



*Certificación ISO 9001:2008 ‡*

---

---

# **Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por medio de mezclas de agregado**

Mayra Flores Flores  
José Antonio Gómez López  
Paul Garnica Anguas

**Publicación Técnica No. 340  
Sanfandila, Qro, 2010**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por  
medio de mezclas de agregados**

**Publicación Técnica No. 340  
Sanfandila, Qro, 2010**

---



Esta investigación fue realizada en la División de Laboratorios de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la M.C Mayra Flores Flores y M.I José Antonio Gómez López.

Se agradece la colaboración de los técnicos Luis A. Pérez Cortes y Mario Antonio Pérez González por la realización de los ensayos de laboratorio.



# Índice

---

Índice.....	I
Índice de Figuras.....	III
Índice de Tablas.....	V
Resumen.....	VII
Abstract.....	IX
Resumen ejecutivo.....	XI
<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Alcance.....	2
<b>Capitulo 2 La fricción en pavimentos.....</b>	<b>3</b>
2.1 Componentes de la fricción en un pavimento.....	3
2.2 Factores que afectan la fricción del pavimento.....	4
2.3 Características de pulido del agregado.....	7
2.4 Propiedades del agregado resistente al pulido.....	9
<b>Capitulo 3 Descripción de los ensayos de laboratorio realizados al agregado.....</b>	<b>13</b>
3.1 Pulimento acelerado (Tex 438-A).....	13
3.2 Residuo insoluble en ácido (Tex 612-J).....	14
<b>Capitulo 4 Geología de Nuevo León y Coahuila.....</b>	<b>14</b>
4.1 Geología del estado de Nuevo León.....	14
4.2 Geología del estado de Coahuila.....	14
<b>Capitulo 5 Trabajo experimental.....</b>	<b>14</b>
5.1 Selección del agregado.....	14
5.2 Mezclas de agregado evaluadas.....	14
<b>Capítulo 6 Análisis de resultados.....</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo 7 Conclusiones.....</b>	<b>14</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>14</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>14</b>



## Índice de Figuras

---

Figura 2.1	Componentes de la fricción (Hall et al, 2009)	1
Figura 2.2	Métodos de agregado para proporcionar textura al pavimento (Dari, 1979 citado por Masad et. al., 2008)	2
Figura 2.3	Modelo generalizado del pulido del pavimento (Chelliah et al, 2003 citado por Masad et al, 2008)	3
Figura 3.1	Colocación del agregado en el molde	4
Figura 3.2	Llenado del molde con resina epóxica	5
Figura 3.3	Molde y pastillas de agregado fabricadas	6
Figura 3.4	Montaje de las pastilla alrededor de la periferia de la rueda metálica	7
Figura 3.5	Colocación de la rueda metálica en la máquina de pulimento	8
Figura 3.6	Máquina de pulimento acelerado	8
Figura 3.7	Péndulo de fricción	9
Figura 4.1	Geología del estado de Nuevo León	9
Figura 4.2	Geología del estado de Coahuila	9
Figura 5.1	Ubicación de los bancos de agregado evaluados del estado de Nuevo León (DGST, 2007)	10
Figura 5.2	Ubicación de los bancos de agregado del estado de Coahuila (DGST, 2007)	10
Figura 5.3	Pastillas fabricadas con agregado de Coahuila	11
Figura 5.4	Pastillas fabricadas con agregado de Nuevo León	12
Figura 6.1	Evolución del valor de pulido de los agregados de Coahuila	13
Figura 6.2	Evolución del valor de pulido de la mezcla de agregado A1/B1	
Figura 6.3	Evolución del valor de pulido de la mezcla de agregado A2/B2	
Figura 6.4	Evolución de la tasa de pulido de los agregado individuales y mezclas de agregado A1/B1	
Figura 6.5	Evolución de la tasa de pulido de los agregado individuales y mezclas de agregado A2/B2	
Figura 6.6	Tasa de pulido de la mezcla A3/B3	
Figura 6.7	Tasa de pulido de la mezcla A3/B4	
Figura 6.8	Rangos de la tasa de pulido de los agregados y mezclas evaluadas	
Figura 6.9	Incremento del valor de pulido residual mezcla A1/B1	
Figura 6.10	Incremento del valor de pulido residual mezcla A2/B2	
Figura 6.11	Incremento del valor de pulido residual mezcla A3/B3	
Figura 6.12	Incremento del valor de pulido residual mezcla A3/B4	
Figura 6.13	Grafica de clasificación del agregado resistente al pulido, TxDOT (Masad et al, 2009)	
Figura 6.14	Grafica de clasificación del agregado resistente al pulido, TxDOT (Masad et al, 2009)	
Figura 6.15	Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A1/B1)	
Figura 6.16	Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A2/B2)	

- Figura 6.17 Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A3/B3)
- Figura 6.18 Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A3/B4)

# Índice de Tablas

---

Tabla 1.1	Factores que afectan la fricción disponible del pavimento (Wallman and Astrom, 2001 citado por Hall, et. al.)
Tabla 5.1	Resultados de los ensayo de laboratorio de los agregados individuales
Tabla 5.2	Nomenclatura de los agregados y mezclas de agregados
Tabla 5.3	Resultados de las mezclas de agregado



# Resumen

---

El objetivo de esta investigación fue indagar la factibilidad de mejorar las características friccionantes de agregados con valor de pulido bajo mezclándolos con agregados de valor de pulido alto, y encontrar la proporción de mezclado más adecuada.

Se evaluaron agregados de los estados de Coahuila y Nuevo León, a cada muestra de agregado se les realizaron los ensayos de residuo insoluble en ácido (Tex 638-J), sanidad del agregado y pulimento acelerado (Tex 438-A). Con base en los resultados del ensayo de pulimento acelerado se seleccionaron los agregados a mezclar. Los porcentajes de mezclado utilizados fueron 50/50, 60/40, 70/30 y 80/20 de agregado con alto y bajo valor de pulido, respectivamente.

A los agregados y cada una de las mezclas se les determinó el coeficiente de fricción inicial, el valor de pulido y la tasa de pulido.

Los resultados indican que las mezclas de agregado presentaron un mejoramiento en el valor de pulido de una o dos unidades por cada 10% de incremento de agregado con valor de pulido alto en la mezcla. Se encontró que las mezclas de agregado escoria-caliza y granito-dolomita en una proporción 80/20 de agregado con alto y bajo valor de pulido respectivamente, son resistentes al pulido. Mientras que la mezcla granito-caliza en sus diferentes proporciones resultó susceptible al pulido.



# Abstract

---

The objective of this investigation was to investigate the feasibility of improving the friction characteristics of aggregates with a low polish value, blending them with aggregates with a high polish value, and find the appropriated blend proportion.

Aggregates from the states of Coahuila and Nuevo Leon were evaluated, to each sample was tested for insoluble acid residue (Tex 612-J), aggregate soundness by use of magnesium sulfate and accelerated polishing (Tex 438-A). Based on test results by accelerated polishing, the aggregates for blending were selected. The blend percentage used were 50/50, 60/40, 70/30 and 80/20 of aggregate with high and low polish values, respectively.

The initial friction coefficient, polish value and polish rate were determined for the aggregates and each different blends. The results indicate that the aggregate blends presented an improvement in the polish value of one or two units for each 10% increase of aggregate with a high polish value in the blend. It was found that the blend of slag-limestone and granite-dolomita in a proportion 80/20, the aggregate with high and low polish value, were more resistant to the polishing. Whereas the granite-limestone blend in its different proportions was susceptible to the polish.



# Resumen ejecutivo

---

En México, desde hace algunos años, la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) comenzó a realizar mediciones de fricción con equipo Mu meter en la red principal de carreteras federales. Las mediciones han manifestado que las carreteras de los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Coahuila, San Luis Potosí, Yucatán y Guanajuato presentaron coeficientes de fricción inferiores a  $\mu=0,4$ , valor mínimo recomendado. Específicamente, el estado de Nuevo León ocupa el primer lugar, con carreteras cuyo coeficiente de fricción es bajo, y Coahuila el tercero.

La mayor parte del territorio de estos estados está constituido por roca sedimentaria y el agregado utilizado para la construcción de pavimentos proviene principalmente de bancos de material de roca caliza. El agregado calizo es susceptible al pulido debido al paso de los vehículos, el pulido del agregado produce la pérdida gradual de la fricción y se recomienda no utilizarlo o limitar su uso en superficies de rodamiento con volúmenes de tránsito altos. Una alternativa conocida para mejorar la resistencia al deslizamiento es combinar el agregado con baja resistencia al pulido con agregado con alta resistencia al pulido.

La resistencia al pulido generalmente es caracterizada a través del ensayo de pulimento acelerado. El ensayo consta de tres pasos principales: la preparación de los especímenes, el pulido de los especímenes en la máquina de pulimento acelerado y el ensayo de fricción con el péndulo británico.

En el presente estudio se evaluaron agregados de los estados de Coahuila y Nuevo León, a cada muestra de agregado se les realizaron los ensayos de residuo insoluble en ácido (Tex 612-J), sanidad del agregado y pulimento acelerado (Tex 438-A). Con base en los resultados del ensayo de pulimento acelerado se seleccionaron los agregados a mezclar. Los porcentajes de mezclado utilizados fueron 50/50, 60/40, 70/30 y 80/20 de agregado con alto y bajo valor de pulido, respectivamente.

A los agregados y cada una de las mezclas se les determinó el coeficiente de fricción inicial, el valor de pulido y la tasa de pulido.

Los resultados indican que las mezclas de agregado presentaron un mejoramiento en el valor de pulido de una o dos unidades por cada 10% de incremento de agregado con valor de pulido alto en la mezcla. Se encontró que las mezclas de agregado escoria-caliza y granito-dolomita en una proporción 80/20, de agregado con alto y bajo valor de pulido respectivamente, son resistentes al pulido. Mientras que la mezcla granito-caliza en sus diferentes proporciones resultó susceptible al pulido.

El presente documento está formado por seis capítulos. En el primer capítulo se aborda el problema, el objetivo y alcance del estudio. El capítulo 2 se refiere a los factores que afectan la fricción del pavimento y las características del agregado resistente al pulido. La descripción de los ensayos de laboratorio para caracterizar

la resistencia al pulido del agregado se encuentra en el capítulo 3. El capítulo 4 comprende una descripción breve de la geología de Nuevo León y Coahuila. En el capítulo 5 se detalla la selección del agregado y las mezclas de agregado evaluadas. El análisis de resultados se muestra en el capítulo 6 y, finalmente, se presentan las conclusiones del presente trabajo.

# 1 Introducción

---

## 1.1 Descripción del problema

En México desde hace algunos años la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) comenzó a realizar mediciones de fricción con equipo Mu meter en la red principal de carreteras federales. Las mediciones han manifestado que las carreteras de los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Coahuila, San Luis Potosí, Yucatán y Guanajuato presentaron coeficientes de fricción inferiores a  $\mu=0,4$ , valor mínimo recomendado. Específicamente, el estado de Nuevo León ocupa el primer lugar con carreteras cuyo coeficiente de fricción es bajo y Coahuila el tercero.

La mayor parte del territorio de estos estados está constituido por roca sedimentaria, predominando las calizas, y el agregado utilizado para la construcción de pavimentos proviene principalmente de bancos de material de roca caliza. Además del agregado calizo, en Nuevo León se tiene disponible agregado granítico y en Coahuila agregado sintético (escoria producto de la fundición de acero en horno de arco eléctrico) e importan agregado riolítico del estado de Durango.

El agregado calizo es susceptible al pulido debido al paso de los vehículos. El pulido del agregado o pérdida de la microtextura genera problemas de falta de resistencia al deslizamiento o fricción en la superficie de rodamiento cuando el pavimento está mojado, y se recomienda no utilizarlo o limitar su uso en superficies de rodamiento con volúmenes de tránsito altos. Por su parte, la riolita, el granito y la escoria generalmente proporcionan una buena resistencia al pulido.

Por lo expuesto anteriormente, resulta conveniente encontrar alternativas viables que ayuden a mejorar la fricción de los pavimentos de concreto asfáltico utilizando los materiales disponibles. La combinación de agregado con baja y alta resistencia al pulido es una opción para mejorar la fricción de la superficie de rodamiento y elevarla a niveles aceptables. En un estudio realizado por Liang (2003) para el Departamento de Transporte de Ohio reportó que la mezcla de agregados mejoró el valor de pulido residual con respecto al agregado con bajo valor de pulido. De los cuatro bancos de agregado evaluados se determinó que la proporción 60/40 de agregado resistente al pulido y agregado con baja resistencia al pulido cumple con los requerimientos de fricción del Departamento de Transporte de Ohio (ODOT). También, el Departamento de Transporte de Texas (TxDOT) permite la mezcla de agregados para mejorar la fricción.

La mezcla de agregado puede ser elaborada con agregado natural o sintético (escoria) y el porcentaje de agregado con valor de pulido alto requerido, para mejorar la fricción, se determina por medio del ensayo de pulimento acelerado.

## **1.2 Objetivo**

Investigar la factibilidad de mejorar las características friccionantes de agregados con valor de pulido bajo mezclándolos con agregados de valor de pulido alto, y encontrar la proporción de mezclado más adecuada.

## **1.3 Alcance**

El alcance de este estudio comprende la evaluación de agregados, de bancos de materiales del estado de Nuevo León y Coahuila, a través de los ensayos de sanidad por el uso de sulfato de magnesio, residuo insoluble en ácido y pulimento acelerado. Con base en los resultados obtenidos de la prueba de pulimento acelerado se seleccionaron cuatro agregados de cada estado, con valor de pulido bajo y alto, para mezclarlos en las proporciones 50/50, 60/40, 70/30 y 80/20 de agregado con valor de pulido alto y bajo, respectivamente

## 2 La fricción en pavimentos

### 2.1 Componentes de la fricción en un pavimento

La fricción del pavimento es el resultado de una interacción compleja entre las dos componentes principales de la fuerza de fricción: la adhesión y la histéresis (Hall, 2009 et. al.). La componente de adhesión resulta de la atracción intermolecular entre los neumáticos de hule y las partículas de agregado. Para superficies mojadas, la adhesión se incrementa con la microtextura, las asperezas de la microtextura penetran la película de agua y proporcionan regiones de contacto secas entre el neumático-pavimento. La histéresis resulta de la deformación del neumático cuando está en contacto con las asperezas de la macrotextura. Esta componente de fricción es pequeña cuando el neumático gira libremente, pero es significativa durante el frenado debido al incremento en la deformación del hule cuando se desliza en lugar de rodar. La histéresis se incrementa con la irregularidad del agregado, el agregado angular causa más deformación del neumático que el agregado redondeado (Moore, 1975 citado por Henderson et. al., 2006).

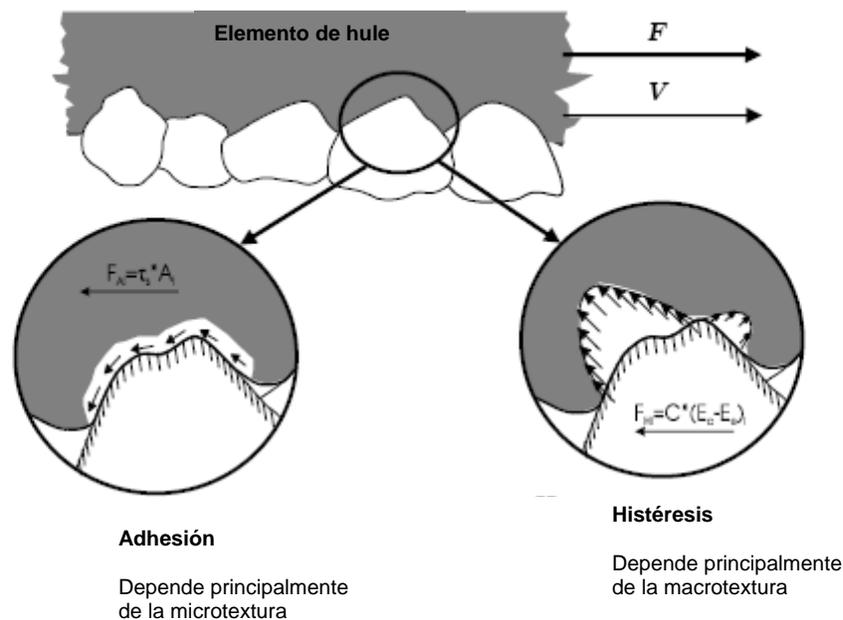


Figura 2.1

Componentes de la fricción (Hall, et. al., 2009)

## 2.2 Factores que afectan la fricción del pavimento

Los factores que influyen las fuerzas de fricción del pavimento pueden ser agrupados en cuatro categorías: las características superficiales del pavimento, operación del vehículo, las condiciones del neumático y los factores ambientales. Debido a que cada factor juega un papel en la definición de la fricción, ésta debe ser vista como un proceso, en lugar de una propiedad inherente del pavimento. Cuando todos esos factores son completamente especificados la fricción toma un valor definitivo (Hall, et. al. 2009).

La Tabla 1 lista los factores que comprenden cada categoría, los más críticos son indicados en negrita, entre estos factores los únicos que se encuentran bajo control de los organismos encargados de la construcción, conservación y administración de las carreteras son los relacionados con las características superficiales del pavimento, la micro y macrotextura, y la velocidad de deslizamiento (Hall, et. al. 2009).

**Tabla 1.1**  
Factores que afectan la fricción disponible del pavimento  
(Wallman and Astrom, 2001 citado por Hall, et. Al.)

