

Evaluación de escombreras de mármoles para su aprovechamiento como agregado en una estructura de pavimento, Córdoba, Argentina

Evaluation of marble waste dumps for use as aggregate in a pavement structure, Córdoba, Argentina

Ignacio Hugo Bin^{(*)(**)}, María Fernanda Poklepovic^(***), Jorge Enrique Coniglio^(*), Manuel Demartis^(*), Facundo Carranza^(**), Lucio Pedro Pinotti^(*), Fernando Javier D'Eramo^(*)

RESUMEN

En este trabajo se caracterizaron 10.000 toneladas de escombreras de mármoles a fin de definir sus parámetros físico-mecánicos y mineralógicos y determinar su aptitud como componente principal en capas granulares de una estructura de pavimento. Aunque los coeficientes Los Ángeles (41-53%) exceden lo permitido en la especificación de referencia, la granulometría, plasticidad y California Bearing Ratio (C.B.R.) (76, 83, 100% al 97, 98 y 100% de la densidad máxima, respectivamente) satisfacen lo especificado, con condicionamientos. Por consiguiente, con un simple cribado, este material de escombrera podría ser utilizado en terraplenes, sub-bases y bases granulares de carreteras, constituyendo una alternativa: a) Ambientalmente sostenible: porque evita nuevas explotaciones y elimina un potencial pasivo ambiental; b) Técnicamente viable: ya que la capacidad portante de las capas granulares no se vería afectada; c) Económicamente conveniente: porque aporta un valor agregado a un sub-producto hoy desechado y reduce costos de explotación y transporte.

Palabras clave: reciclado; escombreras; mármoles; agregados; bases granulares; estructura de pavimento.

ABSTRACT

In this contribution, 10,000 tonnes of marble waste dumps have been characterized in order to define the physico-mechanical and mineralogical parameters and determine their feasibility to be applied as main components in road bases and sub-bases. The Los Angeles abrasion values obtained (41-53%) exceeded those permitted for the standard technical specifications. However, particle-size distribution, plasticity and California Bearing Ratio (C.B.R.)(76, 83, 100% at 97, 98 and 100% of maximum density, respectively) satisfied, marginally, those specifications. Therefore, with a simple screening, these waste dumps would be applied as granular materials in roads. This is an alternative: a) environmentally sustainable, since future crushed stone exploitations would be reduced and removed a potential environmental passive; b) technically feasible, because the carrying capacity of the granular layers would not be affected; and c) economically profitable, because adds value to a currently non useful material and reduces the extraction and transportation costs.

Keywords: recycling; waste dumps; marbles; aggregate; granular base; pavement structure.

(*) Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto e Instituto de Ciencias de la Tierra, Biodiversidad y Sustentabilidad Ambiental (ICBIA) (CONICET-UNRC), Río Cuarto, Córdoba, Argentina

(**) Laboratorio de Calidad. Incisa S.A. Río Cuarto (Argentina)

(***) Departamento I, Tecnología y Laboratorio. Dirección Provincial de Vialidad. Córdoba (Argentina).

Persona de contacto/Corresponding author: ignaciohugobin@gmail.com (I. H. Bin)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7273-292X> (I.H. Bin); <https://orcid.org/0000-0002-6693-5066> (F. Poklepovic); <https://orcid.org/0000-0001-5020-793X> (J.E. Coniglio); <https://orcid.org/0000-0001-5225-1045> (M. Demartis); <https://orcid.org/0000-0001-5880-3023> (F. Carranza); <https://orcid.org/0000-0002-3582-7417> (L. Pinotti); <https://orcid.org/0000-0001-6998-7016> (F.J.D'Eramo).

Cómo citar este artículo/Citation: Bin, Ignacio Hugo; Poklepovic, María Fernanda; Coniglio, Jorge Enrique; Demartis, Manuel; Carranza, Facundo; Pinotti, Lucio Pedro; D'Eramo, Fernando Javier (2021). Evaluación de escombreras de mármoles para su aprovechamiento como agregado en una estructura de pavimento, Córdoba, Argentina. *Informes de la Construcción*, 73(561): e378. <https://doi.org/10.3989/ic.72256>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

1. INTRODUCCIÓN

En los alrededores de la localidad de Las Caleras, Provincia de Córdoba, Argentina, se desarrollan hace más de 70 años numerosas explotaciones de mármoles cuya producción es procesada en la zona y utilizada como componente esencial en diversos productos como cales, baldosas, cerámicos, vidrios, plásticos, pinturas, agroquímicos, pastinas, enduidos, masillas, pegamentos, cosmética, cauchos, etc. y como materia prima en industrias como las papeleras, agrícola (como mejorador de suelos), de alimentos balanceados, entre otras. En esta región, la primera etapa del circuito productivo está a cargo de pequeños productores que desarrollan la actividad a escala familiar y que venden casi la totalidad de su producción a unas pocas empresas de molienda y procesamiento de minerales radicadas en la zona, siendo la etapa productiva secundaria la de mayor beneficio económico, por lo que ha sido el segmento que ha atraído las mayores inversiones en tecnologías y maquinarias. Las canteras de mármoles se han caracterizado históricamente por explotaciones poco mecanizadas y de bajo nivel tecnológico, generalmente carecen de asesoramiento técnico y cuentan con bajos estándares en lo que respecta al cuidado del ambiente. Esto ha derivado en laboreos poco planificados, en la ausencia de criterios de optimización de recursos y en la baja rentabilidad para los productores (1). El trabajo en cantera consiste en la voladura, grillado del material por una malla de barras paralelas de 10 cm de separación, y en la carga y transporte sólo de la fracción gruesa a las plantas de molienda. De la fracción fina que pasa por dicha malla, una parte es aprovechada como materia prima para la fabricación de cal mientras que el resto es acumulado en escombreras. Según Bonalumi et al. (1), el distrito cuenta con más de 75 Mt de reservas, de los cuales más del 50% es material útil explotable. Los materiales de descarte de los usos principales pueden superar el 50% de lo explotado. El desfase existente entre la generación de material y el consumo por parte de los dos hornos caleros que existen actualmente en la zona, sumado a la ausencia de alternativas

o re-procesamientos que permitan darle un valor agregado al estéril, ha generado la acumulación de una importante cantidad de material en escombreras sin utilizar que irá en aumento en los próximos años generando posibles inconvenientes y modificaciones en el terreno y constituyendo un potencial pasivo ambiental. Esta situación, también ha sido observada en otros sectores del país, como por ejemplo en la región de Achiras, al sur de la provincia de Córdoba (2), y en la Cantera La Suiza, al este de la provincia de San Luis, entre otros.

La búsqueda de una solución a esta problemática ambiental, sumado a la planificación y ejecución de obras viales de envergadura en la zona (pavimentación de la Ruta Provincial N°23), ha impulsado el estudio de las escombreras de mármoles de la región de Las Caleras para evaluar su aptitud de uso en terraplenes, sub-bases y/o bases granulares, teniendo en consideración el beneficio ambiental que esto significaría.

En este trabajo, se presenta la caracterización técnica, bajo los lineamientos establecidos en los pliegos particulares de especificaciones técnicas de la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba (PPET-DPV-Cba) en obras vigentes (3) (4), de un conjunto de 3 escombreras que suman un total de 10.000 toneladas aproximadamente, algunas de las cuales datan de al menos 25 años en el sitio y otras corresponden a producciones recientes.

2. MARCO GEOLÓGICO Y ANTECEDENTES

La zona de estudio forma parte de la porción norte de la Sierra de Comechingones, dentro de las Sierras Pampeanas Orientales. Se encuentra a 145 Km de la ciudad de Córdoba y a unos 15 km al oeste de la localidad de Berrotarán. Se accede a la zona, desde dicha localidad, por la ruta provincial E-68 y es atravesada por la RP N°23, cuya traza es de material granular consolidado en este sector y se proyecta su pavimentación. Incluye a las localidades y parajes de Las Caleras, Paso Cabral y Cañada de Álvarez (Figura 1).

