



Ensayo de Resistencia al Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas (TSR)

Objetivo General: Evaluar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad, mediante la determinación de la **Relación de Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR)** entre especímenes acondicionados y no acondicionados.

Objetivos Específicos:

- Preparar especímenes cilíndricos de mezcla asfáltica bajo condiciones controladas de compactación.
- Determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes acondicionados y no acondicionados.
- Analizar la influencia de la humedad en la pérdida de resistencia mecánica de la mezcla.
- Calcular el **TSR (%)** para evaluar la calidad y durabilidad de la mezcla frente a la humedad.

Fundamento Teórico: El daño por humedad en mezclas asfálticas ocurre cuando el agua penetra en los vacíos de la mezcla, provocando pérdida de adherencia entre el asfalto y los agregados. Esto genera desprendimiento de partículas, fisuras y reducción de la vida útil del pavimento.

El ensayo compara la **Resistencia a Tensión Indirecta (ITS)** de probetas **no acondicionadas** con la de probetas que han pasado por un proceso de **saturación parcial, congelación y deshielo en agua caliente**, condiciones que simulan la acción de la humedad en campo (Infante & Reyes, 2015).

El índice **TSR (Tensile Strength Ratio)** expresa el porcentaje de resistencia retenida:

$$TSR = \frac{\overline{Sta}}{\overline{St}} \times 100$$



Donde:

- \overline{St} = Resistencia promedio de especímenes no acondicionados (kPa).
- \overline{Sta} = Resistencia promedio de especímenes no acondicionados (kPa).

Un TSR \geq 80% se considera aceptable para garantizar durabilidad.

Materiales y Equipos:

- Máquina de ensayo mecánica o servohidráulica con capacidad de 100 kN.
- Mordaza Lottman.
- Picnómetro de vacío y bomba de vacío (13–70 kPa).
- Baños de agua con control de temperatura (25°C y 60°C).
- Congelador (-18 \pm 2 °C).
- Horno de ventilación forzada (176 \pm 3 °C).
- Vernier (precisión 0,1 mm).
- Balanza (precisión 0,1 g).
- Termómetro de inmersión (-2 a 68°C).
- Bolsas plásticas resistentes, película plástica autoadherible y cinta adhesiva.
- Espátula o cuchara metálica, charolas de acero inoxidable.

Procedimiento

1. Preparación de especímenes

- Compactar 6 especímenes cilíndricos de 100 mm \varnothing x 63,5 \pm 2,5 mm de espesor.
- Tres serán probados sin acondicionar, tres después de acondicionamiento.

2. Grupo no acondicionado

- Colocar en baño de agua a 25°C durante 20 min – 2 h.
- Ensayar a tensión indirecta y registrar la carga máxima PPP.

3. Grupo acondicionado

- Saturar parcialmente con vacío hasta un grado de saturación entre 70–80%.
- Congelar a -18 °C durante 15 h.
- Sumergir en agua a 60 °C durante 24 h.
- Mantener en baño a 25 °C durante 1–2 h antes de ensayar.
- Ensayar a tensión indirecta y registrar la carga máxima P"PP".



Ejecución del Ensayo

- Colocar el espécimen en la **mordaza Lottman**.
- Ensayar con una velocidad de carga de **50,8 mm/min** hasta la falla.
- Registrar las cargas máximas:
- P → especímenes no acondicionados.
- P'' → especímenes acondicionados.

Cálculos

1. Resistencia de tensión directa (ITS):

$$St = \frac{200P}{\pi \cdot \tau \cdot D}$$

$$Sta = \frac{2000P''}{\pi \cdot \tau'' \cdot D''}$$

Recomendaciones

- Mantener estrictamente los tiempos y temperaturas de acondicionamiento.
- Evitar pérdida de humedad durante el manejo de las probetas.
- Verificar calibración de equipos de carga y medición.
- Usar especímenes con **7 ± 0,5% de vacíos de aire** para asegurar uniformidad.

Aplicaciones e Importancia del Ensayo

- Evaluar la **durabilidad de mezclas asfálticas** frente al daño por humedad.
- Asegurar la calidad de mezclas en proyectos de pavimentación.
- Predecir la vida útil del pavimento y su susceptibilidad al deterioro prematuro.
- Base para la **aceptación de mezclas asfálticas en carreteras** según normativa.



Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval

Objetivo General: Evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de un agregado grueso, mediante el ensayo Micro-Deval, en presencia de agua y carga abrasiva.

Objetivos Específicos:

- Determinar la pérdida de masa del material luego del ensayo, como indicador de su resistencia al desgaste.
- Calcular el porcentaje de pérdida por abrasión.

Fundamento Teórico: El ensayo Micro-Deval es una prueba de laboratorio utilizada para medir la resistencia de los agregados gruesos a la abrasión en condiciones húmedas. La muestra se somete a la acción combinada de desgaste mecánico y abrasión por fricción entre partículas y esferas de acero, todo ello en presencia de agua. Esta condición simula de forma más realista las condiciones de trabajo de los agregados en campo, especialmente en ambientes húmedos.

El resultado se expresa como un porcentaje de pérdida de masa, y permite evaluar la durabilidad del agregado frente a procesos de degradación mecánica. Es una herramienta útil tanto en estudios de calidad como en control de producción. (Campagnoli y López, 2007).

Materiales y Equipos:

Aparato Micro-Deval: con cilindros de acero inoxidable (5 L de capacidad, Ø 200 mm, largo útil 175 mm), velocidad controlada de 100 ± 5 rpm.



Figura 1. Aparato Micro-Deval



Esferas de acero inoxidable: 5000 ± 5 g, de 9.5 ± 0.5 mm de diámetro.



Figura 2. Esferas de Acero

Balanza electrónica: con precisión del 0.1 % de la masa de la muestra.



Figura 3. Balanza

Serie de tamices: 19.0mm($\frac{3}{4}$), 16.0mm($\frac{5}{8}$), 12.5mm($\frac{1}{2}$), 9.5mm($\frac{3}{8}$), 6.3mm($\frac{1}{4}$), 4.75mm(Nro. 4), 1.18mm(Nro 16).



Figura 4. Tamices

Horno: capaz de mantener 110 ± 5 °C para secado hasta masa constante.



Figura 5. Horno

Probetas graduadas de vidrio: para medir exactamente 2.0 ± 0.05 L de agua.



Figura 6. Probeta

Imán o herramienta para separar las esferas de acero.



Figura 7. Imán

Procedimiento

Preparación de la muestra

1. Lavar y secar el agregado a 110 ± 5 °C hasta masa constante.
2. Separar el material según los tamaños de tamiz especificados y recombinarlo de acuerdo con la siguiente tabla:

Ejemplo de gradación para agregados de 19 mm

Pasa Tamiz (mm)	Nro. Tamiz	Retenido del Tamiz (mm)	Masa (g)
19	¾"	16	375
16	5/8"	12.5	375
12.5	½"	9.5	750

Tabla 1. Preparación de la muestra seca al horno de 19 m

Ejemplo de gradación para agregados de menores de 16 mm

Pasa Tamiz (mm)	Nro Tamiz	Retenido del Tamiz (mm)	Masa (g)
12.5	½"	9.5	750



9.5	3/8"	6.3	375
6.3	1/4"	4.75	375

Tabla 2. Preparación de la muestra seca al horno de tamaño menor de 16 mm

Ejemplo de gradación para agregados de 12.5 mm

Pasa Tamiz (mm)	Nro Tamiz	Retenido del Tamiz (mm)	Masa (g)
9.5	3/8"	6.3	750
6.3	1/4"	4.75	750

Tabla 3. Preparación de la muestra seca al horno de tamaño menor de 12.5 mm

- Registrar la masa inicial de la muestra como M_i

Ejecución del ensayo

- Sumergir la muestra en 2.0 ± 0.05 L de agua por al menos 1 hora a 20 ± 5 °C.
- Colocar la muestra en el cilindro del aparato Micro-Deval junto con:
 - Las mismas 2 L de agua usadas para la inmersión.
 - 5000 ± 5 g de esferas de acero de 9.5 ± 0.5 mm de diámetro.
- Sellar el recipiente y colocar en la máquina. Rotar a 100 ± 5 rpm por el tiempo correspondiente.

