FN) con base en algunas características de los materiales.

Rusell desarrolló un modelo para estimar el número de fricción (FN) de las propiedades del material, edad, tránsito y clima:

$$FN=41,4-0,00075D^2-1,45\ln(LAVP)+0,245LAWEAR$$

Donde

FN	número de fricción calculado a 40 mph (64 km/h)
D	porcentaje de dolomita en la mezcla
LAVP	pases de vehículos acumulados por carril
LAWEAR	desgaste de los Ángeles

El Departamento de Transporte de Wisconsin, actualmente emplea este modelo para estimar el FN. El modelo al igual que muchos otros, no diferencia la macrotextura y la microtextura ⁽²⁾.

Otro modelo utilizado para estimar la fricción es el modelo desarrollado en los años setentas por el Transport Research Laboratory (TRL) del Reino Unido. Se basó en el análisis de regresión llevado a cabo en 139 secciones de carretera en el Reino Unido con densidades de tránsito mayores a 4 000 vehículos comerciales por día. Este modelo expresa el valor mínimo de fricción en verano a esperar durante la vida en servicio de una determinada superficie y solo aplica a tramos rectos.

$$SFC= 0,024-0,0000633CVD + 0,010CPA$$

Donde

SFC	coeficiente de fricción transversal medio medido con equipo SCRIM a 50 km/h (calculado como el promedio de tres mediciones realizadas durante los meses de verano, donde el coeficiente es mínimo)
CVD	número de vehículos comerciales por día (considera todos los vehículos, que descargados, exceden 1,5 ton)
CPA	coeficiente de pulimento acelerado del agregado, de acuerdo con la Norma BS812, Part 114

Este modelo tampoco toma en cuenta la influencia de la macrotextura. Debido a que el modelo anterior no reflejaba la situación real para tránsitos elevados, el TRL desarrolló una nueva ecuación en 1998, la cual se ajusta mucho mejor al

comportamiento real de las superficies de carreteras, sobre todo para tránsitos elevados.

$$SFC=K-[B \times \ln(CVD)] + [A \times CPA]$$

Donde

A, B y C son constantes que dependen del trazado geométrico de la carretera, para el caso de autopistas y carreteras con trazos geométricos sin grandes complicaciones: A=0,000618, B=0,0225, y K=0,252.

Este modelo introduce un peso ponderado en forma logarítmica del tránsito; asimismo, define los requisitos de pulido que deben poseer los agregados para formar parte de la superficie de rodamiento, y así asegurar un adecuado coeficiente de fricción mínimo a lo largo de la vida de diseño, bajo tránsito, medido con el equipo SCRIM ⁽⁷⁾.

Cenek Meter y Jamieson Neil J, desarrollaron un modelo para estimar la resistencia al deslizamiento en riegos de sello en carreteras de Nueva Zelanda. El modelo se basó en el análisis de 47 tramos rectos en carreteras estatales todos los tramos tuvieron una edad de tres años o más. De los 47 tramos, 24 fueron construidos con agregado aluvial con un valor de pulido de 52 a 62 y tránsitos de vehículos comerciales pesados entre 12 y 468 por carril por día. Los 23 sitios restantes se construyeron con agregado de roca dura proveniente de bancos con valores de pulido de 43 a 65, y un tránsito de vehículos comerciales pesados por carril por día de 22 y 380. En este estudio se concluyó que los factores que determinan el comportamiento de la resistencia al deslizamiento en los pavimentos en servicio fueron el espaciamiento entre las partículas de agregado y el número de vehículos comerciales pesados (HCV). Asimismo, se aseveró que el estado de equilibrio de pulido de superficie de riegos de sello se alcanza después de 1 millón de vehículos comerciales pesados. El modelo desarrollado fue:

$$MSSC_{av}= 0,0013PSV+0,10e^{-CHVC}-0,007ALD+0,44$$

Donde

MSSC _{av}	coeficiente promedio en verano del SCRIM
PSV	valor de pulido del agregado de acuerdo con la norma BS 812, Part 114
CHVC	tránsito acumulado de vehículos comerciales pesados por carril en millones = tránsito de vehículos comerciales >3,5 ton/carril/día*edad de la superficie (años)*días operacionales por año (=300/10 ⁶)
ALD	la separación mínima promedio del riego de sello (macrotextura), (mm)

Este modelo proporcionó un coeficiente de determinación (r²) de 0,35; un error estándar de estimación de 0,04 para un 95% de confianza de que el valor

estimado de resistencia al deslizamiento, en términos del coeficiente del SCRIM, estará dentro de $\pm 0,08$ de los valores observados ⁽⁶⁾.

Este modelo a diferencia de los anteriores, toma en cuenta tanto la microtextura como la macrotextura.

Gandhi Poduru M. et al, desarrollaron un modelo de regresión basado en el análisis de datos de laboratorio y campo de 20 tramos de carreteras de Puerto Rico. El trabajo de campo consistió en medir el coeficiente de fricción (μ) a 64 km/h (40 mph) con el equipo Mu-meter, y en extraer muestras representativas de pavimento flexible. En laboratorio se determinó el BPN y la macrotextura de losas de pavimento flexible de 60 x 60 cm. El agregado de la mezcla asfáltica se recuperó por extracción, y se le realizaron ensayos de pulimento acelerado y de AIR. Las ecuaciones desarrolladas son:

$$\mu = 47,034 - 0,288 \text{ Sol}$$

$$\mu = -23,0 + 1,325 \text{ PSV}$$

Donde

μ coeficiente de fricción mínimo

Sol solubilidad del agregado en el ácido, de acuerdo con la Norma ASTM D 3042-86, en porcentaje. Donde la solubilidad es 100%-AIR%

PSV valor de pulido del agregado medido con la escala auxiliar de acuerdo con la Norma ASTM D 3319.

En las ecuaciones anteriores, el coeficiente de correlación (r^2) de la ecuación del AIR fue de 0,836 y su significancia estadística $p=0,0001$ y para la ecuación que involucra el PSV el coeficiente de correlación resultó de 0,472 para una significancia estadística $p= 0,041$.

Del estudio surgieron recomendaciones para las especificaciones de PSV y solubilidad. Se recomendó especificar un PSV de 48 para autopistas y áreas de alto riesgo; y un PSV de 45 para áreas de bajo riesgo. Asimismo, se recomendó incluir en la especificación el contenido de carbonato; un 10% máximo de solubilidad en el agregado para autopistas y áreas de alto riesgo; y 25% máximo de solubilidad del agregado para carreteras primarias ⁽²²⁾.

Chien N Fue y Hua Chen, desarrollaron un modelo de regresión múltiple para estimar el número de resistencia al deslizamiento (SN40) por medio de características del agregado como el valor de pulido (PV), y la pérdida de sanidad en cinco ciclos por el uso de sulfato de magnesio. Este modelo se deriva de un número limitado de datos de campo y de laboratorio. En campo, se realizaron

mediciones de fricción con el trailer de rueda bloqueada (ASTM E 274) en tramos de carretera sometidos a más de 8 millones de vehículos por carril.

$$SN40 = 19 - 0,40*(pérdida de sanidad)+0,83*RPV$$

Donde

SN40	número de resistencia al deslizamiento a 64 km/h (40 mph)
Pérdida de sanidad	pérdida de sanidad en cinco ciclos por el uso de sulfato de magnesio del agregado que pasa la malla de 9,5 mm (3/8") y se retiene en la malla de 4,75 mm (No. 4), en porcentaje.
RVP	valor de pulido residual de acuerdo con el método de prueba TEX 438-A

El coeficiente de determinación (r^2) obtenido fue de 0,98. Este modelo considera únicamente la microtextura.

El Departamento de Transporte de Texas, actualmente utiliza este modelo para estimar la resistencia al deslizamiento (SN) de las superficie de rodamiento durante su vida de diseño, y establecer las especificaciones de valor de pulido y sanidad del agregado⁽⁹⁾. Por ejemplo, para un valor de pulido residual de 32 y una pérdida de sanidad de 12% el SN estimado es 41; para un valor de pulido residual de 25 y una pérdida de sanidad de 27%, el SN estimado es de 29.

Otro modelo desarrollado para estimar la fricción en pavimentos es el modelo de la AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras), conocido como Índice de Fricción Internacional (IFI). El modelo es de tipo exponencial, y se describe en función de una constante (FR60) referida a la velocidad de deslizamiento de 60 km/h. La ecuación del IFI es la siguiente:

$$IFI = A + B * F * e^{\left(\frac{S-60}{Sp}\right)} + C * Tx$$

donde

IFI índice de Fricción Internacional a 60 km/h

F valor de la fricción medido en campo

Sp constante de velocidad, $Sp = a + b * Tx$

a y b constantes del equipo utilizado para evaluar la macrotextura

Tx medida de la macrotextura

A,B y C Constantes del equipo utilizado para medir la fricción. La constante C es igual a cero para neumáticos lisos ⁽²⁰⁾

El IFI se indica por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma (F,M); el primero representa la fricción (F); y el segundo la macrotextura (M). El primero es un número adimensional, y el segundo un número positivo sin límites determinados y unidades de velocidad (km/h). El valor cero de fricción indica deslizamiento perfecto, y el valor uno adherencia perfecta ⁽²⁰⁾.

El IFI es una escala de referencia (que relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento); que sirve para estimar la constante de referencia de velocidad (Sp) y la de fricción a 60 km/h (F60) de un pavimento. El par de valores (F60 y Sp) expresan el IFI de un pavimento, y permiten calcular el valor de fricción, F(S), a cualquier velocidad de deslizamiento (S) ⁽²¹⁾.

Los modelos presentados se utilizan para establecer las especificaciones de valor de pulido dependiendo de la resistencia al deslizamiento, que se pretende mantener durante la vida de diseño de la superficie de rodamiento.

De los modelos presentados, únicamente el de Cenek et al, y el de la AIPCR consideran tanto la microtextura como la macrotextura, componentes de la resistencia al deslizamiento.

5 Ejemplo de clasificación de agregado grueso resistente al pulido

A manera de ejemplo, se utilizó la metodología del TX DOT para clasificar el agregado que se emplea en la elaboración de mezcla asfáltica en caliente y tratamientos superficiales. El agregado evaluado proviene de 16 bancos de materiales del estado de Coahuila. De acuerdo con la metodología del TX DOT, se realizaron los ensayos de residuo insoluble en ácido (Tex 612-J), pulimento acelerado (Tex 438-A), y sanidad del agregado por el uso de sulfato de magnesio (ASTM C88); los métodos de prueba aplicados se describen en el Anexo. Adicionalmente, se realizó el ensayo de desgaste de los ángeles (ASTM C 131) y Microdeval (ASTM D6928).

Los ensayos se realizaron en el agregado que pasó la malla de 9,5 mm (3/8 in) y se retuvo en la malla de 4,75 mm (No.4).

Se llevaron a cabo cuatro ensayos de residuo insoluble en ácido; un ensayo de sanidad por el uso de sulfato de magnesio; un ensayo de desgaste de los Ángeles; dos ensayos de Microdeval; y dos ensayos de pulimento acelerado por cada agregado.

En el ensayo de sanidad se utilizó sulfato de magnesio, el cual no es muy empleado en México. Las razones para recurrir al sulfato de magnesio es que la metodología del TX DOT usa dicho sulfato; y también porque varios investigadores recomiendan el uso del sulfato de magnesio, debido a que en el rango de temperatura del ensayo la solución es más estable y se tiene menos variabilidad en los resultados; además, hay menos dificultad para realizar el ensayo ya que la solución de sulfato de magnesio no se cristaliza tan rápido como el sulfato de sodio ⁽²⁸⁾.

Para el ensayo de pulimento acelerado se elaboraron de cuatro a seis pastillas por cada agregado, con material que pasó la malla de 9,5 mm (3/8 in), y se retuvo en la malla de 6,3 mm (1/4 in). A las pastillas de agregado se les determinó el NPB antes del ensayo, y posteriormente fueron sometidas al pulido, usando el neumático liso de hule macizo, durante nueve horas en la máquina de pulimento acelerado. Después del pulido se determinó su valor de pulido residual (Tex 438-A) con el péndulo británico de fricción.

Los resultados de las pruebas de laboratorio de los 16 agregados se incluyeron en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultados de pruebas de laboratorio del agregado

Banco	Descripción material	Residuo Insoluble en ácido	Valor de pulido residual	Pérdida de sanidad MgSO ₄	Pérdida Microdeval	Desgaste Los Angeles
		%		%		%
1	Riolita	100	31	5	4	18
2	Riolita	94	30	10	8	15
3	Riolita	70	27	2	3	13
4	Escoria	65	37	7	19	26
5	Escoria	60	35	0	12	22
6	Dolomita	11	24	7	11	28
7	Caliza	8	26	1	7	20
8	Caliza	1	20	1	9	24
9	Caliza	2	24	2	7	22
10	Caliza	8	24	1	7	22
11	Caliza	6	22	0	5	21
12	Caliza	14	25	13	18	25
13	Caliza	10	25	2	14	21
14	Caliza	8	27	2	7	21
15	Caliza	71	41	27	26	24
16	Caliza	11	27	1	7	21

En lo que se refiere a los valores de pulido, los más bajos corresponden al agregado calizo; le sigue la riolita y por último la escoria; lo anterior corrobora lo encontrado por otros investigadores.

Las pérdidas de sanidad obtenidas se encuentran en un rango de 0 a 10 para la mayoría de los diferentes agregados evaluados; únicamente dos agregados, los bancos 12 y 15 presentaron pérdidas de sanidad fuera de los límites especificados en la Norma N CMT 4/04 03 de la SCT para agregados a utilizar en carpetas de sistemas de riegos (intemperismo acelerado 12% máximo).

En el ensayo de desgaste de los Ángeles se obtuvieron pérdidas en un rango de 20 a 28 para el agregado calizo, de 22 a 26 para la escoria; y de 13 a 18 para la riolita. Si se consideran las especificaciones de desgaste de los Ángeles de la Norma N CMT 4/04 03 de la SCT para agregados a utilizar en carpetas asfáltica de granulometría densa y en sistemas de riegos, todos los agregados evaluados cumplen con la especificación.

El ensayo de desgaste de los Ángeles es el más utilizado mundialmente para evaluar la durabilidad del agregado; sin embargo, actualmente para evaluar dicha propiedad en agregados a utilizar en mezclas asfáltica se recomienda el ensayo Microdeval. Varias investigaciones han demostrado que este ensayo es un excelente indicador del comportamiento en campo, y que es más efectivo que el ensayo de Desgaste de los Ángeles para diferenciar a los agregados de buena

calidad de los agregados de mala calidad, debido a que es un ensayo de abrasión en condición húmeda; por lo que los agregados más débiles o pobres tienden a reducir su resistencia cuando están mojados; y en el campo los agregados están rara vez secos. Asimismo, existe menor variabilidad en los resultados del ensayo (28).

La Norma ASTM D 6928 recomienda una pérdida de abrasión Microdeval máxima de 18% para agregados a utilizar en carpetas friccionantes de concreto asfáltico. En la Tabla 19 puede verse que la mayoría de los agregados evaluados tiene pérdidas Microdeval menores a la recomendada, con excepción de los provenientes de los bancos 4, 12 y 15.

Con base en los resultados de las pruebas de residuo insoluble en ácido, pulimento acelerado y sanidad del agregado por el uso de sulfato de magnesio, utilizando la Fig 6 se clasifica el agregado; y con la Tabla 18 se define el volumen de tránsito para el cual es apropiado el agregado. La clasificación del agregado se presenta en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Clasificación del agregado, de acuerdo con la metodología del TXDOT.

Banco	Descripción material	Residuo insoluble en ácido %	Valor de pulido residual	Pérdida de sanidad MgSO ₄ %	Clasificación del agregado	Núm de veh por carril millones
1	Riolita	100	31	5	A	≥ 20
2	Riolita	94	30	10	A	≥ 20
3	Riolita	70	27	2	A	≥ 20
4	Escoria	65	37	7	A	≥ 20
5	Escoria	60	35	0	A	≥ 20
6	Dolomita	11	24	7	B	12- 20
7	Caliza	8	26	1	B	12- 20
8	Caliza	1	20	1	B	12- 20
9	Caliza	2	24	2	B	12- 20
10	Caliza	8	24	1	B	12- 20
11	Caliza	6	22	0	B	12- 20
12	Caliza	14	25	13	B	12- 20
13	Caliza	10	25	2	B	12- 20
14	Caliza	8	27	2	B	12- 20
15	Caliza	71	41	27	B	12- 20
16	Caliza	11	27	1	B	12- 20

Asimismo, se proyectó el volumen de tránsito a 5, 10 y 15 años de la red carretera principal de Coahuila para estimar el tipo de agregado requerido. Los datos viales se tomaron de la página electrónica de la Dirección General de Servicios Técnicos; y para la proyección se utilizaron los datos del 2002. En la Tabla 5.3 se presentan el volumen de tránsito y el tipo de agregado estimado.

Tabla 5.3 Volumen de tránsito proyectado de la red carretera principal de Coahuila, y tipo de agregado requerido

TRAMO	CUERPO	UBICACION DEL SUBTRAMO EVALUADO				No. Carr	TPDA POR CARRIL				T.C %	F.Crecimiento			Núm. de vehiculos acumulados			Clase de agregado requerido			
		Km	al	Km			2002	2003	2004	2005		5	10	15	5 años	10 años	15 años	5 años	10 años	15 años	
Saltillo - Monclova	único	10 + 000	10	500	2	2308	2353	2282	2345	3.0	5.3	11.5	18.6	4 472 522	9 657 401	15 668 097	D	C	B		
		32 + 500	33	000	2	1770	1793	1651	1674	3.0	5.3	11.5	18.6	3 429 967	7 406 239	12 015 828	D	D	B		
		70 + 500	71	000	2	1529	1580	1651	1674	3.0	5.3	11.5	18.6	2 962 949	6 397 819	10 379 775	D	D	C		
		90 + 000	90	500	2	1529	1580	1651	1674	3.0	5.3	11.5	18.6	2 962 949	6 397 819	10 379 775	D	D	C		
		110 + 000	110	500	2	1529	1580	1651	1674	3.0	5.3	11.5	18.6	2 962 949	6 397 819	10 379 775	D	D	C		
		147 + 000	147	500	2	1529	1580	1651	1674	3.0	5.3	11.5	18.6	2 962 949	6 397 819	10 379 775	D	D	C		
		163 + 000	163	500	2	1529	1580	1651	1674	3.0	5.3	11.5	18.6	2 962 949	6 397 819	10 379 775	D	D	C		
	A	174 + 000	174	500	4	1791	1924	1822	2369	5.0	5.5	12.6	21.6	3 611 381	8 220 521	14 103 080	D	C	B		
Monclova - Piedras Negras	A	15 + 000	15	500	4	1624	1665	1749	1862	4.0	5.4	12.0	20.0	3 210 579	7 116 740	11 869 182	D	D	C		
		32 + 000	32	500	4	1624	1665	1749	1862	4.0	5.4	12.0	20.0	3 210 579	7 116 740	11 869 182	D	D	C		
		50 + 000	50	500	4	1624	1665	1749	1862	4.0	5.4	12.0	20.0	3 210 579	7 116 740	11 869 182	D	D	C		
		70 + 000	70	500	4	1282	1340	1385	1418	4.0	5.4	12.0	20.0	2 533 867	5 616 703	9 367 445	D	D	C		
		91 + 000	91	500	4	1954	1991	2080	2274	5.0	5.5	12.6	21.6	3 941 742	8 972 515	15 393 198	D	C	B		
		119 + 000	120	000	4	3580	3661	3772	3847	3.0	5.3	11.5	18.6	6 937 448	14 979 851	24 303 201	D	B	A		
		142 + 000	142	500	3	1121	1153	1185	1225	3.0	5.3	11.5	18.6	2 171 667	4 689 223	7 607 762	D	D	C		
		157 + 000	158	000	3	1121	1153	1185	1225	3.0	5.3	11.5	18.6	2 171 667	4 689 223	7 607 762	D	D	C		
		160 + 000	161	000	3	1121	1153	1185	1225	3.0	5.3	11.5	18.6	2 171 667	4 689 223	7 607 762	D	D	C		
		165 + 000	166	000	3	1121	1153	1185	1225	3.0	5.3	11.5	18.6	2 171 667	4 689 223	7 607 762	D	D	C		
		170 + 000	171	000	3	1121	1153	1185	1225	3.0	5.3	11.5	18.6	2 171 667	4 689 223	7 607 762	D	D	C		
		227 + 000	227	500	4	2232	2311	2383	2507	3.0	5.3	11.5	18.6	4 324 472	9 337 719	15 149 448	D	C	B		
Libramiento - Allende - Morelos - Nava	A	2 + 300	3	300	4	1358	1348	1422	1449	3.0	5.3	11.5	18.6	2 631 579	5 682 301	9 218 924	D	D	C		
		5 + 000	6	000	4	1358	1348	1422	1449	3.0	5.3	11.5	18.6	2 631 579	5 682 301	9 218 924	D	D	C		
		7 + 000	8	000	4	1316	1344	1303	1684	6.0	5.6	13.2	23.3	2 707 721	6 331 263	11 180 379	D	D	C		
Saltillo - Lim. de Edos. Coah./N.L.	B	18 + 750	17	750	4	5848	5867	6432	9133	6.0	5.6	13.2	23.3	12 031 459	28 132 265	49 678 775	B	A	A		
		25 + 400	24	400	4	5848	5867	6432	9133	6.0	5.6	13.2	23.3	12 031 459	28 132 265	49 678 775	B	A	A		
		32 + 500	31	500	4	5848	5867	6432	9133	6.0	5.6	13.2	23.3	12 031 459	28 132 265	49 678 775	B	A	A		
		22 + 000	23	000	4	2212	2240	2546	2616	6.0	5.6	13.2	23.3	4 551 276	10 641 910	18 792 553	D	C	B		
Saltillo - Torreón	A	27 + 000	27	500	4	2212	2240	2546	2616	6.0	5.6	13.2	23.3	4 551 276	10 641 910	18 792 553	D	C	B		
		30 + 500	31	500	4	2212	2240	2546	2616	6.0	5.6	13.2	23.3	4 551 276	10 641 910	18 792 553	D	C	B		
		42 + 000	42	500	2	1580	1600	1819	1869	6.0	5.6	13.2	23.3	3 250 912	7 601 364	13 423 252	D	D	B		
		50 + 000	51	000	2	1321	1348	1380	1351	2.5	5.3	11.2	17.9	2 533 458	5 399 834	8 642 875	D	D	C		
		60 + 000	61	000	2	1321	1348	1380	1351	2.5	5.3	11.2	17.9	2 533 458	5 399 834	8 642 875	D	D	C		
		72 + 000	73	000	2	1321	1348	1380	1351	2.5	5.3	11.2	17.9	2 533 458	5 399 834	8 642 875	D	D	C		
		80 + 000	80	500	2	1321	1348	1380	1351	2.5	5.3	11.2	17.9	2 533 458	5 399 834	8 642 875	D	D	C		
		100 + 000	100	500	2	1210	1222	1290	1305	3.0	5.3	11.5	18.6	2 344 780	5 063 022	8 214 210	D	D	C		
		140 + 000	140	500	4	1516	1558	1670	1735	4.0	5.4	12.0	20.0	2 996 079	6 641 268	11 076 198	D	D	C		
			B	150 + 000	150	500	4	1516	1558	1670	1735	4.0	5.4	12.0	20.0	2 996 079	6 641 268	11 076 198	D	D	C
			A	180 + 000	180	500	4	1516	1558	1670	1735	4.0	5.4	12.0	20.0	2 996 079	6 641 268	11 076 198	D	D	C
Libramiento Norte de Torreón	A	199 + 000	198	500	4	1516	1558	1670	1735	4.0	5.4	12.0	20.0	2 996 079	6 641 268	11 076 198	D	D	C		
		1 + 000	2	000	4	3969	4001	4050		1.3	5.1	10.6	16.4	7 434 218	15 364 389	23 823 598	D	B	A		
		4 + 650	5	650	4	3969	4001	4050		1.3	5.1	10.6	16.4	7 434 218	15 364 389	23 823 598	D	B	A		
Lim. de Edos. Coah./N.L. - Piedras Negras	único	55 + 000	54	500	2	413	434	454	489	5.0	5.5	12.6	21.6	832 961	1 896 054	3 252 861	D	D	D		
		75 + 000	74	500	2	413	434	454	489	5.0	5.5	12.6	21.6	832 961	1 896 054	3 252 861	D	D	D		
		95 + 000	94	500	2	413	434	454	489	5.0	5.5	12.6	21.6	832 961	1 896 054	3 252 861	D	D	D		
		115 + 000	114	000	2	413	434	454	489	5.0	5.5	12.6	21.6	832 961	1 896 054	3 252 861	D	D	D		
		118 + 500	117	500	2	413	434	454	489	5.0	5.5	12.6	21.6	832 961	1 896 054	3 252 861	D	D	D		
		126 + 000	125	000	2	413	434	454	489	5.0	5.5	12.6	21.6	832 961	1 896 054	3 252 861	D	D	D		
		147 + 000	147	500	2	413	434	454	489	5.0	5.5	12.6	21.6	832 961	1 896 054	3 252 861	D	D	D		
Piedras Negras - Cd Acuña	único	9 + 000	10	000	2	1466	1514	1577	1617	3.5	5.4	11.7	19.3	2 869 402	6 277 351	10 324 926	D	D	C		
		12 + 000	13	000	2	1466	1514	1577	1617	3.5	5.4	11.7	19.3	2 869 402	6 277 351	10 324 926	D	D	C		
		16 + 000	17	000	2	1466	1514	1577	1617	3.5	5.4	11.7	19.3	2 869 402	6 277 351	10 324 926	D	D	C		
		19 + 000	20	000	2	1466	1514	1577	1617	3.5	5.4	11.7	19.3	2 869 402	6 277 351	10 324 926	D	D	C		
		43 + 000	42	000	2	1466	1514	1577	1617	3.5	5.4	11.7	19.3	2 869 402	6 277 351	10 324 926	D	D	C		
		51 + 000	52	000	2	1375	1514	1577	1617	5.0	5.5	12.6	21.6	2 773 176	6 312 530	10 829 742	D	D	C		
		58 + 000	59	000	2	1375	1514	1577	1617	5.0	5.5	12.6	21.6	2 773 176	6 312 530	10 829 742	D	D	C		
		66 + 000	67	000	2	1375	1514	1577	1617	5.0	5.5	12.6	21.6	2 773 176	6 312 530	10 829 742	D	D	C		
		72 + 000	71	000	2	1375	1514	1577	1617	5.0	5.5	12.6	21.6	2 773 176	6 312 530	10 829 742	D	D	C		
		78 + 000	77	000	2	1375	1514	1577	1617	5.0	5.5	12.6	21.6	2 773 176	6 312 530	10 829 742	D	D	C		
		81 + 000	80	000	2	1375	1514	1577	1617	5.0	5.5	12.6	21.6	2 773 176	6 312 530	10 829 742	D	D	C		
Lim. de Edos. Zac./Coah. - Saltillo	único	272 + 000	272	500	2	1994	2038	2132	2138	2.0	5.2	10.9	17.3	3 787 552	7 969 316	12 586 322	D	D	B		
		283 + 000	282	500	2	1994	2038	2132	2138	2.0	5.2	10.9	17.3	3 787 552	7 969 316	12 586 322	D	C	B		
		310 + 000	310	500	2	1994	2038	2132	2138	2.0											

Por otro lado, desde hace aproximadamente siete años, la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) ha medido anualmente la fricción en campo de la red carretera principal de Coahuila. Por lo que se intentó establecer una correlación entre los valores de pulido del agregado evaluado, y las mediciones de fricción en campo, para desarrollar un modelo que estime el número de resistencia al deslizamiento.

Las mediciones de fricción en campo se obtuvieron con el equipo Mu meter. Los tramos evaluados fueron rectos, con una longitud de 500 a 1 000m por cada 20 km de carretera de la red federal básica del estado de Coahuila. Las mediciones se realizaron conforme a la norma ASTM D 694 y de acuerdo con la información proporcionada se realizó una sola medición en la rodera interna del tramo evaluado.

Las mediciones de fricción se llevaron a cabo en los años 2000 a 2005, el tránsito diario promedio anual (TDPA) fue tomado de los datos viales que se encuentran en la página electrónica de la DGST. Los datos de TDPA y de coeficientes de fricción obtenidos en campo, se muestran en la Tabla 1 del Anexo.

Para establecer la correlación se requiere que en los tramos evaluados el coeficiente de fricción haya alcanzado la condición de pulido (estado de equilibrio). La metodología del TX DOT considera que la fase de pulido se ha alcanzado después de que la superficie de rodamiento ha experimentado más de 8 millones de vehículos por carril durante su vida de diseño.

Debido a que las mediciones de fricción en las carreteras de Coahuila son recientes y aunado a esto, algunos de los tramos evaluados se les ha dado mantenimiento (riego de sello, renivelación o recuperación de carpeta) en los últimos cinco años, no se tienen tramos que cumplan con el criterio anterior. En la Tabla 1 del Anexo puede ser visto que los volúmenes de tránsito acumulado a partir del 2002 al 2005, en los cuales se han realizado mediciones, está entre los 500 mil y 3 millones de vehículos por carril, a excepción de la carretera Saltillo-Monterrey en la que el volumen de tránsito es mayor a 11 millones de vehículos por carril. Además, de los 16 agregado evaluados en laboratorio, únicamente dos se evaluaron en campo de acuerdo con la información proporcionada por la UGST de Coahuila (Tabla 2, Anexo).

Por tanto, no fue posible desarrollar una correlación entre las mediciones de fricción en campo y las propiedades de fricción del agregado de Coahuila.

6 Conclusiones

La especificación de valor de pulido o coeficiente de pulimento acelerado se define con base en el valor de resistencia al deslizamiento o coeficiente de fricción que se pretende mantener durante la vida de diseño de la superficie de rodamiento. Una vez definida la especificación, se requiere monitorear el comportamiento del agregado en campo, para verificar que ésta refleje lo observado.

De las especificaciones de valor de pulido presentadas en el documento, la del Reino Unido es la más estricta, y considera tanto zonas urbanas como carreteras; mientras que la española y la de algunos departamentos de transporte de los Estados Unidos, únicamente contemplan carreteras.

En los EUA, el Departamento de Transporte de cada estado define las especificaciones para asegurar el uso de agregados resistentes al pulido con base en pruebas de laboratorio como pulimento acelerado, el comportamiento del agregado en campo, tramos de prueba o una combinación de éstos.

Debido a que en México no existe una especificación de valor de pulido, se están utilizando especificaciones de otros países; sin embargo, hay que tener extrema precaución, pues éstas se desarrollaron para materiales; mediciones con equipos de fricción; y métodos constructivos diferentes a los aplicados en el país. Por ejemplo, si se especifica un valor de pulido de 68 o mayor, de acuerdo con la normativa inglesa, en el país difícilmente se podría encontrar un agregado que cumpla con dicha especificación. El material utilizado para tal caso es un agregado sintético llamado bauxita calcinada, y que se obtiene de la calcinación de arcilla rica en bauxita a temperaturas elevadas (aproximadamente, 1 600°C); y es colocado sobre la superficie con una resina epóxica especial; este tipo de tratamiento se conoce comercialmente como ShellGrip. Si se consideran las especificaciones del TX DOT, y se establece un valor de pulido de 29 y un porcentaje de pérdida de sanidad (intemperismo acelerado) menor a 12%, entonces lo que se está estimando es que la superficie de rodamiento tendrá durante su vida de diseño, una resistencia al deslizamiento (SN40) igual o mayor a 38, la cual es verificada en campo con mediciones anuales. Dicho valor se determina con el remolque ASTM E 274; mientras que en México se utiliza el Mummer, por lo que las mediciones no podrían ser comparables, y por tanto no se podría conocer realmente el comportamiento del agregado en campo.

A la fecha, no se dispone de la información adecuada para desarrollar un modelo propio para estimar el coeficiente de fricción a partir de las propiedades del agregado y las mediciones de fricción en campo. Se intentó encontrar una correlación con datos de agregados del estado de Coahuila; sin embargo, no fue posible debido a que de los 16 agregados evaluados en laboratorio, únicamente dos fueron evaluados en campo, y además de que en los tramos evaluados la superficie de rodamiento no ha alcanzado el estado de pulido.

Por lo anterior, es indispensable que además de llevar a cabo mediciones anuales de fricción en campo, las dependencias encargadas de la construcción y conservación de carreteras, lleven un historial completo y claro, en el que se documenten la fecha de colocación; tipo de tratamiento o mezcla, número de carriles, origen y procedencia del agregado utilizado.

Lo anterior permitirá en un futuro contar con información para desarrollar una correlación propia para estimar la resistencia al deslizamiento, de acuerdo a las características de los materiales y tránsito del país.

Referencias

1. Crespo del Río, Ramón; Garagorri Yarza, José M; Viguera González, Juan F; La adherencia neumático-pavimento, Revista Carreteras, No. 59, Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera (May-Jun1992)
2. Noyce David A; Bahia Hussain U; Yambó Josué, M; Guisk Kim, 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 (April, 2005)
<http://www.mrutc.org/research/0404/Lit%20rev%20and%20info.pdf> (accesado en agosto del 2006)
3. Janoo Vincent C, and Coronon Charles, Performance Testing of Hot Mix Asphalt Aggregates, Special Report 99-20, US Army Corps of Engineers (Dec, 1999)
http://www.ntl.bts.gov/lib/8000/8800/8834/SR99_20.pdf (accesado en agosto del 2006)
4. J.J Henry, Evaluation of Pavement Friction Characteristics: A Synthesis of Highway Practice, NCHRP Synthesis 291, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC (2000)
5. Achútegui Viada, Francisco; La adherencia neumático-pavimento y la seguridad en la circulación, Revista Ingeniería Civil No 124, Revista Técnica de la Asociación de Ingenieros Civiles Españoles (2001)
6. Cenek Meter D, and Jamieson Neil J, Sensitivity of In-service Skid Resistance Performance of Chipseal Surfaces to Aggregate and Texture Characteristics.
www.surfacefriction.org.nz/downloads/PDFs/session%208/Part%201/2%20%20CENEK%20P%20-%20Sensitivity%20of%20in-service%20skid%20...FP.pdf
(accesado en agosto del 2006)
7. Pagola, Marta; Giovanon Oscar; Poncino Hugo, Relación entre el coeficiente de fricción y pulimento de agregados, Memorias de la XXXII Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto de Argentina (2002)
8. Liang Y Robert, Blending Proportions of High Skid and Low Skid Aggregate, Final Report, Department of Civil Engineering, University of Akron, Ohio Department of Transportation (August 2003)
www.dot.state.oh.us/research/2003/Materials/14793-FR.pdf (accesado en agosto del 2006)

9. Fu Chien N; Chen Hua, Alternate Polish Value and Soundness Specifications for Bituminous Coarse Aggregate, Report Number 7-3994, Texas Department of Transportation in cooperation with FHWA (Dec,1998)
10. Crouch L K; Dunn R, Tim; Identification of Aggregates for Tennessee Bituminous Surface Courses, Final Report, Project Number TNSPR-RES1149, Tennessee Department of Transportation (March, 2005)
www.tdot.state.tn.us/longrange/reports/Res-1149.pdf (accesado en agosto del 2006)
11. Indiana Department of Transportation Materials and Test Division, Acceptance Procedures for Dolomite Aggregates ITM No 205-02T (Revised 9-01-02)
www.ai.org/dot/pubs/itm/index.html (accesado en agosto del 2006)
12. Indiana Department of Transportation Office of Materials Management, Acceptance Procedures for Polish Resistant Aggregates ITM No 214-06P (Revised 4-01-06)
www.ai.org/dot/pubs/itm/index.html (accesado en agosto del 2006)
13. Goyat Yann, and Delanne Yves, Adherencia y seguridad vial, Revista Carreteras No 145, Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera (Mar-Abr, 2006)
14. Design Manual for Roads and Bridges, Vol 7. Sección 5, Part I HD 36/99 Amendment No 1 Surfacing Materials for New and Maintenance Construction (Aug, 2001)
www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/index.htm (accesado en agosto del 2006)
15. Specification for Skid Resistance Investigation and Treatment Selection, TNZ T10:2002, Transit New Zeland (2002)
www.transit.govt.nz/technical-information/content-files/Specifcation88-pdfFile.pdf (accesado agosto del 2006)
16. Notes to the Specification for Skid Resistance Investigation and Treatment Selection, TNZ T10 Notes:2002, Transit New Zeland (2002)
www.transit.govt.nz/technical/specifications.jsp (accesado agosto del 2006)
17. Comisión Permanente del Asfalto, Especificaciones técnicas de mezclas asfálticas en caliente de bajo espesor para carpetas de rodamiento, Versión 3 (2005)
www.cpasfalto.org (accesado julio 2006)
18. Dirección General de Carreteras, serie normativas; Riegos auxiliares, mezclas bituminosas y pavimentos de hormigón; Orden Circular 5/2001, Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento (Madrid 2001)
www.e-asfalto.com/espectecnicas/spec_espana.pdf (accesado agosto del 2006)

-
19. Catálogo Pavimentos y Firmes, Tráfico
www.e-asfalto.com/epave/trafico.thtm (accesado agosto del 2006)
 20. Wallman Carl, Gustaf; Aström, Henrik; Friction Measurement Methods and Correlation between Road Friction and Traffic Safety, A Literature Review, Project code 80435, Report medellande 911A. Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Suecia (2001)
www.vti.se/templates/Report2797.aspx?reportid=2410 (accesado en agosto del 2006)
 21. De Solminihac T, Hernan; Indice de Fricción Internacional, Revista Bit, Revista Técnica de la Construcción, Edición No 22, Chile (Jun, 2001)
www.revistabit.cl/pdf/bit22_art10.pdf (accesado en agosto del 2006)
 22. Gandhi Poduru, M; Colucci Benjamín, and Ghandi Srinivas, P; Polishing of Aggregates and Wet-weather Accident Rates for Flexible Pavements, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, TRB No. 1300, National Research Council, Washington DC (1991)
 23. Texas Department of Transportation, Tex-612-J Acid Insoluble Residue for Fine Aggregate, 600-J Chemical Test Procedure, Revised April del 2006
www.dot.state.tx.us/services/construction/test_procedures/tms_series.htm?series=600-J (accesado en abril del 2006)
 24. Texas Department of Transportation, Tex-438-A Accelerated Polish Test for Coarse Aggregate, 400-A Concrete Test Procedure, Revised July del 2005.
www.dot.state.tx.us/services/general_services/manuals.htm (accesado en mayo del 2006)
 25. ASTM C88, Standard Test Method for Soundness of Aggregate by use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, ASTM designation C 88-99a (2005)
 26. ASTM C 131, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM designation C 131-03 (2005)
 27. ASTM D 6928, Standard Test Method for Resistance to Degradation by Abrasion in the Micro-deval Apparatus, ASTM designation D 6928-06 (2006)
 28. W Fowler, David J; Allen John; Lange Alexander and Range Peter; The Prediction of Coarse Aggregate Performance by Microdeval and Soundness Related Aggregate Test, Research Report ICAR 507-F, International Center for Aggregate Research (Jul, 2006)
www.engr.utexas.edu/icar/publications/index.cfm (accesado en agosto del 2006)

29. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex), Norma NLT 174/93 Pulimento acelerado de los áridos, Normas NLT, I. Ensayos de Carreteras, 2da. Ed (1992)
30. Kandhal, Prithvi S; Parker, Frazier Jr; Mallick Rajib, B, Aggregate test for Hot Mix Asphalt: State of the Practice, Transportation Research Circular No 479, Transportation Research Board, National Research Council, Washington (Dec, 1997)
31. Little Dallas; Button, Joe; Jayawickrama, Priyantha; Solaimanian Mansour and Hudson Barry, Literature Review for Long-term, Research on Bituminous Coarse Aggregate, Report 0-1707-1, Project No 0-1707, Texas Transport Institute , Texas A&M University (Jan, 2001)
32. Texas Department of Transportation, Pavement Design Manual (Jul, 2004)
www.dot.state.tx.us/services/general_services/manuals.htm (accesado abril 2006)
33. Texas Department of Transportation, Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets and Bridges (Jun, 2004)
www.dot.state.tx.us/business/specifications.htm (accesado abril 2006)

Anexo

Procedimientos de pruebas de laboratorio

I. Residuo Insoluble en ácido para agregado fino (Tex J-612)

Soluciones requeridas

- Acido clorhídrico concentrado que cumpla con las especificaciones de la ACS
- Agua destilada
- Papel filtro No 2

Procedimiento

1. Pese aproximadamente 500 g de muestra representativa y séquela en el horno a 60°C
2. De la muestra secada en el horno, pese 25 g y colóquela en un recipiente de 2000 ml. Registre la masa con una aproximación de 0,1 g
3. Lentamente agregue el ácido clorhídrico concentrado; agite constantemente con una varilla de vidrio hasta que la reacción termine
4. Después de que ha terminado la reacción agregue una cantidad adicional de 25 ml de ácido clorhídrico, y agite una vez más para asegurar que la reacción terminó
5. Deje el recipiente, bajo una campana extractora hasta que la solución se asiente
6. Decante la solución tanto como sea posible, evitando la pérdida de finos
7. Filtre el residuo y el ácido a través del papel filtro No 2
8. Lave el residuo en un cuarto de temperatura con agua destilada, o desionizada hasta que el ácido clorhídrico sea retirado
9. Coloque el residuo en una charola, y séquelo en el horno a una temperatura de 104°C durante dos horas
10. Permita que el residuo se enfríe y péselo con una aproximación de 1,0 g

Cálculos

Use los siguientes cálculos para determinar el porcentaje de residuo insoluble en ácido:

$$\% \text{residuo insoluble en ácido} = \frac{\text{masa del residuo}}{\text{masa de la muestra secada en el horno}} \times 100$$

II. Método de prueba de pulimento acelerado para agregado grueso Parte I (TEX 438-A)

1. Alcance

Este método proporciona un estimado del pulimento y desgaste relativo del agregado grueso.

2. Definiciones

Los siguientes términos y definiciones son referenciados en este método de prueba:

Combinación: es un porcentaje definido de la mezcla de dos materiales de diferentes características físicas de diferentes localizaciones.

Valor de fricción inicial: el valor de fricción inicial es el promedio de las lecturas del péndulo británico en los especímenes de prueba antes de ser ensayados.

Valor de pulido: el valor de pulimento es el promedio de un conjunto de lecturas en el espécimen de ensaye después de 9 horas de pulido en la máquina de pulimento acelerado. Es más comúnmente conocido como la capacidad de un agregado para resistir los efectos de pulimento debido al tránsito.

Valor de pulido residual. es el valor constante obtenido después de cuatro deslizamientos consecutivos con el péndulo británico.

3. Aparatos

Los siguientes aparatos son requeridos:

- Máquina de pulimento acelerado marca WESSEX, basada en el diseño de 1958 del Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras de Gran Bretaña, la cual cumpla las especificaciones señaladas en “Especificaciones para la máquina de pulimento acelerado Wessex”, montada en un base nivelada, firme y rígida.
- Péndulo Británico (BPT), el cual cumpla con las especificaciones señaladas en “Especificaciones para el péndulo británico”.
- Deslizadores de hule, nuevos, acondicionados para el péndulo británico.
- Aguja medidora de altura, exactitud de 0,025 mm (0,001 in).
- O rings, de hule, de 355,6 mm (14 in) de diámetro con un espesor de 3,2 mm (0,125 in).
- Horno de secado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$).
- Moldes de metal para formar probetas de ensaye

Nota: las probetas hechas deben tener un área superficial expuesta del agregado de 89 mm de longitud (3,5 in); 44,5 mm de ancho (1,75 in) y 16 mm (0,675 in) de profundidad, con dos lados exteriores para montar que midan 6,4 mm (0,25 in) de profundidad y 3,2 mm (0,125 in) de ancho a lo largo de toda la longitud del molde.

4. Materiales.

Los siguientes materiales son requeridos:

- Arena de Ottawa graduada entre la malla 20-30 (opcional) que cumpla los requerimientos ASTM C 190
- Resina de poliéster y catalizador con tiempo de preparación de 10 min y tiempo de curado de 3 a 6 h
- Desmoldante (opcional) para usar con el agente ligante de poliéster
- Suministros misceláneos, recipientes, espátula y varilla agitadora
- Epóxico, de dos componentes, endurecedor tipo 8 y resina tipo 5
- Abrasivo de carburo de silicio (tamaño 150) que cumpla los requerimientos de graduación para el tamaño No. 150 del Instituto Nacional de Normalización Americano (ANSI).

Nota: Para reutilizar el abrasivo, séquelo a temperatura constante en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$); luego cribelo sobre una malla de $107 \mu\text{m}$ (No 140). La porción que pase la malla puede ser reutilizada. La porción retenida debe ser desechada.

5. Inspección y reemplazo del deslizador de hule

Para determinar si el deslizador de hule requiere ser reemplazado, inspeccione visualmente cortes, rebabas; que no este separado de la placa de respaldo de aluminio; desgaste notable en la superficie y otras irregularidades.

Si el desgaste en los lados excede 3 mm (1/8") en el plano de deslizamiento ó 2 mm (1/12") vertical a él, o si cualquier otra irregularidad existe, replácelo.

Si existe rebaba, lije suavemente con una lija 2/0.

Durante el corte del hule para deslizadores nuevos, asegúrese de que las dimensiones del deslizador cumplan los requerimientos, y que los cortes sean en ángulos rectos.

La mezcla de hule debe cumplir los requerimientos de ASTM E 501, con un durómetro tipo A de 71 ± 3 .

6. Acondicionamiento de deslizadores nuevos

La siguiente tabla lista los pasos necesarios para acondicionar deslizadores nuevos.

Acondicionamiento de deslizadores nuevos	
Paso	Acción
1	Pegue cada uno de los deslizadores de hule a la placa de respaldo de aluminio usando los dos componentes del epóxico
2	Haga 10 deslizamientos en la lija de abrasivo de silicio grado No 100, o equivalente, en condición seca con cada uno de los deslizadores.
3	Suavemente lije con papel esmeril 2/0 para retirar cualquier rebaba producida durante los 10 deslizamientos iniciales.
4	<p>Obtenga una probeta estándar de la sección de Materiales y Pavimentos de la División de Construcción (CST/M & P), a la que ha sido asignado un valor de fricción.</p> <p>Nota: una probeta estándar es una probeta hecha de resina de poliéster cubierta en todo lo ancho y largo con arena de Ottawa, de granulometría 20-30.</p>
5	<ul style="list-style-type: none"> • Deje caer el deslizador en la probeta estándar, siguiendo los pasos 9 a 12 del procedimiento "Preparación de especímenes de ensayo" de la Parte I, Agregado con un sólo componente" • Registre el valor de pulido obtenido • Calcule el valor de pulido promedio, y registre el promedio del deslizador nuevo como Promedio del Nuevo Deslizador (PND)
6	<ul style="list-style-type: none"> • Use un deslizador de reserva previamente acondicionado para obtener un segundo grupo de valores de pulido • Registre los valores obtenidos. • Calcule el valor promedio de pulido y registre el promedio del deslizador de reserva como valor promedio del deslizador de reserva (PDR)
7	<p>Compare el Valor promedio del deslizador nuevo acondicionado y el valor promedio del deslizador de reserva:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si el PND está dentro de ± 2 puntos del (PDR), el acondicionamiento está completo y el deslizador nuevo esta listo para usarse • Si el PND está tres ó mas puntos abajo del PDR, descartar el deslizador • Si el PND está tres ó más puntos arriba que PDR, siga al paso 8
8	<ul style="list-style-type: none"> • Si el PND está tres o más puntos arriba que el PDR, haga un deslizamiento en la lija de carburo con el deslizador; luego deje caer el deslizador en la probeta estándar y obtenga un nuevo PND • Repita el paso 7

7. Ensayo para un sólo componente de agregado

Esta parte describe el procedimiento necesario para estimar el pulimento y desgaste relativo de un sólo componente de agregado.

7.1 Preparación de los especímenes de prueba.

La siguiente tabla lista los pasos necesarios para preparar los especímenes de ensayo.

Preparación de especímenes de ensayo	
Paso	Acción
1	Prepare al menos 14 kg (30 lb) de la muestra representativa de acuerdo con el método de prueba "Tex-400-A", muestreo de roca, grava, arena y agregados minerales".
2	Separe la porción de agregado que pase la malla 9,5 mm (3/8") y se retiene en la malla de 6,3 mm (1/4 in)
3	Lave completamente el agregado retenido en la malla de 6,3 mm (1/4 in) del paso 2 y luego séquelo hasta masa constante a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$).
4	Cubra los moldes con el agente desmoldante
5	Mezcle completamente la muestra obtenida en el paso 3 para asegurar uniformidad. Llene un medidor volumétrico de 180 ml, con una abertura de 76 mm de diámetro mínimo, deslizando el medidor a través del material y retirando el exceso de material
6	Divida la muestra obtenida en el paso 5 en ocho partes iguales, usando un cuarteador o una malla cuarteadora.
7	<p>Coloque siete porciones de la muestra dividida dentro de los moldes (1 porción por molde) dejando una sola capa de agregado.</p> <ul style="list-style-type: none"> Quizá sea necesario retirar material del molde para lograr una sola capa La muestra 8 será material extra, si es requerido Si no hay suficiente material para llenar un molde en una sola capa, use el agregado de la muestra 8 para llenar el molde (usted puede escoger el material de esta muestra con la mano) El retirar partículas planas, alargadas o irregulares debe ser mínimo para tratar de simular la textura de la superficie del camino tanto como sea posible. La capa resultante debe ser representativa del material a ser evaluado. La relación de diferente morfología debe ser similar a aquella determinada cuando se hace un conteo de partículas, cuando sea requerido. <p>Nota: Para las gravas, las caras fracturadas no requieren ser colocadas hacia abajo, pero el conteo de caras fracturadas debe ser llevado a cabo de acuerdo con el Método "Tex-460-A, Determinación de caras fracturadas".</p>
8	Los espacios entre las partículas de agregado pueden ser llenadas con arena de Ottawa hasta una profundidad entre $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ in de la altura de la

	partícula (opcional).
Preparación de especímenes de ensayo	
Paso	Acción
9	Siga las instrucciones del fabricante para preparar la resina de poliéster y el catalizador para el agente ligante <ul style="list-style-type: none"> • Mezcle la resina hasta una consistencia en la cual pueda ser roseada sobre y entre las partículas, pero no tan líquida que fluya hacia la arena de Ottawa (si es usada la arena) o sobre la superficie a ser pulida • Si es necesario, agregue glicerina a la resina de poliéster para obtener una consistencia adecuada.
10	Llene el molde preparado hasta su capacidad con el agente ligante
11	Golpee y nivele el agente ligante con los lados curvados del molde
12	Deje curar el agente ligante con el agregado en el molde durante 3 a 6 horas hasta que el agente se endurezca
13	Retire el espécimen del molde y cepille cualquier exceso de arena de la superficie del espécimen
14	Pula la parte trasera del espécimen de prueba con una piedra de pulido o una lijadora si la colocación es apropiada se previene la deformación del espécimen en la rueda de pulimento Nota: use un respirador para prevenir la inhalación de polvo

7.2 Procedimiento

La siguiente tabla lista los pasos estimados para el pulido y desgaste relativo de un solo componente de agregado.

Estimación del pulimento y desgaste relativo de un sólo componen de agregado	
Paso	Acción
1	<ul style="list-style-type: none"> • Use un marcador a prueba de agua para escribir el número de muestra y la fecha del ensaye en la parte trasera de cada espécimen • Etiquete las probetas desde A hasta G en la parte trasera de cada espécimen de prueba, y marque el número en uno de los lados de cada probeta
2	Determine el valor de fricción inicial de los especímenes, si es necesario para propósitos de referencia
3	<ul style="list-style-type: none"> • Coloque dos grupos (14 probetas) alrededor de la periferia de la rueda de pulimento • Coloque los especímenes con la letra hacia fuera de la máquina, que sea visible • Coloque un o-ring a ambos lados de los especímenes de ensaye para mantenerlos contra la rueda de pulimento • Atornille la rueda • Presione hacia abajo los o-rings y los lados del espécimen firmemente para fijarlos en su lugar

Estimación del pulimento y desgaste relativo de un solo componente de agregado.	
Paso	Acción
4	<ul style="list-style-type: none"> • Monte la rueda de pulimento en la máquina de pulimento acelerado • Después de encender la máquina, la llanta debe rodar libremente sin bombeo o deslizamiento • La temperatura del espécimen, agua y aparato debe ser mantenida a 24 ± 3 °C (75 ± 5 °F)
5	<ul style="list-style-type: none"> • Alimiente de abrasivo de carburo de silicio continuamente a la rueda de pulimento cerca del punto de contacto con la llanta a una velocidad de aproximadamente 6 ± 2 g/min, y un flujo de agua de 50 a 75 ml (1,7 a 2,5 fl oz) por minuto. El periodo de pulimento debe ser un total de nueve horas <p>Nota: tiempos inferiores no afectan los resultados del ensaye.</p>
6	Retire las probetas de la rueda de pulimento y lávelas completamente para retirar el abrasivo
7	Sumerja los especimenes en agua por al menos una hora antes del ensaye en el péndulo británico
8	<p>Prepare el péndulo británico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualmente inspeccione el deslizador de hule para asegurar que no requiere ser remplazado. • Nivele el instrumento girando los tornillos niveladores hasta que la burbuja esté centrada en el nivel • Asegúrese que el péndulo se encuentre en una posición libre con la aguja de arrastre, descansando contra el tornillo de ajuste en el brazo del péndulo • Suelte el brazo del péndulo, y anote la lectura de la aguja. Si la lectura no es cero, afloje el tornillo asegurador y gire el tornillo de fricción presionando ligeramente, y ajuste. Repita el ensaye hasta que la lectura de la aguja sea cero
9	Coloque una probeta en la base ensamblada al péndulo, de tal manera que el número de probeta quede con la cara hacia atrás del péndulo
10	<p>Verifique y ajuste la longitud de la huella de contacto del deslizador soltando y bajando lentamente el brazo del péndulo, hasta que sólo toque la superficie del lado derecho del espécimen de ensayo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualmente alinee el lado deslizante con las marcas grabadas en la base • Usando el elevador manual, eleve el deslizador y mueva el péndulo a la izquierda • Lentamente baje el péndulo hasta que el lado deslizante otra vez solo descansa en la superficie del espécimen de ensaye • Si la longitud de la huella de contacto no está entre 75 mm (2-15/16 in) y 78 mm (3-1/16 in), ajuste elevando o bajando el instrumento con

	los tornillos de control de altura vertical <ul style="list-style-type: none">• Repita este procedimiento cada vez que un nuevo espécimen sea ensayado
11	Usando un aspersor, aplique suficiente agua para cubrir completamente el área de ensaye
12	Registre de la segunda a la quinta lectura
13	Continué realizando deslizamientos hasta que obtenga cuatro lecturas consecutivas iguales, y registre esta lectura como el valor de pulido residual
14	Repita los pasos 8 a 13 para cada probeta

Nota 1: Siempre atrape el péndulo durante la parte inicial de su regreso cuando se está deslizando, cuando regrese el péndulo a su posición inicial, eleve el deslizador con su elevador manual para prevenir el contacto entre el deslizador y la superficie de ensaye. Antes de cada deslizamiento, la aguja debe ser regresada hasta que descansa contra el tornillo de ajuste (posición 0)

Nota 2: Mantener la orientación de los especímenes de ensaye como es descrito en los pasos 3, 4 y 9 del procedimiento; esto es extremadamente importante. Esta orientación permite que el espécimen sea ensayado en la misma dirección que en la máquina de pulimento acelerado. Si los especímenes son ensayados en la dirección opuesta del pulimento, pueden obtenerse resultados inexactos

Nota 3 Aunque el ensaye es realizado únicamente en el material que pasa la malla de 9,5 mm (3/8 in) y el retenido en la de 6,3 mm (1/4 in), el valor de pulido obtenido se considera representativo de todos los otros tamaños del material obtenido de la misma producción

8. Reporte

El valor de pulido final reportado es el promedio de los valores de pulido residual obtenidos en los especímenes de prueba. Reporte al número entero más cercano.

Especificaciones para la máquina de pulimento acelerado WESSEX.