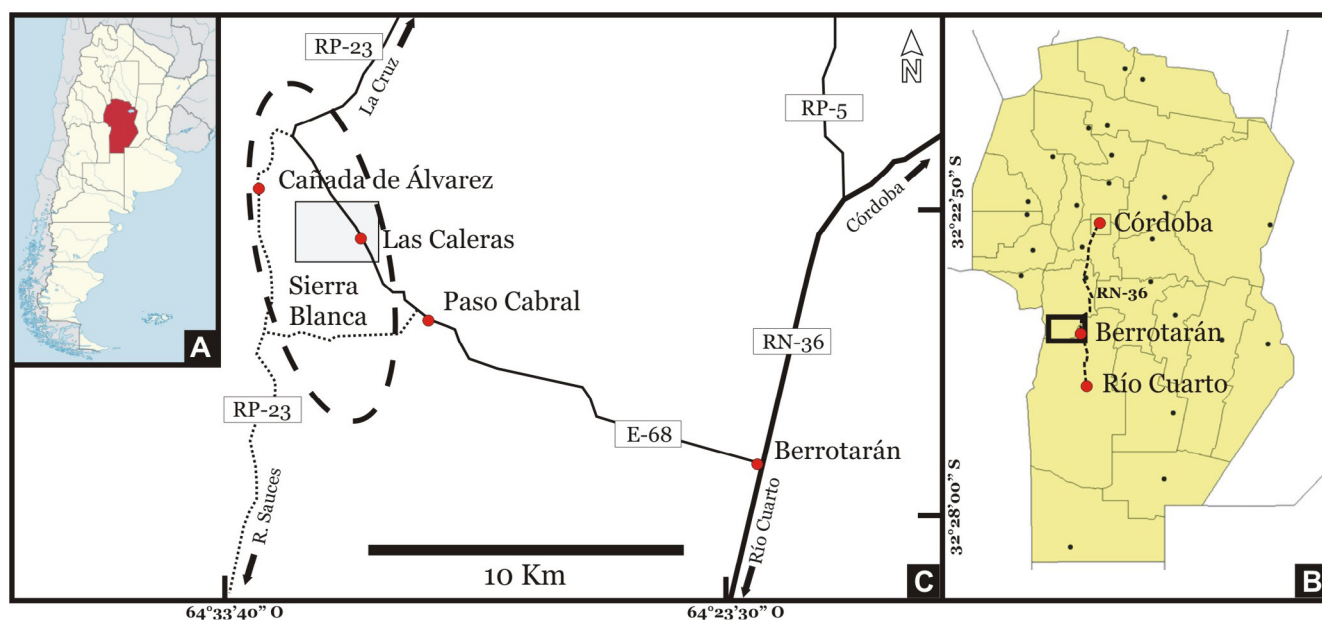


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de Las Caleras-Cañada de Álvarez. A) Mapa de Argentina remarcando la Provincia de Córdoba. B) Provincia de Córdoba. El recuadro indica el sector representado por la Figura 1-C. C) Ubicación de la zona de estudio con las principales vías de accesos. En línea discontinua, la Sierra Blanca. El recuadro gris indica el sector que abarca la figura 3.

El basamento de la región de Cañada de Álvarez, está conformado por un conjunto de rocas ígneas y metamórficas, entre las que se destacan, por sus colores claros y por afloramientos con escasa vegetación, los mármoles de los alrededores de la localidad de Las Caleras. Este sector fue abordado petrológica y estructuralmente por Quintana Salvat (5), Brodtkorb et al. (6)(7), Martino et al. (8), entre otros. Los yacimientos de mármoles fueron relevados por Sfragulla et al. (9) y Bonalumi et al. (1), mientras que el antecedente más reciente es el de Candiani et al. (10).

Las rocas de basamento se disponen a modo de cuña limitada por dos lineamientos a este y oeste, formando un gran bloque de basamento alargado en sentido N-S, denominado Sierra Blanca, que se hunde hacia el sur en los sedimentos modernos del valle de La Cruz. Martino et al. (8) describe cinco tipos litológicos principales aflorantes en la Sierra Blanca: gneises biotíticos granatíferos, ortogneises biotíticos granatíferos, granitos biotíticos, mármoles y anfíbolitas. Los gneises biotíticos granatíferos son la litología dominante, los cuales, junto con los mármoles y las anfíbolitas, constituyen las principales litologías de la mencionada cuña de basamento. Internamente, las rocas de este bloque están estructuradas como una serie de sinformes y antiformes. La estructura más notable de este sector es un sinforme isoclinal volcado con flancos buzantes hacia el este y eje general con inmersión hacia el sudeste, formado en dos estadios principales, el primero involucra metamorfismo y deformación y el segundo sólo deformación (8). Estos autores, sobre la base de las paragénesis observadas en todas las litologías, proponen que las rocas del sector alcanzaron la facies de granulitas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En la zona se detectaron numerosas escombreras y se cubieron más de 80.000 t de material aprovechable dispuesto en acopios distribuidos por todo el distrito. La escombrera de mayor tamaño tiene al menos 18.000 t de material (Figura 2-A). Para la cubicación de las escombreras a las que se pudieron acceder, se utilizó como herramienta un GPS (Garmin eTrex 20), con el cual se delimitaron los acopios permitiendo calcular con precisión su superficie. Debido a las variaciones topográficas no visibles del terreno en la parte inferior de las escombreras, como altura se utilizó un promedio de las mínimas alturas medibles en campo, para evitar sobredimensionar los acopios, por lo que la cantidad total mencionada de escombreras es lo mínimo medible. No se cubicaron escombreras no aprovechables como material de capas granulares, ya sea por presentar alto porcentaje de bloques de gran tamaño (diámetro > 80cm), o por presentar materiales no deseables (vegetación, materiales orgánicos, desechos, suelo vegetal, etc.). Aquellas escombreras de gran tamaño a las cuales no se pudo acceder en campo, se las cubicó con el apoyo de imágenes satelitales, obteniendo un valor de material mínimo aproximado.

El muestreo se realizó con pala manual en varios puntos (Figura 2-B) siguiendo los lineamientos y criterios establecidos en IRAM 1509 (11). Si bien las muestras son puntuales y superficiales, pudiendo variar en el interior de la escombrera, se consideraron de utilidad para representar preliminarmente el material presente. Para el muestreo y los ensayos de laboratorio se tomaron como referencia solamente 3 escombreras: 'Escombrera 1' y 'Escombrera 2', correspondientes a la producción actual, de 900 y 500 toneladas respectivamente en el

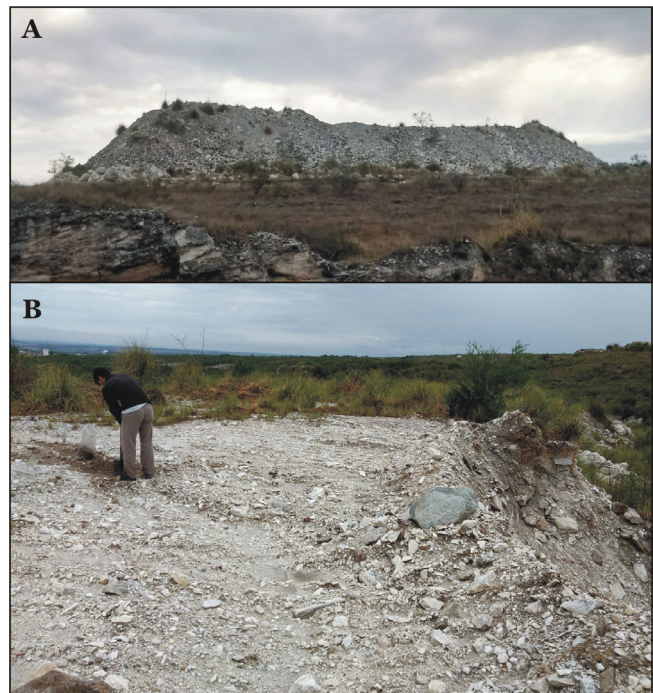


Figura 2: A) Vista de una escombrera cubicada en aproximadamente 18.000 toneladas, una de las más grandes del sector. Esta escombrera es observable desde grandes distancias, incluso desde la ruta de acceso a la región. B) Sistema de muestreo con pala manual en 'Escombrera 3'.