Gradación	Tiempo de Rotación (minutos)	Número de revoluciones
Tabla 1	120 ± 1	12000 ± 100
Tabla 2	105 ± 1	10500 ± 100
Tabla 3	95 ± 1	9500 ± 100

Tabla 4. Tiempo de rotación y Número de revoluciones

- Finalizado el tiempo, verter el contenido sobre tamices de 4.75 mm y 1.18 mm. Lavar hasta que el agua salga clara.
- Retirar las esferas de acero (con imán si es necesario).



9. Combinar y secar el material retenido en los tamices hasta masa constante a 110 ± 5 °C. Registrar la masa como M_f

Cálculos

Se calcula el porcentaje de pérdida por abrasión utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida (\%)} = \left(\frac{M_i - M_f}{M_f} \right) \times 100$$

Donde:

M_i masa inicial de la muestra (g)

M_f masa final después del ensayo (g)

Recomendaciones

- Verificar el estado y calibración del equipo Micro-Deval antes de cada ensayo.
- Asegurarse de utilizar agua limpia y mantener la temperatura adecuada.
- Evitar pérdidas de material durante el vaciado y lavado.
- Manipular con cuidado las esferas metálicas para evitar accidentes o pérdidas.
- Registrar todos los datos con precisión, especialmente los tiempos y masas.

Aplicaciones e Importancia del Ensayo

El ensayo Micro-Deval es fundamental para:

- Determinar la durabilidad de los agregados frente al desgaste.
- Evaluar su idoneidad en mezclas asfálticas, bases granulares y concretos expuestos a condiciones húmedas o abrasivas.
- Comparar la calidad entre distintas fuentes de agregados.
- Realizar control de calidad en proyectos de infraestructura vial y ferroviaria.



Guía del Ensayo: Medida del Potencial de Colapso de un Suelo Parcialmente Saturado (INV E 157)

Objetivo general

Determinar, con base en la norma INV E-157-13, la magnitud del colapso unidimensional que puede experimentar un suelo parcialmente saturado cuando se inunda bajo un esfuerzo vertical predeterminado.

Objetivos específicos

1. Cuantificar el Índice de colapso (I_e) a 200 kPa y clasificar el grado de colapso según la Tabla 157-1.
2. Calcular el Potencial de colapso (I_c) para otros niveles de esfuerzo vertical relevantes al proyecto.
3. Construir la curva esfuerzo–deformación antes y después de la inundación.
4. Estimar asentamientos potenciales en campo a partir de I_c e informar los riesgos para cimentaciones, terraplenes y pavimentos.

Fundamento teórico






Cuando un suelo de baja humedad, estructura suelta y succión capilar interna se satura repentinamente, los meniscos de agua desaparecen y los granos se reacomodan, provocando un colapso que se observa como reducción de altura bajo carga constante (Parra & Grisales 2021). La norma define:

- Colapso: disminución de altura del espécimen confinado al ser inundado.
- I_e (%): deformación adicional a 200 kPa tras inundar.
- I_c (%): deformación adicional a cualquier nivel de esfuerzo.

$$I_c = 100 * \frac{df - di}{h_0}$$



Materiales y equipo

Ítem	Descripción	
Consolidómetro	Según INV E-151, con capacidad de aplicar 5 kPa → 800 kPa y registrar deformaciones.	
Anillos de acero	$\varnothing \approx 63$ mm, $h \approx 20$ mm (o los que use el laboratorio).	
Piedras porosas	Secadas al aire; evitan absorción capilar previa a la inundación.	
Papel filtro (opcional)	Para evitar pérdida de finos.	
Balanza (0,01 g) y Vernier	Para masa, altura y diámetro iniciales.	

Procedimiento de ensayo

1. Selección y preparación del espécimen



- Tipo de muestra: preferir inalterada (bloque o tubo Shelby). Si no es posible, moldear un espécimen reconstituido al índice de huecos y humedad natural objetivo. Registrar el método de obtención.
- Dimensiones del anillo: \varnothing interno típico ≈ 63 mm; altura ≈ 20 mm (ajustar a tu anillo). Verifica planeidad y limpieza.
- Tallado/empotramiento:
 - Coloca el anillo sobre la muestra y empuja lentamente para encamisar sin perturbar.
 - Recorta el excedente a ras con hilo de corte o cuchilla afilada; evita pulidos que cambien la densidad.
 - Mide altura inicial, diámetro y masa del conjunto
- Piedras porosas: usar secas al aire (para no pre-humedecer el suelo). Si hay finos sueltos, coloca papel filtro delgado.

2. Montaje en el consolidómetro

- Apilamiento: base \rightarrow piedra porosa seca \rightarrow espécimen en anillo \rightarrow papel filtro (opcional) \rightarrow piedra porosa superior \rightarrow tapa/casquete. Centrar con cuidado.
- Carga de asiento: aplica 5–10 kPa por 5–10 min para asentar el conjunto y verificar que el reloj/LVDT lea correctamente (cero mecánico). Anota h_0 (altura inicial bajo carga de asiento).
- Condición “seca”: asegúrate de que no haya agua en la celda ni contacto con bandeja húmeda. Cierra válvulas.

3. Trayectoria de carga “en seco” (previa a inundación)

- Secuencia **típica** hasta el esfuerzo objetivo de colapso (usualmente **200 kPa**): 5 \rightarrow 12.5 \rightarrow 25 \rightarrow 50 \rightarrow 100 \rightarrow **200 kPa** (ajusta si tu proyecto pide otro nivel). Mantén **cada escalón 60 min** o hasta estabilización (Δ deformación < 0.005 mm en 10 min). Registra **tiempo y deformación**.
- Hoja **de lecturas por carga (sugerida)**: 0, 0:15, 0:30, 0:45, 1:00 (min). Si el suelo es muy lento, añadir 2:00 y 4:00. Marca h_1 = altura a **200 kPa** justo **antes** de inundar.



4. Inundación bajo esfuerzo constante (colapso)

Modo de inundación: desde la base (abre la línea inferior) para desplazar aire hacia arriba de forma gradual. Mantén **constante** el esfuerzo vertical (p. ej., 200 kPa).

Registro de deformación tras inundar: lectura intensiva porque el colapso puede ser **rápido**:

- **Inmediatas:** a los **10–20–30–60 s**.
- **Minutaje temprano:** 2, 4, 8, 15, 30, 45, 60 min.
- **Posterior:** cada **hora** hasta **24 h** o **estabilización** (el que ocurra primero). Anota h_2 = altura a 24 h (o estabilizada).

Observaciones: nota **fisuras, expulsores de agua, ablandamiento** o cualquier inestabilidad del anillo. Si hay **levantamiento** momentáneo por atrapamiento de aire, consígñalo.

5. Trayectoria de carga pos-colapso (opcional)

Si el programa lo exige, continúa con incrementos > 200 kPa (p. ej., 400 y 800 kPa) para construir la curva esfuerzo–deformación pos-colapso. Mantén misma pauta de lecturas por escalón.

6. Desmontaje y control de humedad final.

- Descarga escalonada (para seguridad del equipo), desmonta el conjunto evitando pérdida de material.
- Contenidos de agua: toma submuestra del espécimen colapsado para humedad final (horno 105–110 °C hasta masa constante).
- Registro final: alturas finales, masas, observaciones y tiempos totales.

Cálculos

1. Deformación unitaria antes y después de la inundación:

$$\varepsilon_i = \frac{(d_i - d_0)}{h_0}$$



$$\varepsilon_f = \frac{(d_f - d_0)}{h_0}$$

2. Índice de colapso:

$$I_e = 100 * (\varepsilon_f - \varepsilon_i) \text{ | para 200 kPa}$$

3. Potencial de colapso:

$$I_c = 100 * (\varepsilon_f - \varepsilon_i)$$

4. Asentamiento de una capa de espesor

$$H: \Delta H = \left(\frac{I_c}{100} \right) * H$$

5. Gráfica esfuerzo – deformación: eje X $\log(\sigma)$, eje Y ε o e.

Recomendaciones

- Usar muestras inalteradas obtenidas con métodos secos; evitar lubricantes.
- Mantener las piedras porosas completamente secas antes del montaje.
- Limitar a 1 h los intervalos de carga antes de inundar para evitar evaporación.
- Inundar desde la base para expulsar aire de manera progresiva.
- Esperar mínimo 24 h o hasta estabilización antes de tomar lectura final.

Aplicaciones e importancia

- Diseño de cimentaciones: prever asentamientos por saturación repentina.
- Pavimentos y terraplenes: evaluar estabilidad ante lluvias intensas.
- Planes de mitigación: definir necesidad de sustitución, precarga o mejoramiento.
- Investigación geotécnica: clasificar suelos según susceptibilidad al colapso.



Determinación de la resistencia a la flexión del concreto mediante una viga simplemente apoyada con carga en el punto central (Norma INV E-415-13)

Objetivo General: Determinar el módulo de rotura (MR) del concreto empleando el método de la viga simplemente apoyada y cargada en el punto central, conforme a la Norma INV E-415-13.

Objetivos Específicos:

- Verificar el cumplimiento del rango de velocidad de carga (0,9 – 1,2 MPa/min) exigido por la norma.
- Medir con exactitud las dimensiones b y d del espécimen y el vano libre L.
- Calcular el MR para cada viga y analizar la variabilidad entre probetas.
- Correlacionar el MR obtenido con la resistencia a compresión del mismo lote de concreto.
- Identificar el modo y la zona de falla para evaluar la calidad del ensayo.

Fundamento teórico

La resistencia a flexión mide la capacidad del concreto para soportar esfuerzos de tracción en la fibra extrema de una viga sometida a momento flector. Se reporta como Módulo de Rotura (MR) y suele representar entre el 10 % y el 20 % de la resistencia a compresión del mismo concreto. (Alva & Velayarce, 2024).

Para un espécimen rectangular cargado en el centro, el momento máximo es $M = P L/4$. Sustituyendo en la ecuación básica de flexión se obtiene:

$$MR = \frac{3 P L}{2 b d^2}$$

También se calcula la velocidad de aplicación de carga para cumplir el rango normativo:

$$V = \frac{f b d^2}{3 L}$$

Materiales y equipos requeridos

- Máquina de ensayo con capacidad suficiente y control de velocidad

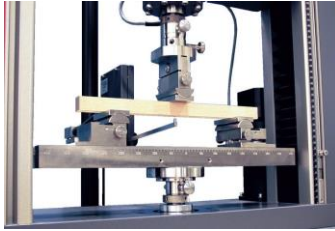


Figura 1. Máquina de Ensayo

- Piezas de cuero (6 mm) para ajustar asientos si la holgura es 0,1 – 0,4 mm.



Figura 2. Pieza de cuero

- Calibradores de lámina de 0,1 mm y 0,4 mm.



Figura 3. Calibradores de lámina

- Pie de rey (0,05 mm)

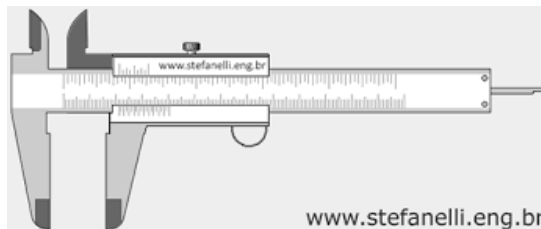


Figura 4. Pie de Rey



- Flexómetro



Figura 5. Flexómetro

- Tres vigas de concreto (normalmente 150 x 150 x >450 mm).

Procedimiento de ensayo

- Preparación del espécimen: rotar la viga para que una cara lateral quede como cara de apoyo.
- Alineación y marcado: medir la longitud total y marcar líneas de referencia.
- Verificación de asientos: verificar holguras con galgas.
- Aplicación de carga: ajustar velocidad de carga y registrar la carga máxima.
- Medición post-falla: medir b y d con tres lecturas por dimensión

Cálculos a realizar

Promedios geométricos:

$$b = \frac{b_1 + b_2 + b_3}{3}$$
$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3}$$

Módulo de rotura (MR):

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Velocidad de carga programada:

$$V = \frac{fbd^2}{3L}$$



Coeficiente de variación (CV):

$$CV = \frac{100 s}{\bar{x}}$$

Resultados y análisis

Presentar una tabla con $P_{\text{máx}}$, dimensiones, MR y modo de falla de cada viga. Comentar valores atípicos y posibles errores derivados de holguras o acabado superficial.

Recomendaciones

- Control dimensional estricto.
- Mantener curado constante.
- Calibrar el equipo anualmente.
- Asegurar velocidad de carga constante conforme a norma

Aplicaciones e importancia

- Diseño de pavimentos rígidos.
- Control de calidad del concreto.
- Investigación de nuevos materiales.
- Relación con resistencia a compresión para diseño estructural.



Resistencia a la Fatiga de Mezclas Asfálticas en Caliente mediante Flexión en Dos Puntos sobre Probetas Trapezoidales (INV E-808-13)

Objetivo General: Evaluar la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas compactadas mediante el ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales, determinando la vida hasta la falla (ciclos a fatiga) bajo deformación controlada a frecuencia constante.

Objetivos Específicos:

- Fabricar y acondicionar probetas trapezoidales ($H \geq 40$ mm, B, b, e según norma).
- Aplicar desplazamiento sinusoidal controlado a 25 Hz, a temperatura constante.
- Registrar la vida hasta fatiga cuando el módulo complejo de rigidez se reduce al 50 % del valor inicial.
- Construir la línea de fatiga ($\log N$ vs $\log \epsilon$), estimar deformación a 10^6 ciclos (ϵ_6) y pendiente $1/b$.
- Evaluar la dispersión ($\sigma_6, \Delta\epsilon_6$) para control de calidad del ensayo.

Fundamento Teórico: La fatiga en mezclas asfálticas es la degradación progresiva por cargas repetidas, principalmente inducida por el tránsito vehicular. El ensayo en probeta trapezoidal con flexión en dos puntos permite inducir tensiones máximas en la región central, sin efectos de corte, facilitando una estimación realista de la vida a fatiga. La línea de fatiga en escala logarítmica (vida vs deformación) proporciona parámetros clave como ϵ_6 (deformación para 10^6 ciclos), pendiente y dispersión, útiles para diseñar pavimentos más duraderos.

Materiales y Equipos:

- Máquina de fatiga con accionamiento sinusoidal, frecuencia 25 Hz (± 4 %), y precisión de desplazamiento $\leq 0.1 \mu\text{m}$.



Figura 1. Máquina de Ensayo



- Cámara termostática ventilada para mantener temperatura constante durante el ensayo.
- Transductores de desplazamiento con precisión mínima $\pm 1.5 \times 10^{-6}$ m.



Figura 2. Transductores de desplazamiento.

- Equipo para extraer núcleos o sembrar placas de muestra; calibrador, balanza, horno para acondicionamiento.

Procedimiento

Preparación de probetas

- Moldear las probetas trapezoidales con mezcla asfáltica en caliente, compactándolas hasta obtener la densidad objetivo y el contenido de vacíos especificado.
- Dimensiones:
 - Altura mínima: 40 mm.
 - Bases mayores (B) y menor (b), espesor (e) y altura (h) conforme a lo indicado en la norma.

Condicionamiento previo

- Estabilizar las probetas a la temperatura de ensayo en la cámara termostática por al menos 4 h (o según especificación del proyecto).

Configuración del equipo

- Colocar la probeta en el dispositivo de flexión en dos puntos, fijándola en los extremos por medio de mordazas metálicas que aseguren un contacto uniforme sin deformar la muestra.
- Ajustar la alineación de la probeta para que el eje de carga coincida con el eje longitudinal de la muestra, evitando esfuerzos adicionales por torsión o excentricidad.



- Instalar los transductores de desplazamiento en la parte superior de la probeta, calibrados en cero antes de iniciar la carga.

Ensayo

- Programar desplazamiento sinusoidal controlado (deformación objetivo ϵ_i) a 25 Hz.
- Registrar continuamente la amplitud de fuerza y desplazamiento.
- Continuar hasta que el módulo complejo (S_{mix}) se reduzca al 50 % del valor inicial \rightarrow número de ciclos N_i (criterio convencional de fatiga).

Inicio del ensayo:

- Activar la máquina y verificar que el registro de fuerza y desplazamiento sea estable desde el primer ciclo.
- Observar que la señal no presente ruidos o desajustes.

Desarrollo:

- Mantener la carga cíclica de manera continua, en condiciones constantes de temperatura y frecuencia.
- Registrar en tiempo real: número de ciclos, amplitud de desplazamiento, fuerza aplicada y módulo complejo de rigidez (S_{mix}).
- El ensayo se da por terminado cuando el módulo complejo (S_{mix}) se reduce al 50 % del valor inicial.
- Registrar el número de ciclos alcanzados (N_f) como la vida a fatiga para ese nivel de deformación.

Repetición de ensayos

- Realizar el ensayo con al menos 4 niveles diferentes de deformación (ϵ_i).
- Ejecutar un mínimo de 3 probetas por nivel para garantizar validez estadística.

Línea de fatiga

- Graficar $\log(N_i)$ vs $\log(\epsilon_i)$ y obtener recta de regresión lineal:

$$\log(N) = a + \frac{1}{b} \cdot \log(\epsilon)$$



Determinar:

- ϵ_6 : deformación asociada a 10^6 ciclos.
- $1/b$: pendiente de la línea de fatiga.
- R^2 : coeficiente de determinación.
- $\Delta\epsilon_6$ y sN : dispersión de los resultados, como indicadores de confiabilidad.

Cálculos

- Constante $K\epsilon$: convierte desplazamiento z en la parte superior a deformación máxima ϵ :

$$K_{\epsilon} = \frac{B}{2(B - b)} \dots$$

(ecuación definitoria para cada probeta)

- Deformación: $\epsilon = K\epsilon \times z$.
- Vida a fatiga N_f : ciclos hasta reducción 50 % del módulo complejo.
- Línea de fatiga:

$$\log(N) = a + (1/b) \cdot \log(\epsilon)$$

ϵ_6 : deformación que corresponde a 10^6 ciclos.

- Índice de calidad $\Delta\epsilon_6$ y dispersión residual sN .

Recomendaciones

- Asegurar la temperatura constante dentro de la cámara (± 1 °C).
- Controlar frecuencia de 25 Hz (± 4 %).
- Repetir pruebas para cada nivel de amplitud con al menos 3 replicados para obtener adecuadas estadísticas.
- Usar probetas homogéneas sin fisuras o daños.
- Revisar transductores y calibración del equipo periódicamente.

Aplicaciones e Importancia del Ensayo

- La línea de fatiga es esencial para predicción de vida útil de pavimentos sometidos a cargas repetidas.
- ϵ_6 (amplitud tolerable de deformación) guía el diseño estructural y selección de mezclas con menor susceptibilidad a grietas por fatiga.



- Permite comparar formulaciones de mezcla (tipos de asfalto, contenido de aire, aditivos), optimizando durabilidad y costo.
- Cumple con especificaciones técnicas modernas de diseño de pavimentos mediante evidencia de comportamiento real de mezcla.



Envejecimiento Acelerado de Ligantes Asfálticos en Cámara de Presión (PAV)

Objetivo General: Producir, bajo condiciones controladas de **aire presurizado** y **temperatura elevada**, el **envejecimiento acelerado por oxidación** del ligante asfáltico utilizando una **cámara PAV**, para obtener un residuo representativo del estado del asfalto tras varios años de servicio, apto para ensayos de desempeño posteriores (reología, fragilidad térmica, etc.).

Objetivos Específicos:

- Acondicionar el ligante para simular su envejecimiento a largo plazo.
- Controlar y **mantener 2.1 ± 0.1 MPa** de presión y la temperatura objetivo durante **$20 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$** dentro de la PAV.
- **Desgasificar** el residuo envejecido a **170 ± 5 °C** y **15 ± 2.5 kPa absolutos** durante **30 ± 1 min**.
- Registrar **T_{máx}**, **T_{min}**, tiempos efectivos y eventuales **desviaciones** para validar el ensayo.
- Preparar el residuo homogéneo para ensayos de desempeño posteriores.

Fundamento Teórico:

El envejecimiento del asfalto se debe, principalmente, a **oxidación** y pérdida/redistribución de fracciones volátiles; esto incrementa su **rigidez** y reduce su **ductilidad**. El método PAV reproduce de forma acelerada el **envejecimiento a largo plazo** del ligante (post-construcción) sometiéndolo a **aire comprimido** a **~ 2.1 MPa** y temperatura elevada por **20 h**. La **temperatura de envejecimiento** se **selecciona según el grado** del ligante y la región climática, pero **no debe exceder ~ 115 °C** para evitar cambios químicos no representativos. **No se evalúa cambio de masa** en PAV (la absorción de aire bajo presión enmascara la oxidación); la validez se basa en el **control de presión/temperatura/tiempo**. En asfaltos **modificados**, pueden presentarse **separaciones de fase**; evaluar la idoneidad del método para cada caso. (Martínez, 2005)

Materiales y Equipos:

Sistema PAV con:

- **Cámara de presión** de acero inoxidable para operar a **2.1 ± 0.1 MPa** entre **90–110 °C**; bastidor para **10 bandejas** en posición horizontal.
- **Control de presión:** válvula de seguridad (no > 2.5 MPa), regulador (± 0.02 MPa), y **purga lenta** (8–15 min hasta presión atmosférica).



- **Control de temperatura:** horno de tiro forzado o cámara con control integrado capaz de estabilizar ± 0.5 °C; alcanzar temperatura de prueba en ≤ 2 h.
- **Medición:** RTD (platino) ± 0.1 °C, registrador de temperatura (log cada ≥ 1 min o al menos **Tmax/Tmin**), manómetro ± 0.02 MPa.
- **Bandejas de acero inoxidable** (no aluminio): \varnothing interno 140 ± 1 mm, profundidad 9.5 ± 1.5 mm, lámina ~ 0.6 mm.
- **Balanza:** capacidad ≥ 200 g, resolución **0.001 g**.
- **Horno** (para manejo de bandejas): 168 ± 5 °C.
- **Horno de vacío:** 170 ± 5 °C, capaz de 15 ± 2.5 kPa absolutos.
- **Sistema de vacío:** bomba/sistema que mantenga ≤ 15 kPa absolutos.
- **Aire comprimido** grado **CGA D** ($19.5\text{--}23.5$ % O₂, CO₂ ≤ 1000 ppm, CO ≤ 10 ppm, aceite ≤ 5 mg/m³, punto de rocío ≤ -40 °C).

Procedimiento

1. Selección de temperatura de envejecimiento según especificación del ligante/región. Evitar > 115 °C.
2. Preacondicionamiento (corto plazo): Envejecer el ligante por INV E-720 (RTFOT). Conservar el residuo caliente o recalentarlo luego para homogeneizar.
3. Pre calentamiento PAV:
 - a. Colocar bastidor en la cámara. Si la cámara va en horno, precalentar la cámara a la temperatura objetivo (recomendado $+10$ a $+15$ °C por encima si se usa horno externo para compensar la caída al cargar bandejas).
 - b. Si la cámara tiene control integrado, seguir instrucciones del fabricante para pre calentamiento.
4. Dosificación en bandejas: Pesar 50 ± 0.5 g de residuo en cada bandeja (capa ~ 3.2 mm).
5. Carga rápida: Insertar bandejas en el bastidor y cargar el bastidor a la cámara rápidamente para minimizar pérdidas térmicas.
6. Conexión de líneas de aire y RTD/registro según diseño del equipo.
7. Presurización y arranque del tiempo:



- a. Si la cámara está en horno: esperar a que la T interna alcance $T_{\text{ensayo}} - \Delta T$ (determinado en normalización), aplicar 2.1 ± 0.1 MPa y iniciar cronómetro.
- b. Si la cámara tiene control integrado: presurizar según recomendación del fabricante y arrancar tiempo.
- c. Si en ≤ 2 h desde la carga no se alcanza la T deseada, invalidar y descartar muestras.

Ejecución del Ensayo (PAV+ desgasificación)

A. Envejecimiento en PAV

- Mantener T (± 0.5 °C) y P = 2.1 ± 0.1 MPa por 20 h \pm 10 min.
- Validez de la corrida:

Inválida si:

- $|T - T_{\text{ensayo}}| > \pm 0.5$ °C por > 60 min (en 20 h); o
- desviación > 5 °C por > 10 min acumulados; o
- P al final está fuera de 2.1 ± 0.1 MPa; o
- sólo se registró T_{max}/T_{min} y alguno difiere $> \pm 0.5$ °C en 20 h.

Depresurización controlada: al final, abrir purga/regular para bajar de 2.1 MPa a atm en 8–15 min (no cuenta dentro de las 20 h).

B. Desgasificación del residuo

- Retirar bastidor y colocar bandejas en horno a 168 ± 5 °C por 15 ± 1 min.
- Precalentar horno de vacío a 170 ± 5 °C.
- Verter rápidamente el residuo caliente a uno o más recipientes para que el espesor sea 15–40 mm. En ≤ 1 min llevar el(los) recipiente(s) al horno de vacío.
- Equilibrar a 170 ± 5 °C 10 ± 1 min sin vacío (es clave calentar antes de aplicar vacío).
- Aplicar vacío hasta 15 ± 2.5 kPa absolutos por 30 ± 1 min.
- Liberar vacío, retirar. Si quedan burbujas, pasarlas con llama/hoja caliente.
- Si no se ensaya de inmediato, cubrir el residuo y almacenar a T ambiente. Para cualquier ensayo posterior, recalentar a 168 ± 5 °C por ≤ 30 min y agitar antes de usar.

Cálculos



El método PAV **no** requiere cálculos de propiedades durante el acondicionamiento; los **cálculos** se limitan a **verificación de tiempos y desviaciones** para **validar** la corrida y a la **confección del informe**.

1. **Tiempo efectivo de envejecimiento (h^{**}:min^{****}):**** tiempo bajo **presión** (20 h ± 10 min); **no** incluye el precalentamiento ni la despresurización.

2. **Control de temperatura:**

Registrar **Tmin**, **Tmax** (o log minuto a minuto) y calcular **tiempos acumulados** fuera de tolerancias; si exceden los umbrales indicados, **ensayo inválido**.

3. **Control de presión:** verificar que **P_final** esté dentro de **2.1 ± 0.1 MPa**; si no, **ensayo inválido**.

4. **Reporte mínimo:**

Identificación de muestra; **T_ensayo (±0.5 °C)**; **Tmax/Tmin (±0.1 °C)**; tiempo **fuera de rango** (min); **tiempo total** (h:min); cualquier instancia en que se requirió **> 163 °C** durante el manejo (temperatura/tiempo).

Recomendaciones

- **Planicidad** del bastidor: verificar en frío y a temperatura de operación; ajustar soportes según fabricante.
- **Bandejas:** usar **acero inoxidable**; revisar **alabeo** con frecuencia; reemplazar si hay deformación.
- **Carga rápida:** preparar todo antes de dosificar para minimizar caída de temperatura al cargar.
- **Normalización previa:** determine **ΔT** por presurización para saber **cuándo** aplicar presión.
- **Evitar sobretemperaturas** (> 115 °C) durante envejecimiento; pueden modificar la **química** del ligante.
- **Seguridad:** manipule el asfalto caliente con EPP; especial cuidado al **levantar la cámara** y al **despresurizar**.
- **Asfaltos modificados:** evalúe **estabilidad de fase**; el método puede ser **no representativo** en algunos modificados.
- **Desgasificación:** siempre **calentar antes** de aplicar vacío; el calor **no** se transfiere eficientemente una vez está al vacío.



Aplicaciones e Importancia del Ensayo

- Permite obtener un **residuo envejecido** para evaluar **desempeño a largo plazo** (ej.: **DSR** a alta T, **BBR** a baja T, penetración/viscosidades envejecidas, etc.).
- **Comparación de fuentes y grados** de ligante bajo una condición estandarizada de **oxidación**.
- Apoya procesos de **selección de ligante** para un **clima/zona** determinado y verificación de **cumplimiento normativo**.



Guía del Ensayo: Mezcla Asfáltica Natural – INV E-442P-17

Objetivo general

Diseñar y evaluar en laboratorio una mezcla asfáltica natural (MAN), según el artículo 442P-17 de INVÍAS, optimizando resistencia, vacíos y durabilidad, con miras a su uso en subbases, bases o capas de rodadura en pavimentos.

Objetivos específicos

- Realizar análisis granulométrico de la mezcla natural y, si es necesario, de agregados de aporte según INV E-213-13.
- Determinar propiedades volumétricas (vacíos totales, vacíos en mezcla, vacíos en agregados) siguiendo criterios definidos en la norma.
- Ensayar mezcla mediante método Marshall Modificado
- Evaluar susceptibilidad al agua con estabilidad Marshall retenida $\geq 75\%$.
- Proponer contenido óptimo de ligante y ajustar fórmula de trabajo según ensayos.

Fundamento teórico

La mezcla asfáltica natural (MAN) es una combinación de arena y finos saturados naturalmente con ligante asfáltico, explotados directamente de cantera. En Colombia se permiten utilizar estas mezclas sin adición de agregados o asfalto, siempre que cumplan con los criterios de composición granulométrica, vacíos, estabilidad y flujo establecidos en la tabla 442P-8. El ensayo Marshall modificado para asfaltos líquidos (según INV E-622-13) permite evaluar la densidad seca máxima, vacíos y resistencia, estableciendo así una fórmula de trabajo robusta para la construcción (Murillo, Suarez & Peña, 2020).

Materiales y equipo

- Mezcla asfáltica natural (MAN): extraída de cantera, sin materia orgánica ni arcilla. Tamaño ≤ 19 mm.



Figura 1. Mezclas Asfáltica

- Agregado de aporte (opcional): si requiere ajuste de granulometría o ligante.
- Ligante asfáltico o emulsión: si se adiciona



Figura 2. Emulsión Asfáltica

- Tamices



Figura 3. Tamices

- Horno



Figura 4. Horno

- Balanza



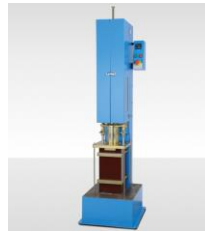
Figura 5. Balanza

- Molde Marshall



Figura 6. Molde Marshall

- Compactador



- Cámaras de inmersión.

Procedimiento

Análisis granulométrico de la mezcla asfáltica en caliente (MAN)

Se debe realizar el análisis granulométrico de la mezcla asfáltica y de los agregados utilizados (en caso de que se hayan mezclado por separado), siguiendo los lineamientos de la norma **INV E-213-13**. Este paso permite verificar que la distribución de tamaños de partículas cumpla con la curva de diseño deseada para la mezcla.

Caracterización de los agregados

Antes de fabricar las mezclas, es necesario asegurar que los agregados cumplan con los requisitos mínimos de calidad. Para esto, deben conocerse los siguientes parámetros:

- **Desgaste:** se determina mediante el ensayo Micro-Deval o Los Ángeles, para evaluar la resistencia al desgaste por fricción.
- **Durabilidad:** análisis frente a ciclos de congelación/descongelación o sulfatación.
- **Limpieza:** se mide con el contenido de material más fino que el tamiz 0.075 mm (material pasante por el tamiz N° 200).
- **Equivalente de arena:** determina la proporción de material plástico en los finos del agregado.
- **Forma de las partículas:** incluye la angularidad, aplanamiento o elongación, según normas específicas.
- **Adhesividad:** evalúa la capacidad del agregado para adherirse al asfalto, especialmente bajo condiciones de humedad.

Preparación de mezclas con diferentes contenidos de ligante (asfalto)

Se deben preparar **al menos cinco mezclas** con diferentes porcentajes de ligante asfáltico, típicamente distribuidos alrededor de un valor medio, en incrementos de aproximadamente ± 0.5 % (por ejemplo: 4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %). Esta variación permitirá identificar el contenido óptimo de ligante que cumpla con los parámetros de diseño.



Caracterización volumétrica y compactación de las mezclas

Para cada mezcla preparada:

- Se determina la **densidad máxima teórica (Gmm)** mediante el método de Rice.
- Se compactan las briquetas según el **procedimiento Marshall modificado** (75 golpes por cara).
- Se determina la **densidad aparente de las briquetas compactadas (Gmb)**.
- A partir de estas mediciones se calculan los siguientes parámetros volumétricos:
 - **Vacíos totales en la mezcla (VTM)**
 - **Vacíos llenos con asfalto (VFA)**
 - **Vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Ensayo Marshall modificado

Cada biqueta compactada se somete a inmersión en agua a 60 °C durante 30 a 40 minutos. Luego se realiza el ensayo Marshall, donde se mide:

- **Estabilidad Marshall (resistencia máxima a carga)**
- **Flujo Marshall (deformación plástica sufrida antes de la falla)**
- **Contenido de vacíos**

Evaluación de la susceptibilidad al agua

Se realiza una comparación de la estabilidad Marshall entre dos juegos de briquetas:

- Un grupo **seco**, ensayado sin tratamiento adicional.
- Un grupo **condicionado en agua** (inmersión prolongada).

Se calcula la **estabilidad retenida** como porcentaje de la estabilidad del grupo seco. Según la norma, la mezcla debe presentar una estabilidad retenida **igual o mayor al 75 %** para considerarse aceptable.

Selección de la fórmula de trabajo

Con base en los resultados obtenidos en los pasos anteriores, se elige el **contenido óptimo de ligante** que:

- Cumpla con los límites especificados para VTM, VFA y VMA.
- Presente buena estabilidad y flujo.
- Tenga adecuada resistencia al agua.

Esta formulación se ajusta como **fórmula definitiva de trabajo**, la cual será utilizada para producción.



Elaboración de curvas de diseño

Finalmente, se deben graficar:

- **Curva de vacíos vs. contenido de ligante:** permite visualizar cómo varían los vacíos con el porcentaje de asfalto.
- **Curva de estabilidad retenida vs. contenido de ligante:** muestra la susceptibilidad al daño por agua según el porcentaje de ligante.

Cálculos

- Densidad seca máxima (γ_d max) y contenido óptimo de ligante (por curva vacíos vs ligante).
- Vacíos totales

$$(Vt \%) = \frac{\gamma_b - \gamma_d}{\gamma_b} \times 100$$

- Estabilidad (kN o lb) y flujo (0.25 mm): comparar con Tabla 442P-8 de la norma (mínimo 500 lb, flujo 8–16).

- *Estabilidad retenida* (%) = $\left(\frac{\text{Estabilidad después de inmersión}}{\text{estabilidad antes}} \right) \times 100 \geq 75 \%$.

Recomendaciones

- Usar agua limpia (potable o según tabla 442P-6: pH 5,5–8, $SO_4 < 1$ g/L).
- Mantener temperaturas de mezcla y compactación bajo control.
- Realizar al menos cuatro contenidos de ligante, para ajustar adecuadamente la curva.
- Registrar tolerancias de granulometría $\pm 1-4$ % en producción.

Aplicaciones e importancia

- Proyectos viales NT1: mezclas de bajo costo con materiales naturales, útiles en vías terciarias.
- Reducción de costos de transporte y ligante al aprovechar mezcla no convencional.
- Aporta sostenibilidad al utilizar recursos locales y optimiza diseños de capas base/rodadura.



ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES II
DOCENTE: ING. M. Sc. LUIS A. CAPACHO S.
MATERIAL DE APOYO

- Permite diseños seguros y documentados, con respaldo técnico sobre vacíos, estabilidad y durabilidad.



Uso del Penetrómetro Dinámico de Cono (Norma INV E-172-13)

Objetivo general: Determinar la resistencia in situ de suelos inalterados o compactados mediante el uso del penetrómetro dinámico de cono (PDC) conforme a la norma INV E-172-13.

Objetivos específicos:

- Calcular el índice de penetración (mm/golpe) en cada tramo de profundidad.
- Determinar el CBR in-situ utilizando las correlaciones estándar.
- Graficar penetración vs golpes y el perfil de índice PDC por profundidad.
- Estimar módulos de reacción y módulo resiliente, si aplica.

Fundamento Teórico: El PDC consiste en clavar una punta cónica (60° , base 20 mm) mediante golpes de un martillo de 8 kg (opcionalmente 4,6 kg en suelos blandos), desde 575 mm de altura, registrando la penetración por golpe. La tasa de penetración correlaciona con el CBR y permite estimar la resistencia al corte y densidad del terreno. Penetraciones excesivas o uso de extensiones de varilla requieren precaución al aplicar estas correlaciones (Agreda, 2006).

Materiales y equipo

- Penetrómetro dinámico de cono (varilla de 16 mm \varnothing , punta cónica $60^\circ/20$ mm).



Figura 1. Penetrómetro

Procedimiento

Selección y preparación del punto de ensayo

- **Limpieza del sitio** retirando material suelto, vegetación o ripio.
- Si hay capa dura superficial (asfalto/hormigón/losa), **perforar** solo esa capa con broca ≈ 25 mm sin afectar el suelo subyacente; si el terreno es muy denso, puede hacerse un **barrenado guía de 25 mm** de profundidad mínima para asentar la punta.



- **Alineación vertical:** colocar el PDC lo más **vertical posible** (usar nivel de burbuja si se dispone).

Cero Inicial y configuración de caída

- **Asentar la punta** del cono en contacto firme con el terreno (sin golpear).
- **Leer y registrar el cero:** profundidad inicial (0 mm) y **conteo de golpes = 0**.
- Confirmar **altura de caída** del martillo: **575 mm** (estándar). Definir **masa de martillo** (8 kg por defecto; 4.6 kg para suelos muy blandos). Esta elección impacta la **corrección posterior** del índice.

Ejecución y toma de datos

- **Levantar** el martillo hasta la marca de 575 mm y **soltar** sin acompañar (caída libre).
- Tras cada golpe, **registrar la penetración** acumulada. Puedes adoptar uno de estos dos esquemas (define uno y **sé consistente**):
 - **Lectura por golpe** (mayor resolución).
 - **Lectura por tramo fijo** (p.ej., cada **50 mm** de penetración), anotando los **golpes requeridos** para alcanzar cada tramo. (Este es el más usado en campo por rapidez.)
- **Ritmo de lectura recomendado:**
 - Al inicio (0–150 mm): lecturas **cada golpe** o cada **25–50 mm** (capas superficiales cambian rápido).
 - En profundidad: lecturas **cada 50 mm** son suficientes, salvo cambios de material (ver 11).
- **Extensión de varillas:** cuando la penetración se acerque a la unión, **detener**, enroscar la siguiente varilla, reapretar, verificar verticalidad y **continuar**. Registrar la **profundidad a cada empalme**.
- **Cambios de estrato:** si notas **saltos** en el índice (repentinamente más blando o duro), reduce el intervalo de lectura (volver a **cada golpe** durante 100–150 mm) para definir mejor la **transición estratigráfica**.
- **Obstrucciones / cantos:** si la penetración por golpe cae abruptamente a ~0 mm por varios golpes, gira 10–20° el equipo o desplázalo **≤15 cm** y repite. Documenta la incidencia.



Cálculo

- Índice PDC:

$$\text{Índice PDC} = \frac{\text{Penetración Acumulada}}{\text{Número de Golpes}}$$

- Índice corregido: multiplicar por 1 si se usó martillo de 8 kg, o por 0.575 (4,6/8) si de 4,6 kg.
- Estimación CBR in situ: aplicar correlación del tipo $\text{CBR} = 1 / (0.017019 \times (\text{PDC})^2)$ o usar tablas estándar.
- Graficar penetración vs golpes, perfil de PDC vs profundidad, y estimar módulos si se requiere.

Recomendaciones

- Mantener el PDC vertical y libre de fricción lateral.
- Limpiar bien el orificio entre series de golpes.
- Usar puntas desechables o gato extractor para facilitar remoción.
- En suelos muy blandos, usar martillo de 4,6 kg o reducir altura.
- Documentar condiciones del terreno (contenido humedad, tipo de suelo).
- Evitar uso de extensiones sin ajustar correlaciones.

Aplicaciones e importancia

- Permite evaluar CBR in situ, densidad y resistencia al corte de subrasantes, bases y sub-bases de pavimentos.
- Complementa y reduce la necesidad de ensayos de laboratorio más costosos.
- Ideal para diseños y control de calidad durante construcción de carreteras y pavimentos ligeros.
- Provee información rápida para toma de decisiones constructivas en campo inmediato.



Determinación de la resistencia a la Carbonatación del Hormigón (UNE-EN 12390-12)

Objetivo General: Determinar la resistencia del hormigón a la carbonatación mediante la medición de la profundidad carbonatada en probetas expuestas a condiciones controladas o aceleradas, evaluando el impacto sobre la durabilidad y protección del acero de refuerzo.

Objetivos Específicos:

- Medir la profundidad de carbonatación en probetas de hormigón siguiendo la norma UNE-EN 12390-10 u otra aplicable.
- Comparar los resultados entre muestras expuestas en condiciones naturales y en cámara de carbonatación acelerada.
- Evaluar la variación de la resistencia a compresión antes y después de la exposición.
- Analizar los factores que influyen en la velocidad de carbonatación (relación agua-cemento, porosidad, recubrimiento, curado, etc.).

Fundamento Teórico:

La **carbonatación del hormigón** es un proceso químico en el que el dióxido de carbono (CO_2) penetra a través de los poros y reacciona con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y otros compuestos, formando carbonato de calcio (CaCO_3). Este fenómeno reduce el pH del hormigón desde valores iniciales cercanos a 12-13 hasta niveles por debajo de 9, lo que provoca la pérdida de la pasivación del acero de refuerzo y el riesgo de corrosión.

Factores que afectan la carbonatación:

- Humedad relativa óptima para la reacción: 50-65%.
- Mayor porosidad y alta relación a/c \rightarrow mayor velocidad de carbonatación.
- Curado deficiente incrementa la permeabilidad.
- Recubrimiento insuficiente del acero acelera la pérdida de protección.

La medición de la profundidad carbonatada se realiza normalmente mediante la aplicación de fenolftaleína, que tiñe de color púrpura las zonas con $\text{pH} > 9$, dejando sin color las zonas carbonatadas. (Moreno, E. I., Lara, G. G. D., Sarabia, E. J. C., & Gómez, F. D., 2004)

Materiales y Equipos:

- Probetas cilíndricas o prismáticas de hormigón:
- Cámara de carbonatación acelerada con control de:
 - CO_2 (típicamente $4 \pm 0,5\%$)
 - Humedad relativa ($65 \pm 5\%$)
 - Temperatura ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)



- Sierra o cortadora de probetas.
- Reactivo indicador: solución alcohólica de fenolftaleína al 1%.
- Balanza, pie de rey, cinta métrica.
- Equipos para ensayo de compresión (si se evalúa resistencia).

Procedimiento

Fabricación de las probetas

- Preparar la mezcla de hormigón de acuerdo con el diseño especificado (controlando relación a/c, agregados y aditivos).
- Colar las probetas en moldes cilíndricos o prismáticos.
- Compactar en capas para evitar vacíos.
- Curar las probetas en condiciones estándar (20 ± 2 °C y $95 \pm 5\%$ HR) por **28 días**.
- Identificar cada probeta con un código único.

Exposición

- Seleccionar el tipo de exposición
 - Natural: almacenar en un ambiente exterior controlado, evitando contacto directo con agua lluvia o contaminantes.
 - Acelerada: introducir en cámara de carbonatación con parámetros controlados (CO_2 : $4 \pm 0.5\%$, HR: $65 \pm 5\%$, T: 20 ± 2 °C).
- Registrar la fecha de inicio, condiciones de exposición y duración programada.
- Revisar periódicamente que las condiciones de la cámara se mantengan dentro de tolerancias.

Corte y Revelado

- Al finalizar el periodo de exposición, extraer la probeta y cortar con sierra diamantada en dirección perpendicular a la superficie expuesta.
- Limpiar el corte para eliminar lechada o polvo fino.
- Aplicar con atomizador o pincel una capa uniforme de fenolftaleína al 1% en alcohol etílico.
- Esperar 1–2 minutos y observar el resultado:
 - Zona púrpura = no carbonatada ($\text{pH} > 9$).
 - Zona incolora = carbonatada ($\text{pH} < 9$).

Medición

- En cada corte medir la profundidad sin color en **mínimo 4 puntos por cara** con pie de rey o regla milimetrada.
- Registrar todas las lecturas en el formato de datos.



- Si la probeta se fragmenta, realizar mediciones en cada fragmento.

Ensayo de compresión (opcional)

- Si se requiere, realizar ensayo de resistencia a compresión antes y después de la exposición.

Consideraciones durante la ejecución

- Garantizar que las probetas no se sequen excesivamente antes de la exposición.
- Controlar que la concentración de CO₂, HR y temperatura sean constantes.
- Evitar contaminación superficial que altere la medición del pH.

Cálculos

Profundidad media de carbonatación (mm)

1. Suma todas las mediciones de profundidad tomadas en la probeta.
2. Divide esa suma entre el número total de mediciones.
3. Ejemplo: Si mediste 8, 9, 10 y 11 mm → $(8 + 9 + 10 + 11) / 4 = 9,5$ mm.

Desviación estándar (mm)

1. Resta la media a cada medición para encontrar la diferencia.
2. Eleva al cuadrado cada diferencia.
3. Suma todos esos valores y divídelos entre $(n - 1)$, donde n es el número de mediciones.
4. Calcula la raíz cuadrada del resultado.
5. Ejemplo: mediciones = 8, 9, 10, 11 mm; media = 9,5; diferencias² = 2,25 + 0,25 + 0,25 + 2,25 → suma = 5, dividir entre 3 = 1,67; raíz cuadrada ≈ 1,29 mm.

Porcentaje de reducción de resistencia a compresión (si se hace el ensayo)

1. Resta la resistencia después de la exposición a la resistencia antes de la exposición.
2. Divide esa diferencia entre la resistencia inicial.
3. Multiplica por 100 para obtener el porcentaje.
4. Ejemplo: $f_{\text{before}} = 30$ MPa, $f_{\text{after}} = 27$ MPa → $(30 - 27) / 30 \times 100 = 10\%$.

Recomendaciones

- No manipular las probetas con manos húmedas o con contaminantes.
- Aplicar fenolftaleína inmediatamente después del corte.
- Tomar fotografías claras para documentación.
- Si se usan diferentes mezclas, identificar cada probeta con código único.

Aplicaciones e Importancia del Ensayo

- Permite estimar la vida útil del hormigón armado.



- Es clave para diseñar recubrimientos adecuados y prevenir intervenciones de mantenimiento.
- Facilita la comparación entre distintos diseños de mezcla y tratamientos de curado.
- Ayuda a validar medidas de protección contra la carbonatación en proyectos de alta durabilidad.



Contenido de Vacíos en Agregados Finos No Compactados (INV E-239)

Objetivo General: Determinar el contenido de vacíos en una muestra de agregado fino no compactada, como una medida de la angularidad, esfericidad y textura superficial de las partículas, según lo establecido por la norma INV E-239.

Objetivos Específicos:

- Calcular el porcentaje de vacíos del agregado fino sin compactar usando la fórmula establecida.
- Interpretar los resultados obtenidos con base en la influencia de la forma y textura del agregado.
- Relacionar el contenido de vacíos con el comportamiento del agregado en mezclas de concreto y asfalto.

Fundamento Teórico: El contenido de vacíos en agregados finos no compactados se relaciona directamente con la forma, textura y gradación del material. Una mayor angularidad o rugosidad genera más vacíos entre las partículas. Este ensayo permite comparar agregados finos y predecir su comportamiento en mezclas (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2013). La norma establece tres métodos: A (gradación estándar), B (fracciones individuales) y C (material tal como se recibe), dependiendo del nivel de análisis requerido y del objetivo del estudio.

Materiales y Equipos:

- Medidor cilíndrico calibrado



Figura 1. Medidor cilíndrico.



- **Embudo metálico**



Figura 2. Embudo

- **Soporte para embudo**



Figura 3. Soporte para embudo

- **Placa de vidrio**



Figura 4. Placa de vidrio

- **Espátula metálica**



Figura 5. Espátula metálica



- Recipiente de contención, Lo suficientemente grande para evitar pérdidas de material durante el vertido, Puede ser de plástico o metal
- Balanza de precisión



Figura 6. Balanza

- Agregado fino seco



Figura 7. Agregado

- Agua destilada o desionizada

Procedimiento

- Definir si se trabajará con:
 - **Método A:** Gradación estándar.
 - **Método B:** Fracciones individuales.
 - **Método C:** Material tal como se recibe.
- **Preparación de la muestra**
 - Secar el agregado fino en horno a $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta masa constante (según INV E-213).
 - Dejar enfriar a temperatura ambiente antes del ensayo.
 - Si se usa el **Método A**, combinar las fracciones granulométricas de acuerdo con las proporciones indicadas por la norma.
 - Si se usa el **Método B**, separar el material en las tres fracciones granulométricas establecidas.
 - Si se usa el **Método C**, ensayar la muestra tal como se recibe.



- **Calibración del medidor cilíndrico**
 - Llenar el cilindro con agua destilada o desionizada hasta el ras, evitando burbujas.
 - Medir la masa del agua y, con su densidad conocida ($\approx 1 \text{ g/cm}^3$), calcular el volumen exacto del cilindro en **mililitros (ml o cm³)**.
 - Anotar el volumen **V** para los cálculos posteriores.
- **Llenado del cilindro con agregado**
 - Colocar el cilindro sobre el recipiente de contención, debajo del embudo fijado en el soporte.
 - Llenar el embudo con la muestra de agregado seco.
 - Abrir el embudo para que el material fluya **libremente**, sin golpes ni vibraciones, hasta llenar el cilindro.
 - Nivelar la superficie con una espátula metálica, sin compactar el material.
- **Pesado de la muestra**
 - Pesar el cilindro lleno de agregado.
 - Restar la masa del cilindro vacío y obtener la **masa neta del agregado (F)**.
 - Repetir el procedimiento completo **dos veces** (para métodos A y C) o con cada fracción (para método B).
 - Calcular el promedio de las determinaciones.

Cálculos

El porcentaje de vacíos se determina con la siguiente fórmula:

$$\%U = \left(\frac{\left(V - \left(\frac{F}{G} \right) \right)}{V} \right) \times 100$$

Donde:

V = Volumen del cilindro (ml)

F = Masa neta del agregado fino (g)

G = Gravedad específica bulk seca del agregado fino

%U = Porcentaje de vacíos del agregado fino sin compactar

Para el método **A** o **C** se promedian las dos determinaciones. Para el método **B**, se calcula %U por fracción y se promedia el resultado de las tres.



Recomendaciones

- Evitar vibraciones o golpes durante el llenado y pesado de las muestras.
- Utilizar el mismo procedimiento en cada repetición para asegurar precisión.
- Realizar la calibración del medidor cilíndrico con agua si no se conoce el volumen exacto.
- Registrar adecuadamente todas las mediciones en el laboratorio.

Aplicaciones e Importancia del Ensayo

Este ensayo permite evaluar la influencia del agregado fino sobre la trabajabilidad y estabilidad de mezclas de concreto y mezclas asfálticas. Un contenido alto de vacíos puede indicar la necesidad de mayor cantidad de pasta o ligante en la mezcla. También sirve para comparar la calidad de diferentes fuentes de agregado fino y optimizar sus proporciones en la mezcla total.



Resistencia a la deformación plástica de las Mezclas Asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV E 756-13)

Objetivo General: Determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica mediante la simulación del tránsito vehicular, evaluando su comportamiento bajo condiciones controladas de presión y temperatura mediante la pista de ensayo de laboratorio.

Objetivos Específicos:

- Evaluar el grado de ahuellamiento que puede presentar una mezcla asfáltica sometida a cargas repetitivas.
- Analizar el comportamiento de diferentes mezclas asfálticas frente a condiciones severas de carga y temperatura.
- Identificar el momento y la velocidad de deformación en distintos intervalos de tiempo durante el ensayo.

Fundamento Teórico: Las mezclas asfálticas en los pavimentos están expuestas a cargas repetidas que generan deformaciones permanentes, conocidas como ahuellamientos. Este tipo de deterioro afecta la seguridad y comodidad de los usuarios.

El ensayo simula el paso continuo de vehículos mediante una rueda cargada que se mueve sobre una probeta prismática de mezcla asfáltica en condiciones controladas. Se mide la profundidad de la deformación a lo largo del tiempo, determinando la velocidad de deformación en diferentes intervalos para evaluar el comportamiento del material frente a cargas repetidas y altas temperaturas.

Materiales y Equipos:

- Molde prismático

Figura 1

Molde prismático



Nota. Molde prismático en el que se fabricará la probeta de mezcla asfáltica.

Tomado de *Campaner Ingeniería Geotécnica* <https://campaner.com.ar/producto/molde-prismatico/>

- Base de compactación de concreto (60×60×20cm)



Figura 2. Base de compactación.

- Placa compactadora

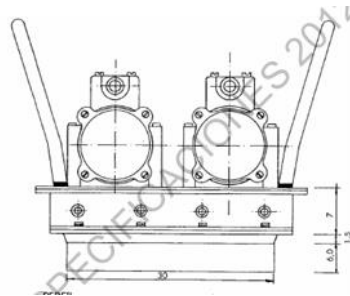


Figura 3. Placa compactadora.

- Máquina de pista de ensayo (carretón con rueda metálica y banda de caucho).



Figura 4. Máquina de pista de ensayo.

- Horno



Figura 5. Horno

- Mezcladora mecánica o recipiente para mezclado manual



Figura 6. Mezcladora

- Termómetros



Figura 7. Termómetro

- Balanzas (precisión mínima 1 g para asfalto, 5 g para agregados)



Figura 8. Balanza

Procedimiento

Fabricación de las probetas

- Calcular la **masa total de mezcla** necesaria a partir del volumen interno del molde prismático y de la **densidad teórica máxima (Marshall)**.
- Secar los agregados a **$110 \pm 5^{\circ}\text{C}$** hasta masa constante y calentar el ligante asfáltico a la temperatura recomendada para obtener la viscosidad de mezcla (**$170 \pm 20 \text{ cSt}$**).
- Mezclar los agregados calientes con el asfalto, asegurando **homogeneidad** y evitando pérdidas de material.
- Precalear el molde prismático y la base de compactación.
- Colocar la mezcla en el molde en **capas sucesivas**, enrasar y compactar cada capa con la placa vibratoria durante **75 s por etapa** hasta completar **4 etapas**.
- Dejar enfriar las probetas dentro del molde al ambiente durante **12 a 24 horas**.
- Desmoldar y verificar las dimensiones, asegurando que no existan fisuras ni segregación.



Preparación previa al ensayo

- Introducir las probetas en un horno a **60 ± 2°C durante 4 h** para estabilizar su temperatura.
- Precalentar la cámara de la máquina de ensayo durante al menos **2 h** a la misma temperatura de prueba (**60 ± 1°C**).
- Colocar cuidadosamente la probeta en la pista de ensayo, evitando contacto previo con la rueda de carga.
- Colocar la rueda metálica recubierta con banda de caucho sobre la probeta y aplicar la carga de prueba especificada.
- Esperar **30 min adicionales** para homogeneizar la temperatura de toda la muestra antes de iniciar la prueba.

Ejecución del Ensayo

- Asentar la rueda realizando **3 pasadas previas** sin registro de datos, con el fin de eliminar irregularidades iniciales.
- Iniciar el ensayo y mantenerlo por **120 min** o hasta alcanzar **15 mm de deformación**, lo que ocurra primero.
- Medir la deformación vertical con el sistema de medición (micrómetro o LVDT) en los siguientes intervalos:
 - Minutos: **1, 3 y 5**.
 - Cada **5 min** hasta los **45 min**.
 - Cada **15 min** hasta los **120 min**.
- Registrar todas las lecturas en la hoja de datos, asegurando consistencia en los intervalos de tiempo.

Cálculos

- Calcular la deformación total en cada tiempo.
- Graficar la curva deformación (μm) – tiempo (min).
- Calcular la velocidad de deformación media entre dos tiempos t_1 y t_2 :

$$V_{t_2/t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

Donde:

- V_{t_2/t_1} = Velocidad de deformación en μm/min
- d_{t_2}, d_{t_1} = Deformaciones en los tiempos t_2 y t_1 respectivamente



- t_2, t_1 = Tiempos en minutos

Se sugieren los intervalos de la siguiente manera: 30-45 min, 75-90 min, 105-120 min.

Recomendaciones

- Controlar estrictamente las temperaturas durante todo el ensayo.
- Asegurarse de que la mezcla esté homogénea y correctamente compactada.
- Utilizar equipo calibrado y limpio para evitar errores de lectura.
- Registrar datos inmediatamente después de cada medición.

Aplicaciones e Importancia del Ensayo

- Permite predecir el comportamiento de mezclas asfálticas en condiciones reales de tráfico y clima.
- Es fundamental en el diseño y control de calidad de mezclas utilizadas en pavimentos sometidos a cargas pesadas.
- Ayuda a seleccionar mezclas con mayor resistencia a la deformación plástica, mejorando la durabilidad del pavimento y reduciendo el mantenimiento.