<b>Características superficiales del pavimento</b>	<b>Parámetros de operación del vehículo</b>	<b>Propiedades del neumático</b>	<b>Factores climáticos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Microtextura</b></li> <li>• <b>Macrotextura</b></li> <li>• Megatextura</li> <li>• <b>Propiedades del material</b></li> <li>• Temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Velocidad de deslizamiento</b></li> <li>• Velocidad del vehículo</li> <li>• Acciones de frenado</li> <li>• Maniobras de conducción</li> <li>• Giros</li> <li>• Alcances</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Huella</li> <li>• <b>Diseño y condición</b></li> <li>• Composición y dureza del hule</li> <li>• <b>Presión de inflado</b></li> <li>• Carga</li> <li>• Temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Clima</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Viento</li> <li>○ <b>Temperatura</b></li> <li>○ <b>Agua (lluvia, condensación)</b></li> <li>○ <b>Nieve y hielo</b></li> </ul> </li> <li>• <b>Contaminantes</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Material antiderrapamiento (sal, arena)</li> <li>○ Polvo, lodo</li> </ul> </li> </ul>

### • **Textura del pavimento.**

La textura de un pavimento es definida por la longitud ( $\lambda$ ) y la amplitud (A) de onda y comprende tres niveles, la microtextura, macrotextura y megatextura.

La microtextura se refiere a las irregularidades en la superficie de las partículas de agregado (textura a escala fina) que principalmente son función de la mineralogía del agregado y es medida a una escala microscópica ( $\lambda < 0.5$  mm, A=1 a 500  $\mu$ m) (Hall, et. al., 2009).

La macrotextura ( $\lambda=0.5$  a 50 mm,  $A=0.1$  a 20 mm) se refiere a las irregularidades en la superficie de rodamiento y depende de las propiedades de la mezcla asfáltica (forma, tamaño y granulometría del agregado) y del método de texturizado o acabado (rallado, estriado; profundidad, ancho, espaciamiento y orientación de los canales/ranuras) usado en pavimentos de concreto hidráulico (Hall, et. al., 2009).

La megatextura ( $\lambda=50$  a 500 mm,  $A=0.1$  a 50 mm) es la textura que tiene longitudes de onda del mismo tamaño que la interface neumático-pavimento y es principalmente definida por los deterioros (baches, roderas, agrietamiento) o defectos en la superficie del pavimento (Hall et al).

- **Propiedades del agregado**

Las propiedades del agregado (por ejemplo las características del agregado y la mezcla, texturizado de la superficie) influyen la micro y macrotextura. Estas propiedades también afectan la durabilidad a largo plazo de la textura dependiendo de la capacidad del agregado y la mezcla para resistir el pulido y la abrasión/desgaste bajo el tránsito acumulado y los efectos ambientales (Hall, et. al., 2009).

- **Velocidad de deslizamiento**

El coeficiente de fricción entre la llanta y el pavimento cambia con la variación del deslizamiento, se incrementa rápidamente con el incremento del deslizamiento hasta un valor pico, lo cual usualmente ocurre entre el 10 y 20 por ciento de deslizamiento; luego disminuye hasta un valor conocido como el coeficiente de fricción de deslizamiento, el cual ocurre a un 100 por ciento de deslizamiento (Hall, et. al., 2009).

### **Condición y diseño del neumático.**

El diseño (por ejemplo el tipo y profundidad de la huella) y la condición del neumático tienen una influencia importante en el drenado del agua que se acumula en la superficie del pavimento. El agua atrapada entre el pavimento y el neumático puede ser expulsada a través de los canales proporcionados por la macrotextura del pavimento y el neumático. La profundidad es particularmente importante para la conducción del vehículo sobre películas delgadas de agua a velocidades altas. Algunos estudios (Henry, 1983 citado por Hall et al, 2009) han reportado una disminución en la fricción en pavimento mojado de 45 a 70 por ciento para neumáticos completamente desgastados comparado con respecto a neumáticos nuevos (Hall, et. al., 2009).

- **Presión de inflado.**

Las altas presiones de inflado causan únicamente una pérdida pequeña de la fricción del pavimento, mientras que las bajas presiones de inflado pueden reducir significativamente la fricción a velocidades altas. Esto es debido a la contracción de los canales de drenaje del neumático y la reducción de la presión de contacto (Hall, et. al., 2009).

### **Temperatura.**

La fricción en neumáticos de hule natural tiene una mayor dependencia de la temperatura, especialmente cuando son llevados hasta el punto de congelamiento. Los compuestos de hule actuales están formulados para eliminar los efectos de la temperatura en la fricción. Debido a que la histéresis es afectada por las propiedades visco elásticas del hule, la fricción se reduce a temperaturas altas cuando el hule es suave. Sin embargo, dichas temperaturas están arriba de las velocidades y temperatura de trabajo normales. Cuando se frena demasiado se pueden alcanzar temperaturas altas, sin embargo primero se debilitarían los frenos antes de que esto ocurra (Hall, et. al., 2009).

- **Agua superficial**

El efecto del espesor de la película de agua en la fricción es mínimo a bajas velocidades (menores a 32 km/h) y muy importante a velocidades altas (mayores a 64 km/h). El coeficiente de fricción de un neumático, deslizándose sobre una superficie mojada, disminuye exponencialmente a medida que se incrementa la película de agua. El efecto de la película de agua está influenciado por el diseño y condición del neumático (Hall, et. al., 2009).

El hidroplaneo es una situación particularmente riesgosa que involucra películas de agua relativamente gruesas y vehículos que viajan a altas velocidades. El hidroplaneo ocurre cuando el neumático del vehículo es separado de la superficie del pavimento debido a la presión del agua que actúa en la interfase neumático-pavimento, causando que la fricción se caiga hasta aproximadamente cero (Hall, et. al., 2009).

### **Nieve y hielo.**

El hielo y la nieve que cubren la superficie del pavimento presentan la condición más riesgosa para el frenado o maniobras del vehículo. El nivel de fricción entre los neumáticos y la superficie del pavimento cubierta con nieve o hielo es tal que cualquier frenado brusco o cambio repentino de dirección resulta en un deslizamiento de rueda bloqueada y pérdida de la estabilidad del vehículo (Hall, et. al., 2009).

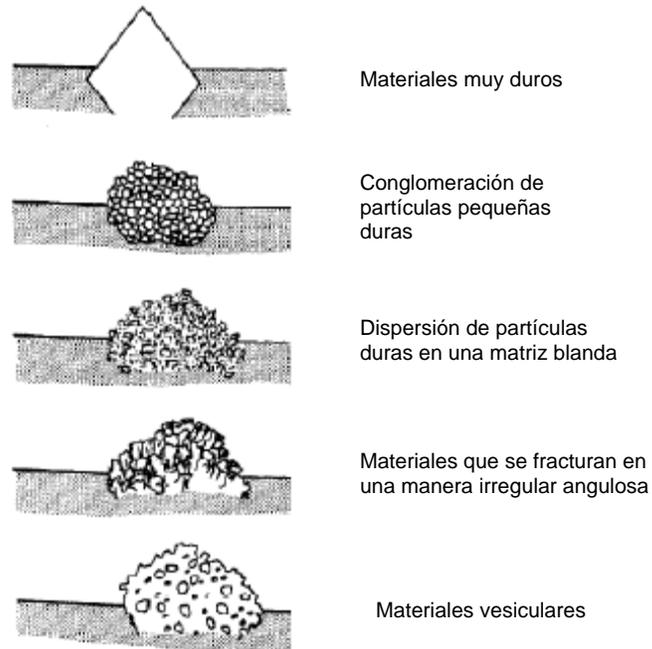
## 2.3 Características de pulido del agregado

La fricción en los pavimentos de concreto asfáltico se va perdiendo gradualmente con el paso del tiempo debido al pulido del agregado. El pulido del agregado es definido como la pérdida de las pequeñas asperezas de la superficie de rodamiento llamadas microtextura. Por otro lado, el desgaste es la pérdida de la macrotextura de las irregularidades de la superficie. La mayoría de los investigadores concuerdan que el mecanismo principal de pulido es la abrasión de las pequeñas asperezas del agregado debido a la acción del roce de los neumáticos del vehículo con los residuos de polvo fino de la carretera, que actúan como agente abrasivo. El mecanismo principal de desgaste involucra una abrasión continua debida a las cargas y cambios ambientales como congelamiento/deshielo, humedecimiento/secado y oxidación. El pulido y el desgaste generalmente involucran procesos similares que varían únicamente en el grado y la tasa de pérdida de material (Liang Robert, 2009).

Los agregados en mezclas asfálticas son pulidos de manera diferente dependiendo de su mineralogía. La Figura 2 muestra cuatro diferentes grupos de agregados los cuales proporcionan cierta textura al pavimento. El primer agregado es muy duro y anguloso compuesto de un solo tipo de mineral. Este agregado resistirá el pulido pero con el tiempo será más redondeado y tendrá menos textura. Además, las rocas constituidas de minerales con aproximadamente la misma dureza se desgastan uniformemente tendiendo a tener una resistencia al pulido baja (Chelliah et al, 2003 citado por Masad Eyad et. al., 2009).

El segundo tipo de agregado tiene casi el mismo patrón de desgaste que el primero, excepto que los cristales que forman la partícula de agregado no están bien cementados. La masa de minerales blandos se desgasta rápidamente con el tiempo, quedando expuestos los granos duros que proporcionan una superficie áspera y antes de que las asperezas de los granos se pulan, la matriz de agregado se desgasta tanto que no puede retener las partículas y quedan expuestos granos sin pulir (abdul-Malak et. al., 1990 tomado de Masad Eyad et. al., 2009). Esta renovación continua de la superficie del pavimento mantiene una buena resistencia al deslizamiento. Se dice que los agregados que tienen granos minerales angulosos, duros y gruesos uniformemente distribuidos en una matriz mineral blanda tienen una resistencia al deslizamiento alta (Kokkalis and Panagouli, 1999 citado por Masad Eyad et. al., 2009).

El tercero y cuarto grupo de agregado se desgastará en forma similar. Ambos agregados están compuestos de minerales duros y débiles. Los vacíos de aire actúan como un tipo de mineral débil. A medida que las partículas son intemperizadas, el mineral débil se romperá y quedarán expuestos los minerales duros desgastados. Esto produce que queden expuestas superficies sin intemperizar que retendrán su textura por periodos prolongados de tiempo y mantendrán sus propiedades friccionantes por más tiempo (Luce, 2006 citado por Masad Eyad et. al., 2009).



**Figura 2.2**

**Métodos de agregado para proporcionar textura al pavimento (Dari, 1979 citado por Masad et al, 2008)**

En un pavimento nuevo la fricción es máxima después de unas semanas de estar abierto al tránsito. Después la resistencia disminuye a una velocidad rápida cuando el agregado expuesto es desgastado y su microtextura y macrotextura se pierden cuando las cargas de tránsito pulen la superficie de rodamiento en la huella de contacto. Luego disminuye más lentamente y alcanza el estado de equilibrio en el cual pequeñas desviaciones en la resistencia son experimentadas mientras los niveles de tránsito sean constantes y no haya un deterioro evidente. Esto generalmente pasa después de 1 millón de ejes equivalente (Kokalis, 1998 citado por Cenek et. al.), 1 a 5 millones de pases de vehículos (Masad et. al., 2009), o dos años de servicio (Masad et. al., 2009; Kokalis, 1998 citado por Cenek et. al.). Así mismo, generalmente hay una disminución del coeficiente de fricción en el pavimento debido a cambios estacionales. En el verano se presentan los niveles más bajos de fricción, debido a que el clima seco permite la acumulación de partículas finas y polvo que aceleran el pulido de la superficie del pavimento. En invierno, la lluvia lava las partículas finas y esto da como resultado una microtextura y macrotextura más alta y consecuentemente la superficie del pavimento presenta una fricción alta (Masad et. al., 2009). La figura 2.3 muestra el modelo de pulido del pavimento.

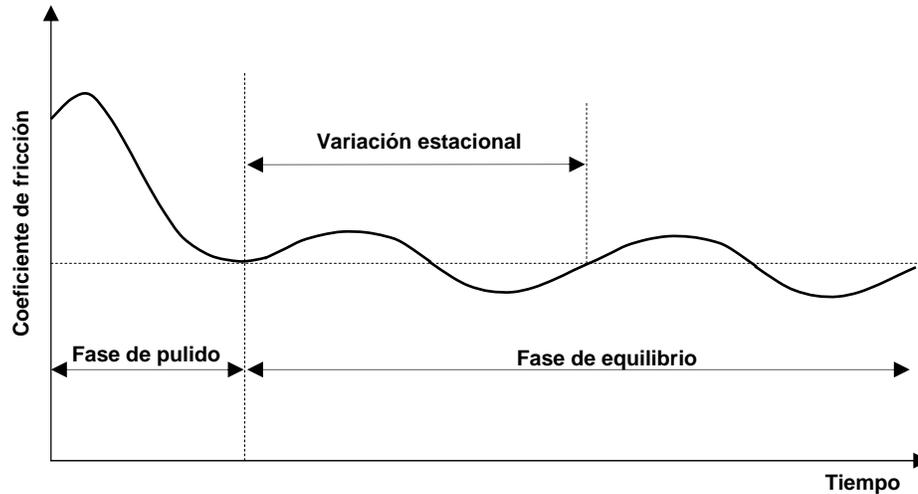


Figura 2.3

Modelo generalizado del pulido del pavimento (Chelliah et al, 2003 citado por Masad et al, 2008)

## 2.4 Propiedades del agregado resistente al pulido

El diseño por fricción requiere un entendimiento completo de los factores que influyen la fricción y el conocimiento de los materiales y técnicas constructivas (incluyendo el equipo) que finalmente dictan la fricción inicial y a largo plazo (Hall, et. al., 2009).

Las propiedades del agregado son el factor predominante que determina el comportamiento friccionante de una superficie de concreto hidráulico o asfáltico. El agregado es el principal componente en la mezcla de concreto hidráulico o asfáltico y, por lo tanto, en ambos tipos de pavimento el agregado está en contacto con los neumáticos de los vehículos (Hall, et. al., 2009).

Los ensayos y caracterización del agregado deben ser realizados en la fracción de agregado que controlará el comportamiento friccionante. En general, los agregados gruesos controlan las propiedades de las mezclas asfálticas, mientras que el agregado fino controla las propiedades friccionantes de las mezclas de concreto hidráulico (Hall, et. al., 2009).

En términos de diseño por fricción y comportamiento, las propiedades más importantes del agregado son:

- Propiedades mineralógicas y petrográficas: Composición/estructura y dureza de los minerales del agregado
- Propiedades geométricas y físicas: angularidad, forma y textura

- Propiedades mecánicas: resistencia a la abrasión/desgaste y características de pulido
- Propiedades de durabilidad: sanidad

#### ➤ **Composición / Estructura y dureza de los minerales del agregado.**

Una de las propiedades más importantes del agregado usado en superficies de rodamiento es la composición de los minerales que constituyen las partículas de agregado. Los agregados que presentan los niveles más altos de resistencia al pulido y al desgaste típicamente están compuestos de cristales (grano grueso) duros, cementados fuertemente embebidos en una matriz de minerales blandos. Las diferencias en el tamaño del grano y dureza proporcionan una superficie abrasiva renovada constantemente debido a las tasas de desgaste diferencial y la rotura de los granos más duros de la matriz de minerales más suaves (Hall, et. al., 2009).

Para determinar la dureza de los minerales se recomienda el ensayo de la dureza de Mohs o una inspección visual del agregado (usando la nomenclatura descriptiva de la norma ASTM C 294) puede proporcionar un entendimiento básico de la composición mineralógica y estructura. Si se requiere información más detallada se puede recurrir al análisis petrográfico. Es importante mencionar que se han observado comportamientos diferentes en agregado con mineralogía similar pero de diferentes sitios (Hall, et. al., 2009).

Los agregados constituidos de minerales duros (Dureza de Mohs > 6) típicamente resisten el desgaste y otras formas de degradación y pueden pulirse fácilmente cuando están sujetos al tráfico. Los agregados constituidos de minerales moderadamente suaves (dureza de Mohs de 3 a 6) sólo resisten el pulido y se desgastan rápidamente cuando son sujetos al tráfico. Las agencias en Estados Unidos consideran que el agregado grueso ideal consiste de 50 a 70 por ciento de grano grueso y minerales duros embebidos en una matriz de 30 a 50 por ciento de minerales blandos (Hall, et. al., 2009).

#### ➤ **Angularidad, forma y textura del agregado.**

La angularidad del agregado, forma y textura son parámetros importantes para definir la microtextura y macrotextura. El agregado fino que presenta lados angulosos y cúbicos o formas irregulares generalmente proporciona niveles más altos de microtextura, mientras que aquel con lados redondeados o formas alargadas generalmente produce una baja microtextura. En el agregado grueso, la trabazón de partículas angulares y ásperas produce una macrotextura profunda. En las mezclas asfálticas las partículas de agregado planas y alargadas tienden a orientarse horizontalmente dando como resultado profundidades de macrotextura bajas.

El ensayo de vacíos sin compactar (AASHTO T 304 y ASTM C 1252) es el más comúnmente usado para evaluar la angularidad, esfericidad y textura del agregado fino. Para evaluar el agregado grueso se utiliza comúnmente el ensayo de caras fracturadas (ASTM D 5821) (Hall et al, 2009)

➤ **Resistencia al desgaste/abrasión**

El uso de agregado resistente a la abrasión es importante para evitar el rompimiento cuando se somete a las fuerzas cortantes del tráfico o durante el manejo, almacenamiento, mezclado, colocación y compactación. El rompimiento de las partículas de agregado fino y/o grueso puede alterar la granulometría significativamente y, por lo tanto, afectar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, resistencia del concreto hidráulico y, en general, la porosidad y macrotextura de la mezcla (Hall, et. al., 2009).

La resistencia al desgaste en agregado grueso es determinada usualmente a través del ensayo de desgaste de los ángeles, aunque en años recientes ha sido reportado que el ensayo Microdeval es un mejor indicador del potencial de rompimiento de agregado grueso. En el caso del agregado fino se recomienda utilizar el ensayo Microdeval (Hall, et. al., 2009).

➤ **Resistencia al pulido.**

La resistencia del agregado fino y grueso al pulido debido al paso de los vehículos es el principal factor en el comportamiento a largo plazo.

Los ensayos recomendados para evaluar la resistencia al pulido son el residuo insoluble en ácido (ASTM D 3042) y valor de pulido o pulimento acelerado (ASTM D 3319). En el caso del agregado fino no hay un ensayo para evaluar de manera directa las características de pulido y, por lo tanto, se utiliza el ensayo de residuo insoluble en ácido (AIR, por sus siglas en inglés), el cual indica la cantidad de carbonatos en el agregado (Hall, et. al., 2009).

Para el agregado grueso, tanto el ensayo de residuo insoluble en ácido como el ensayo de pulimento acelerado (PSV, por sus siglas en inglés) son usados (Hall, et. al., 2009).

➤ **Sanidad**

La sanidad se refiere a la capacidad de un agregado a resistir la degradación causada por los efectos climáticos y ambientales (por ejemplo el humedecimiento y secado, congelamiento y deshielo). Las propiedades de sanidad en el agregado son importantes para evitar el rompimiento, particularmente cuando se utiliza en climas extremosos (Hall, et. al., 2009).

El método de ensayo que se considera caracteriza mejor la sanidad del agregado es el ensayo de sanidad por el uso de sulfato (ASTM C 88, AASHTO T 104). Este ensayo fue desarrollado para simular, sin la necesidad de un equipo de refrigeración, los efectos de la acción del congelamiento y deshielo del agua en las partículas de agregado (Hall, et. al., 2009).

El ensayo puede realizarse por el uso de sulfato de sodio o de magnesio, este último es preferido debido a que produce menos variación en la pérdida de masa y es un mejor indicador de agregado grueso bueno y débil (Hall, et. al., 2009).

Los ensayos de laboratorio no garantizan un adecuado comportamiento a la fricción en campo, de manera que es esencial que sean usados en conjunto con el historial de comportamiento en campo para identificar los tipos de agregado aceptables (Hall, et. al., 2009).

## **3 Descripción de los ensayos de laboratorio realizados al agregado**

---

Hay varios métodos para evaluar el potencial de un agregado para resistir el pulido debido al paso de los vehículos. Estos métodos son clasificados principalmente en dos grupos: los métodos que miden la abrasión del agregado (pérdida de la angularidad y rompimiento) debido a las cargas del tránsito y los métodos que miden el pulido del agregado (pérdida de textura). Además, en estos métodos el cambio en una de las características del agregado, por ejemplo en la pérdida de sanidad con sulfato de magnesio o el valor de pulido, es medido después de someterse a una condición especial y los cambios son atribuidos al pulido del agregado o su capacidad para resistir el rompimiento. Estos cambios en el agregado son relacionados con respecto al potencial para resistir el pulido (Masad et. al, 2009).

Para evaluar las propiedades friccionantes del agregado se realizaron los ensayos de pulimento acelerado, residuo insoluble en ácido y sanidad del agregado. Los dos primeros comúnmente no son realizados en los laboratorios de prueba de materiales por lo que a continuación se describen.

### **3.1 Pulimento acelerado (Tex 438-A)**

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

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



**Figura 3.1**  
**Colocación del agregado en el molde**



**Figura 3.2**  
**Llenado del molde con resina epóxica**



**Figura 3.3**

**Molde y pastillas de agregado fabricadas**

Con un marcador permanente se identifican los especímenes en la parte trasera y uno de sus lados se marca con un punto. Enseguida se determina el coeficiente de fricción inicial, para lo cual se coloca el espécimen en el péndulo británico con el lado marcado hacia atrás, con un aspersor se aplica suficiente agua para cubrirlo y se suelta el brazo del péndulo, esta operación se repite cuatro veces y se registra de la segunda a la quinta lectura. Luego se colocan alrededor de la periferia de la rueda metálica con el punto hacia el frente y ésta se monta en la máquina de pulimento acelerado.



**Figura 3.4**

**Montaje de las pastillas alrededor de la periferia de la rueda metálica**



**Figura 3.5**  
**Colocación de la rueda metálica en la máquina de pulimento**



**Figura 3.6**  
**Maquina de pulimento acelerado**

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



Figura 3.7

Péndulo de fricción

### 3.2 Residuo insoluble en ácido (Tex 612-J)

Este ensayo es rápido, fácil de ejecutar y se recomienda como una prueba preliminar para evaluar las propiedades de desgaste-pulido del agregado. Proporciona el porcentaje de material sin carbonatos (residuo insoluble) en agregados calcáreos. El ensayo consiste en colocar en un recipiente de vidrio una muestra representativa de 25 g de agregado que pasa la malla de 3/8"; previamente lavado y secado, lentamente se agrega ácido clorhídrico y con una varilla de vidrio se revuelve el agregado hasta que la reacción termine. Una vez que la reacción termina, se adicionan 25 ml más de ácido clorhídrico para asegurar que la reacción ha terminado completamente. Cuando la reacción termina se decanta la solución y se filtra el residuo a través de un papel filtro del No. 12, se lava con agua destilada y se seca en el horno a una temperatura de 104 °C durante dos horas. Transcurrido el tiempo de secado se deja enfriar el agregado y se determina su masa. El residuo insoluble en ácido se expresa como la relación entre la masa del residuo y la masa inicial de agregado, en porcentaje



## **4 Geología de Nuevo León y Coahuila**

---

### **4.1 Geología del estado de Nuevo León**

En el estado de Nuevo León afloran principalmente rocas sedimentarias de origen marino (depósitos clásticos y químicos de edad mesozóica). Las rocas más antiguas de Nuevo León son esquistos de edad precámbrica que afloran en el área de Aramberri.

La mayor parte de las rocas que forman grandes estructuras plegadas (anticlinales y sinclinales), que caracterizan a la Sierra Madre Oriental, son del Mesozóico. Los depósitos más recientes están constituidos por conglomerados y suelos aluviales, que pertenecen al Cuaternario, Figura 13.

El estado de Nuevo León queda comprendido dentro de tres provincias: la Llanura Costera del Golfo Norte, la Sierra Madre Oriental y la Gran Llanura de Norteamérica.

La llanura costera del Golfo Norte comprende la porción central del estado y limita con la Gran Llanura de Norteamérica y con la Sierra Madre Oriental.

La estratigrafía de esta región está representada por rocas calcáreas localizadas en el norte de la ciudad de Monterrey. La mayor parte de los afloramientos rocosos de esta provincia pertenece al Cretácico Superior y está constituida por lutitas. Los conglomerados que sobreyacen en forma discordante a los sedimentos del Cretácico Superior son del Terciario (Pleistoceno).

Los depósitos más recientes corresponden al Cuaternario y están constituidos por rellenos aluviales.

En esta zona se explotan los bancos de caliza, los cuales se localizan en el norte de la ciudad de Monterrey (cerro El Topo).

La provincia Sierra Madre Oriental ocupa la mayor parte de la porción occidental del estado y limita al oriente con la Llanura Costera del Golfo Norte y con la Gran Llanura de Norteamérica.

Las rocas más antiguas de esta provincia, en Nuevo León, son esquistos del Precámbrico. Hay afloramientos de areniscas y asociaciones de lutitas y areniscas intercaladas pertenecientes al Triásico. Del Jurásico Superior hay afloramientos masivos de caliza, de yeso y de yeso asociado con caliza. El Cretácico está representado por afloramientos de caliza, de lutitas y asociaciones de calizas-lutitas y lutitas-areniscas.

En esta provincia se realizan las explotaciones más importantes de Nuevo León. En el área de Monterrey se explotan numerosos bancos de caliza, la cual se utiliza en la industria de la construcción, en la siderurgia y en la industria del vidrio.

La provincia de la Gran Llanura Norteamericana ocupa la porción nororiental del estado y limita al este con la Sierra Madre Oriental y al suroeste con la Llanura Costera del Golfo Norte.

Las rocas más antiguas que afloran en esta provincia pertenecen al Cretácico Superior y están constituidas por asociaciones de lutitas y areniscas, y afloramientos extensos de lutitas.

Hay, además, afloramientos de sedimentos marinos del Terciario (Plioceno), principalmente en la porción sureste de la provincia. Del Cuaternario se encuentran los suelos aluviales de los llanos de la provincia.

Las gravas y arenas de la provincia se explotan en los valles, sobre los aluviones, donde algunas compañías privadas seleccionan diferentes tamaños de material, el cual se utiliza en la industria de la construcción, como relleno y como agregado para concreto, así como en la fabricación de tabicón (INEGI, 2010).

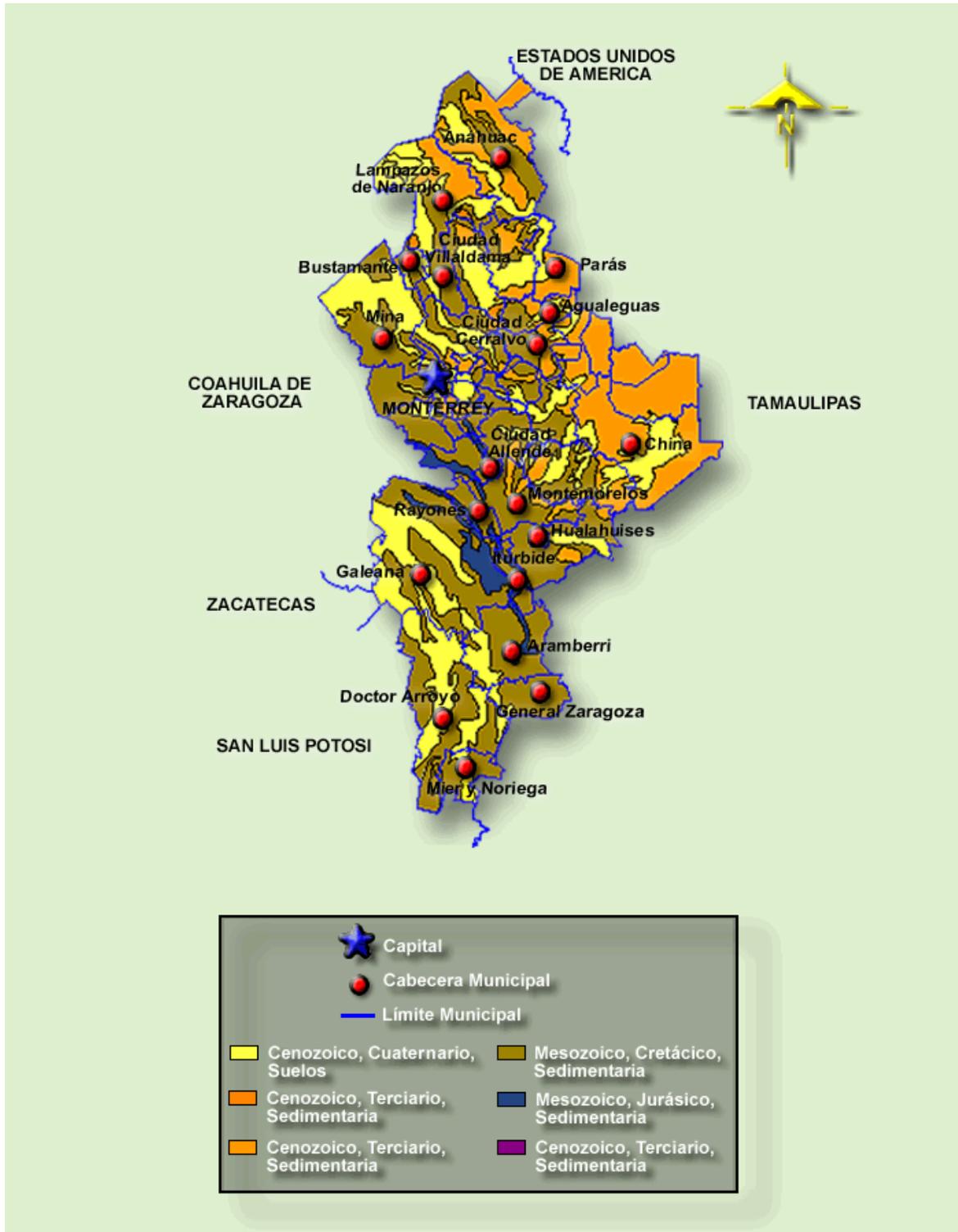


Figura 4.1

Geología del estado de Nuevo León. Fuente: INEGI

## 4.2 Geología del estado de Coahuila

El territorio coahuilense está constituido en su mayor parte por rocas de origen sedimentario, tanto marino como continental cuyas edades van desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. Las más típicas de éstas son las calizas del Mesozoico. Estas rocas han sido afectadas por intensos plegamientos, así como fallamientos e intrusiones relacionadas a ellos. La orientación de los plegamientos es en dirección este-oeste en el sur del estado, y noroeste-sureste en el resto de él. Así las sierras se orientan también preferentemente en tales direcciones.

En diversas zonas del estado se encuentran rocas ígneas cuyas edades varían desde el Triásico hasta el Cuaternario. Son las extrusivas las más jóvenes de ellas, y forman, en algunos casos, las partes más altas de las sierras, mientras que las intrusivas han quedado expuestas en pequeños cuerpos debido a la erosión de las rocas sedimentarias a las cuales intrusieron y en algunos casos mineralizaron. En muchos lugares afloran conglomerados continentales terciarios, que constituyen lomeríos y las extensas bajadas de las sierras.

Los aluviones son los depósitos más recientes y están constituidos por detritos de las diversas rocas mencionadas. Ellos cubren la mayor parte de los llanos y alcanzan en algunos casos espesores de varios cientos de metros. Por último, las rocas metamórficas Paleozoicas afloran en pequeñas áreas dispersas por varias zonas en la entidad.

El estado de Coahuila queda comprendido dentro de tres provincias fisiográficas que son las Sierras y Llanuras del norte, Sierra Madre Oriental y las grandes llanuras de Norteamérica.

La provincia de la Sierra y Llanuras del Norte se caracteriza por la predominancia de llanuras cubiertas por grandes espesores de materiales aluviales, así como por la existencia de sierras aisladas constituidas por rocas sedimentarias de origen marino y afloramientos de rocas ígneas.

Las principales estructuras geológicas que se manifiestan en esta provincia están representadas por fallas de tipo normal, así como por plegamientos (anticlinales y sinclinales) con orientaciones norte-sur y este-oeste, como en la sierra Mojada y del Rey principalmente; que se desarrollan paralelamente al contacto entre los suelos aluviales y las rocas sedimentarias que constituyen estas sierras.

Existen además cuerpos intrusivos y coladas de lava en las porciones que corresponden a las sierras volcánicas escarpadas al centro y norte de la provincia.

En esta provincia destacan los yacimientos de hierro entre los cuales el principal es el yacimiento de Hércules.

En la Sierra Madre Oriental la principal característica geológica de la provincia es la predominancia de rocas mesozoicas de origen sedimentario marino, las cuales fueron sometidas a esfuerzos corticales de tensión y compresión, que dieron lugar a levantamientos serranos abruptos constituidos por rocas calizas, que se alternan con valles intermontanos. Tal es el caso de las sierras: El Burro, Santa Rosa, Menchaca y la Fragua, entre otras. También se encuentran lomeríos de pendientes suaves, constituidos por lutitas asociadas con calizas y areniscas, como los localizados al sureste de la sierra El Burro y en la zona comprendida entre Parras de la Fuente y Saltillo.

Esta provincia se caracteriza por sus estructuras geológicas que han dado lugar a la formación de valles y sierras, cuyas orientaciones predominantes son noreste-sureste y este-oeste. Existe un gran número de fallas normales e inversas, así como de pliegues anticlinales y sinclinales que siguen la orientación de las sierras. Las estructuras ígneas se encuentran diseminadas en la parte de la provincia que corresponde al estado y están constituidas por cuerpos intrusivos y derrames de lava. También existen fracturas de diferentes magnitudes, algunas de las cuales han sido rellenadas por soluciones mineralizantes para formar vetas de importancia económica, como es el caso de las minas de barita, fluorita y de minerales metálicos.

En esta provincia es donde se encuentran los más grandes yacimientos de barita, principalmente en los municipios de Múzquiz y Sabinas. También es considerable la producción de fluorita mediante la explotación de numerosos yacimientos localizados en los municipios de Acuña, General Cepeda y Múzquiz.

Existen, además, en los municipios de Ocampo, Viesca, Candela y Castaños yacimientos y explotaciones de plata, plomo, fierro, cobre y estroncio, así como explotaciones de dolomita, fosforita y yeso.

La porción coahuilense de la Provincia de las grandes llanuras de Norteamérica está constituida por rocas sedimentarias en su mayor parte, aunque también existen pequeños afloramientos ígneos, así como una gran cantidad de materiales de aluvión que cubren las grandes llanuras de la zona.

Las estructuras formadas por las rocas de esta provincia son principalmente plegamientos de las rocas sedimentarias cuyos ejes siguen una orientación noroeste-sureste como en los casos del cerro El Veterano y cerro El Movimiento. Existen, además aparatos volcánicos y derrames lávicos como el de Agua Dulce, loma Kakanapo y cerro El Barril, distribuidos principalmente en la región de Sabinas. Las fallas normales y las fracturas, que afectan tanto a las rocas ígneas como a las sedimentarias, siguen patrones orientados, algunos, al noreste-suroeste y otros al noroeste-sureste (INEGI, 2010).

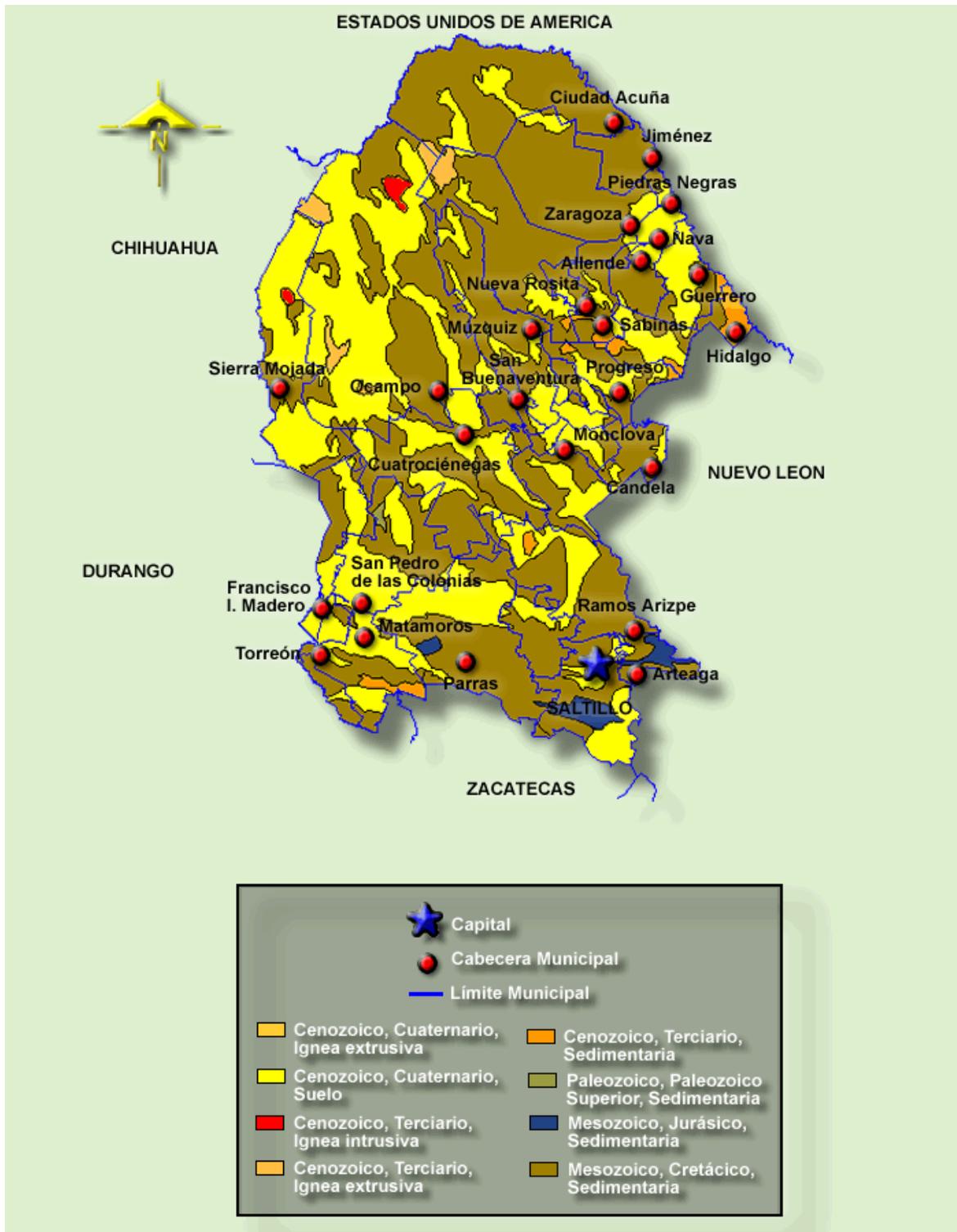


Figura 4.2

Geología del estado de Coahuila. Fuente: INEGI

## **5 Trabajo experimental**

---

### **5.1 Selección del agregado**

Aunque los problemas de falta de fricción en el pavimento se presentan principalmente en el Noreste y Sureste del país, en el presente estudio únicamente se evaluaron agregados procedentes del Noreste, específicamente de los Estados de Nuevo León y Coahuila. Las Unidades Generales de Servicios Técnicos de dichos estados proporcionaron los agregados a evaluar. En el caso de Nuevo León, se evaluaron siete muestras de agregado provenientes de los bancos de materiales indicados en la Figura 15. Con respecto al agregado de Coahuila en un estudio previo se evaluaron 16 muestras de agregado de los cuales se seleccionaron cuatro, dos con valor de pulido alto y dos con valor de pulido bajo, la Figura 16 indica la ubicación de los bancos de materiales.

Para seleccionar el agregado por mezclar, a cada muestra de agregado se les realizaron los ensayos de pulimento acelerado (norma Tex 438-A), sanidad del agregado por el uso de sulfato de magnesio (norma ASTM C 88) y residuo insoluble en ácido (norma Tex 612-J). Los ensayos fueron realizados en muestras de agregado que pasa la malla de 9,0 mm (3/8") y retiene en 6,3 mm (1/4"). Para el ensayo de pulimento acelerado se fabricaron cuatro probetas por cada agregado. A cada agregado se le determinó la fricción inicial con el péndulo británico, de acuerdo con el método de prueba ASTM E 303; y después fueron pulidos durante nueve horas en la máquina de pulimento acelerado de acuerdo con el método de prueba Tex 438-A. Es importante mencionar que al agregado de Nuevo León se le determinó el valor de pulido residual después de nueve horas de pulido y al agregado de Coahuila, durante el ensayo el valor de pulido se determinó a cada hora hasta un total de nueve horas.

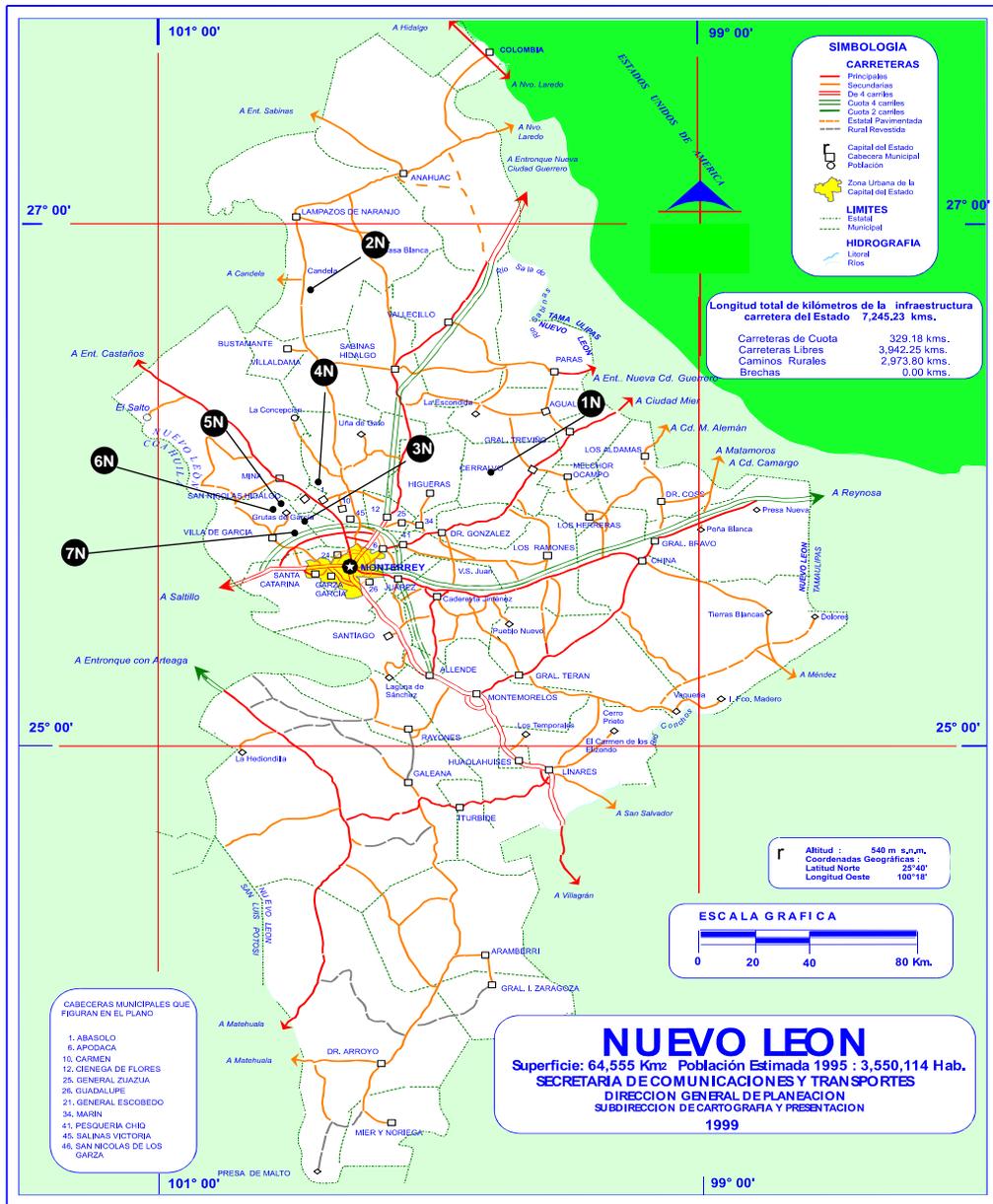


Figura 5.1

Ubicación de los bancos de agregado evaluados del estado de Nuevo León (DGST, 2007)

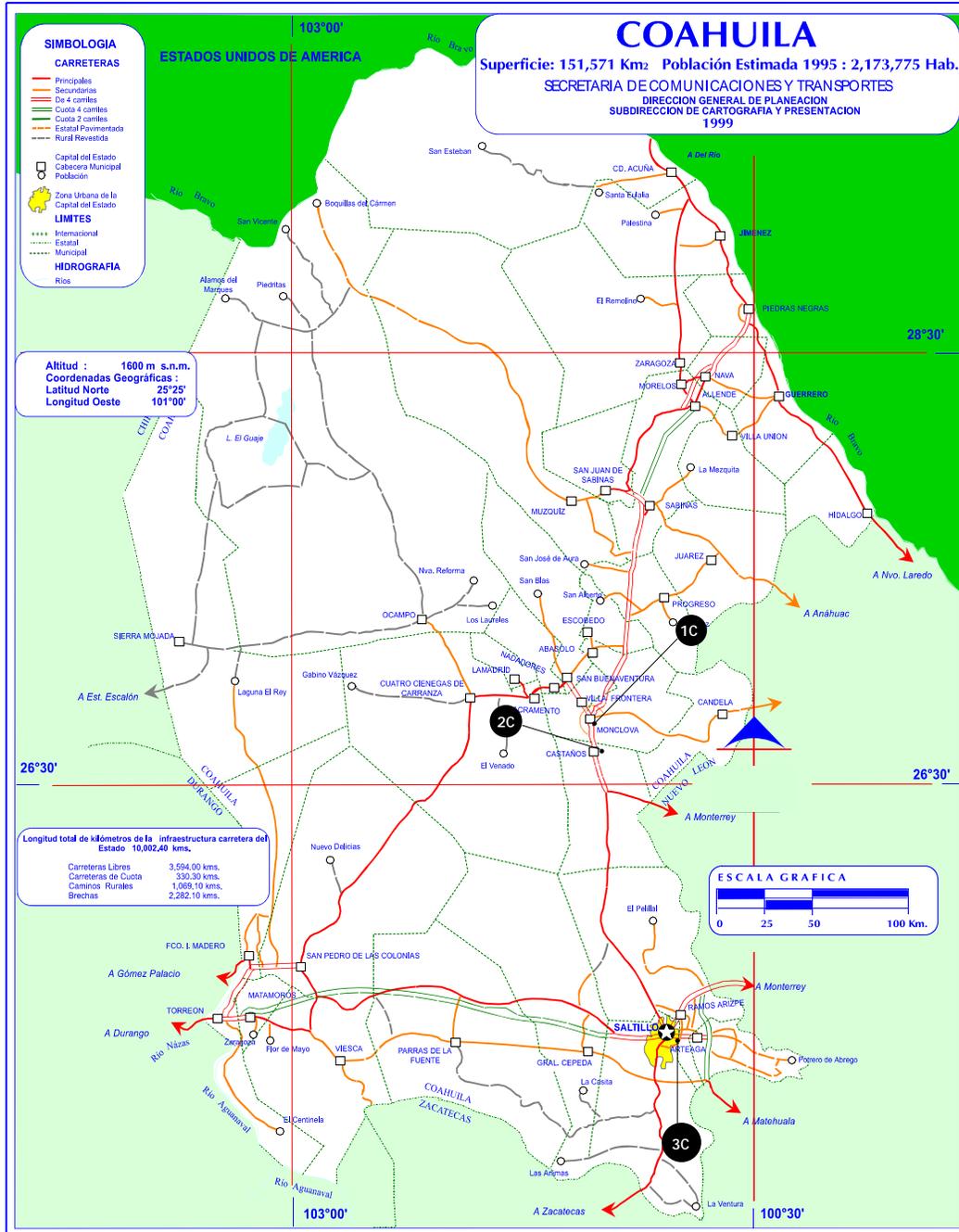


Figura 5.2

### Ubicación de los bancos de agregado evaluados del estado de Coahuila (DGST, 2007)

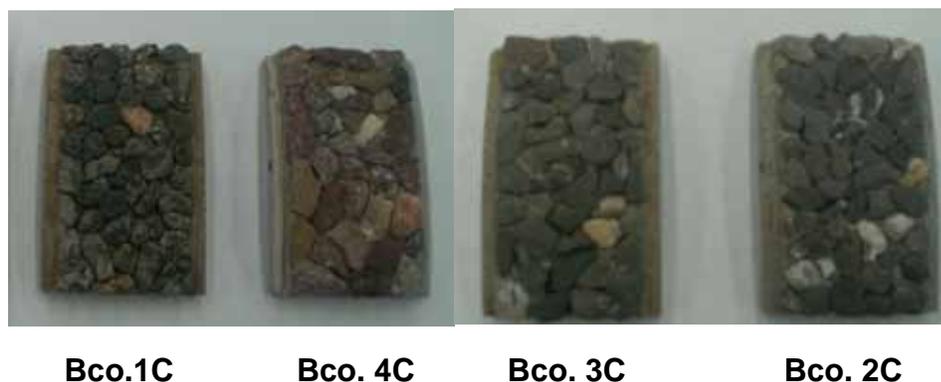
Conviene señalar que antes del pulido los valores medidos son registrados como Número de Péndulo Británico (NPB) y después de nueve horas de pulido como valor de pulido residual (VPR). El NPB es el promedio de cuatro deslizamiento consecutivos con el péndulo y el valor de pulido residual es el valor constante obtenido después de varios deslizamientos consecutivos con el péndulo británico. También, se determinó la tasa de pulido de cada agregado. La tasa de pulido es la

diferencia entre el coeficiente de fricción inicial (NPB) y el valor de pulido residual (VPR), dividido entre el coeficiente de fricción inicial. En la Tabla 5.1 se indican los valores del NPB, el valor de pulido residual, la tasa de pulido, pérdida de sanidad y el residuo insoluble en ácido obtenido para los agregados individuales. En el anexo 1 se encuentran las Tablas con los valores de pulido a cada hora de los agregados seleccionados de Coahuila.

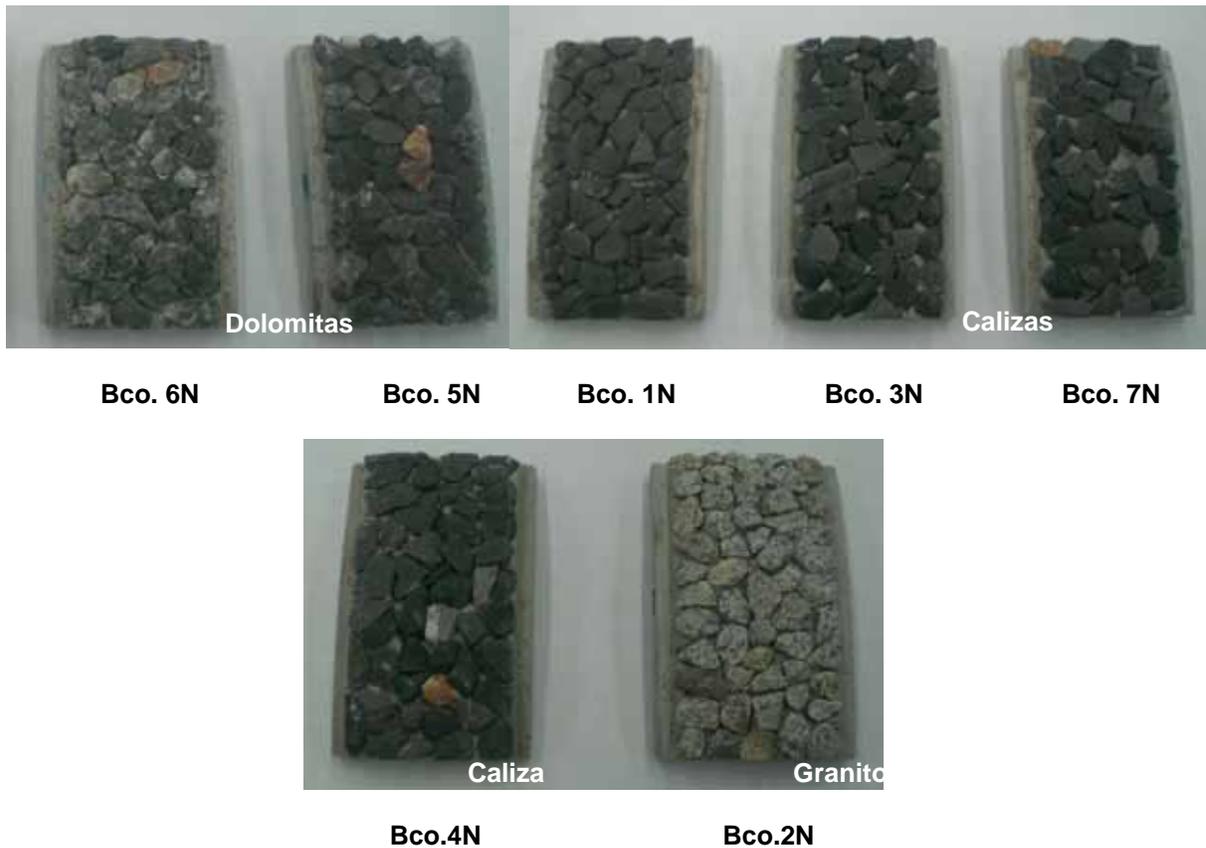
**Tabla 5.1**  
**Resultados los ensayos de laboratorio de los agregados individuales**

Banco	Descripción	NPB	VPR	Tasa de Pulido %	Pérdida de Sanidad %	Residuo Insoluble en ácido %
1N	Caliza	37	24	35	1,0	42
2N	Granito	47	32	32	0,0	100
3N	Caliza	39	22	44	1,0	45
4N	Caliza	37	22	41	1,0	44
5N	Dolomita	43	25	42	2,0	46
6N	Dolomita	44	26	41	3,0	46
7N	Caliza	39	23	41	2,0	44
1C	Escoria (horno arco eléctrico)	43	33	23	0,0	60
2C	Caliza	37	22	40	2,0	2
3C	Caliza	41	23	44	1,0	1
4C	Riolita	44	31	29	4,0	100

Las figuras 17 a 18 muestran especímenes fabricados con el agregado evaluado.



**Figura 5.3**  
**Pastillas fabricadas con agregado de Coahuila**



**Figura 5.4**

**Pastillas fabricadas con agregado de Nuevo León**

Con base en los resultados de pulimento acelerado de los agregados individuales se seleccionaron los bancos 4N y 6N para mezclarlo con el agregado con resistencia al pulido alta del banco de material 2N, del Estado de Nuevo León y de Coahuila, previamente se seleccionaron los agregados de los bancos 2C y 3C y el agregado con valor de pulido alto de los bancos de materiales 1C y 4C.

## 5.2 Mezclas de agregado evaluadas

Para evaluar la mejora de la resistencia al pulido los agregados se mezclaron en diferentes porcentajes. La mezcla de agregados se realizó respecto a la masa del agregado, con excepción de la mezcla de escoria-caliza que se hizo con base a volumen, debido a la diferencia en las gravedades específicas de los agregados. Las proporciones de mezclado usadas fueron 50/50, 60/40, 70/30 y 80/20 por ciento de agregado con valor de pulido residual alto y bajo, respectivamente.

A los agregados individuales y las mezclas se les asignó una nomenclatura y en lo sucesivo se identifican como se indica en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2**  
**Nomenclatura de los agregados y mezclas de agregados**

Banco	Descripción	VPR	Nomenclatura
1C	Escoria (horno de arco eléctrico)	Alto	A1
4C	Riolita	Alto	A2
3C	Caliza	Bajo	B1
2C	Caliza B3	Bajo	B2
2N	Granito	Alto	A3
4N	Caliza	Bajo	
6N	Dolomita	Bajo	B4
1C/3C	Mezcla 50/50 de A1 y B1	---	50/50-1
	Mezcla 60/40 de A1 y B1	---	60/40-1
	Mezcla 70/30 de A1 y B1	---	70/30-1
	Mezcla 80/20 de A1 y B1	---	80/20-1
4C/2C	Mezcla 50/50 de A2 y B2	---	50/50-2
	Mezcla 60/40 de A2 y B2	---	60/40-2
	Mezcla 70/30 de A2 y B2	---	70/30-2
	Mezcla 80/20 de A2 y B2	---	80/20-2
2N/4N	Mezcla 50/50 de A3 y B3	---	50/50-3
	Mezcla 60/40 de A3 y B3	---	60/40-3
	Mezcla 70/30 de A3 y B3	---	70/30-3
	Mezcla 80/20 de A3 y B3	---	80/20-3
2N/6N	Mezcla 50/50 de A3 y B4	---	50/50-4
	Mezcla 60/40 de A3 y B4	---	60/40-4
	Mezcla 70/30 de A3 y B4	---	70/30-4
	Mezcla 80/20 de A3 y B4		80/20-4

En las mezclas de agregado sólo se efectuó el ensayo de pulimento acelerado. Al igual que en los agregados individuales a las mezclas de agregado se les determinó la fricción inicial y después fueron pulidos durante nueve horas en la máquina de pulimento acelerado, de acuerdo con el método de prueba Tex 438-A. A las mezclas de agregado granito/caliza (A3/B3) y granito/dolomita (A3/B4) se les determinó el valor de pulido residual después de nueve horas de pulido; y a las mezclas de agregado escoria/caliza (A1/B1) y riolita/caliza (A2/B2) durante el ensayo, el valor de pulido se determinó a cada hora. Asimismo, se calculó la tasa de pulido de las mezclas de agregado.

La pérdida de sanidad de las mezclas evaluadas, se calculó a partir del porcentaje de pérdida individual de cada componente ponderada con respecto al porcentaje presente en la mezcla y para fines de verificación únicamente se ejecutó el ensayo de sanidad a las mezclas 70/30-3 y 50/50-4.

Los resultados de fricción inicial, valor de pulido residual, tasa de pulido y pérdida de sanidad de las mezclas evaluadas se indican en la Tabla 5.3. En el anexo 1 se pueden consultar las Tablas con los valores de pulido a cada hora.

**Tabla 5.3**  
**Resultados de las mezclas de agregado**

Descripción	Nomenclatura	NPB	VPR	Tasa de Pulido %	Pérdida de sanidad* %
Mezcla 50/50 de A1 y B1	50/50-1	39	25	36	0,5
Mezcla 60/40 de A1 y B1	60/40-1	42	27	36	0,4
Mezcla 70/30 de A1 y B1	70/30-1	43	28	35	0,3
Mezcla 80/20 de A1 y B1	80/20-1	44	30	32	0,2
Mezcla 50/50 de A2 y B2	50/50-2	38	25	34	3,0
Mezcla 60/40 de A2 y B2	60/40-2	42	26	38	3,0
Mezcla 70/30 de A2 y B2	70/30-2	41	27	34	3,0
Mezcla 80/20 de A2 y B2	80/20-2	42	29	31	4,0
Mezcla 50/50 de A3 y B3	50/50-3	40	24	40	0,5
Mezcla 60/40 de A3 y B3	60/40-3	43	25	42	0,4
Mezcla 70/30 de A3 y B3	70/30-3	42	26	38	0,3/1,4**
Mezcla 80/20 de A3 y B3	80/20-3	44	27	39	0,4
Mezcla 50/50 de A3 y B4	50/50-4	45	27	40	1,5/1,3**
Mezcla 60/40 de A3 y B4	60/40-4	43	28	35	1,4
Mezcla 70/30 de A3 y B4	70/30-4	45	29	36	0,9
Mezcla 80/40 de A3 y B4	80/40-4	44	30	32	0,6

\* Estimada a partir del porcentaje de pérdida individual de cada componente ponderada con respecto al porcentaje presente en la mezcla

\*\*Resultado del ensayo de sanidad del agregado por el uso de sulfato de magnesio



## 6 Análisis de resultados

En todos los agregados y mezclas de agregado estudiadas fue encontrado que el valor de pulido residual es alcanzado al final de las 9 horas de pulido.

Como se mencionó anteriormente, al agregado procedente de Coahuila y sus mezclas se les determinó el valor de pulido a cada hora durante el ensayo para evaluar la evolución del valor de pulido con el tiempo. La figura 6.1 muestra la grafica de evolución del valor de pulido con el tiempo de pulido de los agregados individuales, la tendencia general fue que hubo una disminución rápida en el NPB en la primera hora de pulido, lo anterior equivale a que en campo el mayor desgaste de la superficie de rodamiento ocurre en los primeros años de servicio. Después de la primera hora de pulido y hasta la sexta, la disminución del valor de pulido es muy poca y a partir de la séptima y hasta el final del ensayo el valor de pulido es prácticamente constante. En la primer hora, el valor de pulido disminuyó 7 y 13 unidades en el agregado con alto (A1 y A2) y bajo valor de pulido (B1 y B2), respectivamente; de la segunda a la sexta hora, a partir de la cual el valor permanece prácticamente constante, la disminución del valor de pulido fue de dos unidades para todos los agregados.

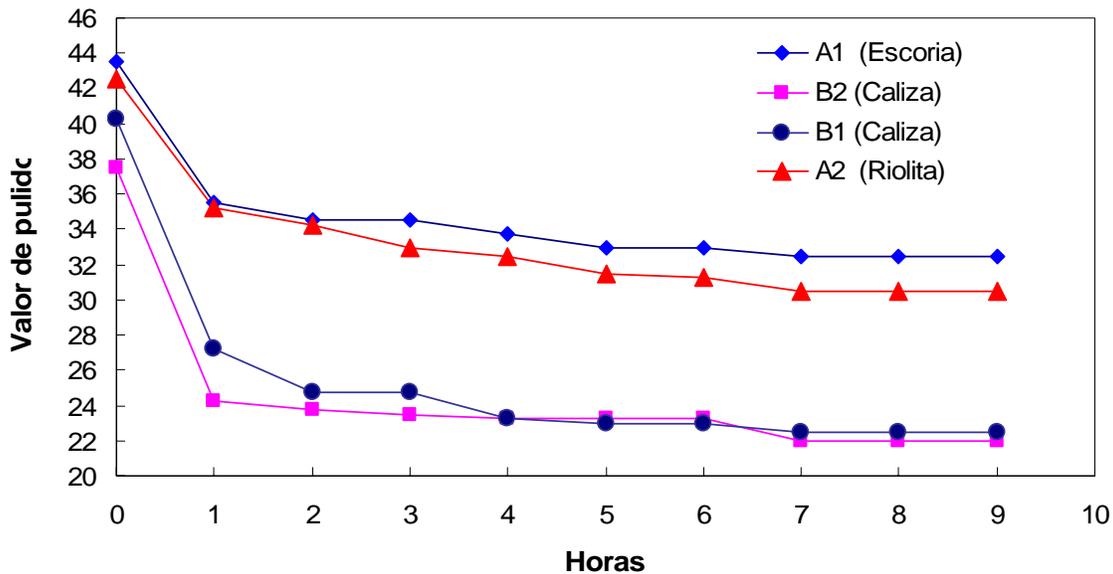
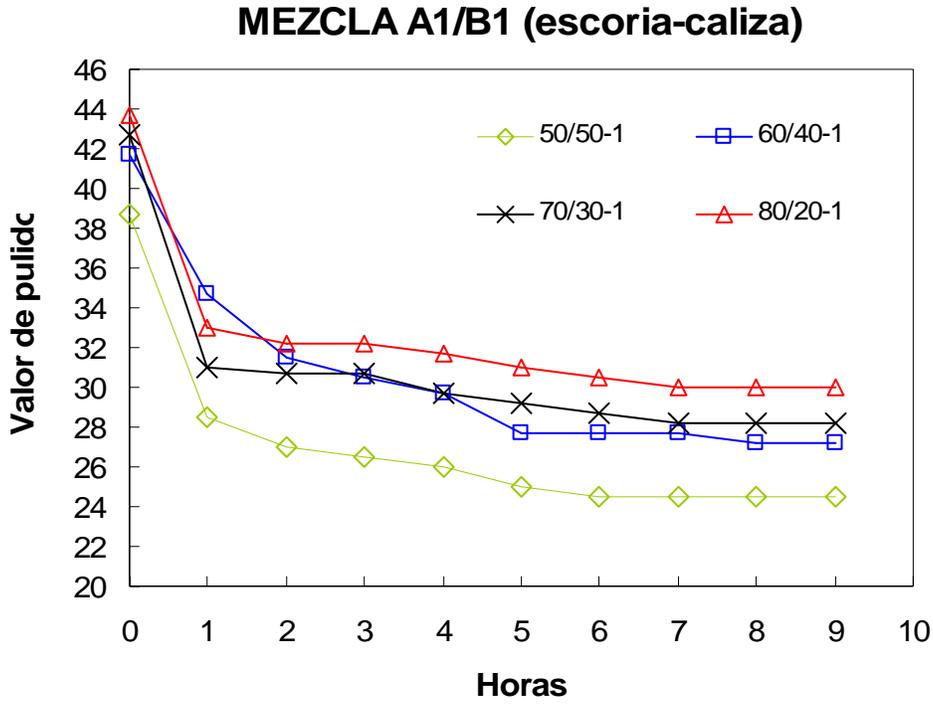
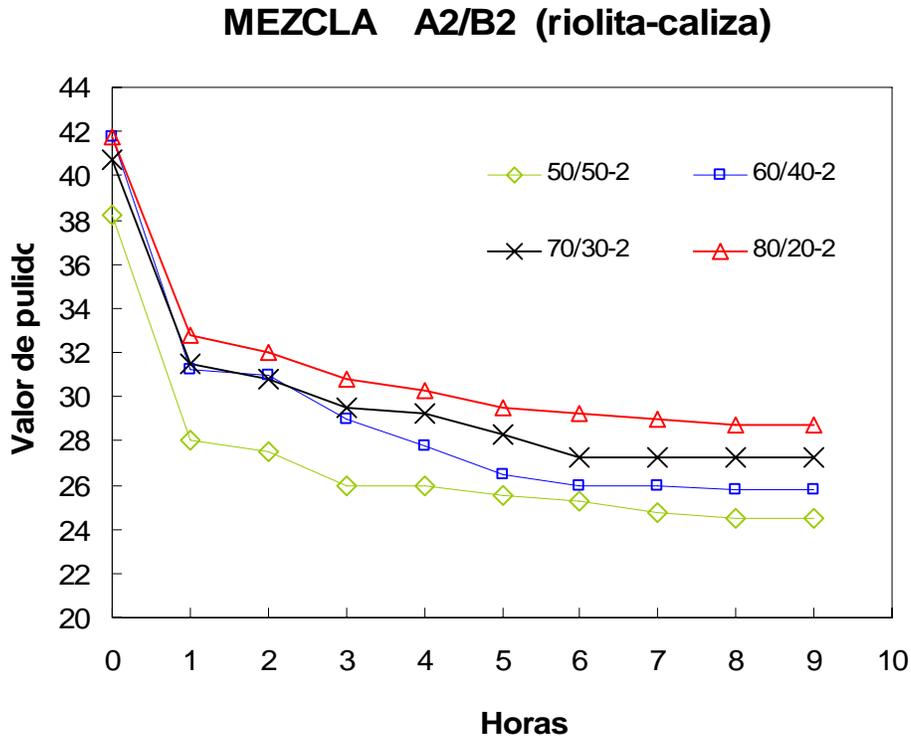


Figura 6.1  
Evolución del valor de pulido de los agregados de Coahuila

En el caso de las mezclas de agregado A1/B1 y A2/B2 la disminución del valor de pulido en la primera hora fue de 10 unidades aproximadamente y menor a uno de la segunda a la sexta hora, figuras 6.2 y 6.3.



**Figura 6.2**  
Evolución del valor de pulido de la mezcla de agregado A1/B1



**Figura 6.3**  
Evolución del valor de pulido de la mezcla de agregado A2/B2

Las figuras 6.4 y 6.5 muestran la evolución de la tasa de pulido de los agregados A1, A2, B1 y B2 y de sus mezclas para cada hora que duró el ensayo. Para los agregados individuales, la tasa de pulido de las calizas en la primera hora fue mayor a 30 % y la tasa de pulido total obtenida superó el 44 %; la escoria y la riolita presentaron una tasa de pulido en la primera hora inferior al 18% y la tasa de pulido total conseguida está por debajo del 30%. En la primer hora la tasa de pulido del agregado calizo es de aproximadamente el doble de la tasa de pulido de la escoria y riolita (agregado resistente al pulido).

Las mezclas de agregado A1/B1 (escoria-caliza) y A2/B2 (riolita-caliza), análogamente a los agregados individuales se pulieron más rápidamente la primera hora y la tasa de pulido total obtenida para ambas mezclas se encuentra en un rango de 31 % a 38%. En las figuras 6.4 y 6.5 puede observarse que la tasa de pulido de las diferentes proporciones de mezclas de agregado se encuentra entre la tasa de pulido del agregado con bajo y alto valor de pulido y la tendencia que presentan es que a medida que se incrementa la proporción de agregado resistente al pulido la tasa de pulido disminuye.

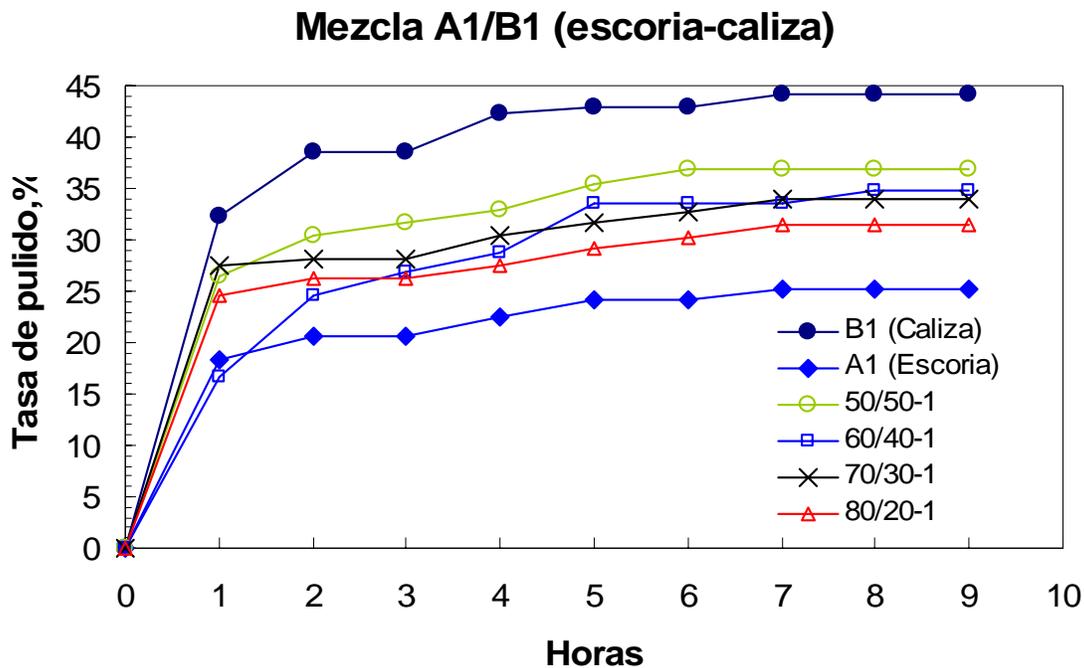


Figura 6.4

Evolución de la tasa de pulido de los agregados individuales y mezclas de agregado A1/B1

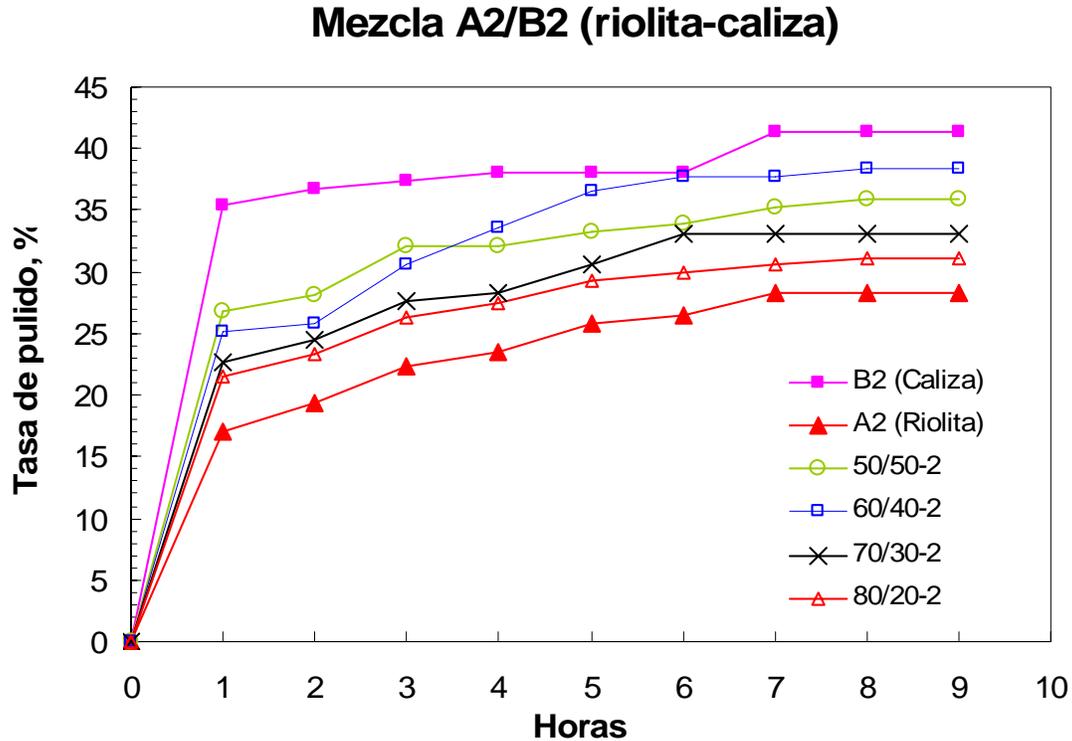


Figura 6.5

#### Evolución de la tasa de pulido de los agregados individuales y mezclas de agregado A2/B2

En lo que se refiere al agregado del estado de Nuevo León sólo se obtuvo la tasa de pulido al final del ensayo. El granito registró una tasa de pulido de 32 % y en las calizas y dolomitas la tasa de pulido fue mayor al 40%. En cuanto a las mezclas de agregado, la mezcla A3/B3 (granito-caliza) mostró tasas de pulido más altas con respecto a la mezcla A3/B4 (granito-dolomita). La tasa de pulido para la mezcla A3/B3 comprende un rango de 38 a 42% mientras que en la mezcla A3/B4 es de 32 a 40 %.

En las figuras 6.6 y 6.7 se presentan gráficamente las tasas de pulido de las proporciones evaluadas para las mezclas A3/B3 (granito-caliza) y A3/B4 (granito dolomita). La tendencia que manifiestan es que a medida que se incrementa la proporción de agregado resistente al pulido la tasa de pulido disminuye.

**Mezcla A3/B3  
(granito-caliza)**

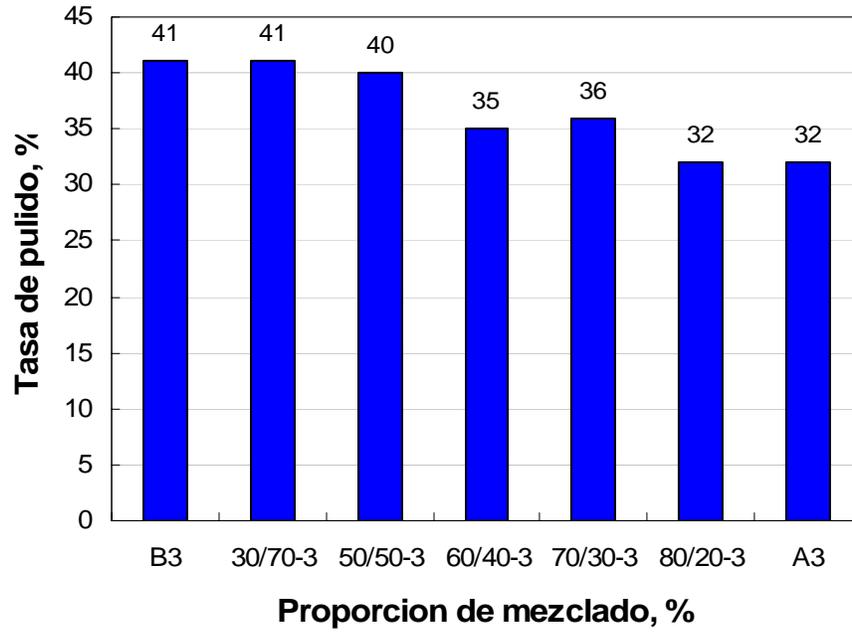


Figura 6.6

Tasa de pulido de la mezcla A3/B3

**Mezcla A3/B4  
(granito-dolomita)**

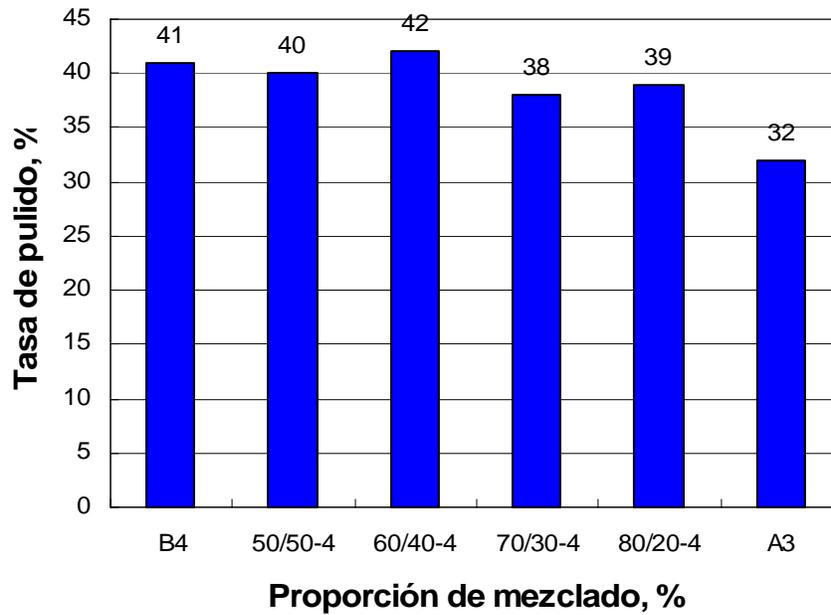
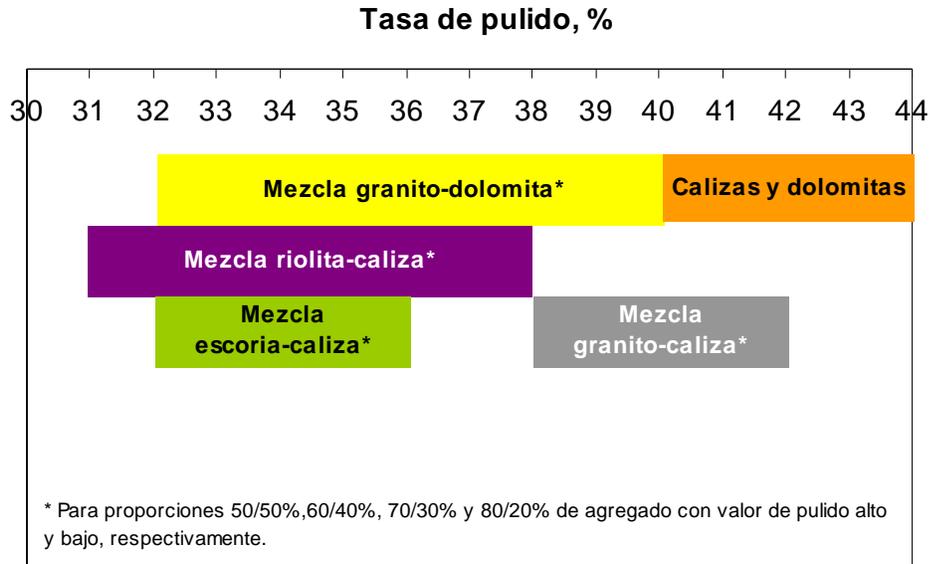


Figura 6.7

Tasa de pulido de la mezcla A3/B4

En general, el valor de pulido de las calizas se encuentra en un rango de 20 a 24, las dolomitas presentaron un valor de pulido de 25 a 26 y el valor de pulido de la riolita, escoria y granito es mayor a 30.

En lo que se refiere a la tasa de pulido para las calizas y dolomitas fue mayor al 40% y para el resto de los agregados (riolita, granito y escoria) menor al 30%. La figura 6.8 indica los rangos de la tasa de pulido para los agregados y las mezclas evaluadas.



**Figura 6.8**

**Rangos de la tasa de pulido de los agregados y mezclas evaluadas**

En cuanto al efecto de la proporción de mezclado en el valor de pulido, en todas las mezclas evaluadas el valor de pulido residual se incrementa con el aumento de la proporción de agregado con valor de pulido alto. En las figuras 6.9 a 6.12 puede verse que en la mezcla A1/B1 el valor de pulido residual se incrementa aproximadamente 2 unidades, en las mezclas A2/B2, A3/B3 y A3/B4 aumenta una unidad por cada incremento de 10% en la proporción de agregado con valor de pulido alto. Para las mezclas A1/B1 y A2/B2 el incremento máximo en el valor de pulido es de 7 unidades con la proporción 80%-20% y en las mezclas A3/B3 y A3/B4 el incremento máximo en el valor de pulido es de 4 y 5 unidades, respectivamente, también con la proporción 80%-20%.

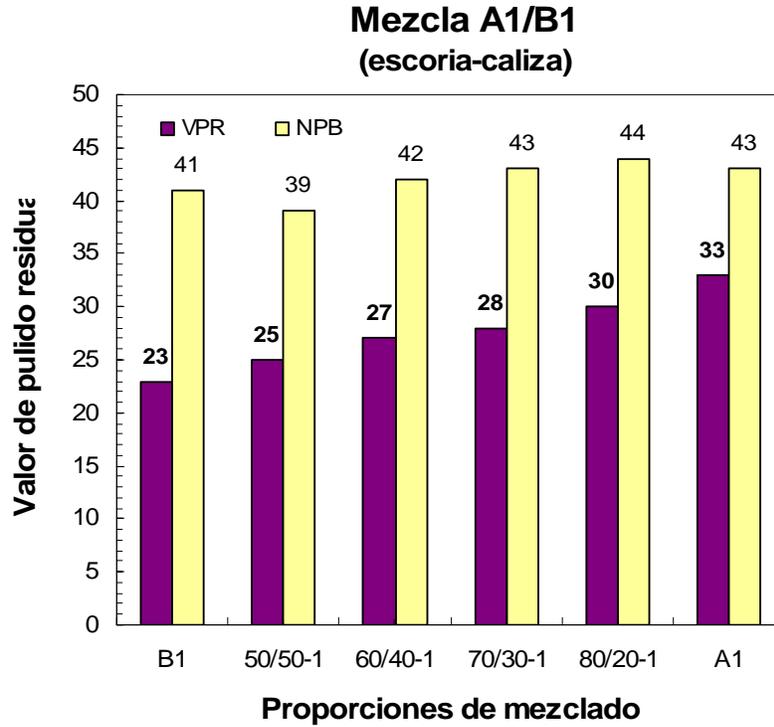


Figura 6.9

Incremento del valor de pulido residual mezcla A1/B1

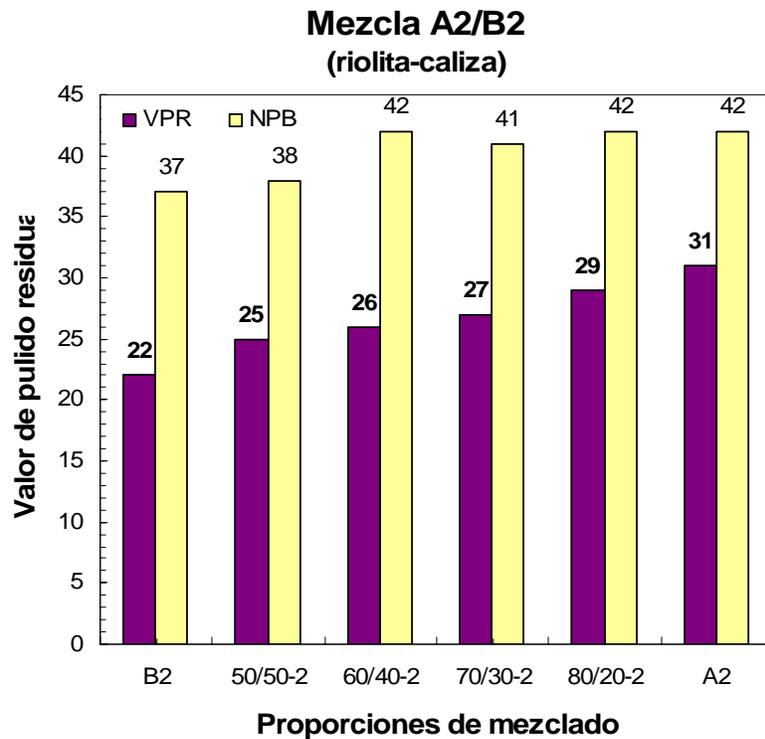


Figura 6.10

Incremento del valor de pulido residual mezcla A2/B2

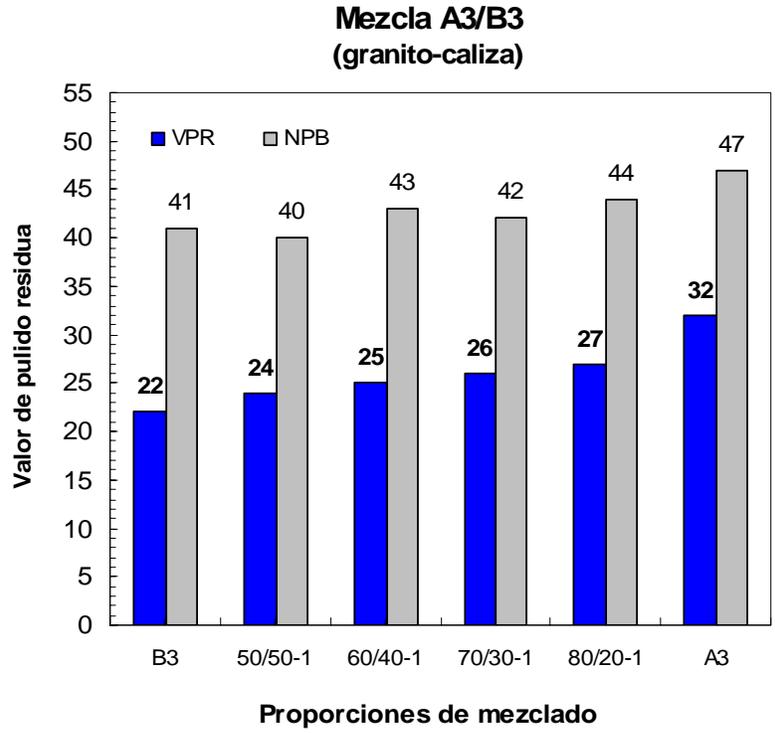


Figura 6.11

Incremento del valor de pulido residual mezcla A3/B3

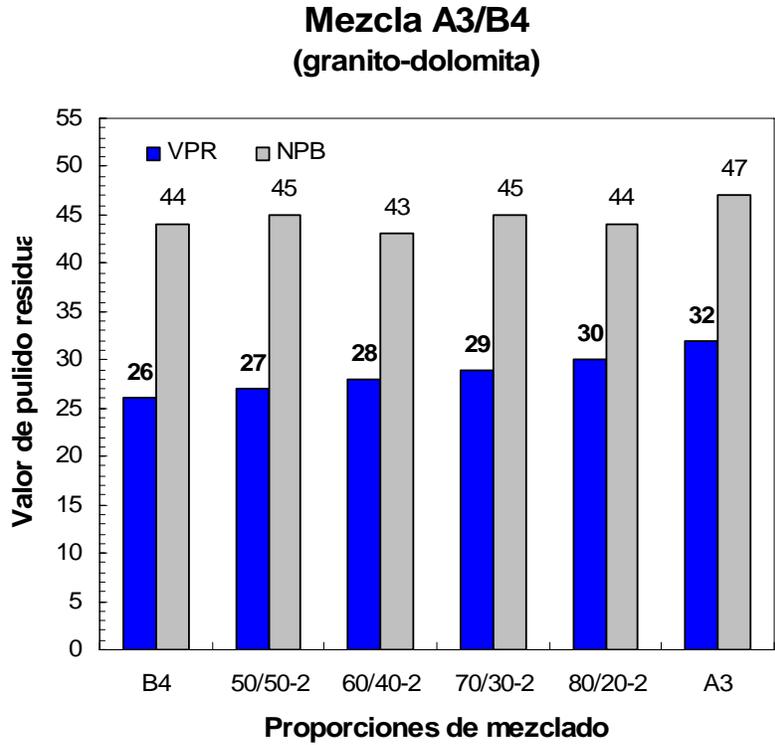


Figura 6.12

Incremento del valor de pulido residual mezcla A3/B4

Como pudo verse en capítulos anteriores, los ensayos que se llevaron a cabo en el agregado fueron realizados de acuerdo con las normas del Departamento de Transporte de Texas (TexDOT), por lo que para definir si las mezclas de agregado son resistentes al pulido se consideró el criterio de clasificación del agregado resistente al pulido de dicho organismo, denominado Sistema de Clasificación del Agregado (SAC, por sus sigla en inglés). En este sistema los agregados son clasificados en cuatro grupos A,B,C y D, con base en el valor de pulido residual y la pérdida de sanidad por el uso de sulfato de magnesio. El valor de pulido depende del volumen de tránsito durante la vida de diseño de la carretera, para volúmenes de tránsito altos se requiere un agregado clase A.

La grafica de la figura 6.13 presenta la clasificación de los agregados y mezclas de agregados evaluados. Tanto los agregados individuales como en las mezclas la pérdida de sanidad es menor al 5%, Tablas 5.1 y 5.3, por lo que para fines de clasificación del agregado se considera una pérdida de sanidad del 5%.

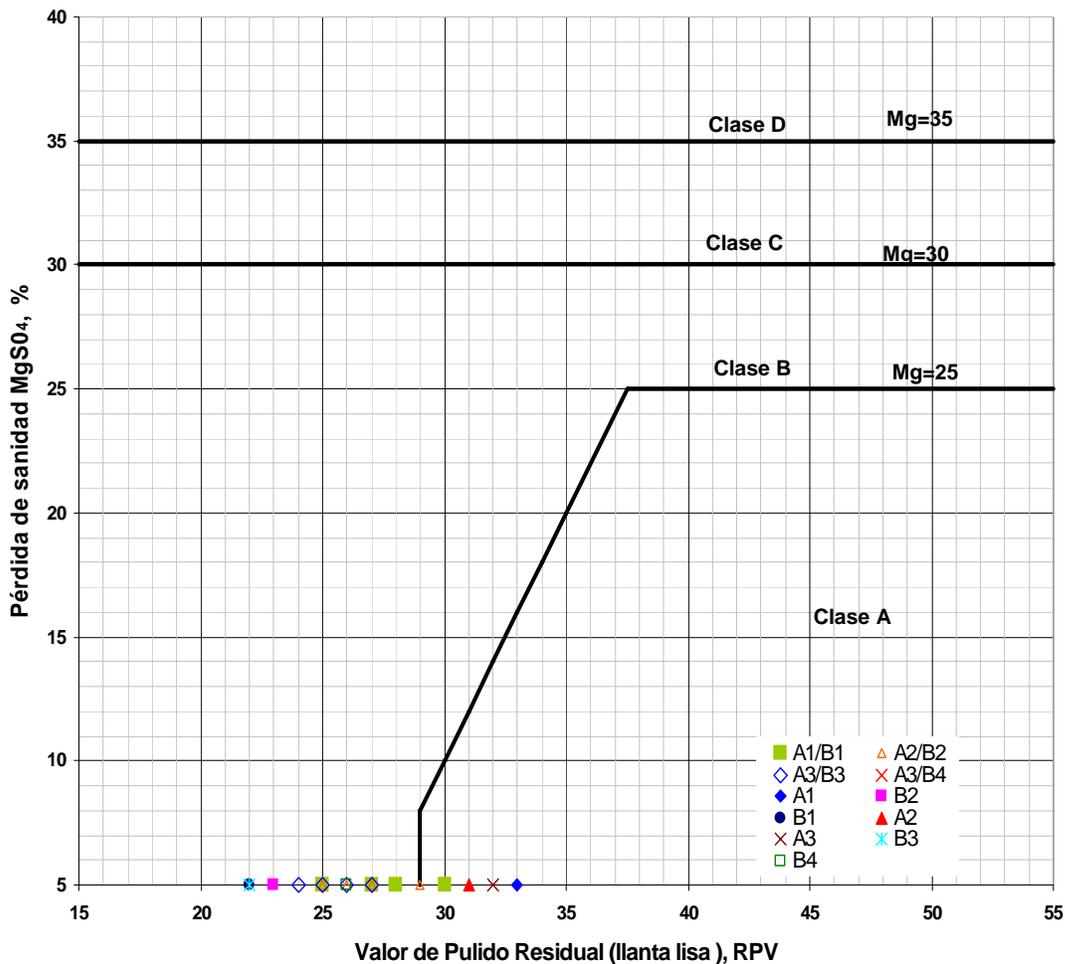


Figura 6.13

Gráfica de clasificación del agregado resistente al pulido, TxDOT (Masad et al, 2009)

De acuerdo con lo anterior, las mezclas de agregado escoria-caliza y granito-dolomita en una proporción 80/20 cumplen con el criterio del TxDOT y se pueden considerar resistentes al pulido. La mezcla riolita-caliza cumple limitadamente dicho criterio y la mezcla granito-caliza no cumple el criterio para volúmenes de tránsito altos.

Cabe señalar que el criterio de clasificación expuesto anteriormente fue utilizado hasta febrero del 2006. Actualmente para clasificar el agregado resistente al pulido emplean un nuevo método de clasificación basado en los resultados de sanidad por el uso de sulfato de magnesio y del Sistema de Imagen del Agregado (AIMS, por sus siglas en inglés), más sensible que el anterior, pues permite distinguir mejor los agregados resistentes al pulido (Masad et. al., 2009).

Finalmente, para establecer la correlación entre el valor de pulido residual y las proporciones de mezclado se realizó una regresión lineal con los resultados de los ensayos. Las figuras 32 a 35 presentan las ecuaciones obtenidas, con las cuales puede estimarse el valor de pulido residual para una determinada proporción de agregado con valor de pulido alto.

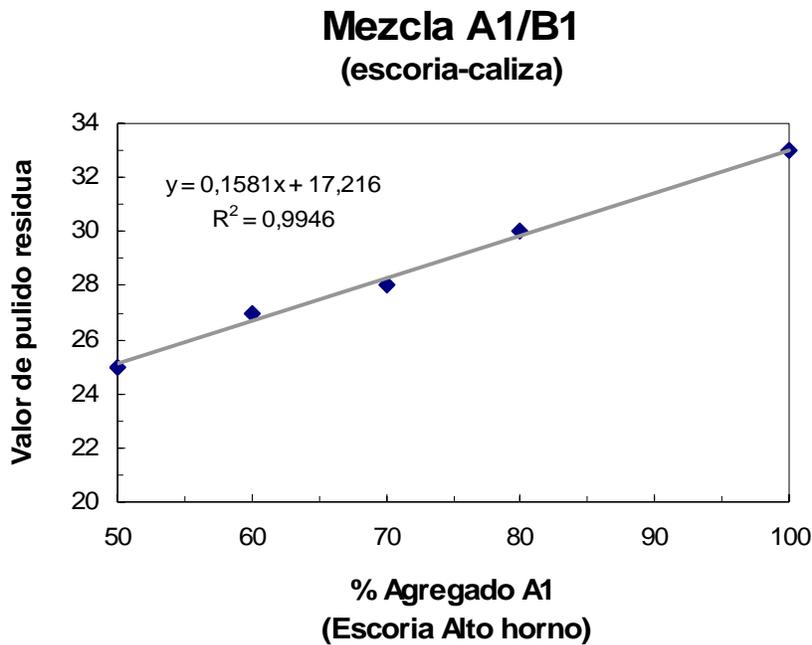


Figura 6.14

Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A1/B1)

### Mezcla A2/B2 (riolita-caliza)

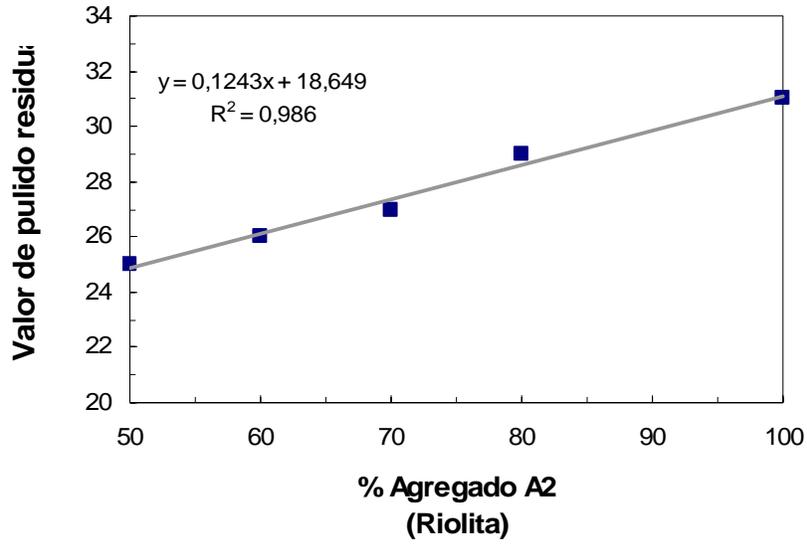


Figura 6.15

Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A2/B2)

### Mezcla A3/B3 (granito-caliza)

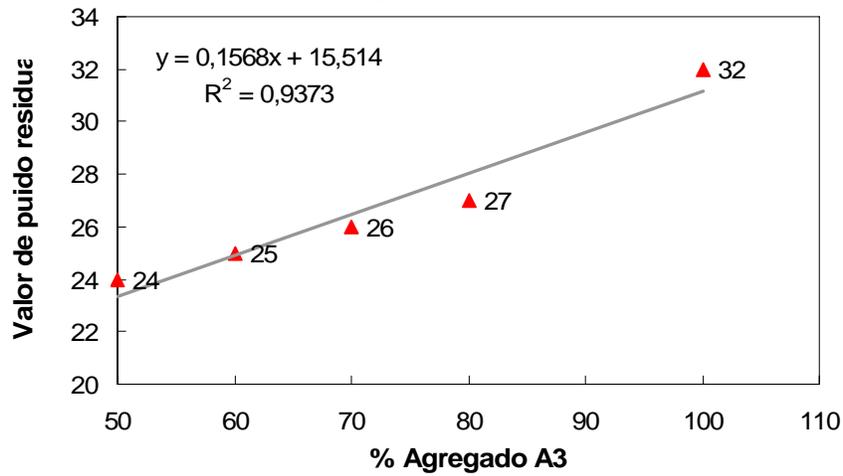


Figura 6.16

Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A3/B3)

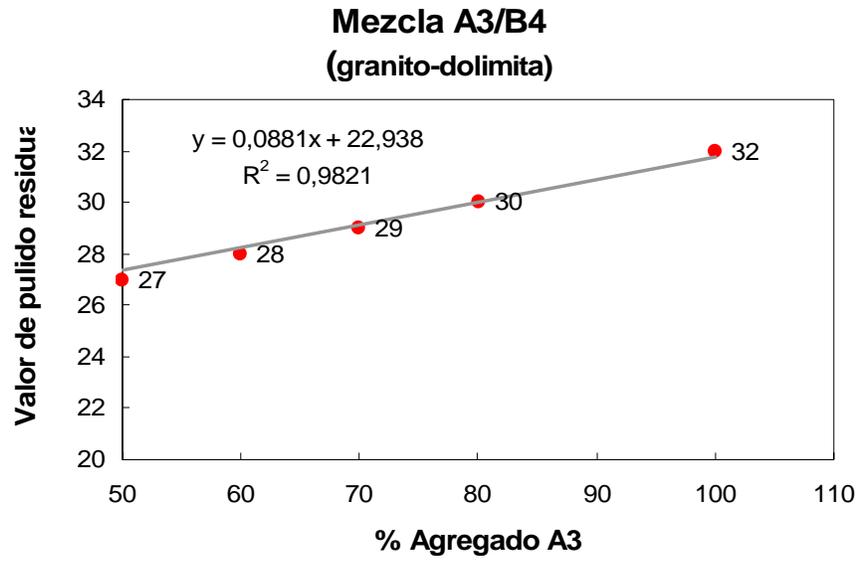


Figura 6.17

Correlación entre el valor de pulido residual y la proporción de mezclado (mezcla A3/B4)

## 7 Conclusiones

---

En el presente estudio se evaluaron las características friccionantes de agregados y mezclas de agregado de los estados de Coahuila y Nuevo León a través de los ensayos de residuo insoluble en ácido, sanidad del agregado por el uso de sulfato de magnesio y pulimento acelerado de acuerdo con la normativa del Departamento de Transporte de Texas. Las conclusiones obtenidas se mencionan a continuación.

- Los agregados calizos presentaron residuos insolubles en ácido menores al 50% lo que indica que el agregado está constituido, en un porcentaje considerable, por carbonato de calcio y son muy susceptibles al pulido. La riolita, granito y escoria registraron valores mayores al 50%.
- La pérdida de sanidad de todos los agregados evaluados fue inferior al 5% lo que señala que el agregado es durable.
- El ensayo de pulimento acelerado manifestó que el valor de pulido de las calizas se encuentra en un rango de 20 a 24, las dolomitas presentaron un valor de pulido de 25 a 26 y el valor de pulido de la riolita, escoria y granito es mayor a 30.
- Para evaluar la evolución del pulido se midió el valor de pulido del agregado de Coahuila a cada hora durante el ensayo de pulimento acelerado y se determinó que en la primera hora de pulido la tasa de pulido para la caliza y las mezclas escoria-caliza y riolita-caliza fue mayor al 30% y, para la escoria y riolita menor al 18%.
- La tasa de pulido total (después de nueve horas de pulido) para las calizas y dolomitas fue mayor al 40%; y para la riolita, granito y escoria menor al 30%. Las mezclas evaluadas presentaron una tasa de pulido en un rango de 30 a 40% y la tendencia es que, a medida que se incrementa la proporción de agregado resistente al pulido, la tasa de pulido disminuye.
- Las mezclas de agregado presentaron un mejoramiento en el valor de pulido, por cada incremento de 10% en la proporción de agregado con valor de pulido alto, la mezcla escoria-caliza se incrementó aproximadamente 2 unidades y las mezclas riolita-caliza, granito- dolomita y granito-caliza aumentaron una unidad en el valor de pulido. Esta última, a pesar de que mostró un mejoramiento en el valor de pulido, no fue suficiente para considerarla una mezcla resistente al pulido.

- De acuerdo con el criterio de clasificación del agregado superficial resistente al pulido (SAC, por sus siglas en inglés) del TxDOT, actualmente en desuso, la riolita, granito y escoria son clasificados como agregados resistentes al pulido y la caliza y dolomita como agregados susceptibles al pulido. En cuanto a las mezclas de agregado, la proporción 80/20 de agregado, con alto y bajo valor de pulido respectivamente, se considera resistente al pulido para el caso de las mezclas escoria-caliza, y granito-dolomita. Las mezclas riolita-caliza cumple limitadamente dicho criterio y la mezcla granito-dolomita no cumple el criterio para volúmenes de tránsito altos.
- Para validar los resultados obtenidos en este estudio es necesario monitorear el comportamiento del agregado en campo a través de mediciones de fricción.
- En el presente estudio el agregado fue evaluado con respecto a su resistencia al deslizamiento, también es necesario realizar otros ensayos que determinen su calidad y la compatibilidad con el asfalto para garantizar que la mezcla asfáltica sea resistente y durable. La evaluación del agregado es sólo una de las etapas que comprende el proceso de diseño de mezclas asfálticas.
- Las ecuaciones de regresión obtenidas para estimar el valor de pulido residual de las mezclas de agregado son válidas para agregados con características mineralógicas similares a las del agregado evaluado en este estudio.

# Bibliografía

---

Ashby Joseph T, Blended Aggregate Study Final Report, Louisiana Highway Research, Report No. FHWA/LA-80/145, (March, 1980).

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)

Hall Jim W Dr et al, Guide for pavement friction (2009)

Henderson R, Cook G, Cenek P, Patrick J. Potter S, The effect of crushing on the skid resistance of chipseal roads, Opus Central Laboratories, Land Transport New Zealand Research Report 295, New Zealand (2006)

Liang Robert Y, Chyi Lindgren, Polishing and Friction characteristics of aggregates produced in Ohio, Report No. OH-2000/001, Department of Civil Engineering and Department of Geology, University of Akron, Akron Ohio (January, 2000).

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).

Liang Robert Y, Continuing Investigation of Polishing and Friction Characteristics of Limestone Aggregate in Ohio., Report No. OH-2009/10, University of Akron, Akron Ohio, (September 2009).

Masad Eyad, Arash Rezaei, Arif Chowdhury and Pat Harris, Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics, Report No.05627-1, Texas Transportation Institute (August 2009).

Texas Department of Transportation, Tex-612-J Acid Insoluble Residue for Fine Aggregate, 600-J Chemical Test Procedure, Revised April del 2006

Texas Department of Transportation, Tex-438-A Accelerated Polish Test for Coarse Aggregate, 400-A Concrete Test Procedure, Revised July del 2005.

ASTM C88, Standard Test Method for Soundness of Aggregate by use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, ASTM designation C 88-99a (2005)

Instituto Nacional de Estadística y de geografía, México. Mapa del estado de Nuevo León. [en línea]. Obtenido de:  
<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/nl/geolo.cfm?c=444&e=26>

Instituto Nacional de Estadística y de geografía, México. Mapa del estado de Coahuila. [en línea]. Obtenido de:  
<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/coa/geolo.cfm?c=444&e=28>

# ANEXO

Tabla A1. NPB y valores de pulido para el agregado B1

Probeta	lecturas	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	42	33	28	30	27	26	26	26	26	26
	2	42	33	27	29	26	25	25	25	25	25
	3	41	33	26	27	25	25	24	24	24	24
	4	40	31	25	26	24	24	24	23	23	23
	NPB	41									
	Valor de pulido		28	25	25	24	23	23	22	22	22
2	1	40	31	27	29	26	25	25	25	24	24
	2	39	30	26	28	25	24	24	24	23	23
	3	39	29	25	27	24	24	23	23	23	23
	4	39	28	25	25	24	24	23	23	22	22
	NPB	39									
	Valor de pulido		28	24	24	23	23	23	22	22	22
3	1	43	31	29	30	26	25	26	26	26	26
	2	41	30	28	29	26	24	25	25	25	25
	3	41	29	27	28	25	23	24	24	24	24
	4	40	28	26	26	24	23	24	24	23	23
	NPB	41									
	Valor de pulido		26	25	25	23	23	23	23	23	23
4	1	41	31	29	29	26	25	25	25	25	25
	2	40	30	27	28	26	24	24	24	24	25
	3	40	29	26	27	25	23	24	24	24	24
	4	40	29	25	26	24	23	23	24	24	24
	NPB	40									
	Valor de pulido		27	25	25	23	23	23	23	23	23
<b>NPB</b>	41										
<b>VPR</b>		27	25	25	23	23	23	23	23	<b>23</b>	

Tabla A2. Valores de pulido para el agregado B2

Probeta	lecturas	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	38	29	26	26	24	26	26	25	25	25
	2	37	28	25	25	23	25	25	24	24	24
	3	37	27	24	25	23	24	24	23	23	23
	4	37	26	24	24	23	24	24	22	22	22
	NPB	37									
	Valor de pulido		24	23	23	23	23	23	23	21	21
2	1	38	27	26	26	24	26	26	25	25	24
	2	38	26	25	25	23	25	25	24	24	24
	3	37	24	24	24	23	24	24	23	23	23
	4	36	24	24	24	23	24	23	23	23	22
	NPB	37									
	Valor de pulido		23	23	23	23	23	23	23	21	21
3	1	39	29	26	26	25	25	25	25	25	25
	2	38	28	26	25	24	24	25	24	24	24
	3	37	27	25	25	23	23	24	24	23	23
	4	36	26	25	24	23	23	24	23	23	23
	NPB	38									
	Valor de pulido		24	23	23	23	23	23	23	23	23
4	1	39	29	29	27	27	26	26	26	26	26
	2	38	28	28	26	26	25	25	25	25	25
	3	37	27	27	26	26	24	25	24	24	24
	4	37	26	27	25	25	24	24	23	23	23
	NPB	38									
	Valor de pulido		26	26	25	24	24	24	24	23	23
<b>NPB</b>	<b>37</b>										
<b>VPR</b>		24	24	24	23	23	23	22	22	<b>22</b>	

Tabla A3. Valores de pulido para el agregado A1

Probetas	lecturas	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	44	37	35	34	35	35	33	34	34	34
	2	44	36	34	34	34	34	32	33	33	33
	3	44	36	34	33	33	33	32	32	32	32
	4	43	36	34	33	33	32	32	32	32	32
	NPB	44									
	Valor de pulido		35	33	33	31	31	31	31	31	31
2	1	44	39	37	37	36	35	35	34	34	34
	2	43	38	36	36	36	34	34	34	34	34
	3	43	38	36	36	35	34	34	33	32	32
	4	42	37	36	36	35	34	33	33	32	32
	NPB										
	Valor de pulido	43	36	35	35	35	33	33	32	32	32
3	1	44	39	38	38	36	35	35	35	35	35
	2	43	38	37	37	35	34	34	34	34	34
	3	43	37	36	36	34	34	34	34	33	33
	4	42	37	35	36	34	33	33	33	33	33
	NPB	43									
	Valor de pulido		35	35	35	34	33	33	33	33	33
4	1	44	37	39	36	37	37	37	36	36	36
	2	44	36	37	36	36	36	36	35	34	34
	3	43	36	37	36	36	36	35	34	34	34
	4	43	36	36	35	36	36	35	34	34	34
	NPB	44									
	Valor de pulido		36	35	35	35	35	35	34	34	34
<b>NPB</b>	<b>43</b>										
<b>VPR</b>		36	35	35	34	33	33	33	33	<b>33</b>	

Tabla A4. Valores de pulido para el agregado A2

Probeta	lecturas	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	42	36	36	35	35	34	34	34	33	33
	2	42	36	35	34	34	33	33	33	33	32
	3	42	35	35	34	34	33	33	32	32	32
	4	41	35	35	34	33	32	33	32	32	32
	NPB	42									
	Valor de pulido		35	34	33	32	31	31	31	31	31
2	1	44	36	36	34	34	34	34	33	33	34
	2	43	36	36	34	34	33	33	33	32	32
	3	43	36	35	34	34	33	33	32	32	32
	4	42	35	35	33	33	32	32	32	31	31
	NPB	43									
	Valor de pulido		35	34	33	33	32	31	30	30	30
3	1	42	36	36	34	34	34	33	33	33	33
	2	42	36	36	34	34	33	33	32	32	32
	3	41	36	35	34	34	33	32	32	32	32
	4	41	35	35	33	34	32	32	32	31	31
	NPB	42									
	Valor de pulido		35	34	33	32	31	31	30	30	30
4	1	43	37	36	34	34	34	34	34	33	34
	2	43	37	36	34	34	34	33	33	32	32
	3	42	36	36	34	34	33	33	32	32	31
	4	42	36	35	33	34	32	32	32	31	31
	NPB	43									
	Valor de pulido		36	35	33	33	32	32	31	31	31
<b>NPB</b>		<b>42</b>									
<b>VPR</b>			35	34	33	33	32	31	31	31	<b>31</b>

Tabla A5. Valores de pulido mezcla 50/50-1

probetas	lecturas	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	38	31	29	29	26	26	25	26	27	27
	2	38	30	28	28	25	25	24	25	25	25
	3	37	29	27	27	24	24	24	24	25	25
	4	37	28	27	26	24	24	23	24	24	24
	NPB	38									
	Valor de pulido		27	26	25	24	24	23	23	23	23
2	1	39	32	31	30	28	29	26	27	28	28
	2	39	31	31	29	27	28	26	26	27	27
	3	38	30	30	29	27	27	25	25	26	26
	4	38	29	29	28	26	27	24	24	25	25
	NPB	39									
	Valor de pulido		29	27	26	26	25	24	24	24	24
3	1	40	33	31	31	30	29	29	29	29	29
	2	39	32	29	29	29	29	28	28	28	28
	3	38	31	29	29	28	28	27	27	27	27
	4	38	30	29	29	27	27	26	27	26	26
	NPB	39									
	Valor de pulido		29	28	28	27	26	26	26	26	26
4	1	40	33	30	30	29	28	27	27	28	28
	2	39	32	29	29	28	27	26	26	27	27
	3	39	31	28	29	28	26	26	25	26	26
	4	39	30	27	28	27	26	25	25	26	26
	NPB	39									
	Valor de pulido		29	27	27	27	25	25	25	25	25
<b>NPB</b>		<b>39</b>									
<b>VPR</b>			29	27	27	26	25	25	25	25	<b>25</b>

Tabla 8. Valores de pulido mezcla 60/40-1

probeta	lectura	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	43	38	34	33	33	32	32	31	30	30
	2	42	37	33	33	32	31	31	30	29	29
	3	41	36	32	32	31	30	30	30	28	28
	4	41	35	31	31	30	29	29	29	27	27
	NPB	42									
	Valor de pulido		34	30	30	29	27	27	27	26	26
2	1	44	38	35	34	34	31	32	33	33	33
	2	43	38	34	34	33	31	31	32	32	32
	3	41	37	34	33	32	31	31	31	31	31
	4	41	37	34	33	32	30	30	30	29	29
	NPB	42									
	Valor de pulido		36	33	32	31	29	29	29	29	29
3	1	41	37	34	31	32	30	27	29	30	30
	2	41	37	33	30	31	29	28	28	29	29
	3	40	36	33	30	30	28	27	27	28	28
	4	39	36	32	29	29	27	27	27	27	27
	NPB	40									
	Valor de pulido		34	31	29	28	26	26	26	25	25
4	1	44	38	34	34	34	33	33	33	33	33
	2	43	37	34	34	33	32	32	32	32	32
	3	42	37	33	33	32	31	31	31	31	31
	4	42	36	33	32	32	30	30	30	30	30
	NPB	43									
	Valor de pulido		35	32	31	31	29	29	29	29	29
<b>NPB</b>		<b>42</b>									
<b>VPR</b>			35	32	31	30	28	28	28	27	<b>27</b>

**Tabla 9. Valores de pulido mezcla 70/30-1**

probeta	lectura	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	42	33	34	34	31	31	29	29	31	31
	2	41	32	33	33	30	30	28	28	30	30
	3	40	31	32	32	30	29	27	27	29	29
	4	43	30	31	31	30	29	27	27	28	28
	NPB	42									
	Valor de pulido		30	30	30	29	28	27	26	27	27
2	1	44	34	34	34	33	32	32	33	34	33
	2	43	34	34	33	32	31	31	32	32	32
	3	42	33	33	33	31	30	31	30	31	31
	4	42	33	32	32	31	30	30	30	30	30
	NPB	43									
	Valor de pulido		31	31	31	29	29	29	29	29	29
3	1	43	33	33	33	33	31	30	29	31	31
	2	43	32	32	32	32	30	29	27	29	29
	3	42	31	31	31	32	30	28	26	28	28
	4	42	31	30	30	31	29	28	26	27	27
	NPB	43									
	Valor de pulido		30	30	30	29	28	27	26	26	26
4	1	44	35	35	35	33	35	34	34	35	34
	2	43	35	34	34	32	34	33	33	34	34
	3	43	34	34	34	32	34	33	32	33	33
	4	43	34	33	33	31	33	33	31	33	33
	NPB	43									
	Valor de pulido		33	32	32	30	32	32	31	31	31
<b>NPB</b>	<b>43</b>										
<b>VPR</b>		31	31	31	29	29	29	28	28	<b>28</b>	

Tabla 10. Valores de pulido mezcla 80/20-1

probeta	Lectura	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	44	34	34	33	32	33	34	32	33	33
	2	43	33	33	32	32	32	33	32	32	32
	3	43	33	32	31	31	31	32	31	31	31
	4	43	32	31	30	30	30	30	29	30	30
	NPB	43									
	Valor de pulido		32	30	30	30	29	29	29	29	29
2	1	45	35	34	36	34	34	33	34	34	33
	2	44	34	34	36	33	33	32	33	33	33
	3	44	34	33	35	33	32	31	32	33	33
	4	44	33	33	34	32	31	31	31	32	32
	NPB	44									
	Valor de pulido		33	33	33	32	31	31	31	31	31
3	1	44	34	34	35	34	34	33	30	31	30
	2	44	33	34	33	34	33	32	29	30	30
	3	43	33	33	33	33	32	30	28	29	29
	4	43	33	32	33	33	32	30	27	28	28
	NPB	44									
	Valor de pulido		33	33	33	32	31	29	28	28	28
4	1	45	36	35	35	35	36	36	34	35	35
	2	44	35	34	34	34	35	35	33	34	34
	3	44	35	34	34	34	35	34	33	33	33
	4	44	34	33	33	33	34	34	32	32	32
	NPB	44									
	Valor de pulido		34	33	33	33	33	33	32	32	32
<b>NPB</b>		<b>44</b>									
<b>VPR</b>			33	32	32	32	31	31	30	30	<b>30</b>

Tabla 11. Valores de pulido mezcla 50/50-2

probetas	lecturas	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	39	32	30	30	30	29	29	29	29	29
	2	39	31	30	29	29	28	28	28	28	28
	3	38	30	29	28	28	28	28	28	28	28
	4	37	30	29	27	27	27	27	27	27	27
	NPB	38									
	Valor de pulido		29	29	27	27	26	26	26	25	25
2	1	39	30	29	27	27	27	27	27	27	27
	2	38	30	28	27	27	26	26	26	26	26
	3	38	29	28	26	26	26	25	25	25	25
	4	37	28	27	25	26	25	25	25	25	25
	NPB	38									
	Valor de pulido		26	26	25	25	25	24	24	24	24
3	1	40	30	29	27	29	27	28	27	27	27
	2	40	29	28	26	28	27	27	26	26	26
	3	39	29	28	25	27	26	26	25	25	25
	4	39	28	27	25	26	26	25	25	25	25
	NPB	40									
	Valor de pulido		28	27	26	26	25	25	24	24	24
4	1	38	31	30	28	29	28	28	27	27	27
	2	37	30	29	27	28	27	27	26	26	26
	3	37	29	28	27	27	26	26	26	26	26
		36	29	28	26	26	26	26	26	26	26
	NPB	37									
	Valor de pulido		29	28	26	26	26	26	25	25	25
<b>NPB</b>	<b>38</b>										
<b>VPR</b>		28	28	26	26	26	25	25	25	<b>25</b>	

Tabla 12. Valores de pulido mezcla 60/40-2

Probeta	lectura	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	44	34	34	31	31	30	29	29	29	29
	2	44	34	33	30	30	30	29	29	28	28
	3	43	33	31	30	29	29	28	28	27	27
	4	43	32	31	29	28	28	27	27	26	26
	NPB	44									
	Valor de pulido		31	31	28	27	27	26	26	25	25
2	1	41	34	33	33	29	27	28	28	28	28
	2	40	33	32	32	29	26	27	27	27	27
	3	40	32	31	31	28	26	27	26	26	26
	4	39	30	30	30	27	26	26	25	25	25
	NPB	40									
	Valor de pulido		30	30	29	27	25	24	24	24	24
3	1	41	34	34	33	30	29	29	28	29	29
	2	41	34	33	32	30	28	28	27	28	28
	3	40	33	32	31	29	27	27	26	28	28
	4	39	33	31	30	28	27	27	26	27	27
	NPB	40									
	Valor de pulido		32	31	29	28	26	26	26	26	26
4	1	44	35	34	33	32	31	31	31	31	31
	2	44	34	34	33	31	30	30	30	30	30
	3	43	34	33	32	30	29	29	30	30	30
	4	42	34	33	31	29	28	28	29	29	29
	NPB	43									
	Valor de pulido		32	32	30	29	28	28	28	28	28
<b>NPB</b>		<b>42</b>									
<b>VPR</b>			31	31	29	28	27	26	26	26	<b>26</b>

Tabla 13. Valores de pulido mezcla 70/30-2

Probeta	lectura	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	43	32	34	30	30	32	30	30	30	30
	2	43	31	33	29	30	31	29	29	29	29
	3	42	31	32	29	29	31	28	28	28	28
	4	42	31	31	29	29	30	28	28	27	27
	NPB	43									
	Valor de pulido		31	31	29	29	28	28	28	28	28
2	1	40	34	33	31	31	31	29	30	29	29
	2	39	33	32	30	31	30	28	29	29	28
	3	38	32	32	29	30	29	28	28	28	28
	4	37	31	31	29	30	29	27	27	27	27
	NPB	40									
	Valor de pulido		31	30	29	29	28	27	27	27	27
3	1	39	34	33	31	32	32	30	30	29	29
	2	38	34	32	30	32	31	29	29	29	28
	3	38	33	32	30	31	30	28	28	28	27
	4	38	33	31	30	31	30	27	27	27	27
	NPB	39									
	Valor de pulido		32	31	30	30	29	27	27	27	27
4	1	42	34	32	31	31	31	30	30	29	29
	2	41	33	32	31	31	30	29	29	29	29
	3	41	32	31	30	30	29	28	28	28	28
	4	41	32	31	30	30	29	27	28	28	27
	Valor de pulido	41	32	31	30	29	28	27	27	27	27
<b>NPB</b>		<b>41</b>									
<b>VPR</b>			32	31	30	29	28	27	27	27	<b>27</b>

Tabla 14. Valores de pulido mezcla 80/20-2

probetas	lecturas	HORAS									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	42	35	34	32	32	32	31	31	31	31
	2	41	34	33	32	31	31	30	30	30	30
	3	41	33	33	31	31	31	30	30	30	30
	4	41	33	32	31	30	30	29	29	29	29
	NPB	41									
	Valor de pulido		33	31	31	30	30	29	29	29	29
2	1	42	34	33	32	33	32	31	30	30	31
	2	42	33	32	31	33	31	30	30	30	30
	3	41	32	32	31	32	31	30	29	29	29
	4	41	32	31	30	32	31	29	29	29	29
	NPB	42									
	Valor de pulido		32	31	31	31	29	29	29	29	29
3	1	43	34	34	32	33	33	31	31	31	30
	2	43	34	33	32	33	32	31	30	30	30
	3	42	34	33	31	32	31	30	29	29	29
	4	42	33	33	31	32	31	30	29	29	29
	NPB	43									
	Valor de pulido		33	33	31	31	30	30	29	29	29
4	1	42	34	33	31	31	32	30	30	30	30
	2	42	34	33	31	31	31	30	30	30	29
	3	41	33	32	30	30	31	29	29	29	29
	4	40	33	32	30	30	31	29	29	29	28
	NPB	41									
	Valor de pulido		33	32	30	30	29	29	29	28	28
<b>NPB</b>		<b>42</b>									
<b>VPR</b>			33	32	31	31	30	29	29	29	<b>29</b>



**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](http://www.imt.mx)  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)