momento del muestreo, y 'Escombrera 3', de 8600 toneladas, la cual yace en el sitio hace al menos 25 años, en las coordenadas 32°23'13.14"S y 64°31'45.45"O (Figura 3). El material extraído fue llevado al laboratorio donde se procedió con el cuarteo y ensayo individual de cada escombrera y a la elaboración de una mezcla en cantidades compensadas, según la representación volumétrica, de las tres, muestra denominada 'Mezcla'. Los ensayos de caracterización se realizaron en los laboratorios centrales de la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba (DPV-Cba), de la empresa constructora vial Incisa S.A. y del Departamento de Geología de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) y se utilizaron de referencia los lineamientos establecidos en los PPET-DPV-Cba, vigentes en obras actualmente en ejecución. Debido a que los mismos no admiten un tamaño de agregado mayor a 31,75mm para capas granulares, se separó en laboratorio el retenido en dicho tamiz (que representa aproximadamente un promedio del 12% del total del material en las muestras tomadas) y a la fracción pasante se le realizaron los ensayos de caracterización. Éstos incluyeron: granulometría (según Norma VN-E7-65 (12)), desgaste Los Ángeles (según Norma IRAM 1532:2009(13)), límites de Atterberg (pasante tamiz 0,420mm) (según Norma VN-E2-65 (14) y VN-E3-65 (15)), Proctor (según Norma VN-E5-93 (16), Método V, con compensación de material grueso para correlacionar con ensayo de Valor Soporte), Valor Soporte Relativo (VSR) e hinchamiento (en base a la Norma VN-E6-84 (17), Método Dinámico simplificado, con sobrecarga de 4,54 Kg., considerando una estructura de pavimento convencional. Este ensayo es conocido en inglés como California Bearing Ratio o C.B.R.), peso específico aparente (PEA) y absorción del material grueso retenido tamiz 19,1mm (en base a la Norma VN-E13-67 (18)). Los ensayos Proctor y valor soporte se llevaron a cabo con el material 'Mezcla', aunque se utilizó como granulometría de referencia la de la 'Es-

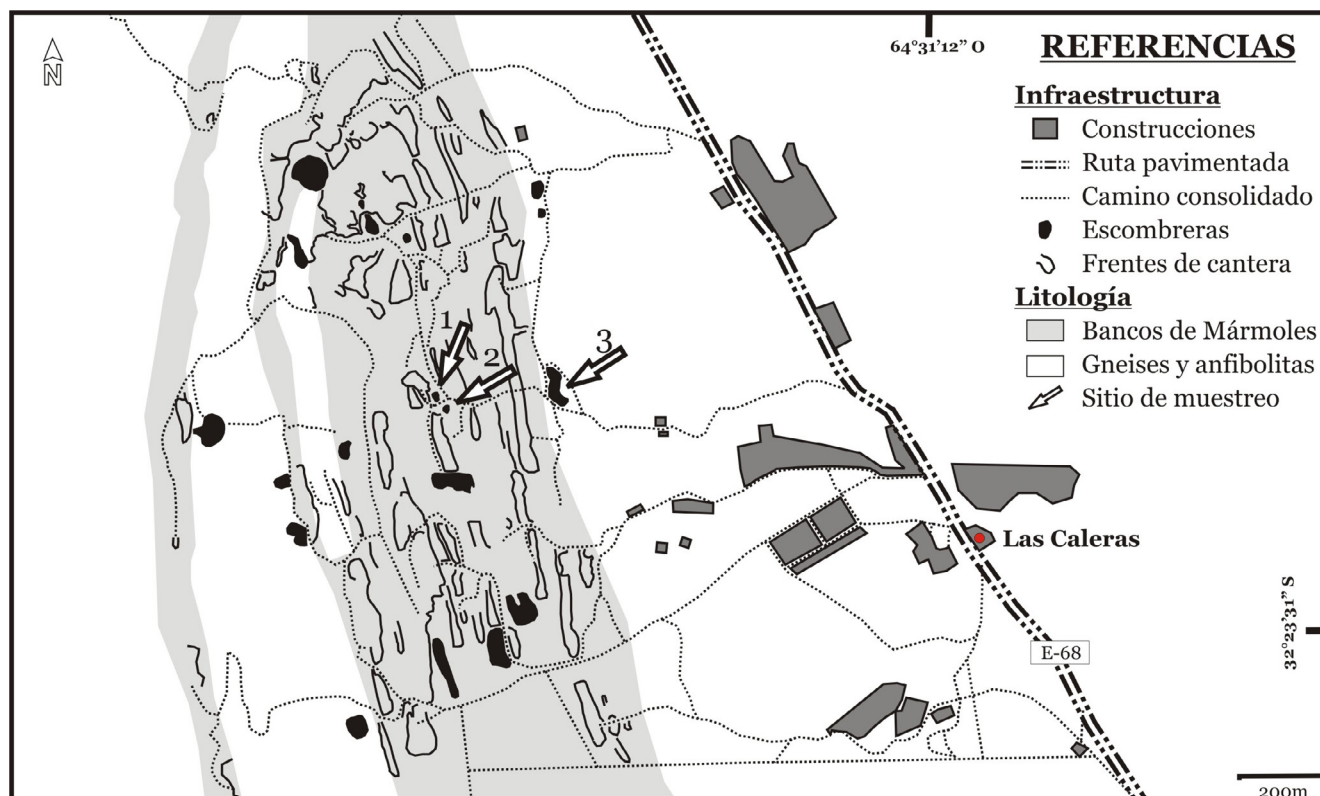


Figura 3: mapa de ubicación de las escombreras y los bancos de mármoles. Las flechas indican las escombreras muestreadas (1, 2 y 3).

combrera 3', de mayor representación volumétrica. Por otro lado, para caracterizar la totalidad de las escombreras y proponer su re-utilización completa, se procedió a la trituración de la fracción retenida en tamiz 31,75mm y ejecución de ensayos de desgaste Los Ángeles, con el objetivo de simular en laboratorio un posible reprocesamiento de las escombreras.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Descripción y petrografía

Martino et al. (8), reconocen dos tipologías de mármoles en la Sierra Blanca: dolomíticos y calcodolomíticos, distinguidos según los colores, tamaño de grano, desarrollo de cristales, estructura, mineralogía principal y su mineralogía de accesorios.

En los frentes de cantera, se distinguen dos tipos de bancos calcáreos: estratos blancos-grises, macizos, con cristales bien desarrollados, características coincidentes con la descripción los mármoles dolomíticos de Martino et al. (8); y bancos bandeados, de color blanco-amarillentos, con cristales de aspecto terroso o sacaroides y con bandas de colores, de 20 cm de espesor aproximadamente, generadas por el contenido variable de minerales silicatados, los cuales se asignaron a los mármoles calcodolomíticos descriptos por dichos autores. Los bancos calcáreos se encuentran intercalados con estratos de gneises y anfibolitas también plegados y desmembrados (Figura 4-A y 4-B).

La producción actual de mármoles se orienta preferentemente a los dolomíticos por su mayor precio en el mercado de destino, mientras que los calcodolomíticos son vendidos a muy bajo costo a los hornos caleros por su gran contenido de impurezas. El color blanco y la pureza del mismo, juega un rol fundamental en el valor del producto. La compleja interrela-

ción de los tipos de mármoles dentro de los estratos y la alta deformación y plegamiento de los bancos (Figura 4-A), dificulta la explotación de cada uno individualmente. La separación se realiza por cribado, ya que naturalmente en el material volado, los bloques de mayor tamaño son predominantemente mármoles dolomíticos, más macizos y resistentes que los otros, y por separación visual en base a la experiencia de los operadores. Esto genera que, en las escombreras estudiadas, el material esté conformado por más del 95% de agregados de mármoles de características asignables a los calco-dolomíticos (8), con contenidos variables de minerales calcosilicatados, pudiendo definir al material ensayado como homogéneo. El porcentaje restante corresponde a agregados de anfibolitas y gneises con diferentes grados de alteración.

Al microscopio, los mármoles presentan una textura granoblástica y una estructura maciza con una grosera orientación de los cristales de mayor tamaño. Los minerales principales son carbonatos (calcita-dolomita), forsterita y diópsida que conforman

Tabla 1. Porcentaje modal de minerales presentes en los mármoles de las escombreras estudiadas realizado sobre sección delgada.

Mineral	Porcentaje modal
Carbonatos primarios (calcita y dolomita)	59,0 %
Forsterita (Olivino)	21,5 %
Diópsido (Piroxeno)	9,0 %
Serpentinas	9,5 %
Carbonatos tardíos	0,5 %
Otros (Tremolita, Flogopita, Apatita, Epidoto)	0,5 %

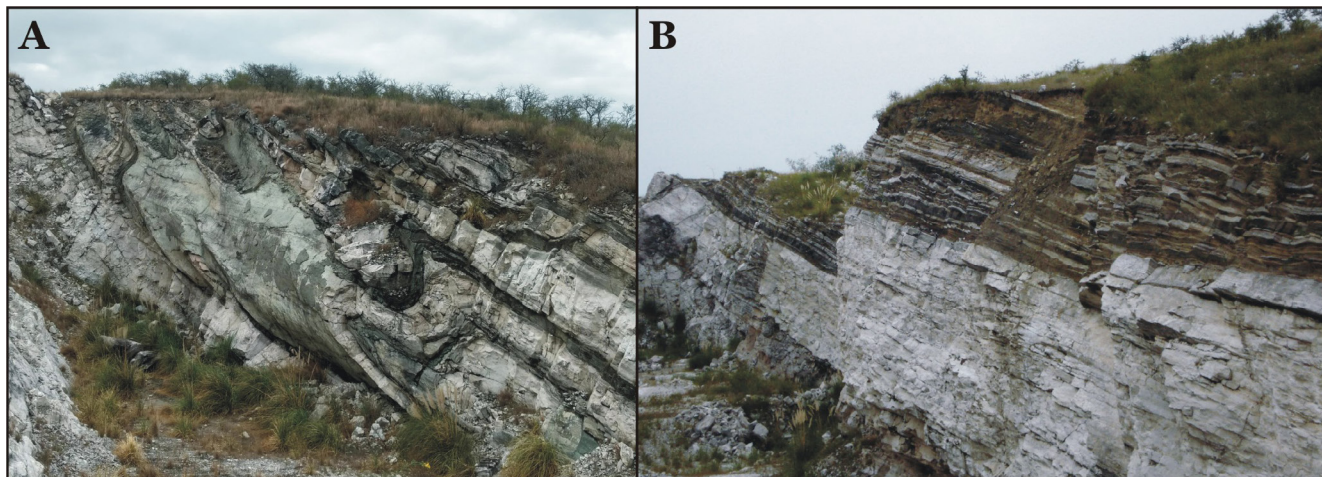


Figura 4: A) Estratos de mármoles calcodolomíticos bandeados a escala de afloramiento con intercalaciones de bancos de anfibolitas. Se observa claramente el intenso plegamiento de los estratos. B) Bancos de mármoles intercalados con estratos de anfibolitas y gneises en un frente antiguo de explotación.

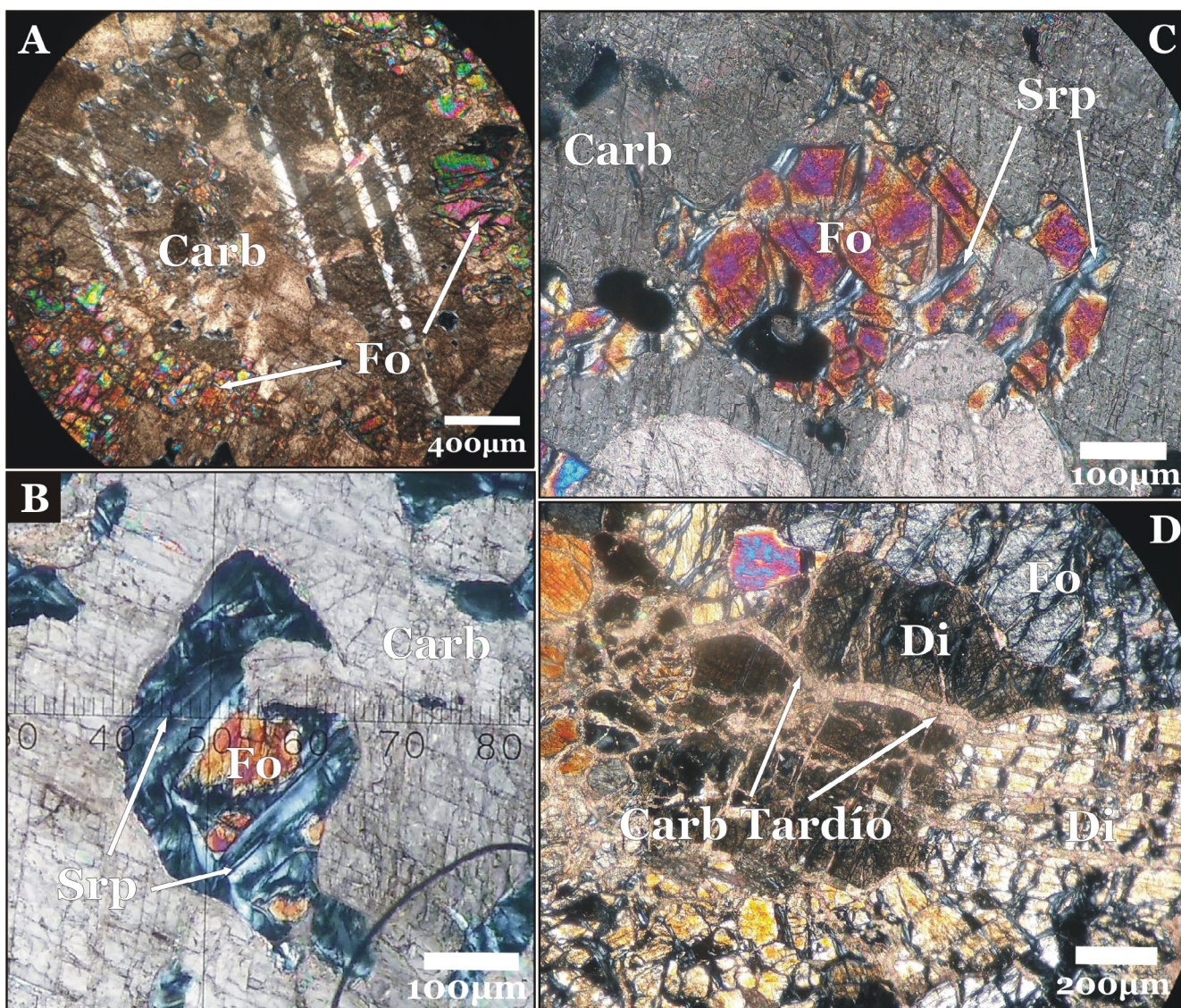


Figura 5: Microfotografías de mármol calco-dolomítico de la 'Escombrera 1' (con analizador): A) Carbonatos primarios (calcita-dolomita) en cristales bien desarrollados con maclas polisintéticas y foliación romboédrica. Se observan cristales fracturados de forsterita formando groseras "bandas". B) Serpentinis relleno de cavidades. Se observa un cristal de forsterita parcialmente alterado y carbonatos, que ocupan el mayor porcentaje de la fotografía. C) Serpentinis creciendo en las fracturas de un cristal de forsterita parcialmente alterado. D) Carbonatos secundarios (tardíos) en cristales muy pequeños creciendo en venillas que fracturan y disectan a cristales de diópsido, forsterita, carbonatos primarios y serpentinas.

casi el 90% de la roca, mientras que los accesorios observados son tremolita, flogopita, apatita y epidoto. Como minerales secundarios, se observan algunos asignados al grupo de las serpentinas, que están presentes en todas las muestras analizadas, y escasos carbonatos de crecimiento tardío (Tabla 1). Los carbonatos primarios (59,0%) aparecen en cristales bien definidos de hasta 5 mm, con foliación romboédrica marcada y, en ocasiones, maclas polisintéticas en una dirección (Figura 5-A). Muchos de estos cristales son anhédros, de menor tamaño (0,2-1mm) y se hallan parcialmente alterados y disueltos, presentando manchones de aspecto terroso y huecos con crecimiento de serpentinas en los espacios vacíos (Figura 5-B). Según Martino et al. (8), los contenidos de calcita y dolomita son similares en esta variedad de mármoles. El segundo mineral más abundante después de los carbonatos es la forsterita (21,5%). Se presenta en cristales grandes de hasta 5 mm muy fracturados, con crecimiento de serpentinas en todos sus bordes y fracturas (Figura 5-C). En ocasiones, se presentan como bandas de cristales pequeños de forsterita fracturados entre los carbonatos primarios (Figura 5-A). La diópsida (9,0%) suele estar dentro de las bandas ricas en forsterita, o en cristales distribuidos por toda la muestra. En general se presenta en cristales de menor tamaño, aunque algunos pocos alcanzan los 5 mm. También se hallan muy fracturados y disgregados con crecimiento en sus bordes y fracturas de serpentinas y flogopita, en algunos cristales. La flogopita no es muy abundante y ocurre en pequeños cristales de hábito acicular a tabular o prismático, exclusivamente sobre los planos de fracturas y clivaje de la diópsida. La tremolita se reconoce en pequeños cristales tabulares largos con fracturas transversales, que crecen principalmente en la foliación de la calcita-dolomita primaria, mientras que la apatita y el epidoto, solamente aparecen en muy pequeños cristales aislados en la muestra. Como mineral secundario, el más abundante (9,5%), es un mineral incoloro, de baja birrefringencia, que se encuentra rellenando los espacios intercrystalinos (Figura 5-B) y las fracturas de los cristales (Figura 5-C), o también ocurre con hábito acicular y en estrellas alterando a todos los minerales anteriores. Este mineral fue asignado al grupo de las serpentinas. Los otros minerales secundarios se manifiestan en venillas de cristales muy pequeños que rompen e interpenetran cristales mayores de diópsido y forsterita y que por su hábito y color de interferencia muy alto, se asumen como carbonatos de formación tardía (0,46%) (Figura 5-D).

Según la mineralogía observada, los mármoles presentan paragénesis de facies de granulita con retrogradación hasta la facies de anfíbolita baja (8), (9).

4.2. Ensayos de Laboratorio

Las granulometrías de las distintas escombreras (realizadas sobre el material pasante tamiz 31,75mm) son bastante similares entre sí (Figura 6) y se encuentran dentro de los entornos propuestos por los pliegos de referencia tanto para bases granulares (Figura 7-A), donde se acerca al entorno fino, como para sub-bases, en el cual se asemeja más al entorno grueso (Figura 7-B). Los ensayos de plasticidad del pasante tamiz IRAM 0,42 mm (N°40) sobre las escombreras 1 y 3, demostraron que el material es no plástico (IP=0) en ambos casos, con un límite líquido (LL) de 20,9% y 17,8% respectivamente (Tabla 2). El P.E.A. de la fracción gruesa (retenido tamiz IRAM 19,1 mm -3/4"- Escombrera 1) fue determinado en 2,743 y la absorción en 1,81%. (Tabla 3). Para los ensayos de desgaste Los Ángeles, el material se fraccionó en retenido y pasante de tamiz de 31,75mm y se analizaron por separado la Escombrera 1, 2, 3 y la 'Mezcla'. Se obtuvieron

valores de coeficientes Los Ángeles (CLA) (gradación A) de 44, 42 y 53 % en las Escombreras 1, 2 y 3, respectivamente, mientras que la 'Mezcla' presentó un coeficiente de 50% (Tabla 4). El material retenido por el tamiz 31,75mm fue re-triturado, presentando valores de CLA de 38% (gradación A) para la 'Mezcla' y de 32% (gradación B) para la Escombrera 1. En ambos casos, el CLA del material re-triturado disminuye un 12% con respecto al material de la misma escombrera (correspondiente al mismo muestreo) que pasa el tamiz 31,75mm (1-1/4") (Figura 8).

Con el pasante del tamiz de 31,75mm de la muestra 'Mezcla', se realizó el ensayo de Proctor y VSR. La densidad máxima (Proctor) se determinó en 2,13 g/cm³ y la humedad óptima de compactación en 8,5% (Figura 9). El VSR fue de 74%, si se considera el 97% de la densidad máxima correspondiente a los moldes de 56 golpes por capa, tal como lo especifica el pliego de referencia. Si se toma el 98% y el 100% de la densidad máxima, el VSR es de 83% y 100% respectivamente (Figura 10). El hinchamiento promedio medido en todos los moldes luego de 4 días de inmersión fue de 0,53%, ampliamente menor al máximo admitido en los pliegos (2,5% para terraplenes) (Tabla 5)

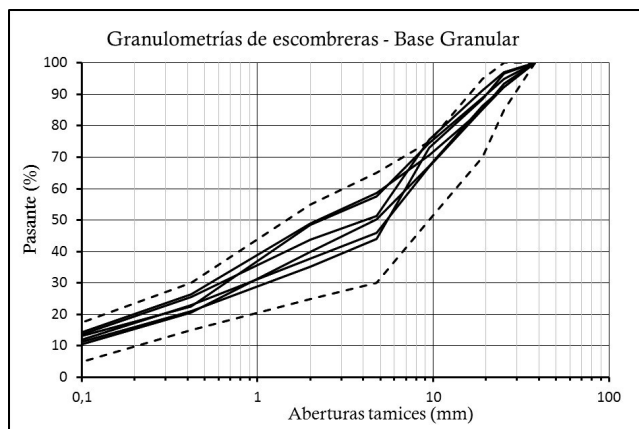


Figura 6: Granulometrías de las diferentes escombreras en distintos puntos de muestreo graficadas en conjunto con los entornos especificados para base granular. Se destaca la gran similitud entre todas las granulometrías de las diferentes escombreras, limitándose a un rango acotado dentro del cual varían, y el hecho de que todas ellas entran dentro de los entornos.

Tabla 2. Ensayo de plasticidad de la fracción pasante tamiz N°40 (0,42mm), según Norma VN-E2-65 (14) y VN-E3-65 (15).

Muestra	Fracción	Límite Líquido (LL)	Límite Plástico (LP)	Índice de Plasticidad (IP)
Escombrera 1	Pas 0,42 mm (N°40)	20,95 %	No Plástico	0
Escombrera 3	Pas 0,42 mm (N°40)	17,4 %	No Plástico	0

Tabla 3. Se indican los Pesos Específicos Aparentes y absorción de agua de los agregados de mármoles tomados de las escombreras. La fracción ensayada corresponde a la retenida en tamiz 19,1 mm (3/4") de la 'Escombrera 1'.

Peso Específico Aparente (P.E.A)	2,743
Peso Específico del agregado seco (P.E.A.S)	2,614
Peso Específico del agregado Saturado (P.E.A.Sat)	2,661
Absorción	1,81%

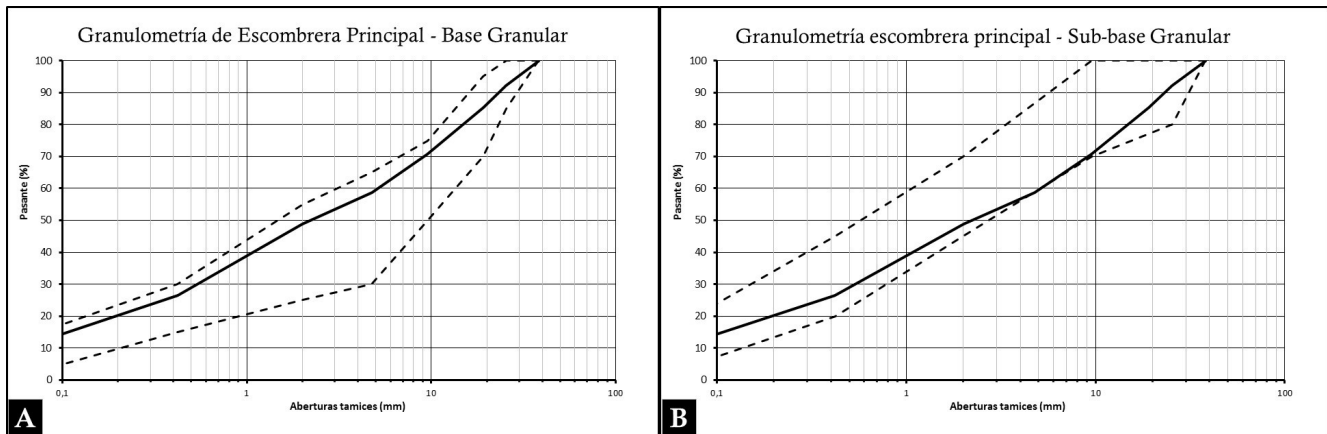


Figura 7: Granulometría de la escombrera 3, de mayor representación volumétrica, graficada en conjunto con: A) los entornos de base granular, y B) los entornos de sub-base, que especifican los pliegos de referencia.

Tabla 4. Resultados de ensayos de Desgaste Los Ángeles (13) de distintas fracciones granulométricas y escombreras. Se observa la marcada diferencia del coeficiente Los Ángeles del material retenido en tamiz 31,75mm y re-triturado; en ambos casos, disminuye un 12% con respecto al material pasante del tamiz 31,75mm (1-1/4") correspondiente al mismo muestreo.

Muestra	Fracción	Gradación	Coefficiente los ángeles
Escombrera 1	Ret 31,75mm	B	32 %
	Pas 31,75mm	A	44 %
Escombrera 2	Ret 31,75mm	A	No determinado
	Pas 31,75mm	A	41%
Escombrera 3	Ret 31,75mm	A	No determinado
	Pas 31,75mm	A	53 %
Mezcla	Ret 31,75mm	A	38 %
	Pas 31,75mm	A	50 %

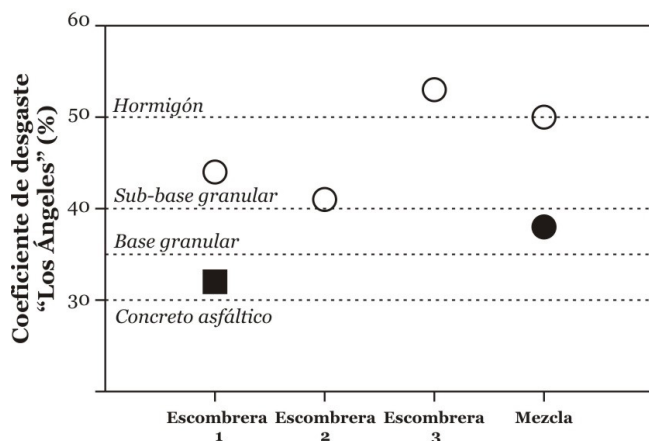


Figura 8: Resultados de ensayos de Desgaste Los Ángeles en relación a los límites máximos establecidos por las especificaciones técnicas de referencia. Marcadores blancos: material pasante de 31,75mm. Marcadores negros: material retenido de 31,75mm. Círculos: gradación A. Cuadrados: gradación B. Con líneas de puntos, se indican los valores máximos admitidos por los pliegos vigentes para las distintas capas estructurales.

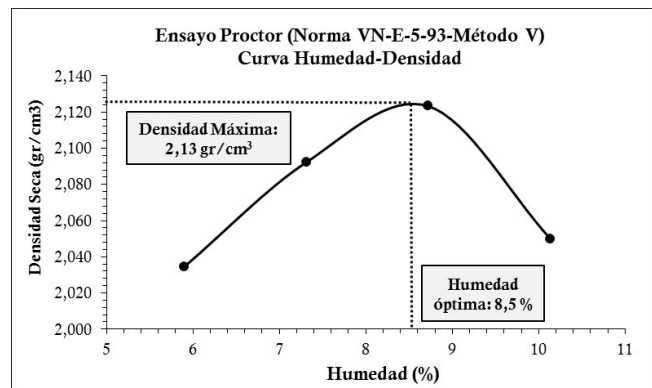
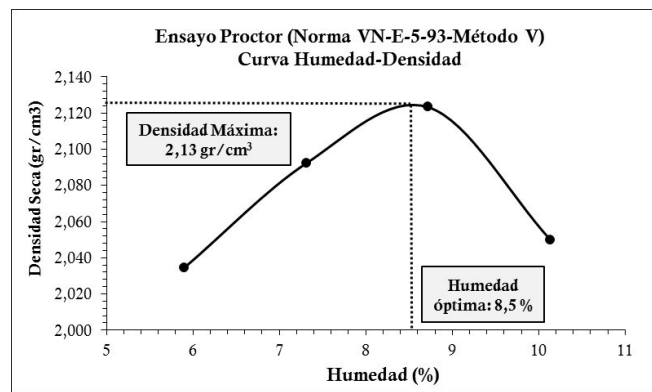


Figura 9: Gráfico humedad versus densidad resultante del Ensayo Proctor según Norma VN-E-5-93 (Método V) (16).

Tabla 5. Planilla de hinchamiento medido según Norma VN-E-6-84 (Método Dinámico N°1-simplificado-)(17). Sobrecarga = 4,54 Kg.

Golpes por capa	Molde N°	Lectura 1° día (cm)	Lectura 2° día (cm)	Lectura 3° día (cm)	Lectura 4° día (cm)	Altura (cm)	Hinchamiento (%)
12	1	0,000	0,030	0,030	0,030	11,45	0,26
	2	0,045	0,045	0,060	0,060	11,63	0,52
25	3	0,030	0,030	0,040	0,050	11,58	0,43
	4	0,010	0,010	0,030	0,030	11,58	0,26
56	5	0,040	0,040	0,050	0,130	11,50	1,13
	6	0,010	0,020	0,020	0,070	11,50	0,61
Promedio							0,53

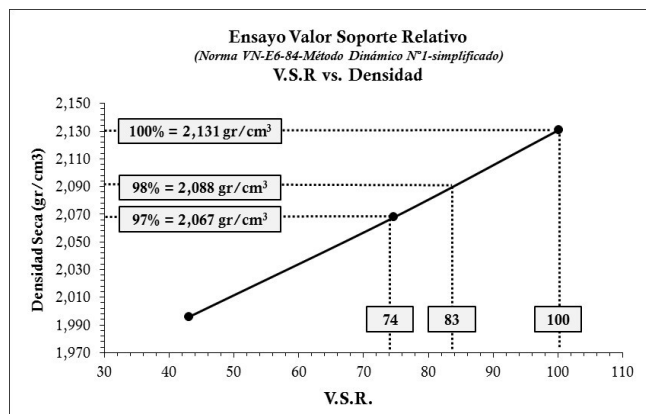


Figura 10: Gráfico de VSR versus Densidad, resultante del ensayo de VSR e hinchamiento de suelos según Norma VN-E-6-84 (Método Dinámico N°1-simplificado-) (17). Los tres puntos del gráfico corresponden a un promedio de dos moldes compactados con 5 capas de 12, 25 y 56 golpes, respectivamente. Se señalan los valores de VSR para una densidad de 97, 98 y 100% de la de los moldes de 56 golpes. Sobrecarga de penetración = 4,54 Kg, calculado según una estructura de pavimento convencional.

4.3. Discusiones de los resultados

Los valores de los ensayos de laboratorio (PEA, absorción y CLA) son comparables con los obtenidos para rocas de la misma naturaleza en otras partes del país (19) (20). La variabilidad textural observada en los frentes de cantera y la mayor o menor presencia de minerales calcosilicados y de minerales secundarios, posiblemente condicionan las variaciones en la resistencia mecánica de la roca. Además, la cantidad de minerales del grupo de las serpentinas (9,5%), supera el máximo admitido por la Norma VN-E67-75 (21) para minerales perjudiciales (<2%), por lo que se considera necesario profundizar estudios para evaluar el comportamiento de los agregados derivados de esta roca a lo largo de la vida útil de la estructura civil en la que se proyecte aplicar.

Si bien los CLA del material de las escombreras sin re-triturar superan el máximo admitido en los pliegos de referencia (3)(4) (35% para bases granulares y 40% para sub-bases), el VSR del material al 97% de la densidad máxima (VSR=74%) resultó ampliamente mayor al mínimo exigido por los PPET (3)(4) para la conformación de sub-bases granulares (>40%) y terraplenes (>5%), aunque fue ligeramente menor a lo exigido para bases granulares (>80%). En este sentido, la Norma VN-E6-84 (17) establece que, en caso de que en obra se especifique un 95, 98 o

100% de la densidad máxima obtenida en el Método V de dicha norma, se debe considerar el VSR correspondiente a esa densidad especificada. Los PPET de referencia (3) (4), exigen en obra una densidad de la capa terminada del 100% de la densidad Proctor. No obstante, el valor de VSR especificado por dicho pliego es el correspondiente al 97% de la densidad máxima, hecho que contradice el aparatado de la norma mencionado. Por lo tanto, se propone evaluar la opción de utilizar el material estudiado también en bases granulares con una exigencia de compactación en obra de 98% o más, respecto a la densidad Proctor, ya que, en estas densidades, se superó el valor mínimo de 80% exigido por los pliegos para el VSR. En resumen, de acuerdo a los resultados obtenidos, con un simple grillado por una malla de 32mm de abertura aproximadamente, el material que conforma las escombreras estudiadas podría ser utilizado en terraplenes, sub-bases y bases granulares sin afectar la resistencia (VSR) solicitada en los pliegos vigentes. La cantidad de material medido sería suficiente para ejecutar alrededor de 24 Km de una capa granular de una estructura convencional de pavimento.

Por otro lado, se ha observado que cuando se re-trituran los agregados retenidos en malla 31,75mm de las escombreras de mármoles en estudio, los valores de CLA descienden por debajo del límite de 40%. Esto puede deberse a una selección que ocurre naturalmente ante el proceso de voladura, donde las porciones de roca de mayor resistencia mecánica, rompen en bloques de mayor tamaño, mientras que los sectores del frente alterados o físicamente debilitados, conforman los bloques menores y el polvo. Por lo tanto, la incorporación de este material re-triturado a las capas granulares podría acercar la curva granulométrica al centro de los entornos, mejorar el comportamiento mecánico del agregado total (menores CLA), aumentar los valores de VSR, y aportar un beneficio ambiental complementario aprovechando la totalidad de las escombreras, sin perder de vista la necesidad de realizar un previo análisis de la factibilidad económica y ambiental de este re-procesamiento.

No obstante, para poder hacer efectiva la aplicación de este material de escombreras en obras concretas, sería necesario incorporar en las especificaciones técnicas, límites más permisivos en el ensayo de coeficiente Los Ángeles y en el contenido de minerales perjudiciales para los agregados de capas granulares. Como antecedente de esta adaptación normativa, se pueden nombrar los PPET de la DPV-Cba para las obras del extremo sur de la provincia de Córdoba (22) y los pliegos de las obras del norte de La Pampa, región donde los agregados convencionales (rocas ígneas y metamórficas) son escasos. Estos pliegos inclu-

yen un anexo donde se consideran a las “toscas” o calcretos como material alternativo para la ejecución de sub-bases y bases granulares, cuando los CLA habituales de dichos materiales varían entre los 38 y 45% (23). Adaptaciones normativas similares condicionadas por las características de los materiales locales, han sido sugeridas también en otros sitios del mundo, como por ejemplo en las Islas Canarias, España, (24) donde los agregados más abundantes son de origen volcánico, con características de densidad y permeabilidad muy diferente a los áridos convencionales. Complementariamente, se podrían plantear criterios diferenciados según la intensidad de tránsito, como aplica actualmente la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina (25) para otras capas estructurales y el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)(26) de España, que establecen la posibilidad de utilizar materiales de inferior resistencia para las vías de menor tránsito.

La presente investigación comparte la misma línea de trabajo con numerosos estudios que se están realizando en el mundo orientados a evaluar el comportamiento de las estructuras civiles elaboradas con materiales no convencionales provenientes del reciclado o de la reutilización de desechos de otras industrias (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37), algunos de los cuales han mostrado resultados favorables. Dichos estudios, persiguen el fin común de hacer de la industria de la construcción una actividad cada día más sostenible. Esta necesidad de evolución de la manera de afrontar las obras y el desarrollo de la infraestructura, ha sido planteada como importante y urgente por muchos autores en todo el mundo (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La utilización de este sub-producto o descarte de la industria de minerales calcáreos en la conformación de capas granulares en obras viales de la región, significaría importantes beneficios fundamentalmente en dos aspectos: ambiental y económico. En el aspecto ambiental, utilizar este material que es considerado descarte y que representa un gran porcentaje del volumen de extracción primaria, favorece a la eliminación de un potencial pasivo ambiental de considerable envergadura local, así como a la utilización integral de un recurso no renovable. Además, la explotación de este material acumulado significó un costo ambiental (emisiones de dióxido de carbono, consumo de energía y de materias primas, explosivos, gas oil, etc.) con sus consecuentes huellas de carbono (46), por lo que aprovecharlo significa optimizar los recursos y disminuir el impacto que genera la extracción primaria de áridos. Por otro lado, esta alternativa aplicada regionalmente, permite diversificar la demanda de agregados entre más fuentes de provisión, ejerciendo menores presiones extractivas focalizadas en pocos sitios. En el aspecto económico, esta reutilización redundaría en un beneficio para los productores de mármoles, ya que podrán darle un valor agregado a un producto que actualmente consideran como descarte y podrán obtener mayor ganancia neta de las inversiones realizadas para la extracción primaria del material (gastos de maquinaria, gas oil, explosivos, personal, impuestos, etc.), aumentando la rentabilidad y optimizando los recursos. Además, podría significar un beneficio económico para las empresas constructoras que ejecutan las obras viales cercanas, y, por lo tanto, también para las de-

pendencias gubernamentales, debido a que se reducirían los costos operativos y de transporte de materiales.

En cuanto a la viabilidad técnica, el material mostró un adecuado comportamiento en relación a su resistencia y a otros parámetros que condicionan su servicio, como la plasticidad. No obstante, no cumple con todos los requisitos establecidos en los pliegos. Es posible que sea necesaria la adecuación de los proyectos y de los cálculos estructurales para el uso de estos materiales no convencionales, sin dejar de ponderar factores económicos y ambientales (47). Además, la disposición actual del material en numerosas escombreras correspondientes a diferentes periodos de producción, puede generar una importante variabilidad de una a otra, por lo que serán necesarias caracterizaciones independientes de cada una y un adecuado manejo de los acopios. Para asegurar la homogeneidad y la calidad del material resultante, se proponen la siguiente secuencia y parámetros de trabajo: 1) Extracción del material de las escombreras actuales y cribado por una grilla de abertura cuadrada de 32mm. Este movimiento podría realizarse con pala cargadora sobre una grilla inclinada; 2) Mezclado y homogeneización del material pasante y acopiado en pilas menores a 1000 t; 3) Caracterización de cada lote mediante ensayos de laboratorio incluyendo, al menos, granulometría, plasticidad, Proctor y VSR; 4) En caso de que los valores obtenidos en los ensayos cumplan con los requerimientos pre-establecidos, se procederá a la carga y transporte a la obra para su directa distribución y compactación.

En base a todo lo mencionado, se considera que la utilización de las escombreras de mármoles que se generan en la industria de los minerales calcáreos, para la ejecución de capas granulares que conforman la estructura de un camino, es una alternativa ambientalmente sustentable, económicamente conveniente y técnicamente viable.

Por último, cabe mencionar que esta problemática de acumulación de materiales calcáreos de descarte en escombreras también fue observada en otros sitios de Argentina. Se recomienda ejecutar caracterizaciones similares de las mismas para evaluar la posibilidad de utilizar materiales alternativos o no convencionales en las obras viales, con el objeto de que la industria de la construcción pueda contribuir en la mitigación de los impactos ambientales de las industrias primarias, disminuyendo también el propio impacto y sin afectar la calidad y las prestaciones técnicas de las estructuras en servicio.

6. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue realizada con recursos aportados por la empresa constructora Incisa S.A. y con fondos provenientes del programa de investigación PPI18/C456 financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto (SECYT-UNRC) y del proyecto PICT-2016-1754 financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (ANPCYT).

Se agradece a la Dirección Provincial de Vialidad de la Provincia de Córdoba por permitir el uso de los laboratorios para la ejecución de los ensayos.

El estudio forma parte de un proyecto de investigación mayor enmarcado en una beca co-financiada entre CONICET e Incisa S.A. otorgada al primer autor.

7. REFERENCIAS

- (1) Bonalumi, A., Sfragulla J., Jerez D., Bertolino S., Sánchez Rial J. y Carrizo E. (2014). Yacimientos de minerales y rocas industriales. En: Martino R. y Guerreschi A. (Eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba* (pp. 983-1024). Córdoba: Asociación Geológica Argentina.
- (2) Cristofolini, E.; Otamendi, J.; Martino, R.; Tibaldi, A.; Armas, P. & Barzola, M. (2017). Faja de cizalla Las Lajas: petrografía, estructura interna e implicancias tectónicas, extremo sur de la Sierra de Comechingones, provincias de Córdoba y San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 74 (3): 295 – 314.
- (3) Pliego Particular de Especificaciones técnicas (2017). Departamento Estudios y Proyectos, Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba. Obra: Proyecto de pavimentación Ruta Provincial S-353. Tramo: Autopista Córdoba-Rosario - Acceso a Colonia Videla. Expediente N°0045-0196613/2017. 47 páginas.
- (4) Pliego Particular de Especificaciones técnicas (2016). Departamento Conservación de Pavimentos, Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba. Obra: Rehabilitación R.P. E-79-Tr: Oncativo- a. Ascasubi y R.P. N°2, Tr: Va. Ascasubi-Río Tercero. Expediente N°0045-19037/16. 54 páginas.
- (5) Quintana Salvat, F. (1981). Fotointerpretación geológica de la zona de Cañada de Álvarez, Departamento de Calamuchita, Provincia de Córdoba: un sinclinal volcado. *Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba*, 4 (1-4): 237-241.
- (6) Brodtkorb, M., Hillar, N. y Ametrano, S. (1981). Consideraciones genéticas en los bancos de cobre presentes en las canteras de caliza de la “Cañada de Álvarez”, Provincia de Córdoba. En *Actas 8° Congreso Geológico Argentino*, 2: 851-861. Buenos Aires: Asociación Geológica Argentina.
- (7) Brodtkorb, M. K. de, Coniglio, J.E. y Miró, R. (2014). Yacimientos metalíferos y metalogenia. En: Martino R. y Guerreschi A. (Eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba* (pp. 1025-1075). Córdoba: Asociación Geológica Argentina.
- (8) Martino, R., Guerreschi, A. Y Giambastiani, M. (1997). El sinforme de la Sierra Blanca: petrología y evolución estructural, Sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52: 143-156.
- (9) Sfragulla, J. A., Jerez D. G. y Bonalumi A. (1999). Mármoles y otras rocas carbonáticas de Córdoba. En: Zappettini, E. O. (ed.) *Recursos Minerales de la República Argentina* (pp. 271-295). Buenos Aires: Anales Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR.
- (10) Candiani, J.C., Ulacco H. y Ojeda G. (2016). Hoja Geológica 3366-II Villa de Merlo, provincias de San Luis y Córdoba. *Boletín 415*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino.
- (11) IRAM (1987). *IRAM 1509 Agregados para hormigones. Muestreo*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM)
- (12) Dirección Nacional de Vialidad, Normas de Ensayo (1998). *VN - E7 - 65 Análisis mecánico de materiales granulares*. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- (13) IRAM (2009). *IRAM 1532 Agregados. Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método 'Los Ángeles'*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- (14) Dirección Nacional de Vialidad, Normas de Ensayo (1998). *VN - E2 - 65 Límite líquido*. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- (15) Dirección Nacional de Vialidad, Normas de Ensayo (1998). *VN - E3 - 65 Límite plástico, índice de plasticidad*. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- (16) Dirección Nacional de Vialidad, Normas de Ensayo (1998). *Norma VN - E5 - 93. Compactación de suelos*. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- (17) Dirección Nacional de Vialidad, Normas de Ensayo (1998). *Norma VN - E6 - 84. Determinación del valor soporte e hinchamiento de Suelos*. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- (18) Dirección Nacional de Vialidad, Normas de Ensayo (1998). *VN - E13 - 67 Peso específico aparente y absorción de agregados pétreos gruesos*. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- (19) Frias, R., Quintana, E., Bonalumi, A.A. y Sfragulla J.A. (2001). La obra vial, generadora del desarrollo regional sustentable. En *XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*. Buenos Aires: Asociación Argentina de Carreteras.
- (20) Mangin, N. M. (2009). *Utilización de agregados calcáreos de la Provincia de Córdoba para el desarrollo de hormigones con cemento Portland blanco* (Tesis magíster en geología no publicada). Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.
- (21) Dirección Nacional de Vialidad, Normas de Ensayo (1998). *VN - E67 - 75 Análisis del tipo y calidad de la roca de los agregados gruesos. Exigencias*. Gerencia de Planeamiento, Investigación y control. Subgerencia de Investigación y Desarrollo, Dirección Nacional de Vialidad.
- (22) Anexo aclaración sin consulta N°2, Pliego Particular de Especificaciones técnicas (2015). Departamento Estudios y Proyectos, Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba. Obra: Pavimentación Ruta Provincial N° 26. Tramo: Onagoity – Bouchard – Límite con Prov. de Buenos Aires. Expediente N°0045-017634/2015. 11 páginas
- (23) Deguillén, A. O. (2016). Jefe División Laboratorio, Dirección Provincial de Vialidad de La Pampa, Argentina (comunicación personal).
- (24) Franesqui, M. A., Yepes, J., García-González, C., Gallego, J., Pérez, Ignacio. (2015, 2 de octubre). Áridos de islas volcánicas para capas granulares de firmes de carreteras. Trabajo presentado en *IV Congreso Nacional de Áridos*, Madrid, España. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/284545618>
- (25) Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos (2017). Vialidad Nacional, Ministerio de Transporte, República Argentina. 69 pág. <https://www.argentina.gov.ar/transporte/vialidad-nacional/licitaciones/pliegos-de-especificaciones-tecnicas>

- (26) Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3. (2017). Ministerio de Fomento. Gobierno de España. <https://www.fomento.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/17-pliegos-de-prescripciones-tecnicas-generales>.
- (27) Jiménez, J. R., Agrela, F., Ayuso, J., López, M. (2011). Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-bases de carreteras. *Materiales de Construcción*, 61(302):289-302. doi: 10.3989/mc.2010.54009
- (28) Kreiker, J., Cruz Carrizo, J., Ceppi, S., Mutal, R. (2014, 14 de noviembre). Caracterización de desechos industriales inorgánicos para ser usados como material suplementario en morteros cementicios. *XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Maceió, Brasil. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/301434621>
- (29) Kreiker, J., Andrada, C., Positieri, M., Gatani, M., Quintana. Crespo, E. (2014). Estudio de propiedades de las cenizas de cáscaras de maní para promover su uso como material suplementario en morteros cementicios. *Revista Ibracon de estruturas e materiais*, 7 (6): 905-912. ISSN 1983-4195. Doi: 10.1590/S1983-41952014000600001.
- (30) Buzatu, T., Talpoş, E., Petrescu, M. I., Ghica, V., Iacob, G. y Buzatu, M. (2014). Utilization of granulated lead slag as a structural material in roads constructions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 17 (4): 707-717. Doi: 10.1007/s10163-014-0297-z.
- (31) García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Juan-Valdes, A., Pozo, J. y Guerra-Romero, M. (2014). Ceramic ware waste as coarse aggregate for structural concrete production. *Environmental technology*. 36: 1-10. Doi: 10.1080/09593330.2014.951076.
- (32) Dungca, J. R. y Dychangco, L. F. T., (2016). Strength properties of road base materials blended with waste limestones. *International Journal of Geomate*, 11 (25): 2493-2498.
- (33) Quintero, M., Rodríguez, P., Rubio, J., Jaramillo, L., Nuñez-Moreno, F. (2017). Caracterización de la flexión y compresión de elementos estructurales huecos fabricados con láminas de Tetra Pak® reciclado y cálculo aproximado de la huella de carbono producida en su elaboración. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32 (3): 131-148. ISSN 0718-5073. Doi: 10.4067/S0718-50732017000300131.
- (34) Quintana Crespo, E. y Heyd, M. (2017). Incorporación de triturados de hormigón y escombros en capas de estabilizados granulares y cementicios para uso vial. *En 3º Congreso Argentino de Áridos*. Córdoba: CEMINCOR.
- (35) Muniandy, R., Ismail, D. y Salihudin, H. (2017). Performance of recycled ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA). *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 20: 844-849. Doi: 10.1007/s10163-017-0645-x.
- (36) Anjali Chawla, K. I. Syed Ahmed Kabeer & Ashok Kumar Vyas (2018) Evaluation of strength and durability of lean concrete mixes containing marble waste as fine aggregate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA). *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 20. doi: 10.1080/19648189.2018.1471009
- (37) Tugrul Tunc E.J. (2019). Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of Environment Management*. 231:86-97. Doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.034. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30340136#>.
- (38) Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. y Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. 29(C): 394-416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037
- (39) Danielsen S. W. y Kuznetsova E. (2014). Environmental Impact and Sustainability in Aggregate Production and Use. En: Lollino G. et al. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory*. 5: 41-44. doi: 10.1007/978-3-319-09048-1_7. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/265650890>.
- (40) Danielsen S. W. y Kuznetsova E. (2016). Resource management and a Best Available Concept for aggregate sustainability. En: Příkryl, R., Török, Á., Gomez-Heras, M., Miskovsky, K. & Theodoridou, M. (eds), *Sustainable Use of Traditional Geomaterials in Construction Practice*. Geological Society, London, Special Publications. 416: 59-70. doi: 10.1144/SP416.7. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/273948820>.
- (41) Příkryl, R., Török, Á., Theodoridou, M., Gomez-Heras & M., Miskovsky, K. (2016). Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society En: Příkryl, R., Török, Á., Gomez-Heras, M., Miskovsky, K. & Theodoridou, M. (eds), *Sustainable Use of Traditional Geomaterials in Construction Practice*. Geological Society, London, Special Publications. 416: 59-70. doi: 10.1144/SP416.7. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/298070425>.
- (42) Ghanbari, M., Abbasi, A. y Ravanshadnia, M. (2017). Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO2 emissions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 20 (8). 10.1007/s10163-017-0640-2.
- (43) Příkryl, R. (2017). Constructional geomaterials: versatile earth resources in the service of humankind—introduction to the thematic set of papers on: challenges to supply and quality of geomaterials used in construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 76: 1-9. Doi: 10.1007/s10064-016-0985-0.
- (44) Martínez-Lage I., Vázquez-Burgo P., Velay-Lizancos M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management & Research*. 104:9-19. doi: 10.3390/ma12234016
- (45) Rodríguez G., Sáez Del Bosque I.F., Asensio E., Sánchez de Rojas M.I., Medina C. (2020). Construction and demolition waste applications and maximum daily output in Spanish recycling plants. *Waste Management & Research*. doi: 10.1177/0734242X20904437. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32072878>
- (46) Zabalza, I., Valero, A., Aranda-Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Fuel and Energy Abstracts*. 46: 1133-1140. Doi: 10.1016/j.buildenv.2010.12.002.
- (47) Hosseini, M. R., Rameezdeen, R., Chileshe, N. y Lehmann, S. (2015). Reverse logistics in the construction industry. *Waste Management & Research*. 33(6):499-514. Doi: 499-514. 10.1177/0734242X15584842.