Las siguientes son especificaciones para la máquina de pulimento acelerado Wessex:

1. Rueda de pulimento, de 406 mm de diámetro, con superficie perimetral plana para fijar 14 especímenes de 44 mm x 89 mm (1-3/4 x 3 1/2 in)
2. Sistema para hacer girar la rueda de pulimento sobre su propio eje a una velocidad de 320 ± 5 rpm
3. Mecanismo que permita que la superficie de la rueda de hule se apoyen sobre las probetas de la rueda de ensayo con una fuerza total de $391,44 \pm 4,45$ N (88 ± 1 lb). La llanta debe girar libre sobre su propio eje, con un plano de rotación que coincida con el de la rueda de pulimento
4. Llanta lisa de hule macizo
5. Alimentador capaz de alimentar de abrasivo de carburo de silicio a una velocidad de 6 ± 2 g/min. El abrasivo debe ser abastecido continúa y uniformemente en todo lo ancho de la sección transversal del espécimen, delante del punto de contacto con la rueda de hule
6. Alimentador de agua capaz de descargarla a una velocidad de 50-75 ml (1,7-2,5 fl. Oz) por minuto. El agua debe ser roseada continua y uniformemente sobre la superficie del agregado de los especímenes delante del punto de contacto con la llanta de hule

Especificaciones para el péndulo británico

Las siguientes son las especificaciones para el péndulo británico:

1. Un péndulo, con deslizador y placa de soporte con un peso de 1500 ± 30 g
2. La distancia desde el centro de gravedad del péndulo al centro de oscilación de 411 ± 5 mm ($16,2 \pm 0,2$ in)
3. Un mecanismo con un ajustador vertical capaz de proporcionar una huella de contacto del deslizador de 125 ± 2 mm ($4 \frac{5}{16} \pm \frac{1}{16}$ in) para ensayos en superficies planas y 75 a 78 mm (3 a $3 \frac{1}{16}$ in) para especímenes de la rueda de pulimento
4. Un resorte y una palanca para que el deslizador ejerza una carga normal promedio, entre el deslizador y la superficie de ensaye de $24,5 \pm 1$ N ($5,5 \pm 0,2$ lb) para un desplazamiento del deslizador de 6,30 mm (1/4 in)
5. El deslizador consiste de una placa de aluminio en la cual se pega una tira de hule de 6x25x75 mm (1/4x1x3 in) para ensayos en superficies planas
6. Para especímenes curvados de la rueda de pulimento se usa una tira de hule de 6x25x32 mm (1/4x1x1 1/4 in)

III. Método de prueba para determinar la sanidad de agregados por el uso de sulfato de sodio o de magnesio (ASTM C88-05)

1. Alcance

- 1.1 El método cubre las pruebas de agregados para estimar su sanidad cuando están sujetos a la acción de intemperismo en concreto u otras aplicaciones. Se realiza por inmersión repetida en solución de sulfato de sodio o de magnesio, seguida por secado al horno hasta que se deshidrate parcial o totalmente la sal precipitada en los espacios de los poros permeables. La fuerza expansiva interna, derivada de la rehidratación de la sal durante la reinmersión, simula la expansión del agua durante el congelamiento. Este método de prueba proporciona información útil en la evaluación de la sanidad de los agregados cuando no hay instrucciones adecuadas disponible en los registros de servicios del material expuesto a las condiciones de intemperismo actual
- 1.2 Los valores dados en paréntesis son proporcionados para propósitos de información, únicamente
- 1.3 Esta norma puede involucrar materiales, operaciones y equipo peligroso. No señala todos los riesgos. Es responsabilidad de la persona que lo use establecer las condiciones de seguridad e higiene, y determinar su aplicabilidad previo uso

2. Documentos aplicables

2.1 Normas ASTM:

- | | |
|-------|--|
| C 33 | Especificaciones para agregados de concreto |
| C 136 | Método de prueba para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos |
| C 670 | Práctica para la preparación de la precisión e incertidumbre de materiales de prueba para la construcción. |
| C 702 | Método para reducir muestras de campo de agregados a tamaños de prueba |
| D 75 | Práctica para muestreo de agregados |
| E 11 | Especificación para mallas con propósito de prueba |
| E 100 | Especificaciones ASTM para hidrómetros |
| E 323 | Especificaciones para mallas de placa perforada para propósitos de prueba |

3. Importancia y uso

- 3.1 Este método de prueba proporciona un procedimiento de estimación preliminar de la sanidad de los agregados para su uso en concreto y para otros propósitos. Los valores obtenidos pueden compararse con especificaciones, por ejemplo, la especificación C33, que son diseñadas para indicar la conveniencia de emplearlos los agregados propuestos. Cuando la precisión de este método es pobre (sección 12), suele no ser conveniente en el momento el rechazo del material, sin la confirmación de otros métodos de prueba más estrechamente relacionados con el uso específico intentado.
- 3.2 Los valores para el porcentaje de pérdida permitido por este método de prueba son usualmente diferentes para agregados finos y gruesos, y es de llamar la atención el hecho de que los resultados por el empleo de las dos sales difiere considerablemente; y debe tenerse cuidado de entrenarse en fijar límites apropiados en cualquier especificación que incluya requerimientos para esta prueba. La prueba es usualmente más severa cuando se usa sulfato de magnesio; por tanto, los límites para el porcentaje de pérdida permitido cuando se usa sulfato de magnesio, son normalmente más altos que los límites al utilizar sulfato de sodio

Nota 1. Refiérase a la sección apropiada en la especificación C 33, que establece las condiciones para la aceptación de agregados finos y gruesos los cuales no cumplen con los requerimientos basados en esta prueba

4. Equipo

- 4.1 Mallas. Con aberturas cuadradas de los siguientes tamaños conforme a las especificaciones E 11 ó E 323, para cribar las muestras de acuerdo con las secciones 6, 7 y 9:

0,150 mm (No 100)	8,0 mm (5/16 in) 9,5 mm (3/8 in)
0,300 mm (No 50)	12,5 mm (1/2 in) 16,0 mm (5/8 in)
0,600 mm (No 30)	19,0 mm (3/4 in) 25,0 mm (1 in)
1,18 mm (No 16)	31,5 mm (1 ¼ in)
2,36 mm (No 8)	37,5 mm (1 ½ in) 50,0 mm (2 in)
4,00 mm (No 5)	63,0 mm (2 ½ in)
4,75 mm (No 4)	

4.2 Contenedores. Los contenedores para sumergir las muestras de agregados en la solución, de acuerdo con el procedimiento descrito en este método de prueba, deben estar perforados de manera que permitan el libre acceso de la solución en la muestra y el escurrimiento de la solución, sin pérdida de agregado

Nota 2. Los recipientes hechos de malla de alambre o mallas con abertura convenientes, son contenedores adecuados para las muestras

4.3 Regulación de la temperatura. Deben proporcionarse los medios adecuados para regular la temperatura de las muestras durante la inmersión en la solución de sulfato de sodio o magnesio

4.4 Balanzas. Para agregado fino, una balanza con exactitud dentro de 0,1 g sobre el rango requerido para esta prueba; para agregado grueso una balanza con exactitud de 0,1% de la masa de prueba ó 1g, el que sea mayor, sobre el rango requerido para la prueba

4.5 *Horno de secado*. Un horno de tamaño apropiado capaz de mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$); la velocidad de evaporación, para este rango de temperatura, debe ser al menos 25 g/h para cuatro horas, durante tal período las puertas del horno deben permanecer cerradas. Esta velocidad debe ser determinada por la pérdida de un litro de agua contenida en vasos deprecitados pequeños; cada uno, inicialmente con 500 g de agua a una temperatura de $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($70 \pm 3^{\circ}\text{F}$), colocados en cada esquina y al centro de cada una de las parrillas del horno. Los requerimientos de evaporación son para aplicar a todos los lugares de prueba cuando el horno está vacío excepto para el agua de los vasos deprecitados.

4.6 *Medidores de gravedad específica*. Hidrómetros conforme a los requerimientos de la especificación E 100; o una combinación de probeta graduada y balanza, capaz de medir la gravedad específica de la solución con una precisión de $\pm 0,001$

5. Soluciones especiales requeridas

5.1 Prepare la solución de sulfato de sodio o magnesio de acuerdo con 5.1.1 ó 5.1.2 (nota 3) para sumergir las muestras de prueba. El volumen de la solución debe ser al menos cinco veces el volumen de sólidos de todas las muestras sumergidas en cada prueba.

Nota 3. Algunos agregados contienen carbonatos de calcio o magnesio que son atacados químicamente por la solución fresca de sulfato, resultando mediciones de pérdidas erróneamente altas. Si esta condición es encontrada o es esperada, repita la prueba empleando una solución filtrada que ha sido usada previamente para probar el mismo tipo de roca carbonosa, prevenga que la solución cumpla con los requerimientos de 5.1 y 5.2 para gravedad específica

5.1.1 *Solución de sulfato de sodio.* Prepare una solución de sulfato de sodio disolviendo una USP, o sal de igual grado, en agua a una temperatura de 25 a 30 °C (77 a 86°F). Agregue suficiente sal (nota 4), de forma³ anhidra (Na_2SO_4) o cristalina ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) para asegurar no únicamente la saturación, sino también la presencia de exceso de cristales cuando la solución está lista para ser empleada en la prueba. Revuelva completamente la mezcla durante la adición de sal, y agite la solución a intervalos frecuentes hasta que sea usada. Para reducir la evaporación y prevenir la contaminación mantenga la solución tapada todo el tiempo cuando no sea utilizada. Mantenga la solución a una temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ($70 \pm 2^\circ\text{F}$). Vuelva a agitar, y permita que la solución permanezca a la temperatura a la que fue hecha por al menos 48 horas antes de usarla. Antes de cada empleo disuelva los cristales de sal; si hay en el contenedor, agite la solución completamente, y determine la gravedad específica de la solución. Cuando use la solución, ésta debe tener una gravedad específica no menor de 1,151 ni mayor de 1,174. Deseche la solución si está descolorida, o fíltrela y verifique su gravedad específica.

Nota 4. Para la solución, 215 g de sal anhidra, ó 700 g de decahidratada por litro de agua son suficientes para saturación a 22°C (71.6 °F). Sin embargo, cuando las sales no son completamente estables y cuando es deseable que un exceso de cristales esté presente, el uso de al menos 350 g de la sal anhidra, ó 750 g de la sal decahidratada por litro de agua, es recomendado.

5.1.2 *Solución de sulfato de magnesio.* Prepare una solución saturada de sulfato de magnesio por disolución de una USP o sal de igual grado en agua a una temperatura de 25 a 30 °C (77 a 86°F). Agregue suficiente sal (nota 5), de forma³ anhidra (Mg_2SO_4) o cristalina ($\text{Mg}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (sal Epsom), para asegurar la saturación y la presencia de exceso de cristales cuando la solución está lista para emplearse en la prueba. Revuelva completamente la mezcla durante la adición de sal, y agite la solución a intervalos frecuentes hasta que sea utilizada. Para reducir la evaporación y prevenir la contaminación, mantenga la solución tapada todo el tiempo cuando no se utilice. Mantenga la solución a una temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ($70 \pm 2^\circ\text{F}$). Vuelva a agitar, y permita que la solución permanezca a la temperatura a la que fue hecha por al menos 48 horas antes de usarla. Previo a cada empleo, disuelva los cristales de sal; si hay en el contenedor, agite la solución completamente, y determine la gravedad específica de la solución. Cuando use la solución, ésta debe tener una gravedad específica no menor de 1,295 ni mayor de 1,308. Deseche la solución si esta descolorida, o fíltrela y verifique su gravedad específica.

Nota 5. Para la solución, 355 g de sal anhidra, ó 1 230 g eptahidratada por litro de agua, son suficientes para saturación a 23°C (73.4 °F). Sin embargo, cuando estas sales no son completamente estables, la sal anhidra es la más estable de las dos; y cuando es deseable que un exceso de cristales este presente, es recomendado que la sal heptahidratada se emplee y en una cantidad al menos de 1 400 g/l de agua.

5.1.3 Solución de cloruro de bario. Prepare 100 ml de solución de cloruro de bario al 5%, disolviendo 5 g de BaCl₂ en 100 ml de agua destilada.

6. Muestras.

6.1 La muestra debe obtenerse en general de acuerdo con la práctica D 75, y reducida a un tamaño de prueba conforme los Métodos C 702.

6.2 *Agregado fino.* El agregado fino para la prueba debe cribarse a través de la malla de 9,5 mm (3/8 in). La muestra tiene que ser de tal tamaño que sea al menos 100g de cada uno de los siguientes tamaños, los cuales deben estar disponibles en cantidades de 5% o más (retenido igual o mayor a 5%) , expresado en términos de las siguientes mallas:

Pasa la malla	Retenido en la malla
0,600 mm (No 30)	0,300 mm (No 50)
1,18 mm (No 16)	0,600 mm (No 30)
2,36 mm (No 8)	1,18 mm (No 16)
4,75 mm (No4)	2,36 mm (No 8)
9,5 mm (3/8 in)	4,75 mm (No 4)

6.3 *Agregado grueso.* El agregado grueso para la prueba consiste de aquel material retenido en la malla No 4. La muestra será de tal tamaño que proporcionará las siguientes cantidades de los tamaños indicados, los cuales deben estar disponibles en cantidades de 5% o más (retenido igual o mayor a 5%):

Tamaño (mallas de abertura cuadrada)		Peso, g
9,5 mm a 4,75 mm	3/8 in a No.4	300 ± 5
19,0 mm a 9,5 mm	¾ in a 3/8 in	1000 ± 10
Consistiendo de :		
12,5 mm a 9,5 mm	½ in a 3/8 in	330 ± 5
19,0 mm a 12,5 mm	¾ in a ½ in	670 ± 10
37,5 mm a 19,0 mm	1 ½ in a ¾ in	1500 ± 50
Consistiendo de:		
25,0 mm a 19,0 mm	1 in a ¾ in	500 ± 30
37,5 mm a 25,0 mm	1½ in a 1 in	1000 ± 50
50,0 mm a 37,5 mm	2½ in a 1 ½ in	5000 ± 300
Consistiendo de:		
63,0 mm a 50,0 mm	2 in a 1 ½ in	2000 ± 200
63,0 mm a 37,5 mm	2½ in a 2 in	3000 ± 300
Tamaños más grandes		
Consistiendo de:		
75 mm a 63 mm	3 a 2 ½ in	7000 ± 1000
90 mm a 75 mm	3 ½ in a 3 in	7000 ± 1000
100 mm a 90 mm	4 in a 3 ½ in	7000 ± 1000

- 6.4 Cuando un agregado a ser ensayado contiene cantidades apreciables de material fino y grueso, teniendo una gradación con más del 10% en peso del material retenido en la malla de 3/8 in, y también más del 10% en peso de material que pasa la malla No 4, separe las muestras de prueba del material que pasa la malla No 4 y el retenido en la malla No 4 y ensáyelas de acuerdo con los procedimientos para agregados finos y gruesos, respectivamente. Reporte los resultados por separado para la fracción de agregado fino y grueso, dando los porcentajes de la fracción fina y gruesa en la granulometría inicial.

7. Preparación de la muestra de prueba

7.1 *Agregado fino.* Lave completamente la muestra de agregado fino en la malla No 50 (0,300 mm), seque a peso constante a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) y separe en los diferentes tamaños por cribado, como sigue: haga una separación de la muestra gradada por medio de pequeños montones mediante las mallas especificadas en 6.2. De las fracciones obtenidas de esta manera, seleccione muestras de tamaño suficiente para obtener 100g después de cribar el material. (En general, una muestra de 110g será suficiente). No use agregado fino atrapado en las aberturas de las mallas en la preparación de las muestras. Pese las muestras a $100 \pm 0,1\text{g}$ de cada una de las fracciones separadas después del cribado final, y colóquelas en contenedores separados para ensayar.

7.2 *Agregado grueso.* Lave completamente y seque la muestra de agregado grueso a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) hasta masa constante y sepárelo en los diferentes tamaños mostrados en 6.3. Pese las cantidades de los diferentes tamaños con las tolerancias de 6.3, y cuando la porción del ensaye corresponda a dos tamaños, combínelos para obtener la masa total. Registre las masas de las muestras de prueba y sus fracciones. En el caso de tamaños más grandes que 19,0 mm (3/4 in), registre el número de partículas en la muestra de ensayo.

8. Procedimiento.

8.1 *Almacenamiento de la muestra en la solución.* Sumerja las muestras en la solución preparada de sulfato de sodio o magnesio, por al menos 16 horas y no más de 18 horas; de tal manera que la solución cubra el agregado hasta una profundidad de al menos 1/2 in (nota 6). Tape el contenedor para reducir la evaporación y prevenir la adicción accidental de sustancias ajenas. Mantenga las muestras sumergidas en la solución a una temperatura de $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($70 \pm 2^{\circ}\text{F}$) durante el periodo de inmersión.

Nota 6. Es conveniente colocar mallas de alambre pesado sobre la muestra en los contenedores, lo cual permitirá que las partículas ligeras sean cubiertas por la solución

8.2 *Secado de las muestras después de la inmersión.* Después del período de inmersión retire las muestras de agregado de la solución; permita que se escurran durante 15 ± 5 min, y colóquelas en el horno de secado. La temperatura del horno debe ser constante, de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9^\circ\text{F}$). Seque las muestras a la temperatura especificada hasta masa constante. Establezca el tiempo requerido para alcanzar masa constante como sigue: con el horno contiene la carga máxima esperada de la muestra; verifique la pérdida de masa de las muestras ensayadas retirándolas y pesándolas, sin enfriar, a intervalos de dos a cuatro horas, haga suficientes verificaciones para establecer el tiempo de secado requerido para los lugares menos favorables del horno. (ver 4.5) y condiciones de la muestra (nota 7). Se considera que la masa constante ha sido alcanzada cuando la pérdida de masa sea menor de 0,1% de la masa de la muestra en un período de cuatro horas de secado. Después de que la masa constante ha sido alcanzada, deje enfriar las muestras en un cuarto de temperatura, después éstas deben nuevamente ser sumergidas en la solución preparada como es descrito en 8.1.

Nota 7. El tiempo de secado requerido para alcanzar la masa constante puede variar considerablemente por varias razones. La eficiencia del secado será reducida a medida que se acumulan los ciclos debido a la sal adherida a las partículas; y en algunos casos, debido al incremento de la superficie por el rompimiento de las partículas. Las distintas fracciones de tamaño de agregado tendrán diferentes tiempos de secado. Las partículas más pequeñas tenderán a secarse más lentamente debido a que su área superficial es mayor y sus espacios interparticulares son limitados; pero esta tendencia puede ser alterada por los efectos del tamaño y forma del contenedor.

8.3 *Número de ciclos.* Repita el proceso alterno de inmersión y secado hasta que el número de ciclos requeridos se obtenga.

8.4 Después de completar el ciclo final, y después de que la muestra se ha enfriado, lávela hasta que este libre de sulfato de sodio o magnesio determinado por la reacción del agua lavada con cloruro de bario (BaCl_2). Lavar circulando el agua a $43 \pm 6^\circ\text{C}$ ($110 \pm 10^\circ\text{F}$) a través de las muestras en sus contenedores. Esto puede ser hecho colocándolos en un tanque dentro del cual el agua caliente sea introducida cerca de la base y permita que se desborde. En la operación de lavado las muestras no tienen que encontrarse sujetas a impactos o abrasión que puedan provocar rompimiento de partículas.

Nota 8. El agua potable contiene sulfatos, así que cuando se use para lavar se turbará al ser ensayada con solución de cloruro de bario. La turbiedad de una solución de agua potable y la solución de cloruro de bario debe ser evaluada de manera que cuando el agua de lavado del ensaye tenga el mismo grado de turbiedad que la solución, puede asumirse que la muestra de ensaye está libre de sulfatos.

9. Examinación cuantitativa

9.1 Haga la examinación cuantitativa como sigue:

9.1.1 Después de que el sulfato de sodio o magnesio se ha removido, secar cada una de las fracciones de la muestra a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9^\circ\text{F}$) hasta masa constante. Crible el agregado fino con la misma malla en la cual éste fue retenido antes del ensayo, y crible el agregado grueso sobre la malla mostrada abajo para el tamaño apropiado de partícula. Para agregado fino, el método y la duración de cribado será el mismo que el que se empleo en la preparación de las muestras de prueba. Para agregado grueso, el cribado debe ser manual; con agitado suficiente para asegurar que todas las partículas de tamaño pequeño pasen la malla seleccionada. No debe emplearse manipulación extra para romper las partículas, o hacer que pasen a través de la malla. Pesar el material retenido en cada una de las mallas y registrar cada cantidad. La diferencia entre cada una de estas cantidades y la masa inicial de la fracción de muestra ensayada, es la pérdida en el ensayo, y se expresa en porcentaje de la masa inicial para usar la Tabla 1.

Tamaño del agregado		Malla usada para determinar la pérdida	
mm	in	mm	in
100 a 90	4 a 3 ½	75	3
90 a 75	3 ½ a 3	63	2 ½
75 a 63	3 a 2 ½	50	2
63 a 37,5	2 ½ a 1 ½	31,5	1 ¼
37,5 a 19,0	1 ½ a ¾	16,0	5/8
19,0 a 9,5	¾ a 3/8	8,0	5/16
9,5 a 4,75	3/8 a No. 4	4,0	No. 5

10. Examinación cualitativa

10.1 Haga un examen cualitativo de las muestras de agregado ensayadas mayores que 19,0 mm (3/4 in) como sigue (nota 9):

10.1.1 Separe las partículas de cada una de las muestras ensayadas en grupos de acuerdo con la acción producida por el ensayo (nota 9).

10.1.2 Registre el número de partículas, reportando cada uno de los tipos de deterioros.

Nota 9. Muchos tipos de acciones pueden ser esperadas. En general, éstas suelen ser clasificadas como desintegración, rompimiento, agrietamiento, desmoronamiento, descascamiento, etc. Ya que únicamente las partículas más grandes de ¾ in se requieren examinarse cualitativamente, se recomienda que el examen de las partículas más pequeñas sea hecho con el propósito de determinar si hay cualquier evidencia de rompimiento excesivo.

11. Reporte

11.1 El reporte debe contener los siguientes datos (nota 10).

11.1.1 Masa de cada fracción de cada una de las muestras antes de la prueba.

11.1.2 El material de cada una de las fracciones de la muestra que pasa la malla designada en 9.1.1 para cribar después de la prueba, expresada como un porcentaje de la masa original de la fracción.

11.1.3 El promedio ponderado calculado de acuerdo con el método de prueba C 136 del porcentaje de pérdida para cada una de las fracciones con base en la gradación de la muestra, como fue recibida para la examinación, o preferentemente la gradación promedio del material de la porción que se suministró, y de la cual la muestra es representativa excepto que:

11.1.3.1 Para agregados finos (con menos del 10% de material retenido en la malla de 3/8 in (9,5 mm)), asuma que los tamaños más finos que la malla No. 50 (0,300 mm) tienen 0% de pérdida; y los tamaños mayores de 3/8 in (9,5 mm) tienen la misma pérdida que el tamaño inmediato posterior.

11.1.3.2 Para agregado grueso (con menos del 10% de material que pasa la malla de 4,75 mm (No.4)), asuma que los tamaños más finos que la malla No 4 (4,75 mm) tienen la misma pérdida que el tamaño inmediato anterior.

11.1.3.3 Para un agregado que contiene cantidades apreciables de material fino y grueso ensayado como dos muestras separadas, como se indica en 6.4, calcule la pérdida ponderada por separado para las fracciones menores y mayores que la malla No 4 con base en la granulometría recalculada considerando la fracción fina como el 100%; y la fracción gruesa como el 100%. Reporte los resultados por separado, dando el porcentaje de material que pasa y se retiene en la malla No 4 en la granulometría inicial.

11.1.3.4 Para propósitos de calcular el promedio ponderado, considere que cualquier tamaño en 6.2 ó 6.3 que contenga menos del 5% de retenido, tiene la misma pérdida que el promedio del tamaño inmediato anterior y posterior; o si uno de estos tamaños está ausente, que tiene la misma pérdida que el tamaño inmediato anterior o posterior, cualquiera que se presente.

11.1.4 Reporte el porcentaje de pérdida de la pesada al número entero más próximo.

11.1.5 En el caso de partículas mayores de $\frac{3}{4}$ in (19,0 mm) antes de la prueba: 1) el número de partículas de cada fracción antes de la prueba; y 2) el número de partículas afectadas, clasificadas como el número de desintegración, rompimiento, agrietamiento, descascaramiento, etc. Como se presenta en la Tabla 2.

11.1.6 Tipo de solución (sulfato de sodio o magnesio), y si la solución fue recientemente preparada o previamente usada.

Nota 10. La Tabla 1 muestra un formato sugerido para el registro de los datos, los resultados de prueba insertados son para propósitos de ilustración. Los valores de la prueba mostrados pueden ser apropiados para la sal, dependiendo de la calidad del agregado.

Tabla 1 Formato recomendado para registrar los datos del ensaye (con valores de prueba ilustrativos)

Tamaño de la malla		Granulometría original de la muestra, %	Masa de la fracción antes del ensaye g	Porcentaje que pasa la malla seleccionada después del ensaye	Pérdida de masa %	
SANIDAD DEL AGREGADO FINO						
Menos 0,150 mm (No 100)		6,0	---	---	---	
0,300mm (No 50) a No. 100		11,0	---	----	---	
0,600 mm (No 30) a No 50		26,0	100	4,2	1,1	
1,18 mm (No 16) a No 30		25,0	100	4,8	1,2	
2,36 mm (No 8) a No 16		17,0	100	8,0	1,4	
4,75 mm (No 4) a No 8		11,0	100	11,2	1,2	
9,5 mm (3/8 in) a No 4		4,0	---	11,2 [^]	0,4	
Total		100,0	---	----	5,0	
SANIDAD DEL AGREGADO GRUESO						
63 mm (2 ½ in) a 50 mm (2 in)	2825g	2 ½ a 1½	20	4783	4,8	1,0
50 mm (2 in) a 37,5 mm (1 ½ in)	1958g					
37,5 mm (1 ½ in) a 25,0 mm (1 in)	1012g	1 ½ a ¾	45	1525	8,0	3,60
25 mm (1 in) a 19,0 mm (¾ in)	513g					
19,0 mm (¾ in) a 12,5 mm (1/2 in)	675g	¾ a 3/8	23	1008	9,6	2,20
12,5 mm (1/2 in) a 9,5 mm (3/8 in)	333g					
9,5 mm (3/8 in) a 4,75 mm (No 4)	298g	3/8 a No.4	12	298	11,2	1,3
Total			100	---	---	8

[^] El porcentaje de pérdida (11,2%) del siguiente tamaño más pequeño se usan como el porcentaje de pérdida para este tamaño, ya que contiene menos del 5% de la muestra original, como es descrito en 11.1.3.4

Tabla 2 Formato sugerido para el examen cualitativo (con valores de prueba ilustrativos)

Examinación cualitativa de los agregados gruesos									
Tamaño de la malla	Partículas que presentan deterioro								No total de partículas antes del ensaye
	desintegración		descascaramiento		Agrietamiento		desmoronamiento		
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
63 mm (2 ½ in) a 37,5 mm (1 ½ in)	2	7	--	--	2	7	---	---	29
37,5 mm (1 ½ in) a 19,0 mm (¾ in)	5	10	1	2	4	8	---	---	50

12. Precisión

12.1 Para agregados gruesos con pérdida ponderada de sanidad en un rango de 6 a 16 % para el sulfato de sodio; y de 9 a 20% para el de magnesio, los índices de precisión son los siguientes:

	Coefficiente de variación (1S%), % ^A	Diferencia entre dos resultados de pruebas (2DS%), % de promedio ^A
Multilaboratorio:		
Sulfato de sodio	41	116
Sulfato de magnesio	25	71
Un solo operador:		
Sulfato de sodio	24	68
Sulfato de magnesio	11	31

^A Estos números representan, respectivamente, los límites de una desviación y dos desviaciones estándar (1S%) y (D2S%), respectivamente, como se describe en la práctica C670.

12.2 Incertidumbre

No hay material de referencia adecuado para determinar la incertidumbre de este procedimiento; no hay declaración de incertidumbre.

13. Palabras clave

13.1 Agregado, sulfato de magnesio, sulfato de sodio, sanidad, intemperismo.

Tabla 2. Historial de mantenimiento y bancos de materiales utilizados en los tramos evaluados

CARRETERA	Tramo	No. cpos	No, carriles	Ubicación del subtramo evaluado		Bco. de mat. utilizado	Fecha de puesta en servicio	actividad de Mantenimiento		
				km	al km			Actividad	Año	
MÉXICO - PIEDRAS NEGRAS	Lím. de edos. N.L/Coah.-Saltillo	1	2	236 + 500	237 + 000					
	Huauchichil - La Encantada	1	2	215 + 000	215 + 500					
	Saltillo - Monclova	1	2	12 + 000	9 + 500	5	25/05/2005	Ren. y carp.	2005	
				30 + 000	29 + 500					
				71 + 000	70 + 000					
				84 + 000	82 + 000	TITANES	14/08/2002	Rec. y carp	2002	
				90 + 000	89 + 000					
				112 + 000	110 + 000	TITANES	20/06/2002	Rec. y carp.	2002	
				123 + 000	122 + 500					
				131 + 000	130 + 000					
				147 + 500	147 + 000					
		163 + 500	163 + 000							
		2	4	170 + 000	169 + 500	5	07/04/2005	Rec. Carp	2005	
	Monclova - Km 125+000	2	4	15 + 000	15 + 500	5	25/05/2005	ren. y carp	2005	
				32 + 000	32 + 500	5	15/10/2005	ren. y carp	2005	
				50 + 000	50 + 500	5	15/10/2005	ren. y carp	2005	
				70 + 000	70 + 500					
				92 + 000	92 + 500				Rec. y carp	2003
					5	05/12/2004	Rec. carp	2004		
				110 + 000	110 + 500	5	14/11/2005	Ren. y carp	2005	
	122 + 000	124 + 500				Rec. y carp	2002			
		5	09/05/2004	Rec. carp	2004					
	Km 125+000 - Km 206+500	1	2	142 + 000	142 + 500	16	20/10/2004	Sello	2004	
157 + 000				158 + 000	16	20/10/2004	Sello	2004		
160 + 000				161 + 000	16	20/10/2004	Sello	2004		
165 + 000				166 + 000	16	20/10/2004	Sello	2004		
170 + 000				171 + 000	16	20/10/2004	Sello	2004		
Km 210+000 - Piedras Negras	1	4	227 + 000	227 + 500	5	20/11/2005	Rec. y carp	2004		
Libramiento-Allende/ Morelos	1	4	2 + 000	2 + 500	5	13/10/2005	Ren. y sello	2005		
			4 + 000	4 + 500	5	13/10/2005	Ren. y sello	2005		
			7 + 000	7 + 500	5	13/10/2005	Ren. y sello	2005		

CARRETERA	Tramo	No. cpos	No. carr	Ubicación del subtramo evaluado km al Km		Bco. de mat utilizado	Fecha puesta en servicio	Actividades de mantenimiento	
								Actividad	Año
MONTERREY - TORREON	Saltillo - Lím.de Edos Coah./N.L.	2	4	20 + 000	20 + 500				
				26 + 500	27 + 500				
				33 + 000	29 + 000				
	Saltillo - T. Puebla	2	4	9 + 000	10 + 000	De Acero	30/06/2005	Rec. Carp	2005
				27 + 000	27 + 500	Río Nazas	05/07/2005	Sello	2005
		1	2	33 + 000	34 + 500	De Acero	20/05/2002	Rec. y carp	2002
	T. Puebla - La Esperanza	1	2	42 + 000	43 + 000			Ren. Sello	2002
						De Acero	05/07/2005	Ren. y carp	2005
				60 + 000	61 + 000				
				73 + 000	72 + 000				
				82 + 000	83 + 000				
	T. La Esperanza - La Cuchilla	2	4	100 + 000	101 + 000				
				105 + 500	106 + 500				
				115 + 000	116 + 000				
				140 + 000	140 + 500	Río Nazas	05/07/2005		
				150 + 500	149 + 500	Río Nazas	05/07/2005		
				160 + 000	160 + 500	Río Nazas	30/06/2005		
				162 + 000	161 + 500	Río Nazas	30/06/2005		
				180 + 000	179 + 500	Río Nazas			
	La Cuchilla - Matamoros	1	2	188 + 000	189 + 000	Río Nazas	09/05/2003		
195 + 000				194 + 000	Río Nazas	09/05/2003			
Libramiento Norte de Torreón	2	4	198 + 000	199 + 000	Río Nazas	09/05/2003			
			210 + 000	211 + 000					
			229 + 000	230 + 000	Río Nazas	19/07/2005	Ren. y sello	2005	
			3 + 000	4 + 500	Río Nazas	14/10/2002	Rec. carp	2002	

Análisis de especificaciones de valor de pulido para agregados

Carretera	Tramo	No. cpos	No. carriles	Ubicación del subtramo evaluado km al km		Bco. de mat. utilizado	Fecha de puesta en servicio	Actividades de mantenimiento	
								Actividad	Año
NUEVO LAREDO- CD. ACUÑA	Lím. de Edos Coah./NL.- Piedras Negras	1	2	55 + 000	54 + 500	5	31/10/2005	Ren. y sello	2005
				75 + 000	74 + 500	5	31/10/2005	Ren. y sello	2005
				95 + 000	94 + 500	5	31/10/2005	Ren. y sello	2005
				102 + 000	100 + 000	5	31/10/2005	Ren. y sello	2005
				115 + 000	114 + 000				
				118 + 000	117 + 500				
				126 + 000	125 + 500				
				149 + 000	147 + 000	5	31/10/2005	Ren. y sello	
				154 + 000	152 + 000	5	31/10/2005	Ren. y sello	
				165 + 000	164 + 500	5	31/10/2005	Ren. y sello	
	Piedras Negras - Cd. Acuña	1	2	9 + 000	11 + 000	5	31/10/2005	Sello	
				17 + 000	16 + 000	5	31/10/2005	Sello	
				20 + 000	19 + 000				
				42 + 000	43 + 500	5	20/08/2002	Ren. y sello	2002
				48 + 000	50 + 000	5	20/08/2002	Ren. y sello	2002
				52 + 000	51 + 000				
	59 + 000	58 + 000							
	67 + 000	66 + 500							
	70 + 000	73 + 000							
ZACATECAS -SALTILLO	Lím de edos. Zac./Coah - Saltillo	1	2	272 + 500	272 + 000				
				282 + 000	282 + 500	De acero	06/09/2003	Rec. y carp	2003
				310 + 500	310 + 000				
		1	4	326 + 000	327 + 000	De acero	18/09/2003	Rec. y carp	2003



CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx