



Comparativa granulométrica y comportamiento de finos de pétreos de origen natural y reciclados de concreto

Granulometric comparison and behavior of stone fines
of natural origin and recycled concrete

Flor María de los Ángeles González Porta*
Juan Bosco Hernández Zaragoza

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México.

*angelesgporta@gmail.com

01

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

F. M. A. González Porta y J. B. Hernández Zaragoza, "Comparativa granulométrica y comportamiento de finos de pétreos de origen natural y reciclados de concreto", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 9, núm 16, pp. 6-22, 2026.



Resumen

Esta investigación determina las características de los materiales de construcción reciclados, las cuales pueden variar según el concreto de origen, por lo que cada banco de reciclado debe ser evaluado acorde a las normativas mexicanas vigentes. Los materiales reciclados pueden usarse en construcciones, aunque no en capas estructurales debido a la heterogeneidad en sus distribuciones granulométricas, sino en los estratos inferiores como terracerías. Después de aplicar experimentos de laboratorio, se identificó una elevada concentración de arenas para los reciclados de concreto (60.22 %) frente a los naturales (30.95 %). Se comparó la granulometría, textura y comportamiento de los finos, destacando que

estos fortalecen la resistencia del concreto al rellenar fisuras. La investigación se centra en la evaluación de la factibilidad de uso de materiales reciclados por medio de parámetros establecidos en las normativas a manera de alternativa sustentable para la construcción de carreteras, comparando los materiales de origen natural y procesado, y se determina que es la combinación entre ambos la que mejora el rendimiento de las mezclas. En Querétaro, existe solamente un banco de reciclados de construcción normados, y se recomienda su utilización combinada para mejorar la distribución granulométrica y las propiedades mecánicas de las mezclas.

Palabras clave: agregados reciclados, construcción de carreteras, economía circular, emisiones de CO_2e , granulometría, límites de Atterberg.

Abstract

This research evaluates the characteristics of recycled materials, which vary depending on the concrete of origin, thus each recycling bank must be evaluated according to current Mexican regulations. Recycled materials can be used in construction, although not in structural layers due to the variability in their granulometric distribution, but in lower strata as is the case in dirt roads. Laboratory tests were carried out, identifying a high concentration of sands in the recycled concrete (60.22%) in comparison to the natural ones (30.95%). The granulometry, texture and behavior of the fines were evaluated, highlighting that these im-

prove the concrete resistance by means of filling cracks. The research focuses on the evaluation of the feasibility of using recycled materials through parameters established in the regulations as a sustainable alternative in road construction, comparing materials of natural and processed origin, concluding that the combination of both improves performance. of the mixtures. In Querétaro, there is only one regulated construction recycling bank, and its combined use is recommended to improve the particle size distribution and mechanical properties of the mixture..

Keywords: recycled aggregates, road construction, circular economy, CO_2e emissions, particle size distribution, Atterberg limits.



Introducción

De acuerdo con la SEMARNAT, la economía circular es un modelo de desarrollo que busca mantener el valor de los productos, materiales y recursos en las cadenas de producción durante el mayor tiempo posible mediante estrategias como el ecodiseño, el reciclaje, la reutilización y la valorización [1]. No obstante, a pesar de la creciente demanda y relevancia del proceso de reciclaje, en México, la proporción de materiales reciclados alcanzó apenas el 9.63 % del volumen total de residuos generados en 2012 [2].

El CO_{2e} de los gases de efecto invernadero (como metano, óxido nitroso y varios gases fluorados) refiere a la concentración equivalente de CO_2 que tendría el mismo efecto de forzamiento radiativo durante un periodo de 100 años. Al respecto, la media de CO_{2e} por tonelada de asfalto generada es de 0.055 kg CO_{2e} /kg mientras que el asfalto reciclado alcanza los 0.066 kg CO_{2e} /kg, es decir, un 20 % más [3]. Por otro lado, Jiménez [4] reporta una densidad de CO_{2e} /kg para agregados naturales de 0.00132 m³ piedra/kg y de 0.002 m³ fragmentos/kg para agregados de concreto reciclados. Sin embargo, al priorizar la cuantificación de las emisiones de carbono sobre el análisis detallado del proceso de reciclaje en sí, se ha relegado la importancia del material reciclado en obras de construcción.

El objetivo principal de la presente es comparar las propiedades granulométricas y el comportamiento de los finos en materiales pétreos de origen natural y reciclado, con el fin de evaluar su viabilidad técnica para su uso en la construcción de carreteras, particularmente en las capas de menor exigencia estructural.

Marco teórico

La Unión Europea [5] informó sobre la generación de 2317 millones de toneladas de residuos en 2018, de las cuales el 36 % (aproximadamente 834 millones de toneladas) provino de la industria de la construcción. Este sector genera repercusiones medioambientales insoslayables: desviaciones de los cauces superficiales, contaminación de aguas subterráneas, cambio de uso de suelos, polución atmosférica, pérdida de vegetación, impactos visuales, reducción de terreno cultivable. En este contexto, Hansen reporta que, como estrategia de desarrollo sostenible, el polvo de piedras y agregados de concreto puede reciclarse con resultados satisfactorios en durabilidad y resistencia, tanto al estrés mecánico como al fuego [6] en la producción de concretos verdes [7]. Otra ventaja es el ahorro de recursos no renovables relacionados con operaciones secundarias en la extracción de materia prima para



la producción de concreto (por ejemplo, el combustible para el transporte del material y los sitios de explotación directa del terreno).

Fergus [8] aplicó a un agregado de concreto reciclado 300 ciclos en una cámara de congelamiento y deshielo, tras los cuales se mantenían sus propiedades de durabilidad y buena calidad general. Aunque se trata de un estudio temprano, abre la posibilidad de que el uso de residuos en el concreto pueda beneficiar tanto a la industria de la construcción, al mejorar la durabilidad y resistencia, como a la gestión de residuos, al contribuir a estrategias de cero residuos y economía circular [9], [10]. A su vez, los trabajos de Tejas y Pasla evaluaron las propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto con pétreos reciclados, y estimaron que el módulo elástico puede incluso superar el de un concreto convencional [11].

En cuanto a la durabilidad, se ha reportado que, aunque los agregados reciclados presentan un mayor desgaste en la prueba de Los Ángeles frente a los naturales, exhiben mejor resistencia al intemperismo acelerado. Esta capacidad se atribuye a su origen, principalmente de concreto premezclado diseñado para resistir ambientes agresivos. El desempeño similar de ambos materiales en pruebas micro-Deval sugiere que los agregados reciclados podrían ser aptos para aplicaciones en capas no estructurales donde la abrasión es moderada [12].

La granulometría de los agregados influye directamente en la densidad, resistencia, permeabilidad y trabajabilidad del concreto o mezcla. Un material con predominancia de partículas gruesas (como la grava) suele ofrecer mayor resistencia mecánica, menor área superficial específica, y por tanto, menor demanda de agua y cemento, haciéndolo ideal para capas estructurales como bases o subbases de pavimentos. Por otro lado, un material con alta proporción de partículas finas (arena o limos) puede mejorar la trabajabilidad y facilitar el acabado superficial, pero si no está bien graduado, puede provocar exudación, fisuración por contracción, y pérdidas de resistencia. Además, un exceso de finos puede reducir la permeabilidad de los agregados y afectar su comportamiento frente a la precipitación o la intemperie, limitando su aplicación a las capas inferiores no estructurales [13]. Por tanto, una de las desventajas de los reciclados es que tanto el agregado fino como el grueso presentan una granularidad tan irregular que no necesariamente les permite componer mezclas lo suficientemente densas, compactas o manejables.

Por último, los límites de Atterberg [14] proporcionan información sobre las propiedades de deformación de la fracción de materiales que pasa a través de la malla núm. 40 (0.425 mm), el límite técnico entre fracción gruesa y fina en suelos según la mayoría de las normativas geotécnicas. Los resultados de estas



pruebas se emplean principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. El proceso de prueba implica la determinación del límite líquido (LP), que es el contenido de agua en el cual un suelo plástico exhibe una resistencia al corte de 2.45 kPa ($\sim 25 \text{ g/cm}^2$), marcando la transición entre los estados semilíquido y plástico. Además, se evalúa el límite plástico, que es el contenido de agua para el cual un cilindro de suelo se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm, marcando la transición entre estados plásticos y semi-sólidos. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

Metodología

A fin de llevar a cabo las pruebas empíricas, en primer lugar, se recopilaron muestras de agregados pétreos de una cantera natural y de un proveedor industrial de agregados reciclados. En segunda instancia, se aplicaron las normas SCT-MMP-1-03-03 [15], referentes a la preparación y condiciones de evaluación de agregados pétreos. Como siguiente paso se realizó el análisis granulométrico por medio de un tamizado gradual sistemático de cada tipo de muestra bajo la SCT-MMP-1-06-03 [16]. La siguiente etapa consistió en la determinación de los límites de consistencia de los materiales por medio del método del cono de penetración de conformidad con la norma británica BS 1377:2-1990 [17]. Por último, una vez obtenidos los registros de granulometría, límite líquido e índice plástico, se procedió a una comparación entre los especímenes para determinar la adecuación de los agregados reciclados como materiales de construcción en carreteras en función de sus parámetros físicos.

Equipo

Para el cuarteo del material se utilizaron equipos de conformidad con la normativa M-MMP-1-03-03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Figura 1):

- Cuarteador metálico
- Cuchara
- Tres bandejas
- Charola rectangular para depositar el material descartado



FIGURA 1.

Equipo para cuarteo: cuarteador metálico, cuchara, bandejas, charola rectangular para depositar el material descartado. Fuente: elaboración propia.



De acuerdo con la normativa M-MMP-1-06-03, para la granulometría se emplearon tamices de las siguientes medidas (Figura 2):

- 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4" y núm. 4 para las gravas
- Núm. 10, núm. 20, núm. 40, núm. 60, núm. 100 y núm. 200 para las arenas y finos

Adicionalmente se ocupó un cucharón para el vertido del material en las mallas, así como una charola como fondo y la tapa superior para evitar pérdida de finos. El uso de diferentes mallas obedece a la clasificación granulométrica estándar de los materiales pétreos, donde los tamaños de partícula determinan si el material se considera grava, arena o fino. De acuerdo con la normativa y la clasificación del sistema SUCS, las partículas mayores a 4.75 mm se consideran gravas, mientras que aquellas entre 0.075 mm y 4.75 mm se clasifican como arenas. Las que son menores a 0.075 mm se identifican como finos.

FIGURA 2.

Equipo para granulometría. Conjunto de mallas empleadas para el proceso de tamizado sucesivo. Fuente: elaboración propia.



La técnica utilizada para la obtención de los límites de Atterberg o límites de consistencia fue el método de penetrómetro cónico. Los límites de Atterberg



se utilizan para caracterizar el comportamiento plástico de los suelos finos, determinando su capacidad de deformarse sin romperse. Específicamente, permiten identificar el contenido de humedad en el cual un suelo cambia de estado sólido a semisólido (límite plástico), y de semilíquido a plástico (límite líquido). Estos valores son fundamentales para clasificar los suelos según el sistema SUCS y para prever su desempeño en campo, ya que influyen directamente en la trabajabilidad, compactabilidad y estabilidad del material en terracerías o capas estructurales. En la Figura 3 se aprecia la copa de Casagrande y el penetrómetro respectivamente. Adicionalmente, se ocupó un mortero de porcelana con pistilo para la homogenización y mezclado de los finos y agua previo a su uso en las pruebas.

FIGURA 3.
Equipo de límites de consistencia. Cono de penetración normalizado con su respectivo penetrómetro (izquierda) y copa de Casagrande (derecha).
Fuente: elaboración propia.



Recopilación de muestras

Los agregados pétreos naturales empleados en el proyecto fueron extraídos de una cantera ubicada en la cañada del municipio de El Marqués, Querétaro. Esta fuente suministra materiales pétreos de calidad estandarizada al corporativo Abraham González, una empresa mexicana del sector de la construcción. En total se extrajo una muestra.

Los reciclados fueron provistos por Reurba, compañía que posee la única certificación en el registro de prestadores de servicios especializados en residuos de construcción en el estado de Querétaro. Se extrajeron tres muestras, puesto que los reciclados suelen presentar características muy variables, incluso si vienen del mismo proveedor.



Cuarteo del material (M-MMP-1-03-03)

Se llevó a cabo un cuarteo (descarte aleatorio de la mitad de cada muestra), previo secado y desagregación de ambos materiales, utilizando un cuarteador metálico bajo las especificaciones establecidas en la normativa M-MMP-1-03-03 (Figura 4):

- Número igual de aberturas de los ductos separadores en ambas direcciones de vertido
- No menos de 8 para materiales gruesos, 12 para finos
- Ancho mínimo de aberturas: 1.5 veces el tamaño máximo de las partículas si la muestra es gruesa; 12.5 a 20 mm si la muestra pasa la malla de 3/8"
- Tolva de ancho igual o menor que las aberturas en general y longitud igual al cuarteador
- Dos charolas laterales para recibir el material

FIGURA 4.
Cuarteador con material pétreo. Se observan las ranuras que dividen por la mitad cada muestra y las depositan en la bandeja inferior.
Fuente: elaboración propia.



El proceso se efectuó cuatro veces, una por cada muestra recopilada (3 naturales y 1 reciclada).

Análisis granulométrico (M-MMP-1-06-03)

Este ensayo tiene la finalidad de identificar la distribución de tamaños de las partículas que conforman los materiales pétreos empleados y consiste básicamente en el cribado secuencial de las muestras de agregados; los detalles pueden consultarse en [16]. Los resultados son esenciales para comprender la distribución de tamaños de las partículas en los materiales y desempeñan un papel crucial en el proceso de diseño y construcción. Como cabe suponer, se realizaron en total cuatro análisis granulométricos: tres a los agregados reciclados y uno a los agregados naturales.



Determinación de límites de consistencia

Se cuantificaron los respectivos índices plásticos (IP) de las muestras, en función de los límites de Atterberg. Estos parámetros suelen tratarse en términos de los límites líquido (LL) y plástico (LP), para los cuales existen pruebas específicas; sin embargo, debido a la baja cohesión de las muestras recopiladas en esta investigación, fue necesario recurrir a datos de LP reportados en literatura previa. El LL se graduó a partir del test del cono de penetración, normado por la normativa británica BS 1377:2-1990, que permite obtener resultados de materiales limosos y/o arenosos con bajo índice de plasticidad. Consiste en colocar un cono normalizado de 30° y 80 g (Figura 5) sobre una muestra de suelo, y dejar que penetre el material durante un lapso de 5 segundos; la profundidad que alcanza está estrechamente correlacionada con el contenido de humedad. Entonces, se considera que el LL se encuentra al porcentaje de humedad en que el cono penetra una longitud de 20 mm; en cuanto al LP, Barreto y Gámez [18] indican que el punto de transición entre el estado plástico y semisólido en materiales con bajo índice de plasticidad se encuentra a una penetración de 2.2 mm.

El índice de plasticidad se calculó como una función de ambos límites por medio de la diferencia entre ellos, multiplicada por el factor 0.73, que compensa la divergencia entre las pruebas realizadas con el cono de penetración contra los métodos convencionales: de copa de Casagrande para el LL y el método de desmoronamiento para el LP.

$$IP = 0.73 (LL - LP) \quad (1)$$



FIGURA 5.
Cono de penetración
colocado sobre la
muestra de material
para determinar el
límite de consistencia.
Fuente: elaboración
propia.



Resultados

Granulometría

El material natural presenta un tamaño nominal de partícula de 2 mm, lo que correspondería con una arena; a pesar de ello, la presencia de grava es mayor debido a que la diferencia con la malla de 1” y la malla de ½” es minúscula. El material contiene una cantidad menor de arenas de las mallas número 40 a la 200, debido a que el proveedor las reserva para mezclas con especificaciones únicas de uso en asfaltos. El resumen de todas las mallas se encuentra en la Tabla 1, y los colores representan el nivel de retención de cada malla en orden descendente como sigue: rojo, naranja, amarillo, verde claro y verde oscuro.

TABLA 1.
Granulometría de pétreo natural. Fuente: elaboración propia.

MALLA (RETENIDO)	MM	CONTENIDO DEL COSTAL 1 EN GRAMOS	%
1.5”	37.5	526.7	6.60
1”	25	1264.9	15.84
0.75”	19	731.7	9.16
0.5”	12.5	1257.7	15.75
0.375”	9.5	301.1	3.77
0.25”	6.3	932.8	11.68
núm. 4	4.75	416.5	5.22
núm. 10	2	1286.6	16.11
núm. 20	0.85	634.8	7.95
núm. 40	0.425	299.8	3.75
núm. 60	0.25	101.2	1.27
núm. 100	0.15	75.2	0.94
núm. 200	0.075	75.2	0.94
Pasa 200		82.1	1.03
Total		7986.3	100.00

El material pétreo reciclado muestra alta variabilidad en las granulometrías, pero predominan las arenas en los tres grupos (pese a que una de las muestras se compuso mayoritariamente de grava a propósito); en la Tabla 2 se encuentra el resumen de todas las mallas, con el código de color especificado antes. En los tres costales el tamaño nominal fue de 2 mm, con alta incidencia de



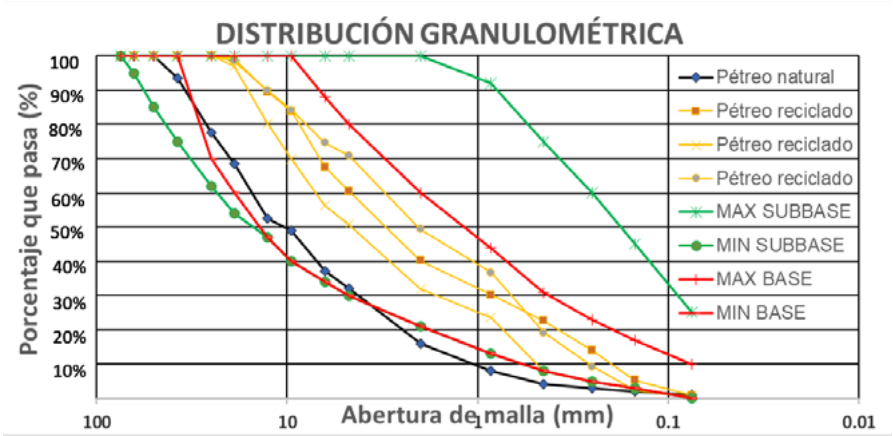
grava de ½” en el costal 2 y arenas de 0.425 mm en el costal 3. Esta diferencia puede atribuirse a la naturaleza heterogénea del concreto reciclado, ya que proviene de residuos de construcción con composición, origen y procesamiento muy variables. A diferencia de los agregados naturales, que provienen de fuentes controladas, los reciclados pueden contener fragmentos de diferentes tipos de concreto (estructural, pavimento, banquetas, etc.) con distintos tamaños y grados de trituración. Además, durante la recolección, es posible que no se haya realizado un cribado uniforme en el banco Reurba, lo que provoca que en una misma zona de extracción coexistan partículas más finas y más gruesas.

TABLA 2.
Granulometría de los pétreos reciclados. Fuente: elaboración propia.

MALLA (RETENIDO)	mm	COSTAL 1 (G)	COSTAL 2 (G)	COSTAL 3 (G)
0.75"	19	25.6	139	64.7
0.5"	12.5	252.3	792.3	354.2
0.375"	9.5	147.7	484	233.7
0.25"	6.3	427.3	632.9	388.7
núm. 4	4.75	183	258.2	155.1
núm. 10	2	533.1	881.8	882
núm. 20	0.85	261.7	390.3	516.8
núm. 40	0.425	200.4	741.5	726
núm. 60	0.25	226.5	139.4	402.6
núm. 100	0.15	226	94.7	283.2
núm. 200	0.075	118.6	106.6	91.6
Pasa 200		21.4	24.3	6.5
Total		2623.6	4685	4105.1

Las curvas granulométricas, tanto de pétreos naturales como de reciclados de concreto, se muestran a continuación en la Figura 6. Se muestran también las gráficas correspondientes a los valores máximos y mínimos permitidos para los materiales empleados en la construcción de bases y subbases carreteras [19].

FIGURA 6.
Curvas de granulometría de las muestras. Fuente: elaboración propia.





La clasificación de acuerdo con el contenido de gravas, arenas y finos se realiza con base en la distribución del contenido y los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c). El cálculo del C_u se da por medio de:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

Y el C_c :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} \quad (3)$$

Donde:

D_{10} Tamiz por el que pasan el 10 % de partículas más pequeñas

D_{30} Tamiz por el que pasan el 30 % de partículas más pequeñas

D_{60} Tamiz por el que pasan el 60 % de partículas más pequeñas

Adicionalmente, para realizar el cálculo de los diámetros efectivos es necesaria una interpolación con la Ecuación 4:

$$D_x = D_i \cdot \left(\frac{x}{x_i} \right)^{\left(\frac{\log\left(\frac{D_s}{D_i}\right)}{\log\left(\frac{x_s}{x_i}\right)} \right)} \quad (4)$$

Donde:

D_i Diámetro conocido anterior al diámetro buscado

D_s Diámetro conocido posterior al diámetro buscado

X Porcentaje asociado al diámetro buscado

X_i Porcentaje asociado al diámetro anterior al diámetro buscado

X_s Porcentaje asociado al diámetro posterior al diámetro buscado

Una vez sustituidos en la Ecuación (4) los valores registrados, se tiene:

$$D_{10} = 1.1491 \text{ mm}$$

$$D_{30} = 4.4101 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 15.6378 \text{ mm}$$

Con estos diámetros efectivos se tienen los siguientes coeficientes de uniformidad y curvatura:

$$C_u = 13.6087$$

$$C_c = 131.0823$$



Con los datos anteriores, se puede concluir de los agregados naturales que:

- Contienen un 68.01 % de gravas.
- Las arenas deben ser nombradas en su clasificación, puesto que componen el 20 % o más del agregado.
- Los finos no son decisivos, pues representan un 1.03 %.
- La clasificación SUCS corresponde a una *grava bien graduada con arena*.

Para los agregados reciclados se tienen los datos resumidos en la Tabla 3:

TABLA 3.

Coefficientes de uniformidad y curvatura de las tres muestras de agregados reciclados, determinados a partir de sus respectivas distribuciones granulométricas. Fuente: elaboración propia.

COSTAL	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c
1	0.204141593	0.837657186	4.680153817	22.92601792	0.734414107
2	0.48432232	1.730988983	7.217009006	14.90125215	0.857229043
3	0.262696846	0.687042355	3.36053288	12.79243713	0.534692407

Con los datos anteriores, se puede concluir de los agregados reciclados que:

- Predomina el contenido de arenas con 59.7 % (costal 1), 50.25 % (costal 2) y 70.7 % (costal 3).
- Las gravas deben ser nombradas en su clasificación, puesto que componen el 20 % o más de los agregados.
- Los finos no son decisivos al tener solo un 0.82 % (costal 1), 0.52 % (costal 2) y 0.16 % (costal 3) de ellos de manera natural; sin embargo, al ser sometidos al desgaste estos materiales tienden a producir un alto contenido de finos, por lo que es importante su evaluación.
- Los agregados reciclados tienen una clasificación SUCS de *arenas mal graduadas con grava* (SP).

Límites de consistencia

Respecto a los resultados de la prueba con el cono de penetración, en la Tabla 4 se observan las humedades a la par de su penetración para los finos de los agregados; un análisis gráfico se muestra en las Figuras 7 y 8, donde se observan las intersecciones del LL y el LP.



TABLA 4.
Datos del cono de penetración: material natural y material reciclado. Se muestra el contenido de humedad correspondiente a cada grado de penetración. Fuente: elaboración propia.

MATERIAL NATURAL		MATERIAL RECICLADO	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)
26.7	86	36.9	94
31.1	155	41.7	116.5
32.7	201.5	43.6	201
31.8	224.5	45.2	224.5
36.7	273	48.1	345

FIGURA 7.
Línea de tendencia del material natural.
Fuente: elaboración propia.

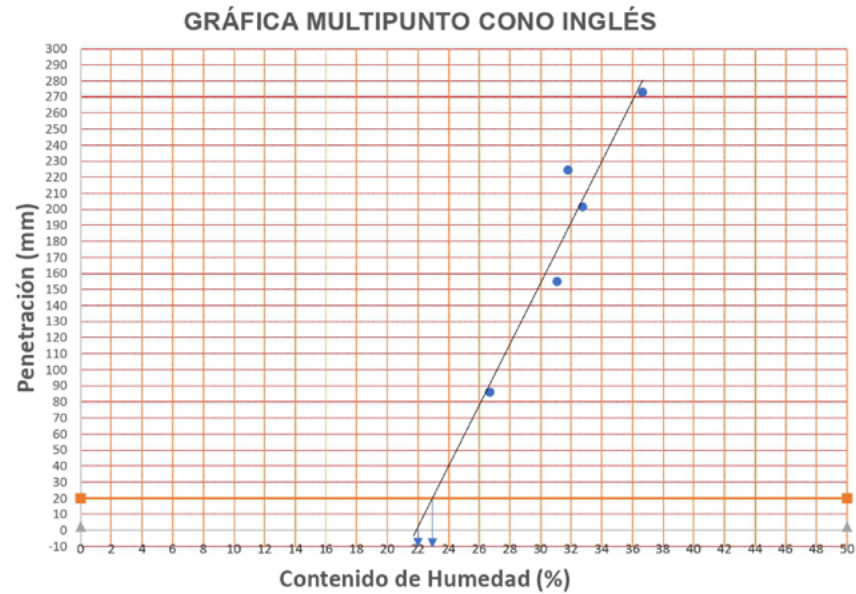
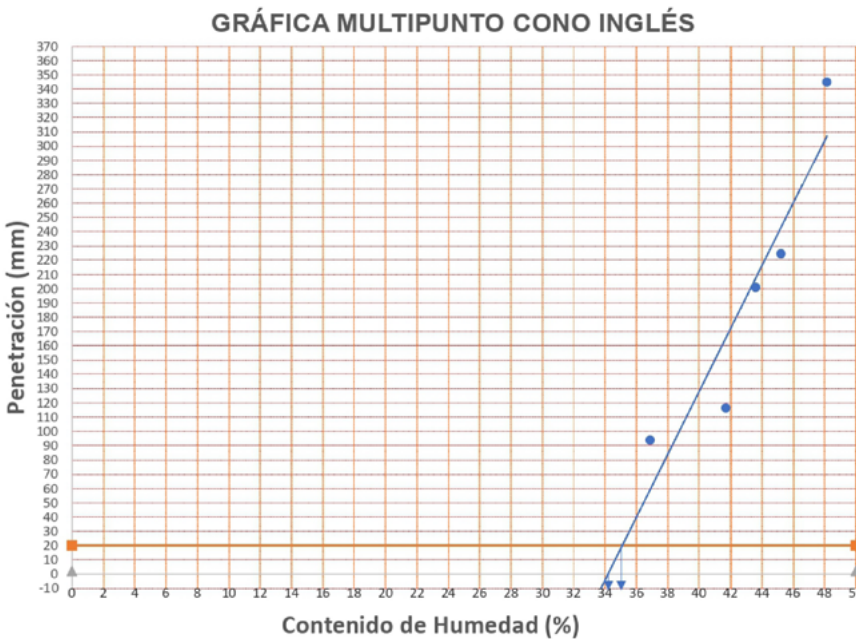


FIGURA 8.
Línea de tendencia del material reciclado.
Fuente: elaboración propia.





En las gráficas mostradas puede apreciarse que el límite líquido de los materiales naturales (la intersección de la recta de regresión lineal con la profundidad de penetración de 20 mm) es de 23 %, mientras que el límite plástico (la intersección de la recta de regresión lineal con la profundidad de penetración de 2.2 mm) es de 22 %. Por tanto, el índice plástico de los finos naturales está dado por:

$$IP = 0.73(23 - 20) = 2.19$$

En cuanto a los materiales reciclados, una muestra compuesta por una porción aleatoria de cada costal dio como resultado un límite líquido de 35 %, mientras que el límite plástico fue de 34.4 %. Para los finos reciclados esto daría un valor de:

$$IP = 0.73(35 - 20) = 10.95$$

De acuerdo con la clasificación SUCS los finos del material natural corresponden a un *limo inorgánico de baja compresibilidad*, mientras que los finos del material reciclado serían clasificados como un *limo inorgánico de mediana compresibilidad* y/o *limo orgánico*.

Conclusión

Los estudios revelan que los materiales reciclados tienen un mayor contenido de arena (60.22 %) en comparación con los naturales (30.95 %), lo que genera una variabilidad en el tamaño de partículas que dificulta su uso en capas estructurales. Los agregados naturales presentan una mejor graduación, con un C_u de 13.61 y un C_c de 131.08, clasificándolos como *gravas bien graduadas con arena*, mientras que los reciclados tienen mayor variabilidad, con un C_u entre 12.79 y 22.93 y un C_c que oscila entre 0.53 y 0.86, clasificándose como *arenas mal graduadas*. Los límites de Atterberg muestran baja plasticidad en ambos tipos de agregados, aunque los reciclados presentan un límite líquido más alto (35 %) e índice de plasticidad mayor (10.95 %) que los naturales. Además, los agregados reciclados generan un 20 % más de emisiones de CO_2 (0.066 kg CO_2 /kg) que los naturales (0.055 kg CO_2 /kg), lo que, sumado a su mayor costo y menor consistencia granulométrica, limita su uso en capas superiores.

No se recomienda el uso en sustitución total de agregado natural por agregado reciclado, ya que sus características (con excepción de su buena resistencia al intemperismo, como se demostró en estudios anteriores) suelen ser inferiores a las de los agregados naturales. Esto no implica que sean inadecuados, sino que actualmente no cumplen con los parámetros normativos exigidos para su



uso en capas estructurales. Esta limitación impide que los agregados reciclados contribuyan plenamente a los objetivos de la economía circular, pues para que un material abone de forma efectiva a este modelo, debe ser técnica y normativamente viable como sustituto funcional, lo cual aún requiere más investigación, clasificación rigurosa y normativas estandarizadas que permitan su aprovechamiento integral.

Los agregados pétreos reciclados presentan ventajas importantes, como una alta resistencia a las sales y al intemperismo, así como una buena trabajabilidad de sus finos, los cuales, según los límites de plasticidad, se comportan como limos. Esta característica los hace útiles en aplicaciones donde se requiere cierta manejabilidad, aunque su baja cohesión puede ser una limitación. Sin embargo, también presentan desventajas relevantes. Entre ellas se encuentra su alta variabilidad granulométrica, incluso dentro de un mismo banco de materiales, lo que dificulta garantizar un comportamiento uniforme. A pesar de solicitar muestras representativas de grava, en las pruebas realizadas se observó una predominancia de arenas. Esta falta de consistencia, sumada a un mayor costo de producción y a una generación ligeramente superior de emisiones de CO_{2e} en comparación con los materiales naturales, limita su aplicación en capas estructurales superiores, como carpetas asfálticas o losas de rodamiento, donde se requiere durabilidad y control granulométrico preciso.

Por estas razones, se considera que el uso más viable y realista de los agregados reciclados es en capas inferiores, como terracerías, subrasantes, subbases y bases, donde las exigencias estructurales son menores y se pueden tolerar algunas variaciones sin comprometer la seguridad o durabilidad de la vía. Se recomienda su utilización en combinación con materiales naturales en proporciones menores al 50 %, previa evaluación de sus propiedades. Esta estrategia no solo permite aprovechar los residuos de la construcción, sino que también promueve una gestión más sustentable al reducir el consumo de recursos naturales no renovables. Además, se subraya la necesidad imperante de desarrollar pruebas de desempeño en campo que habiliten la validación empírica del comportamiento bajo condiciones reales.

Agradecimientos

Un agradecimiento al laboratorio de suelos de la UAQ y a mi esposo por siempre apoyarme. Además, se agradece el acceso a los bancos de materiales y la disposición de los propietarios para suministrarlos.



Referencias

- [1] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). "Gobierno de México expide la Ley General de Economía Circular enfocada en impulsar la conservación del medio ambiente del país". Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/gobierno-de-mexico-expide-la-ley-general-de-economia-circular-enfocada-en-impulsar-la-conservacion-del-medio-ambiente-del-pais?idiom=es>
- [2] V. J. Gutiérrez Avedoy, I. F. Ramírez Hernández, G. Encarnación Aguilar, y A. Medina Arévalo, *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2012*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>
- [3] Comité Técnico D.2 Pavimentos, *Reducción de la huella de carbono del ciclo de vida de los pavimentos*. Organización de las Naciones Unidas: PIARC, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.piar.org/es/pedido-de-publicacion/31426-es-Reducción%20de%20la%20huella%20de%20carbono%20del%20ciclo%20de%20vida%20de%20los%20pavimentos%20-%20Informe%20Técnico>
- [4] L. F. Jiménez, J. A. Domínguez, y R. E. Vega-Azamar, "Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete", *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, núm. 1, Art. 7949741, 2018, DOI: [10.1155/2018/7949741](https://doi.org/10.1155/2018/7949741)
- [5] Eurostat, *Waste Statistics*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2020/11/Waste-statistics.pdf>
- [6] T. C. Hansen, "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985", *Materials and Structures*, vol. 19, pp. 201-246, 1986, DOI: [10.1007/bf02472036](https://doi.org/10.1007/bf02472036)
- [7] H. R. Sobuz, M. H. Khan, R. Islam, K. I. Kabbo, A. Alzlfawi, M. Jameel, y M. H. Khan, "Combined influence of crushed brick powder and recycled concrete aggregate on the mechanical, durability and microstructural properties of eco-concrete: An experimental and machine learning-based evaluation", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 36, pp. 8757-8776, 2025, DOI: [10.1016/j.jmrt.2025.05.118](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.118)
- [8] J. S. Fergus, "Laboratory investigation and mix proportions for utilizing recycled Portland cement concrete as aggregate", en *Proceedings of the National Seminar on PCC Pavements Recycling and Rehabilitation*, Washington, DC, EUA, Dic. 1981, Rep. FHWA-TS-82-208, pp. 144-160.
- [9] S. Jadon y S. Kumar, "Stone dust and recycled concrete aggregates in concrete construction: An efficient way of sustainable development", *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: [10.1016/j.matpr.2023.04.221](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.221)
- [10] S. Vilakazi, E. Onyari, O. Nkwonta, y J. K. Bwapwa, "Reuse of domestic sewage sludge to achieve a zero waste strategy & improve concrete strength & durability - A review", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 43, pp. 122-127, 2023, DOI: [10.1016/j.sajce.2022.10.012](https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.10.012)
- [11] S. Tejas y D. Pasla, "Assessment of mechanical and durability properties of composite cement-based recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 387, art. 131620, 2023, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.131620](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131620)
- [12] R. Alvarado Uribe *et al.*, "Comparativa del desgaste de materiales pétreos de origen natural y materiales pétreos reciclados", *Coloquio POSGRADO FI UAQ*, 2023, no publicado.
- [13] R. A. Khan, J. N. Akhtar, R. A. Khan, y M. N. Akhtar, "Experimental study on fine-crushed stone dust a solid waste as a partial replacement of cement", *Materials Today: Proceedings*, 2023, DOI: [10.1016/j.matpr.2023.03.222](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.222)
- [14] *Límites de Consistencia*, M-MMP-1-07/07, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-07-07.pdf>
- [15] *Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras*, M-MMP-1-03/03, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-03-03.pdf>
- [16] *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*, M-MMP-1-06/03, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-06-03.pdf>
- [17] *Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2: Classification tests*, BS 1377-2:1990, British Standards Institution.
- [18] J. Leal-Barreto y A. J. Gámez Morales, "Determinación del límite líquido y plástico para un suelo caolín amarillo usando el penetrómetro de cono de caída con diferentes modelos de cono", tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5e221067-fe95-4ffe-a9e1-909b96b61823/content>
- [19] *Materiales para Subbases y Bases*, N-CMT-4-02-001/11, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/N-CMT-4-02-001-11.pdf>



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

? perspectivasci@uaq.mx

.....
REVISTA INCLUIDA EN:
.....

VISITA NUESTRO

FISIÓN
PODCAST

Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

D | DESPACHO DE
PUBLICACIONES

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA