

EVALUACIÓN DE LAS ROCAS DUNITAS COMO AGREGADO EN EL
CONCRETO E IDENTIFICACIÓN DEL MECANISMO DEL PROCESO DE
CARBONATACIÓN NATURAL.

LAURA MARCELA HUERTAS GUERRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE GRADO - MONOGRAFÍA
BOGOTÁ D.C.
2019

EVALUACIÓN DE LAS ROCAS DUNITAS COMO AGREGADO EN EL
CONCRETO E IDENTIFICACIÓN DEL MECANISMO DEL PROCESO DE
CARBONATACIÓN NATURAL.

LAURA MARCELA HUERTAS GUERRA

Monografía

Ing. Sandra Consuelo Díaz Bello
Directora de Investigaciones

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MONOGRAFÍA
BOGOTA D.C.
2019

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias a sus valiosas ideas, al apoyo, orientación y seguimiento de la Ingeniera Sandra Díaz.

A mis padres por su esfuerzo y constante lucha por convertir a su hija en profesional y poder aportarle mucho a la sociedad.

A mi hijo Santiago y esposo por su amor, paciencia y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	9
1. CARACTERISTICAS Y FORMACIÓN GEOLOGICA A NIVEL MUNDIAL Y EN COLOMBIA	10
2. CARBONATACIÓN NATURAL	28
2.1 TIPOS DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE CARBONATACIÓN.....	37
2.2. ESTRATEGIAS DE REPARACIÓN	38
2.3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR EL PROCESO DE CARBONATACIÓN.....	39
2.4. MEDIDAS PARA MINIMIZAR EL IMPACTO NEGATIVO DEBIDO A LA CARBONATACIÓN.....	41
3. APLICACIÓN DE LAS DUNITAS COMO AGREGADO PETREO	45
3.1. INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS PETREOS EN LAS CARACTERISTICAS DEL CONCRETO.....	50
4. CONFLICTOS AMBIENTALES POR MINERÍA EN EL VALLE DE ABURRA.....	53
5. DISCUSIÓN	59
CONCLUSIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultado promedio de los análisis químicos (%) realizados a dunitas del yacimiento de cromo “Merceditas”, Moa, Holguín, Cuba, tomado de Pons-Herrera, J., & Leyva-Rodríguez, C., 2007.....	12
Tabla 2. Dunitas orogénicas a nivel mundial, tomado de Orígenes de las dunitas orogénicas (2015).	15
Tabla 3. Contenido de Metales Preciosos en dunitas y cromitas de la Dunita de Medellín, tomado de Eurico Pereira et al., 2006.	21
Tabla 4. Reservas aproximadas de materiales de construcción en valle de aburra. (Ramírez María Isabel, 2018).	46
Tabla 5. Características de las dunitas tomadas del instituto geológico y minero de España.....	49
Tabla 6. Composición química de las dunitas.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Fotografía de dunita, tomada de www.geovirtual2.cl.</i>	10
Figura 2. <i>Diagrama de la clasificación basada en los contenidos de Olivino-Piroxenos, Para M más grande a 90 %: Contenido de minerales máficos mayor de 90 %, en el cuál clasifica la roca Dunita estudiada en este documento, tomado de Rodríguez Lozada Jose Antonio, Las Islas canarias y el origen y clasificación de las rocas ígneas.</i>	11
Figura 3. <i>Distribución a nivel mundial de las dunitas orogénicas. Tomado de Orígenes de las dunitas orogénicos: Petrografía, geoquímica e implicaciones.</i>	15
Figura 4. <i>Mapa geológico de la región central de Antioquia tomado de Jorge Restrepo (2008).</i>	23
Figura 5. <i>Mapa detallado del sector bajo de la quebrada Santa Elena, tomado de Jorge Restrepo (2008).</i>	24
Figura 6. <i>Microfotografías de muestras de las Dunitas de Medellín, tomado del repositorio de Laura González (2016).</i>	27
Figura 7. <i>Diagrama de la cámara de carbonatación, tomado de Moreno et, al. (2004).</i> ... 32	32
Figura 8. <i>Profundidad de carbonatación primaria, tomado de Serrano & Moreno, 2006.</i> . 33	33
Figura 9. <i>Profundidad de carbonatación secundaria, tomado de Serrano & Moreno, 2006.</i>	34
Figura 10. <i>Profundidad de carbonatación terciaria, tomado de Serrano & Moreno, 2006.</i> 34	34
Figura 11. <i>Modelo del esquema de carbonatación, tomado de Rafael Calvo y Mario Sierra, (2015).</i>	40
Figura 12. <i>Probeta de ensayo con recubrimiento de buena calidad, w/c=0.8 y después de 23 días de exposición acelerada. El color morado indica el área libre de carbonatación. Tomado de Moreno, Solis-Carcaño, & Arias-Palma, 2008.</i>	42
Figura 13. <i>En esta imagen se muestra la dispersión entre la resistencia a la compresión y la profundidad de carbonatación, obtenido de (Solis-Carcaño, 2018).</i>	43
Figura 14. <i>En esta imagen se muestra la dispersión entre la cantidad de cemento por m³ y la profundidad de carbonatación, obtenido de (Solis-Carcaño, 2018).</i>	43
Figura 15. <i>Serie de reacción de Bowen, descrito por Norman Bowen en 1915 y 1922, este gráfico nos proporciona una representación visual del orden en que los minerales cristalizan a partir de un magma, suponiendo que este magma se enfría muy lentamente en profundidad y en ambiente inalterable.</i>	45
Figura 16. <i>Serie de meteorización de Goldlich. Junto a cada mineral se indica, entre paréntesis, el tiempo medio de meteorización de cada uno de ellos para unas condiciones climáticas templadas y húmedas, tomado de Petrología de Victor Barrientos.</i>	45
Figura 17. <i>Municipios del departamento de Antioquia, importadores de materiales de construcción. (Santa Fe de Antioquia, Olaya, Sopetran, Liborina, Belmira, San Jerónimo, San Pedro, Bello, Medellín, Caldas, Itagüí, Sabaneta, Envigado, Retiro, Amagá), Tomado de Ramírez Isabel, 2018.</i>	48

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un gran interés en utilizar materiales de construcción que puedan ofrecer grandes ventajas cuando estos son adicionados al concreto, sobre todo cuando se tiene una alta contaminación ambiental y se quiere mitigar, generando concretos sostenibles.

Con la presente investigación se buscó evaluar si las dunitas pueden ser incluidas en los concretos como agregados verdes con el fin de que estas ayuden en la absorción de CO₂ y se puedan mitigar las emisiones de gases efecto invernadero a la atmosfera. Las dunitas se definen como rocas de origen magmático, es una roca intrusiva con gran contenido de olivino, hace parte del grupo de las peridotitas y no presenta contenido de cuarzo en su mineralogía.

Este trabajo de investigación se realizó para identificar si es posible incluir dunitas como agregado al concreto simple, debido a que los problemas de corrosión pueden generarse si se adicionan en el concreto reforzado.

Es por esto que se realizó una rigurosa revisión bibliográfica acerca de la posibilidad de la inclusión de las dunitas como agregado en el concreto, la localización de los depósitos de dunitas y el mecanismo de carbonatación en el concreto.

Se ha demostrado científicamente que rocas como las dunitas sirven como agregado en la fabricación de concretos, teniendo en cuenta que son capaces de absorber carbono (CO₂), por lo que sugieren que las rocas dunitas son materiales ecológicos que podrían ayudar a mitigar emisiones a la atmosfera. ¹

En el concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación generalmente es un proceso de pocas consecuencias, sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inofensivo, avanza lenta y progresivamente desde la superficie expuesta del concreto, encontrando dentro de la masa de concreto al acero de refuerzo generando una posible corrosión del acero.

¹ SINC, Servicio de Información y Noticias Científicas

OBJETIVOS

Para el desarrollo de esta investigación se plantea un objetivo general y de este se desprenden unos objetivos generales con el fin de dar resultados óptimos esta investigación.

GENERAL:

Evaluar el mecanismo del proceso de carbonatación natural de las rocas dunitas y su posible inclusión en el concreto como agregado.

ESPECIFICOS:

1. Localizar las regiones colombianas en donde se encuentran depósitos de dunitas y sus propiedades, a partir de revisión bibliográfica.
2. Identificar los procesos de carbonatación que se presenta en el concreto a nivel teórico.
3. Analizar la posibilidad del uso de dunitas en concreto reforzado sin causar daños estructurales, a partir de la revisión bibliográfica.

1. CARACTERISTICAS Y FORMACIÓN GEOLOGICA A NIVEL MUNDIAL Y EN COLOMBIA

La dunita es una peridotita, roca intrusiva ultramáfica, constituida principalmente por olivino, se caracterizan por no poseer cuarzo, ni feldespatos, ni feldespatoides.



Figura 1. Fotografía de dunita, tomada de www.geovirtual2.cl.

Las Dunitas serpentinizadas se caracterizan por poseer una estructura reticular, con la siguiente composición promedio: Olivino, 95-97 %; Piroxeno 3-5 %; Espinelas cromíferas 0,5-1,0.²

Las dunitas están constituidas principalmente por minerales del grupo del olivino, los cuales, después de la deshidratación, es decir en temperaturas entre los 600 y 800 °C, tienden a recrystalizar principalmente como forsterita (Mg_2SiO_4) de una refractariedad superior a los 1800 °C, éstas siempre mantienen su consistencia sólida, por presentar elevadas temperaturas de reblandecimiento y fusión superiores a 1480 °C y 1550 °C respectivamente.³

Se puede también deducir que las dunitas por su elevado contenido de olivino son más susceptibles al deterioro, ya que este fue uno de los primeros minerales en cristalizar en el magma; por lo tanto, el olivino hace referencia a la serie Ferro magnesiana discontinua, en la cual se puede deducir que dicha roca es de coloración oscura.⁴

² Reynaldo La Rosa Vázquez, (2011). Utilización De Las Dunitas Asociadas A La Mineralización Cromifera De La Región De Camagüey Para La Elaboración De Ladrillos Refractarios.

³ Pons-Herrera, J., Leyva-Rodríguez, C., Rodríguez- Martínez, G. y Ramírez- Pérez, M., (2000). Características físico – químicas de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa – Baracoa (zonas Amores y Miraflores).

⁴ Barrientos Víctor, (2012). Geología, unidad III.

En las dunitas al ver que su cantidad de cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasas y feldespatoideos no alcanza ni el 10% de su contenido mineralógico, no clasifica en el diagrama de Streckeisen, por lo cual para las dunitas se usa el diagrama de los ultras básicos, que sirve en la clasificación basada en los contenidos de Olivino-piroxenos, para contenido de minerales máficos mayor de 90%.⁵



Figura 2. Diagrama de la clasificación basada en los contenidos de Olivino-Piroxenos, Para M más grande a 90 %: Contenido de minerales máficos mayor de 90 %, en el cuál clasifica la roca Dunita estudiada en este documento, tomado de Rodríguez Lozada José Antonio, *Las Islas canarias y el origen y clasificación de las rocas ígneas.*

Dichas dunitas pertenecen al complejo ultramáfico el cual se caracteriza, desde el punto de vista petrológico, por una composición heterogénea con predominio de las harzburgitas; en menor proporción se encuentran las dunitas, dunitas plagioclásicas, wherlitas, lherzolitas y piroxenitas serpentinizadas en mayor o menor grado.⁶

Los principales yacimientos de Dunita a nivel mundial se localizan en Noruega (Aaheim), Estados Unidos (Twin Sisters, Webster), Nueva Caledonia (Noumea), Nueva Zelandia (Dun Mountain, Red Hills, Red Mountain), España (Galicia), Austria (Leoben), Suecia, Canadá, Italia, Grecia, Sudáfrica y Brasil.”⁷

⁵ Wolfgang Griem. (2017). Museo virtual geología, <https://www.geovirtual2.cl>

⁶ Pons-Herrera, J., Leyva-Rodríguez, C., Rodríguez- Martínez, G. y Ramírez- Pérez, M., (2007). Características físico – químicas de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa – Baracoa (zonas Amores y Miraflores).

⁷ Reynaldo La Rosa Vázquez, (2011). Utilización De Las Dunitas Asociadas A La Mineralización Cromífera De La Región De Camagüey Para La Elaboración De Ladrillos Refractarios.

Las dunitas se encuentran dentro de los yacimientos cromíticos de Camagüey (Cuba) y en las grandes extensiones situadas en el macizo montañoso Moa – Baracoa. Se encuentran en la llamada asociación ofiolítica, que representa la antigua corteza oceánica en el macizo Moa-Baracoa, formando parte del complejo ultramáfico serpentizado.⁸

Las dunitas tienen estructura reticular, es decir, están conformados por la unión de pequeños paralelepípedos y presentan la siguiente composición mineralógica:

- Olivino: 95 – 98%
- Piroxenos: 3 – 5%
- Espinelas cromíferas: 0.5 – 1%

Algunas veces estas dunitas se muestran con un aspecto externo diferente, resaltan por su color gris oscuro con tonalidades verdosas, son holocristalinas, es decir, sus componentes son cristales, Granulometría media, textura masiva, están bien agrietadas, y poseen una densidad promedio de $2,79 \text{ g/cm}^3$.⁶

Las características refractarias de estas rocas se manifiestan por las relaciones $\text{MgO/SiO}_2 (> 1)$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} (1,2-1,9)$, valores aceptados actualmente para su utilización como material refractario.

Tabla 1. Resultado promedio de los análisis químicos (%) realizados a dunitas del yacimiento de cromo “Merceditas”, Moa, Holguín, Cuba, tomado de Pons-Herrera, J., & Leyva-Rodríguez, C., 2007.

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	P.P.I.
M-1	37.4	1.21	0.025	0.47	41.7	2.65	4.68	0.09	0.05	0.05	0.31	12.5

En el yacimiento Amores los minerales cromíticos y las dunitas se encuentran muy agrietados, con algunas grietas rellenas de kerolitas, serpofitas o carbonato de calcio. (Pons-Herrera, J., & Leyva-Rodríguez, C. 2000).

En este sector las dunitas en general son de grano fino, color verde grisáceo y verde negruzco, fuertemente serpentizadas; poseen textura bandeada y una estructura variada (nodular, reticular, laminar y fibrosa bandeada) en dependencia del tipo específico de dunita. Están compuestas mayormente por olivino (80-90%) y en menor proporción por ortopiroxenos y cromita.⁹

⁸ Pons-Herrera, J., Leyva-Rodríguez, C., Rodríguez- Martínez, G. y Ramírez- Pérez, M., (2007). Características físico – químicas de las dunitas serpentizadas de la región de Moa – Baracoa (zonas Amores y Miraflores).

⁹ Pons-Herrera, J., Leyva-Rodríguez, C., Rodríguez- Martínez, G. y Ramírez- Pérez, M., (2000). Características físico – químicas de las dunitas serpentizadas de la región de Moa – Baracoa (zonas Amores y Miraflores).

Estudios anteriores realizaron análisis de microsonda electrónica (EPMA) la cual permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo de sustancias sólidas a escala micrométrica y no es destructiva.¹⁰

Dichos análisis fueron efectuados a cristales de olivino presentes en las dunitas serpentinizadas, permitieron establecer para este mineral en las dos zonas, las fórmulas cristaloquímicas siguientes:

- Amores: $(Mg_{1,79} Fe_{0,17}) SiO_4$; con valores de forsterita entre 91,16 y 91,82%, y de fayalita entre 8,32 y 8,96%.

- Miraflores: $(Mg_{1,71} Fe_{0,21}) SiO_4$; con valores de forsterita entre 90,68 y 91,26%, y de fayalita entre 8,82 y 8,98%. En ambas zonas los contenidos de forsterita son inferiores a los reportados para las dunitas serpentinizadas de la zona de Merceditas.¹¹

En las dunitas estudiadas, se observa que favorece su utilización como material refractario debido a la escasa presencia de piroxenos (menor de 1%) y la poca variación en el contenido de forsterita en el olivino, tanto en las dunitas de Amores como en las de Miraflores, con valores promedio entre 90 - 91%.⁹

Las dunitas de tipo orogénico son comunes en los cinturones metamórficos de alta presión (HP) y ultra alta presión (UHP). La dunita orogénica experimentó el metasomatismo más débil y conserva adecuadamente las características petrológicas y geoquímicas iniciales de la peridotita orogénica antes de ser incorporada a la zona de subducción.¹²

Según el artículo de “Orígenes de dunitas orogénicas” publicado en 2015, Las dunitas se encuentran presentes en más de cuarenta (40) lugares a nivel mundial, en ellas podemos encontrar tres principales tipos: dunita residual, dunita de sustitución o replaciente y dunita acumulativa, las cuales presentan orígenes y formaciones geológicas diferentes.¹⁰

Las dunitas residuales son producto de altos grados de fusión parcial (25 - 60%) del manto primitivo y exhiben altos valores de Mg (Mayor porcentaje en peso) en composiciones de roca a granel, que son similares a peridotitas antiguas cratónicas.

¹⁰ Castellanos Alarcón, O., & Ríos Reyes, C. (2005) Microsonda electrónica: Principios de funcionamiento.

¹¹ Pons-Herrera, J., Leyva-Rodríguez, C., Rodríguez- Martínez, G. y Ramírez- Pérez, M., (2007). Características físico – químicas de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa – Baracoa (zonas Amores y Miraflores).

¹² Bin Su, Yi Chen, Shun Guo, Jingbo Liu, (2015). Orígenes de las dunitas orogénicas: Petrografía, geoquímica e implicaciones.

Los datos isotópicos indican que estas dunitas se derivaron principalmente del manto litosférico subcontinental Archean-Paleoproterozoic (SCLM).¹⁰

Mientras que las dunitas de sustitución se formaron mediante la reacción de peridotita rica en piroxeno ambiente con masa fundida de sílice insaturada. La textura típica de la reacción de roca fundida es el resultado de la disolución de ortopiroxeno asociada a la precipitación de neoblastos de olivino. En comparación con las dunitas residuales, las dunitas de reemplazamiento tienen concentraciones generalmente con un SiO₂ inferior y FeO superior.¹³

Los olivinos de dunitas replacientes muestran valores relativamente bajos de FeO (principalmente 90.4-92.4) con contenido variable de NiO (0.18-0.53 % en peso), y las espinelas producen una correlación positiva entre los contenidos de Cr (< 65) y TiO₂ (hasta 0.6%).¹¹

Las dunitas replacientes exhiben abundancias variables del elemento del grupo del platino (PGE) que van desde un ligero enriquecimiento hasta un agotamiento extremo en relación con las peridotitas ambiente ricas en piroxeno. Las dunitas acumuladas se formaron a través de la formación de cristales de los magmas del manto y solo ocupan una pequeña proporción de las dunitas orogénicas.¹¹

Como se muestra a continuación se puede evidenciar que la mayoría de las dunitas están ubicadas en orógenos fanerozoicos, que corresponden a la ocurrencia común de placas tectónicas.¹¹

¹³ Bin Su, Yi Chen, Shun Guo, Jingbo Liu, (2015). Orígenes de las dunitas orogénicas: Petrografía, geoquímica e implicaciones.

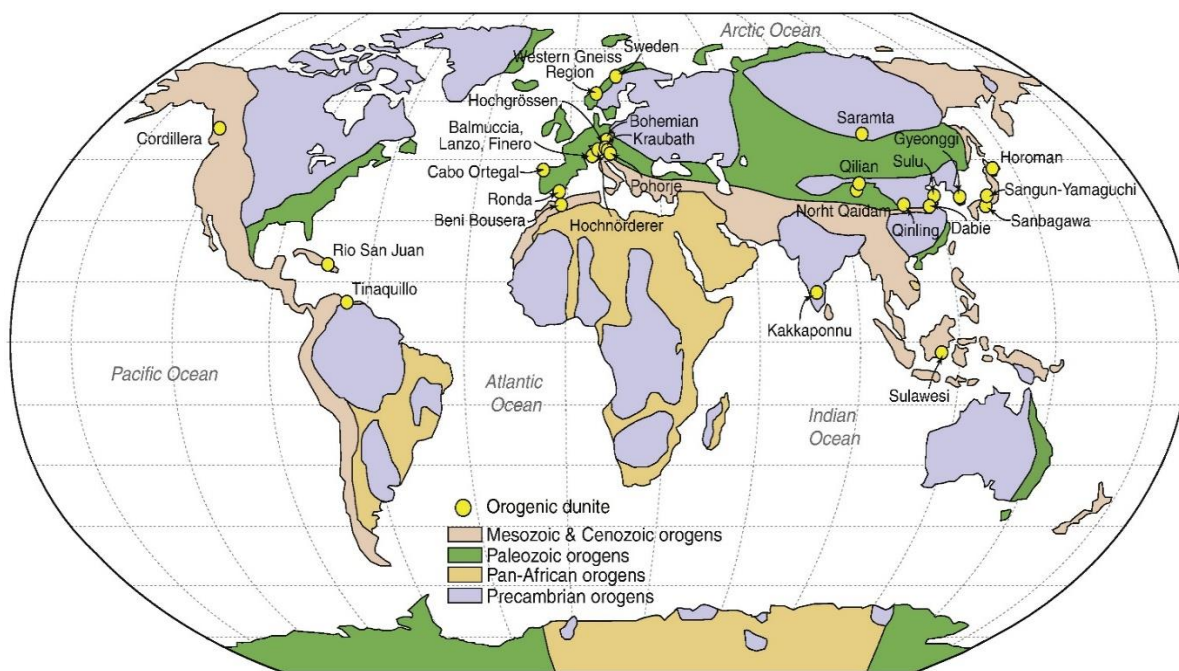


Figura 3. Distribución a nivel mundial de las dunitas orogénicas. Tomado de Orígenes de las dunitas orogénicas: Petrografía, geoquímica e implicaciones.

Tabla 2. Dunitas orogénicas a nivel mundial, tomado de Orígenes de las dunitas orogénicas (2015).

REGIÓN	LOCALIDAD	OCURRENCIA	ROCA COEXISTENTE	EDAD DE ORO	ORIGEN
Sulu, china	Zhimafang	Capa	Lherzolita, Harzburgita, piroxenita y eclogita.	Mesozoico	Derretimiento parcial
	Ganyu	Macizo	Serpentinita y eclogita	Mesozoico	Derretimiento parcial
	Maobei	Lense	Wehrlite, harzburgite, pyroxenite y eclogite.	Mesozoico	Acumulación
	Hujialing	Macizo	Clinopyroxenite y serpentinita	Mesozoico	Derretimiento Parcial
	Rongcheng	Macizo	Harzburgita y eclogita	Mesozoico	Derretimiento Parcial

Dabie, China	Raobazhai	Lentes	Harzburgita, lherzolita, piroxenita y eclogita	Mesozoico	Derretimiento Parcial
	Maowu	Capa	Harzburgita, piroxenita y eclogita	Mesozoico	----
Qinling, China	Songshugou	Macizo	Harzburgita, tilaíta y piroxenita	Paleozoico	Acumulación (gruesa); reacción de fusión-roca (grano fino)
Norte de Qaidam, China	Lüliangshan	Capa	Harzburgita, lherzolita y piroxenita	Paleozoico	La fusión parcial acumulación.
Qilian, China	Yushigou	Vena	Harzburgite	Paleozoico	Acumulación
Macizo de Gyeonggi, Corea del Sur	Hongseong	Lentes	Metabasita	mesozoico	Acumulación
	Baekdong	Lentes	Harzburgita y lherzolita	mesozoico	Reacción Melt-rock
	Yugu	Menor	Lherzolita, harzburgita y websterita	mesozoico	----
	Bibong	Lentes	Harzburgite	mesozoico	-----
Hokkaido, norte de Japón	Horoman	Capa	Harzburgita, lherzolita, gabro y piroxenita.	Cenozoico	Reacción Melt-rock
	Iwanaidake	Lentes	Harzburgita, piroxenita y cromitita	mesozoico	La fusión inconsecuente
Sangun, Japón	Sangun-Yamaguchi	Macizo	Harzburgita y cromitita	mesozoico	Derretimiento parcial
Sanbagawa, Japón	Higashi-akaishi	Macizo	Harzburgita, Wehrlita y Piroxenita	mesozoico	Derretimiento parcial
	Fujiwara	Macizo	Wehrlite, serpentita y gabro	mesozoico	Acumulación

Western Gneiss Region, Noruega	Almklovdalen	Macizo	Harzburgita, lherzolita, wehrlita, piroxenita y eclogita	Paleozoico	Derretimiento parcial
	Kallskaret	Bloquear	Lherzolita, piroxenita y eclogita	Paleozoico	Derretimiento parcial
	Otrøy	Bloquear	Harzburgita, lherzolita y granate	Paleozoico	Derretimiento parcial
	Sandvik, Gurskøy	Bloquear	Lherzolita y piroxenita	Paleozoico	Derretimiento parcial
	Onilsavatn	Bloquear	Dunite libre de granate	Paleozoico	Derretimiento parcial
Suecia	Friningen	Lentes	Harzburgita, lherzolita y piroxenita	Paleozoico	Derretimiento parcial
	Kittelfjäll	Capa	Harzburgite	Paleozoico	Derretimiento parcial

A nivel nacional se ha demostrado la presencia de depósitos de dunitas en Colombia. La mayoría de los estudios arrojan que el departamento de Antioquia es el principal lugar en donde estas se encuentran.

Son diversos los estudios realizados sobre la Cordillera Central, en su sector más septentrional, sector en el cual se encuentra incluida el área de Medellín. La mayoría de los autores admiten de forma generalizada efectos policíclicos y polimetamórficos que afectaron las rocas constituyentes de esta cordillera y las diferentes unidades lito estratigráficas que la conforman.¹⁴

En el caso de las dunitas localizadas en Medellín, la mayoría de los autores han considerado que su edad se clasifica posterior al metamorfismo y anterior a la intrusión del Batolito Antioqueño, ubicándola así entre el Triásico y el Cretáceo.¹⁵

¹⁴ Pereira Euricio et al. (2006) contribución al conocimiento de las anfíbolitas y dunitas de Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá).

¹⁵ Restrepo Jorge (2008), Obducción y metamorfismo De Ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera central De Colombia.

La dunita de Medellín presenta gran extensión, se encuentra en la parte oriental de Medellín, norte de Bello y en los sectores sur y occidental de San Pedro.¹²

Cuenta con estructura planar la dunita, observable muy bien en las rocas con algo de meteorización, aunque en fragmentos recién fracturados no es tan fácil observar esta foliación. Es posible que corresponda a planos de alta deformación dúctil, como es el caso de la harzburgita de la quebrada Chupadero, en la cual los cristales deformados de enstatita están envueltos por esta foliación; igual sucede con la espinela crómica. A nivel de sección delgada dicha foliación no es muy notoria. Es muy probable que la estructura planar corresponda a deformaciones dúctiles en el manto, así como la deformación kink en la enstatita.¹³

Según Eurico Pereira et al., 2006, en la geología en este sector se encuentran las siguientes unidades litológicas:

- **Granulitas y migmatitas.** Se han descrito en las localidades de La Ceja y El Retiro al oriente de Medellín. Dada su litología y mayor grado de metamorfismo han sido consideradas por diversos autores como rocas del Proterozoico - Paleozoico inferior.
- **Paragneises en la parte suroriental del Valle de Aburrá y Esquistos sericíticos en el Ancón.** En apariencia estos últimos forman parte de una franja que se extiende desde el Alto de Minas hasta el Ancón Sur. Hacia el noroeste de Medellín, cerca de Boquerón, hay esquistos cuarzo sericíticos con cantidades variables de grafito, y la presencia en algunas zonas de porfidoblastos de granate y estaurólita o andalucita.
- **Anfibolitas.** Afloran en una gran extensión del área, aunque no parecen formar parte de una misma unidad, sino que están expuestas en zonas geográficas y tectónicas variadas, al igual que con diversas características mineralógicas y texturales, así como en sus edades geocronológicas. De los cuerpos extensos de anfibolita son importantes los que se encuentran estrechamente relacionados con la Dunita de Medellín, así como con gneises y esquistos biotíticos. Las anfibolitas de Medellín se han considerado como rocas de edad Paleozoica, aunque las relaciones de campo parecen indicar la presencia de varias anfibolitas con edades diferentes.
- **Rocas ultramáficas.** Se incluyen en éstas: peridotitas, dunitas, dunitas serpentinizadas y serpentinitas. Estas rocas están relacionadas con el

sistema de fallas Cauca-Romeral. Es frecuente encontrarlas asociadas con gabros y basaltos. Para la mayoría de las rocas ultramáficas, se ha considerado una edad de formación del Jurásico-Cretácico temprano con un emplazamiento al continente durante el Cretáceo tardío – Paleógeno.

- **Granitoides neisicos.** Cuerpos de composición granitoide y estructura neisica, entre otros el llamado Ortoneis de La Miel (municipio de Caldas) y el Gneis de la Iguaná, afloran en varias localidades. El Ortoneis de Caldas esta intruyendo Anfibolitas granatíferas y los esquistos intercalados con éstas.
- **Cuerpos de roca granítica.** Importantes en el área son: El Batolito Antioqueño y el stock de AltaVista. El primero es un cuerpo que ocupa una amplia extensión del sector norte de la cordillera Central. Su propia área es de 7.221 km² y la de cuerpos satélites 322 km² (INGEOMINAS, 1996). Aflora al oriente y nororiente de Medellín. El stock de Altavista, es un cuerpo plutónico aflorando en la margen occidental del Valle de Aburrá. Esta caracterizado por presentar una gran variedad petrográfica con rocas que van desde gabros, dioritas, tonalitas hasta rocas porfídicas con matriz afanítica de composición andesítica, que parecen ser las predominantes. El contacto con las anfibolitas existentes en el sector occidental de Medellín es intrusivo.

La dunita aparece mediante un contacto fallado, generalmente subhorizontal, a las Anfibolitas de Medellín. En la zona de contacto y debido a cabalgamiento de las Dunitas sobre las anfibolitas se generaron esquistos actinolíticos, cloríticos y talcosos. Esta dunita es parcialmente serpentinizada. Es característico para esta unidad el que presenta estratificación primaria, resultante de actividad mantélica, foliación metamórfica y plegamiento polifásico. Por su fábrica, mineralogía y química parece estar representando la base de una Ofiolita que sufrió desmembramiento y acreció al continente.

Las Anfibolitas localizadas geográficamente más cerca a la dunita, se hallan plegadas siguiendo una fase de deformación dúctil responsable de la foliación metamórfica (S_n) en facies anfibolítica y una fase más frágil, responsable de los doblamientos mesoscópicos con charnela horizontal de dirección aproximada de N-S y planos axiales sub-verticales. Estos últimos doblamientos apenas dan origen a

una crenulación (S_{n+1}) poco penetrativa, el cual se define como un tipo de plegamiento regular con una longitud de onda de 1 cm o menor.¹⁶

El tipo de contacto entre las Anfibolitas de Medellín y las Dunitas de Medellín es normalmente fallado y la mejor expresión de esto se puede observar en la autopista Medellín-Bogotá. Se trata de una zona de aproximadamente un kilómetro y medio, medido sobre la carretera, donde el contacto se manifiesta por la presencia notable de esquistos verdes replegados y actinolíticos, o por zonas decamétricas donde se presentan mezclas, de manera compleja, de varios tipos de roca como anfibolitas, dunitas, esquistos de talco y anfibolita-esquistos. Los esquistos cloríticos a partir de las dunitas y actinolíticos a partir de la anfibolita, se han interpretado como generados durante el proceso de obducción. A lo largo de todo el contacto entre dunitas y anfibolitas, éste cambia de buzamiento, en unos sectores es subhorizontal y en otros relativamente inclinado. Las anfibolitas y dunitas integran una secuencia única de corteza-manto superior oceánico, la cual fue acrecionada al dominio continental, muy probablemente, en el ciclo Apalachiano-Varisco, habiendo sido deformada y metamorfozada durante este ciclo. Estudios previos han enfatizado la importancia de la presencia de cuerpos de cromita podiforme en las dunitas de Medellín como depósitos característicos de ofiolitas. En los trabajos preliminares que se vienen adelantando en el marco del proyecto "Metales Preciosos en Ofiolitas" de Cytel ha sido posible el seleccionar muestras de la dunita y de las cromitas de Medellín para establecer las posibilidades de determinar la presencia de elementos del grupo del platino EGP.¹⁴

Se destacan los contenidos que superan promedios normales para este tipo de roca en las muestras OF-10-2 y OF-10-3 de la siguiente tabla en las cuales alcanzan, en la suma total de sólo Pt y Pd, valores que llegan a superar a 1.0 ppm. A su vez nótese las deficiencias de EGP en las cromitas ricas en Al, (muestras OF-12, 12A, suma menor a 27 ppb), de la Dunita de Medellín; estas cromitas guardan una similitud muy notoria con la de los principales complejos ofiolíticos. (Omán, Chipre, Nueva Caledonia, Turquía, California).

¹⁶ Pereira Euricio et al. (2006) contribución al conocimiento de las anfibolitas y dunitas de Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá).

Tabla 3. Contenido de Metales Preciosos en dunitas y cromitas de la Dunita de Medellín, tomado de Eurico Pereira et al., 2006.

Muestra No.	O F - 10	O F - 10	O F - 10	OF 10- 2	OF 10 -3	OF 10- 4	OF 10- 5	OF 10- 6	OF M 02	OF M 03	OF M 03	OF M 14	OF - 12	OF - 12
Tipo de Roca	D u n i t a	Du n i t a	Du n i t a + Sx + Es	Duni ta + Sx	Du ni ta + Sx	Duni ta + Sx	Dunit a + Sx	Duni ta + Sx	Duni ta alter Hid rot	Du ni ta + Mg	Duni ta + Mg	Duni ta	Cr o mit a	Cr o mit a
Pt (ppb)	20	14	0	293 y 78	87 4 y 30 7	0 y 14	0 y 16	0 y 18	0 y 6	0 y 7	0 y 3	0 y 7	4	3
Pd (ppb)	31	10	2	3 y 100	16 y 81 0	5 y 25	3 y 21	4 y 36	3 y 8	3 y 10	0 y 8	3 y 7	0	0
Ir (ppb)	2	4	0	24	20	0	0	0	0	0	0	0	7	3
Os (ppb)	3	3	4	0	6	3	3	3	4	3	2	4	0	0
Ru (ppb)	4	6	2	1 y 3 y 6	5 y 14	2 y 6	2 y 6	2 y 6	2 y 8	2 y 8	1 y 4	2 y 6	14	7
Rh (ppb)	2	2	0	56	30 5	0	0	0	0	0	0	0	2	1
u (ppb)	34	17	8	10	14	44	54	32	5	0	7	10	0	0

Las Dunitas de Medellín fueron consideradas, en la región, como el único componente de una ofiolita desmembrada. Como bien estos autores plantean, hay una estrecha relación entre el metagabro de El Picacho y la dunita y consideran que ambos hacen parte de una misma ofiolita por lo cual proponen entonces una nueva unidad litoestratigráfica en el área a la que denominaron Complejo Ofiolítico de Aburrá. Este complejo Ofiolítico, comprende en su parte basal la Dunita de Medellín y en la parte intermedia los Metagabros de El Picacho. No se ve, por ahora, razón para disociar de este complejo ofiolítico a su componente lávica, representada en

las anfibolitas de Medellín. Igualmente, como lo demuestra el quimismo de las rocas máficas de Medellín, es compatible con un magma. ¹⁷

A su vez En el flanco occidental de la Cordillera Central se encuentra localizado el valle de Aburrá, departamento de Antioquia. Allí también se presentan afloramientos de varios cuerpos de anfibolitas, así como un importante cuerpo de dunita, todos los cuales fueron instruidos por plutones de edad cretácica.¹⁸

El principal mineral de alteración es la serpentina, el cual se presenta dentro de los cristales de olivino y en forma de venillas que atraviesan toda la roca; talco, iddingsita y clorita acompañan las venillas de serpentina, masas amorfas de hidróxidos con colores rojizos y relieve moderado y minerales opacos (magnetita) se presentan asociados a las venillas de serpentina, posiblemente formados por segregación de hierro durante la serpentinización del olivino.¹⁹

Microscópicamente las rocas de esta unidad presentan una textura nematoblástica caracterizada por la orientación y ordenamiento de los cristales de hornblenda. La hornblenda está presente en proporciones que varían entre el 58 y 65%, con un color verde azulado y fuerte pleocroísmo de verde oscuro o amarillento, que enmascara los colores de interferencia. Se reconoce, en la mayoría de los cristales, su exfoliación típica en dos direcciones. La plagioclasa (labradorita - Bitownita) se encuentra en proporciones del 12%, en cristales pequeños fuertemente alterados a caolinita y pequeños cristales de cuarzo (7 y 10%) acompañan a la plagioclasa. Como minerales secundarios se reconocieron clorita, caolinita, sericita y minerales opacos. ¹⁷

¹⁷ Pereira Euricio et al. (2006) contribución al conocimiento de las anfibolitas y dunitas de Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá).

¹⁸ Restrepo Jorge (2008), Obducción y metamorfismo De Ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera central De Colombia.

¹⁹ González Laura (2016) Petrogenesis de los complejos ultrámáficos de Heliconia – Angelópolis y del oriente de Medellín, Antioquia, Colombia.

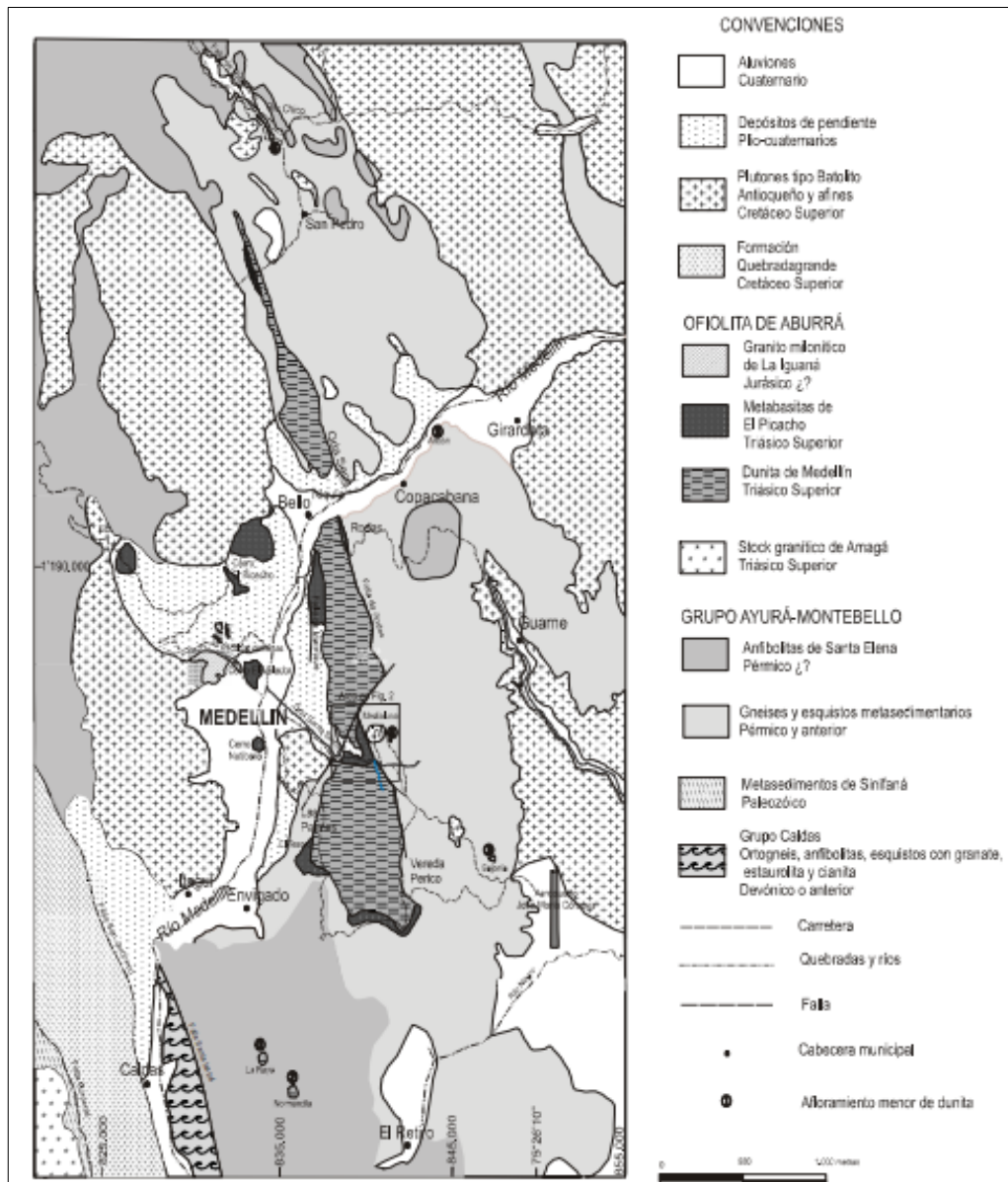


Figura 4. Mapa geológico de la región central de Antioquia tomado de Jorge Restrepo (2008).

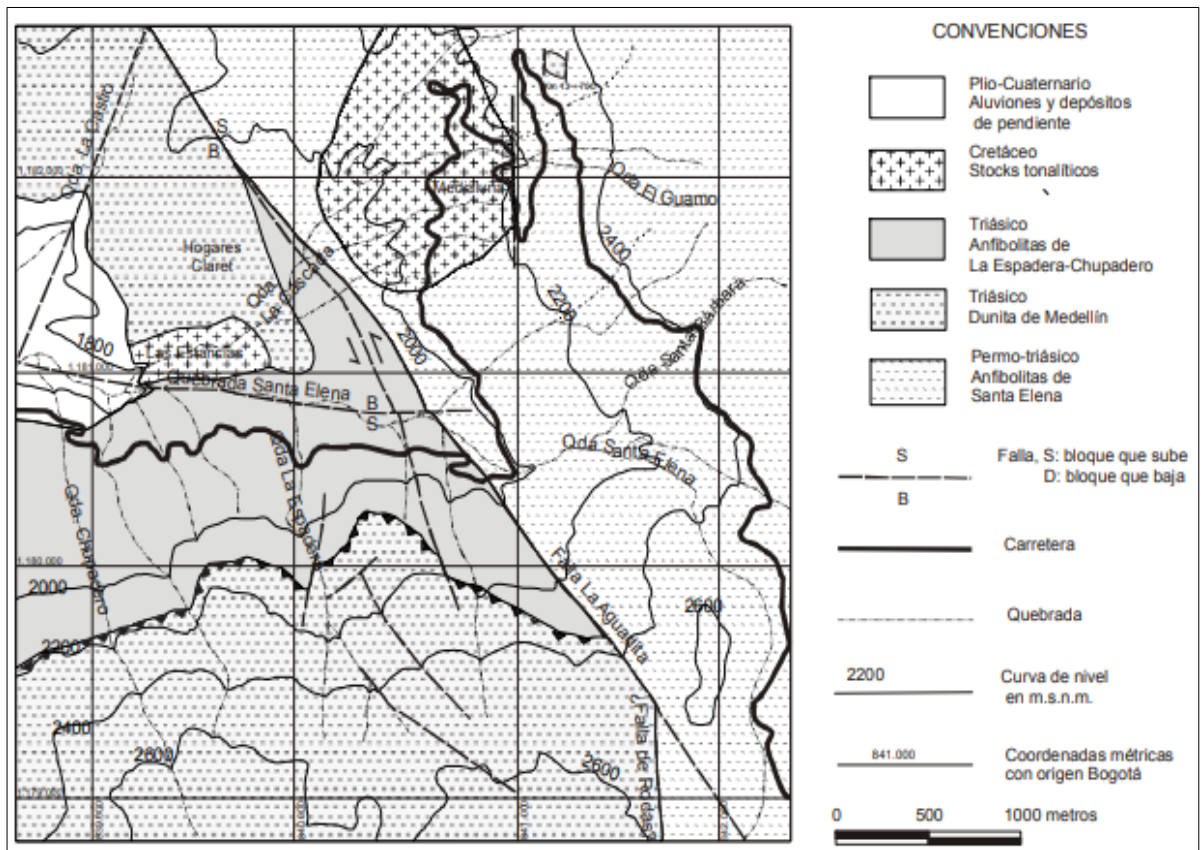


Figura 5. Mapa detallado del sector bajo de la quebrada Santa Elena, tomado de Jorge Restrepo (2008).

Esta unidad está conformada por un cuerpo principal que aflora al oriente de Medellín y varios cuerpos menores. El área es de aproximadamente 60 kilómetros cuadrados. El cuerpo principal se extiende desde la vereda Perico del municipio de Envigado al sur hasta cerca de la cabecera municipal de San Pedro al norte y está dividido en tres bloques. El bloque meridional está separado del central por la quebrada Santa Elena, en donde afloran anfíbolitas, y el central está separado del septentrional por los aluviones del río Medellín en el municipio de Bello.²⁰

Los cuerpos menores de los que el autor Jorge Restrepo¹⁸, mencionaba anteriormente son:

²⁰ Restrepo Jorge (2008), Obducción y metamorfismo De Ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera central De Colombia.

- **Cuerpo del alto de La Raya**, localizado en la bifurcación del camino de herradura que desde El Retiro llega a Envigado y a Caldas. Este cuerpo está formado por serpentina con algo de magnesita.
- **Cuerpo de Normandía**, descrito por Rodríguez et al., 2005, localizado al oriente del anterior.
- **Cuerpo de Sajonia**, localizado en el antiguo camino de herradura entre Medellín y Rionegro. Además de la dunita, allí se presentan zonas ricas en enstatita intercrecida con el olivino. También se encuentran pequeñas cantidades de flogopita asociada con estos minerales.
- **Cuerpo de Media Luna**. En el kilómetro 10+700 de la carretera Medellín Santa Elena Rionegro, sitio en donde desde hace muchos años se presentan dificultades geotécnicas, aflora un pequeño cuerpo ultra básico, separado de las anfibolitas de Santa Elena por fallas frágiles. Dentro de la roca, coexistiendo con olivino y tremolita se encuentra antofilita. También se encuentran bloques de antofilita granofélsica y mucho asbesto anfibólico, probablemente formado por la misma antofilita.
- **Cuerpo del Ancón Norte o de Copacabana**. En una antigua cantera afloran diversas rocas que incluyen dunita, anfibolitas, paragneises y paraesquistos, los cuales están instruidos por gabros hornbléndicos. (Gutiérrez y Londoño, 1988).
- **Cuerpo del río Chico**. Entre San Pedro y Belmira aflora un cuerpo de un poco más de un kilómetro de largo de dunita. Dicho cuerpo está controlado por la falla del río Chico. Presenta zonas tan ricas en enstatita que hacen que localmente la roca se transforme en una ortopiroxenita.

Actualmente no hay pruebas de que estos cuerpos se hallan formados al mismo tiempo, pero se deja este planteamiento hipotéticamente. Según la petrografía de ésta, en algunas partes la roca ultra básica está bastante serpentinizada, en otras más frescas se observa que el único mineral ferromagnesiano original es el olivino que es el mineral predominante, lo que ha llevado a que la roca sea clasificada como una dunita.²¹

En el artículo de Jorge Restrepo se realizó el estudio de las secciones delgadas para determinar si había presencia de ortopiroxeno en las dunitas pero no se observó ningún porcentaje de este mineral, por lo tanto es probable que el hecho de que en algunas de esas rocas el olivino tenga muy marcado el clivaje es decir,

²¹ Restrepo Jorge (2008), Obducción y metamorfismo De Ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera central De Colombia.

su dirección de debilidad y puede haber producido la confusión de este mineral con ortopiroxeno.

Otros minerales que se encuentran son espinelas crómicas, tremolita, talco, clorita, magnetita y serpentina, además de la antofilita del cuerpo de Media Luna. Como minerales secundarios son frecuentes costras de garnierita en las fracturas de la dunita, así como uvarovita asociada con las cromititas.

La aparición de tremolita dispersa dentro de la dunita en la gran mayoría de las muestras indica la presencia de alguna cantidad de calcio repartido por todo el cuerpo. Aunque cristales de clinopiroxeno no se han encontrado en la dunita, es probable que estuviera presente y que el metamorfismo de facies anfibolita lo hubiera transformado en tremolita, único mineral cálcico magnésico estable en rocas ultrabásicas dentro de la facies anfibolita.²²

Macroscópicamente las rocas de la unidad de la Dunita de Medellín están fuertemente fracturadas y alteradas. Se caracterizan por ser macizas, faneríticas, mesogranulares, de color gris verdoso a verde oliva y por tener un índice de color hipermelánico. La mayoría de las muestras poseen pátinas de serpentina de color verde amarillento; como textura específica presenta textura cumular, que se hace evidente por los procesos de serpentización de los cristales de olivino.²³

²² Restrepo Jorge (2008), Obducción y metamorfismo De Ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera central De Colombia.

²³ González Laura (2016) Petrogenesis de los complejos ultramáficos de Heliconia – Angelópolis y del oriente de Medellín, Antioquia, Colombia.

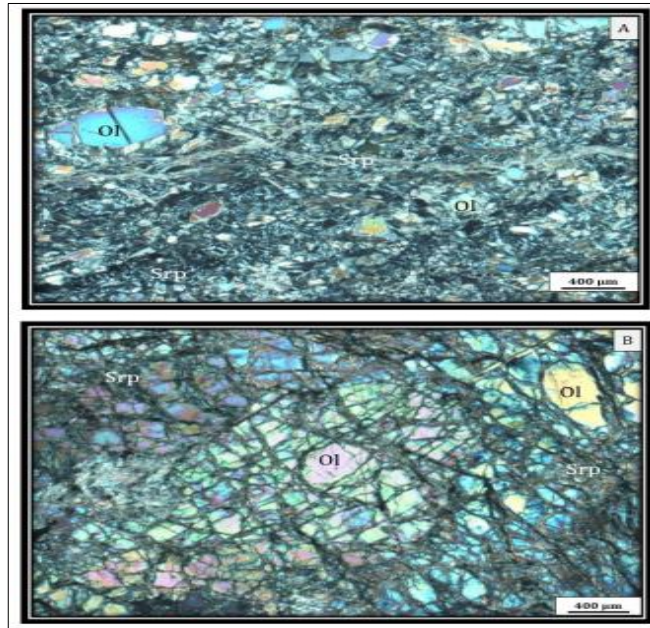


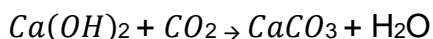
Figura 6. Microfotografías de muestras de las Dunitas de Medellín, tomado del repositorio de Laura González (2016).

En la imagen anterior se observa la alteración a serpentina que presentan los cristales de olivino (Ol) así como también las venillas de serpentina (Srp) que le dan a la roca la apariencia cumular. También se observan venillas de serpentina (Srp) alrededor y a través de los cristales de olivino; adicionalmente se observa el fuerte fracturamiento de los cristales de olivino (Ol).²⁴

²⁴ González Laura (2016) Petrogenesis de los complejos ultramáficos de Heliconia – Angelópolis y del oriente de Medellín, Antioquia, Colombia.

2. CARBONATACIÓN NATURAL

La carbonatación es una reacción química en la que el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono y forma carbonato cálcico insoluble:



La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral.²⁵

La pérdida de pH en el concreto es un problema por que el concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino.²⁴

Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.²⁴

Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando también hay cloruros en el concreto. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero ahogado. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruro para la corrosión es significativamente menor -100 ppm o menos-. Por esta razón, una investigación de la condición para la mayoría de las estructuras de concreto en proceso de corrosión debe siempre incluir un análisis de la profundidad de carbonatación.²⁴

La manera más fácil de detectar la carbonatación en una estructura es romper un pedazo de concreto (preferentemente cerca de un borde) en donde se sospeche que hay carbonatación. Después de soplar todo el polvo residual del espécimen o del substrato, se pulveriza una solución de 1 o 2 por ciento de fenolftaleína en alcohol sobre el concreto. Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosado

²⁵ Broomfield, J.P., "Cathodic Protection of Reinforced Concrete", Society for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Report núm. 001.95, 1995.

brillante. Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del concreto.²⁴ Las agencias de prueba calificadas realizan estas pruebas rutinariamente como parte de una investigación de la condición en edificios y estructuras de concreto. Además de las pruebas de carbonatación, estas investigaciones de la condición incluyen con frecuencia pruebas de resistencia del concreto, valoraciones de la profundidad del recubrimiento, contenido de cloruro y permeabilidad del concreto.²⁶

El aire de la atmosfera posee dióxido de carbono (CO_2), el cuál puede penetrar el concreto debido a la presencia de sus poros capilares. El fenómeno de la carbonatación del concreto es la reacción que produce el dióxido de carbono con los compuestos cálcicos hidratados del cemento.²⁷

La carbonatación se caracteriza por ser un proceso fisicoquímico en la que una serie de reacciones químicas se producen en la presencia de dióxido de carbono (CO_2), que promueve la reducción del pH en el hormigón.²⁸

El CO_2 presente en la atmósfera se difunde a través de la cubierta de hormigón, se disuelve en la solución de los poros, y luego reacciona con iones de calcio para precipitar carbonato de calcio ($CaCO_3$). El resultado de la carbonatación es la disolución de los hidratos que contienen calcio, el primero de ellos es la portlandita, $Ca(OH)_2$.²⁹

La carbonatación del concreto es la segunda causa de corrosión en estructuras de concreto reforzado. La corrosión debido al proceso de carbonatación es un proceso lento en comparación con la corrosión por cloruros, que conduce a una corrosión uniformemente en el acero que causa formación de grietas rápidamente, lo que genera menor tiempo de vida útil en la estructura. La aceleración en la formación de estas grietas se da siempre y cuando estén presentes las condiciones de temperatura y humedad adecuadas.²⁹

En ambientes tropicales no marinos, la corrosión por carbonatación podría ser el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado. Sin embargo, el proceso de carbonatación natural es lento y un proceso acelerado es necesario para obtener datos en menor tiempo.³⁰

Varios factores influyen en la carbonatación, como la temperatura y la humedad relativa, los sistemas de poros y la porosidad, la composición mineralógica y

²⁶ Broomfield, J.P., "Cathodic Protection of Reinforced Concrete", Society for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Report núm. 001.95, 1995.

²⁷ Solís Carcaño Rómel G. (2013), Carbonatación natural del concreto a cuatro años.

²⁸ Silva, A., Neves, R., & Brito, J. (2013). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete.

²⁹ Drouet Emeline, Poyet Stéphane, Le Bescop Patrick, Torrenti Jean-Michel y , (2018). Carbonatación de pastas de cemento endurecido: Influencia de la temperatura.

³⁰ Moreno Eric, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia and Francisco Duarte Gómez. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.

geoquímica, las proporciones de los constituyentes, como la relación de agua a aglomerante.³¹

La resistencia a la carbonatación es uno de los indicadores de durabilidad del concreto. La carbonatación del concreto al disminuir el valor de pH en el concreto, da como resultado la corrosión acelerada de las barras de refuerzo.³²

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado radica en la capacidad que tiene el material tanto para evitar el ingreso de agentes agresivos como el agua, el oxígeno, el dióxido de carbono, y los cloruros, como para soportar ciertas concentraciones sin ver comprometida su integridad. En el caso del dióxido de carbono y los cloruros, uno de los parámetros para evaluar dicha capacidad está dado por el valor del pH del agua del poro del concreto. A mayor pH se requiere, en el caso de la carbonatación, mayor cantidad de CO_2 para carbonatar el concreto.³³

En el concreto reforzado, por ejemplo, en el caso de corrosión del refuerzo, un valor alto de pH es necesario para mantener pasivo el acero. La carbonatación de concreto inicia la corrosión del acero de refuerzo debido a la reducción del pH del agua del poro, proceso que tradicionalmente ha sido medido usando un indicador ácido-base de color que se rocía sobre una sección de concreto recién expuesto. Sin embargo, este método sólo nos da una indicación del valor del pH del agua del poro. El acero en estructuras de concreto es protegido del ambiente atmosférico debido a la alcalinidad de la solución del poro, es decir, con Ph mayor a 12.5. Sin embargo, el acero puede corroerse si la protección se pierde.³⁴

La carbonatación del concreto puede afectar el pH del agua del poro. Como resultado de esta reacción, el pH de la solución del poro puede descender desde más de 12.5 a 8 unidades; bajo estas condiciones la barra de refuerzo pierde su estado pasivo, provisto por la alcalinidad del concreto que la rodea y la corrosión del acero se desarrolla. El método más común para determinar la profundidad de carbonatación en concreto es usando un indicador ácido-base de color (solución de fenolftaleína) rociada sobre una superficie recién expuesta del concreto. Sin embargo, esta técnica sólo indica un valor aproximado de pH, ya que la fenolftaleína presenta un rango de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10. Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0.³⁰

³¹ Duygu Ergenç y Rafael Fort, (2018). Aceleración de la carbonatación en morteros a base de cal en ambientes con alto contenido de CO_2 .

³² Jinzhi Tang, Jin Wu, Zhenghao Zou, Anyi Yue y Andrea Mueller, (2018). Influencia de la carga axial y de la edad de carbonatación en la resistencia a la carbonatación del concreto agregado reciclado.

³³ Moreno Eric, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia and Francisco Duarte Gómez. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.

³⁴ Moreno Eric, (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación.

Como el indicador de color es sólo una aproximación, es deseable una forma más precisa de determinar el pH. En el pasado, una técnica de lixiviación fue utilizada, consistiendo en mezclar el polvo de cemento o concreto molido con agua en una relación 1:1. Después de revolver la mezcla, la solución fue filtrada y entonces, se determinó el pH. Como el cemento hidratado tenía cerca de 20% de hidróxido de calcio, el proceso estaba lixiviando hidróxido de calcio y diluyendo la concentración de sodio y potasio. Por lo tanto, el pH de la solución filtrada se aproximaba al pH de una solución de hidróxido de calcio saturado.³⁰

Gracias a las observaciones de Moreno en el 2006, se deduce:

- Los valores del pH de la solución del poro del concreto antes de la carbonatación son mayores que el pH de una solución saturada de hidróxido de calcio.
- Los valores del pH de la solución del poro después de la carbonatación fluctuaron entre 8 y 9.8 unidades. El valor final incrementa cuando disminuye la cantidad de puzolanas presentes en el material cementante.
- Los valores del pH obtenido en concreto carbonatado son consistentes con los obtenidos en pastas y morteros carbonatados.

La protección puede perderse debido al ingreso de iones agresivos de cloruros en “ambientes marinos” o a la neutralización de la solución del poro, es decir al proceso de carbonatación. En lugares con clima tropical, como el de la Península de Yucatán, las condiciones atmosféricas pueden fomentar la agresividad del dióxido de carbono.³⁵

Según la investigación realizada por los autores Moreno et al., se pretendía determinar el estudio del efecto de la relación agua/cemento en las velocidades de carbonatación de especímenes de concreto. Los resultados obtenidos permitirán pronosticar el momento en que la protección alcalina se pierde, con lo que se podría programar el mantenimiento de los edificios en función de su resistencia a la compresión de diseño. Por otra parte, debido a que la carbonatación es un proceso lento. Para poder obtener resultados a corto plazo se requiere acelerar el proceso. Para esto, se construyó una cámara de carbonatación que permita acelerar el proceso.

Con el propósito de acelerar el proceso de carbonatación en el concreto, fue necesario construir una “cámara de carbonatación”, para tener en su interior un ambiente con mayor concentración de CO_2 que en el ambiente normal.³¹

³⁵ Moreno Eric, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia and Francisco Duarte Gómez. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.

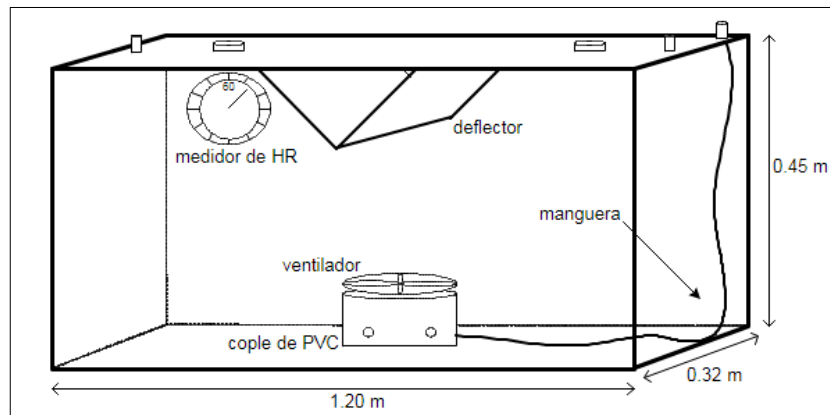


Figura 7. Diagrama de la cámara de carbonatación, tomado de Moreno et, al. (2004).

Esta cámara, con dimensiones de 1.22 m de largo, 0.32 m de ancho y 0.45 m de alto, tiene forma de prisma rectangular siendo en su mayor parte de vidrio a excepción de la tapa que es de acrílico con un espesor de 1 cm, la cual se fijó en la cámara mediante una cinta selladora que evita fugas del interior de la cámara. Esta tapa tiene dos orificios de 5 mm que sirven como salidas de aire y dos orificios más de 19 mm que sirven para poder insertar un medidor de humedad relativa (HR); éstos últimos fueron adecuados con tubo de PVC de 5 cm de largo con rosca y tapón para los casos en los que el medidor de humedad no está colocado.³⁶

De la investigación de Moreno et, al. En el 2004 Se puede deducir lo siguiente:

Entre la relación de la pérdida de masa por secado al ambiente y el tipo de mezcla; a mayor a/c, mayor porcentaje de pérdida de masa.

- En el caso de mezclas con la misma a/c, se observó que, a mayor revenimiento (hundimiento que sufre un cono de concreto fresco al quitarle el apoyo), mayor porcentaje de pérdida de masa.
- La profundidad de carbonatación varió de acuerdo al tipo de mezcla, mayor profundidad de carbonatación conforme aumenta a/c.
- La profundidad de carbonatación aumenta conforme el contenido de cemento disminuye.
- Entre las mezclas de igual a/c, la profundidad de carbonatación varió en forma inversa al revenimiento.

Se ha probado con éxito barras de acero galvanizado como alternativa contra la corrosión inducida por la carbonatación del concreto en ambientes tropicales no marinos; sin embargo, no deja de ser una alternativa inicial costosa y por

³⁶ Moreno Eric, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia and Francisco Duarte Gómez. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.

consiguiente no muy atractiva a pesar de las ventajas que brinda, además de que su mejor desempeño ocurre en edificaciones nuevas.³⁷

Otra opción para esta problemática es el uso de películas barrera o sistemas de protección superficial (revestimientos por pintura y productos similares. El mecanismo básico de protección de estos elementos consiste en la formación de una película semiflexible y continua, que actúa como barrera física de baja permeabilidad a gases como el dióxido de carbono, al agua, al vapor de agua y cualquier otro agente agresivo al concreto reforzado.³⁸

Se calculó la cantidad de dióxido de carbono que en promedio consume la totalidad de cemento dentro de la cámara de carbonatación por semana, para que se mantuviera constante el 4% de CO_2 circundante en el medio ambiente de la cámara, y de esta forma se acelerara el proceso de carbonatación. El avance de la carbonatación se determinó mediante la aplicación de una solución alcohólica de fenolftaleína al 1%, la cual se rocía sobre una superficie de concreto que ha sido expuesta recientemente. No se recomienda hacer cortes con sierra o barrenaciones, debido a la posible contaminación de material no carbonatado sobre las zonas carbonatadas. La Determinación de las profundidades de carbonatación se realizó de la siguiente manera: Dos especímenes de concreto por mezcla diseñada fueron removidos de la cámara a diferentes tiempos. Posteriormente se partieron los cilindros por la mitad utilizando cincel y martillo, seguidamente se rocía fenolftaleína al 1% sobre la superficie recién cortada y las lecturas de las profundidades de carbonatación se realizaron con la ayuda de un vernier digital.³⁹

El criterio para la determinación de la carbonatación fue el siguiente (RILEM 1988):

Cuando el frente de carbonatación avanza como una línea paralela a la superficie, la profundidad de carbonatación es determinada como se muestra a continuación.

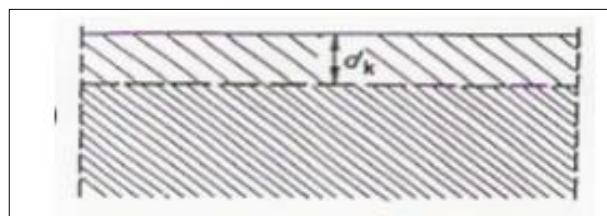


Figura 8. Profundidad de carbonatación primaria, tomado de Serrano & Moreno, 2006.

³⁷ Serrano Ixtepan D and Moreno Eric I. (2006), Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado.

³⁸ Trocónis de Rincón, O., et al., (2003). "Materiales y sistemas de rehabilitación," en Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón, P. Helene y F. Pereira, eds., Sao Paulo, pp. 215-250.

³⁹ Moreno Eric, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia and Francisco Duarte Gómez. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.

Cuando el frente de carbonatación avanza como se muestra a continuación, se tomará la profundidad de la gráfica promedio dk y la máxima profundidad $dk_{m\acute{a}x}$ es registrada.

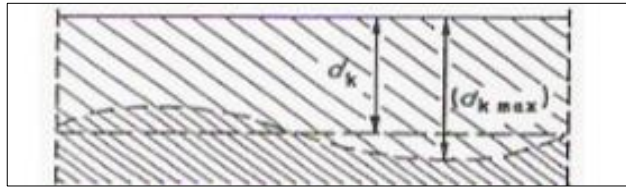


Figura 9. Profundidad de carbonatación secundaria, tomado de Serrano & Moreno, 2006.

Si el frente de carbonatación avanza paralelo a la superficie con áreas carbonatadas, aisladas y profundas, como se muestra a continuación, entonces la máxima profundidad $dk_{m\acute{a}x}$ de la carbonatación debe ser dada así como la profundidad normal dk . En este caso, ningún promedio es calculado.

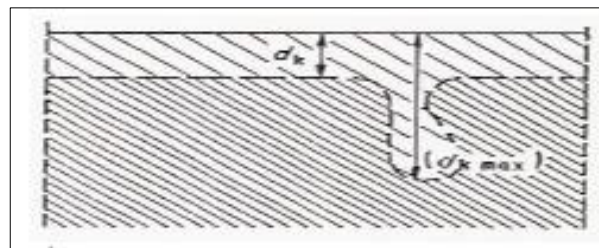


Figura 10. Profundidad de carbonatación terciaria, tomado de Serrano & Moreno, 2006.

En todos los casos se realizó una primera lectura, para lo cual se usaron los especímenes de control externo. Dicha prueba se hizo al finalizar el período de acondicionamiento y un día antes de colocar los especímenes de prueba en el interior de la cámara, ya que al estar en el ambiente de laboratorio sufrieron una carbonatación inicial. Esto se hizo con el objeto de poder determinar el avance real del frente de carbonatación en los especímenes durante el período de exposición acelerada.⁴⁰

En el artículo “Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros”, se presentan los resultados obtenidos en el estudio de mezclas de concreto producidas con un 90% de cemento Portland ordinario (OPC) y un 10% de adiciones de metacaolín (MK) y humo de sílice (SF). Se estudiaron cuatro tipos de MK, dos de ellos producidos a través de un tratamiento térmico de caolines colombianos y los dos restantes fueron obtenidos en el mercado internacional (Europa y Estados Unidos). Las propiedades evaluadas fueron resistencia a compresión, absorción de agua, volumen total de poros permeables, absorción capilar, resistencia a la carbonatación y resistencia a la penetración de iones cloruro. El estudio de carbonatación se realizó en especímenes de concreto a

⁴⁰ Serrano Ixtepan D and Moreno Eric I. (2006), Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado.

diferentes edades de curado en una cámara climática bajo condiciones controladas (30°C, 70% H.R. y 2,25% CO₂).⁴¹

Los concretos adicionados, a 28 días de curado, presentaron una mayor susceptibilidad frente a la carbonatación en comparación con los concretos de referencia (OPc sin adición), sin embargo, a mayor edad de curado la resistencia a carbonatación de las muestras de concreto con y sin adición incrementó. La permeabilidad a cloruros fue evaluada mediante la aplicación de la norma ASTM C1202. En general, los concretos con adición presentan la menor absorción capilar y la más alta resistencia a la penetración del ion cloruro en comparación a las mezclas de OPC sin adición.³⁷

El concreto como material estructural es el de mayor uso a nivel mundial por lo simple de su composición (cemento, agua, arena y triturado), manejabilidad, resistencia y duración.⁴²

Sin embargo, el concreto reforzado se deteriora al interactuar con el medio ambiente, siendo la corrosión del acero de refuerzo el mayor factor en la reducción de la vida de servicio de las estructuras y elementos de concreto reforzado.⁴³

Este posee capacidades de resistir esfuerzos a compresión y en combinación con el acero estructural forma una unión muy compacta que mejora su comportamiento a tensión, dando origen así al concreto reforzado, el cual con altos estándares de calidad en su diseño y construcción lo hace estructuralmente muy eficiente.⁴⁴

La durabilidad del concreto se ve afectada entre otras cosas por factores internos de carácter químico como la reacción álcali-agregado y factores de carácter externo como la cloración, sulfatación y carbonatación. La carbonatación que es el proceso en el cual el ambiente alcalino del concreto se va perdiendo gradualmente en el tiempo debido a la combinación de varios factores como lo son humedad, temperatura, ataque químico de CO₂ atmosférico, porosidad del concreto, relación agua /cemento, afectando sus propiedades mecánicas y dejando expuesto al acero de refuerzo al ataque de la corrosión.⁴⁰

La carbonatación se caracteriza por ser un proceso fisicoquímico en la que una serie de reacciones químicas se producen en la presencia de dióxido de carbono (CO₂), que promueve la reducción del pH en el hormigón. El CO₂ penetra en el concreto a través de un mecanismo de difusión el cual se produce gradualmente, dando lugar

⁴¹ Mejía Ruby, Rodríguez Cesar, Rodríguez Erich, Torres Janneth, Delvasto Silvio, (2009). Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros.

⁴² Galán, I. (2011). Carbonatación del Hormigón: Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

⁴³ Moreno Eric, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia and Francisco Duarte Gómez. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.

⁴⁴ Galán, I. (2011). Carbonatación del Hormigón: Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

a una capa carbonatada (llamada frente de carbonatación) que aumenta en espesor con el tiempo. ⁴⁵

Actualmente se conoce que la carbonatación depende de varios factores (Bakker 1988) como son el tipo y cantidad de cemento, porosidad del material, tipo y cantidad de adiciones de puzolanas, es decir, materiales silíceos o aluminosilíceos, entre otros. ³⁹

El estrés concreto tiene una gran influencia en la profundidad de la carbonatación, por lo que es de vital importancia investigar el modelo de profundidad de carbonatación bajo un estado de estrés concreto. En general, la estructura de hormigón tiene características dependientes del tiempo, ya que a medida que el hormigón envejece, su resistencia y rigidez y otras propiedades también cambiarán. Por lo tanto, bajo la misma tensión del concreto y el diferente tiempo de carbonatación, la influencia de la tensión del concreto en la profundidad de la carbonatación será diferente. ⁴⁶

Según la investigación de Jian Wang et, al., Los resultados indicaron que la profundidad de carbonatación se incrementó con un aumento en el nivel de tensión de tracción a la flexión. A medida que aumentaba el tiempo de carbonatación bajo el mismo nivel de tensión de flexión, el coeficiente de influencia de la tensión disminuía, y los resultados calculados del modelo de coeficiente de influencia del estrés considerando el tiempo de carbonatación estuvieron en buena concordancia con los datos experimentales. La influencia máxima de las proporciones de la mezcla de hormigón en el coeficiente de influencia de la tensión fue limitada, que fue aproximadamente dentro de $\pm 10\%$.

El aumento de carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad y permeabilidad del concreto.

⁴⁵ Silva, A., Neves, R., & Brito, J. (2013). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete.

⁴⁶ Jian Wang Han Su Jinsheng Du, (2018). Influencia de los efectos acoplados entre la tensión de tracción por flexión y el tiempo de carbonatación en la profundidad de carbonatación del hormigón.

2.1 TIPOS DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE CARBONATACIÓN

- **Relación agua / cemento**

Este es el parámetro más importante en la resistencia de los concretos, debido a que la resistencia del concreto completamente compactado es inversamente proporcional a su relación agua /cemento. ⁴⁷

Relaciones de A/C por encima de 0.5 pueden proporcionar resistencias bajas y ser susceptibles a ser atacados por agentes externos, como por ejemplo la carbonatación debido a que aumenta su permeabilidad, y relaciones A/C menores de 0.45 contribuyen a resistencias significativas a la compresión y mejor desempeño de la estructura a agentes que se encuentran en el medio ambiente que afectan la durabilidad. ⁴⁸

- **Porosidad**

Es cuándo el concreto cambia de estado manejable y empieza a endurecerse, entonces los ingredientes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras que los ingredientes más livianos flotan arriba. El agua siendo el más liviano sube, lo que causa que está se evapore y se exprime en todas las direcciones. Como el agua ocupa espacios de la mezcla, esta deja muchos vacíos entrecruzados en todas las direcciones, estos espacios huecos se atan entre si creando lo que se llama porosidad. ⁴⁹

- **Humedad Relativa**

Es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua que tiene el aire y el máximo que podría contener a una temperatura y presión determinada. ⁵⁰

- **Grado de exposición**

Es el medio al que está sometida la estructura y está relacionado con la durabilidad de está. Entre los diferentes grados de exposición tenemos ambientes marinos,

⁴⁷ Argos, 2013. 360° EN CONCRETO. Recuperado el 8 de Octubre de 2018, <http://360gradosblog.com/index.php/resistencia-mecanica-del-concreto> y resistencia-a-la-compresión/

⁴⁸ Chávez, Reyes, Pérez, Corvo, & Osorno, 2010.

⁴⁹ Chan Yam José Luis, Carcaño Romel Solís y Moreno Eric Iván. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto, (2003).

⁵⁰ Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales, 2005.

acción de congelación y descongelación del hielo, fuertes vientos, exposición a sustancias químicas entre otros.

Verbeck en 1958 apuntó como posible causa de las diferencias entre las carbonataciones a diferentes concentraciones de CO₂, la influencia indirecta que puede ejercer la concentración de CO en la humedad interior del hormigón. Según Verbeck, altas concentraciones de CO₂ pueden aumentar la humedad interna del hormigón debido a la mayor velocidad de reacción y evolución del agua; a bajas concentraciones de CO₂ la humedad interna no aumenta por encima de la humedad exterior.⁵¹

2.2. ESTRATEGIAS DE REPARACIÓN

Se puede elegir la protección catódica (PC) si el daño por corrosión es severo.⁵ Sin embargo, esta es una opción costosa y requiere la continuidad eléctrica del refuerzo, así como también costos sustanciales para el mantenimiento progresivo. La realcalinización es una técnica bastante nueva que pretende restaurar la alta alcalinidad del recubrimiento de concreto extrayendo electroquímicamente un químico con alto contenido de pH en la estructura. Se trata también de una opción costosa con un historial muy limitado.⁵²

Con frecuencia, la opción más factible es reparar y proteger el concreto. Esta es una técnica de reparación directa que atiende claramente la necesidad inmediata del propietario. Sin embargo, la reparación del daño visible es sólo el primer paso para una reparación duradera del concreto dañado por la corrosión. Las áreas resanadas cubren usualmente sólo alrededor de 15 por ciento de toda el área de la superficie, pero el área total de esta ha sido carbonatada. Si sólo se resana el daño visible, sin preocuparse por las causas subyacentes, no pasará mucho tiempo antes de que ocurra mayor astillamiento. Esto se debe a que el problema de la carbonatación nunca se resolvió de manera efectiva.⁵¹

Recubrimientos anti-carbonatación. Para detener efectivamente el avance del "frente de carbonatación", con frecuencia se emplean recubrimientos anti-carbonatación. Los recubrimientos anti-carbonatación están específicamente diseñados para detener el ingreso del dióxido de carbono.⁵¹

⁵¹ Calvo & Sierra, 2015

⁵² Broomfield, J.P., "Cathodic Protection of Reinforced Concrete", Society for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Report núm. 001.95, 1995.

2.3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR EL PROCESO DE CARBONATACIÓN

En general, se acepta que a concentraciones por debajo del 3-4 % de CO₂ el proceso es similar al que ocurre al carbonatar en el aire o en ambientes naturales. Existen algunos estudios que describen la correspondencia en las profundidades de carbonatación en ensayos naturales y acelerados con bajas concentraciones de CO₂. Ho et al. En 1987 comprobaron que la profundidad de carbonatación de probetas carbonatadas al 4% durante una semana era similar a la de probetas carbonatadas en ambiente de laboratorio a lo largo de un año. En 2003 Sanjuán et al. Concluyeron que realizar ensayos de 7-15 días de carbonatación al 4-5 % de CO₂ es un procedimiento adecuado para calcular velocidades de carbonatación, ya que se obtiene aproximadamente la misma profundidad que al cabo de un año al natural.⁵³

El modelo matemático de Rodríguez, Aperador y Vera autores colombianos y chileno el último, se basaron en los fundamentos de Tutti para predecir la vida de servicio de los refuerzos de acero. Tutti consideraba en su modelo la combinación de la carbonatación y los iones de cloruro, diciendo que el fenómeno se dividía en dos periodos: el primero es una iniciación que finaliza con el inicio de la corrosión y el segundo por un periodo de propagación activa. La difusión del dióxido de carbono en el concreto es un proceso en estado estable, en donde la profundidad de carbonatación x puede ser descrita mediante la siguiente ecuación:

$$x = A \sqrt{t}$$

Dónde:

- t : Tiempo medido en años.
- A : Coeficiente de Carbonatación.

Teniendo este principio se desarrolló un software para estimar el coeficiente de carbonatación mediante dos modelos matemáticos para si luego llegar al frente de carbonatación en un determinado tiempo.

⁵³ Galán, I. (2011). Carbonatación del Hormigón: Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

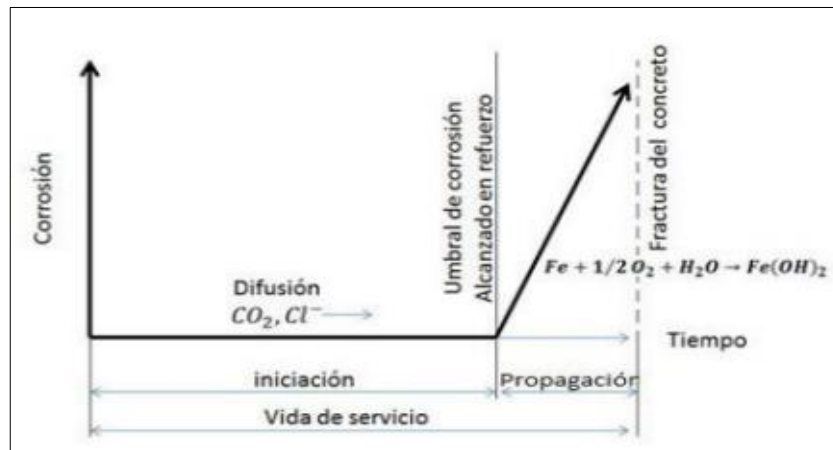


Figura 11. Modelo del esquema de carbonatación, tomado de Rafael Calvo y Mario Sierra, (2015).

En esta imagen se muestra el modelo de la corrosión de refuerzo en los concretos reforzados.

El primer modelo matemático se basó en concentraciones cementantes (Puzolanas) y condiciones ambientales. Este tiene principios fundamentales que dicen: que la tasa de carbonatación depende de la humedad relativa del concreto, que están entre 50% y 75%, la velocidad de carbonatación depende de la concentración de CO_2 que está en 0.03% en zonas rurales y 0.4 % en zonas urbanas, la carbonatación crece al aumentar la relación agua cemento debido a la porosidad, pero también se ha encontrado que disminuir mucho el contenido de cemento amplifica a la carbonatación debido a que baja la reserva alcalina y contempla que los materiales puzolánicos pueden tener o no propiedades cementantes por si mismos los cuales deben ser molidos e hidratados para adquirir esta propiedad y reaccionar químicamente con los hidróxidos de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades aglutinantes. Como resultado de la reacción puzolánica el concreto adquiere mayor resistencia mecánica y menor permeabilidad, pero menor cantidad de hidróxido de calcio, aun así esta es suficiente para mantener alto pH.⁵⁴

El segundo modelo matemático se basa en los procesos fisicoquímicos en la carbonatación del concreto. Sigue exactamente el modelo matemático planteado

⁵⁴ Galán, I. (2011). Carbonatación del Hormigón: Combinación de CO_2 con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

por Papadakis que presento y modelo los procesos en la carbonatación del concreto; estos procesos incluyen la difusión de CO₂ en su fase gaseosa en los poros del concreto.

En este modelo se da concordancia en la dependencia de la profundidad de carbonatación con el tiempo, con la relación agua cemento, con la concentración atmosférica de CO₂, temperatura ambiente y humedad relativa.

La carbonatación mineral produce sílice y carbonatos que se mantienen estables durante largos períodos de tiempo y que, por tanto, pueden eliminarse en zonas como las minas de silicato o pueden reutilizarse con fines de construcción, si bien es probable que esa reutilización sea mínima en relación con las cantidades producidas. Tras la carbonatación, el CO₂ no sería liberado en la atmósfera. Como consecuencia, apenas sería necesario vigilar los lugares de eliminación y los riesgos conexos serían casi insignificantes.⁵⁵

2.4. MEDIDAS PARA MINIMIZAR EL IMPACTO NEGATIVO DEBIDO A LA CARBONATACIÓN

Existen métodos desde los más sencillos hasta los más complejos como el diseño de recubrimientos específicos, pinturas de protección, métodos adecuados de compactación de concretos entre otros, pero la implementación de estas técnicas o métodos de prevención dependen de la economía del proyecto o de la circunstancia en que se exponga la estructura. La conservación de las estructuras de concretos empieza desde la planificación, escogiendo las mejores técnicas, luego la construcción que se basa en utilizar las herramientas adecuadas y por último la preservación que trata de hacer los mantenimientos adecuados para que no decaiga la estructura y se deteriore a través del tiempo. Un método de protección contra la carbonatación son las pinturas "VINIL-ACRILICAS", investigadores de la Universidad Autónoma de Yucatán de México se enfocaron en estudiar el desempeño de los recubrimientos del concreto como una alternativa para evitar la carbonatación de los elementos de este material y, por lo tanto la corrosión del refuerzo. Varios tipos de pinturas Vinil-Acrílicas y uno de Acrílica fueron aplicadas en probetas de concreto para monitorear el avance de la carbonatación. Las probetas de concreto fueron cilíndricas y se colaron usando tres relaciones agua/cemento. Después de pintados los cilindros fueron carbonatados en una

⁵⁵ Ramos canals Susan, Almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂) en rocas ofiolíticas de composición máficas (gabro y basalto) bajo condiciones controladas - Lima, 2018.

cámara de carbonatación a un 4% de CO₂ y 60% de humedad relativa. Los resultados mostraron que las pinturas Vinil-Acrílicas y Acrílicas de Buena calidad redujeron satisfactoriamente la velocidad de carbonatación de los especímenes de concreto.⁵⁶



Figura 12. Probeta de ensayo con recubrimiento de buena calidad, $w/c=0.8$ y después de 23 días de exposición acelerada. El color morado indica el área libre de carbonatación.
Tomado de Moreno, Solís-Carcaño, & Arias-Palma, 2008.

Las resistencias a la compresión medias medidas en los concretos a la edad de 4 años fueron: 462 kg/cm² (45,3 MPa), 400 kg/cm² (39,2 MPa), 365 kg/cm² (35,8 MPa) y 252 kg/cm² (24,7 MPa), para las A/C de 0,40, 0,50, 0,60 y 0,70 respectivamente.⁵¹

⁵⁶ Moreno, E., Solís-Carcaño, R., & Arias Palma, C. (2008). Desempeño de las pinturas Vinil Acrílicas contra la carbonatación del concreto.

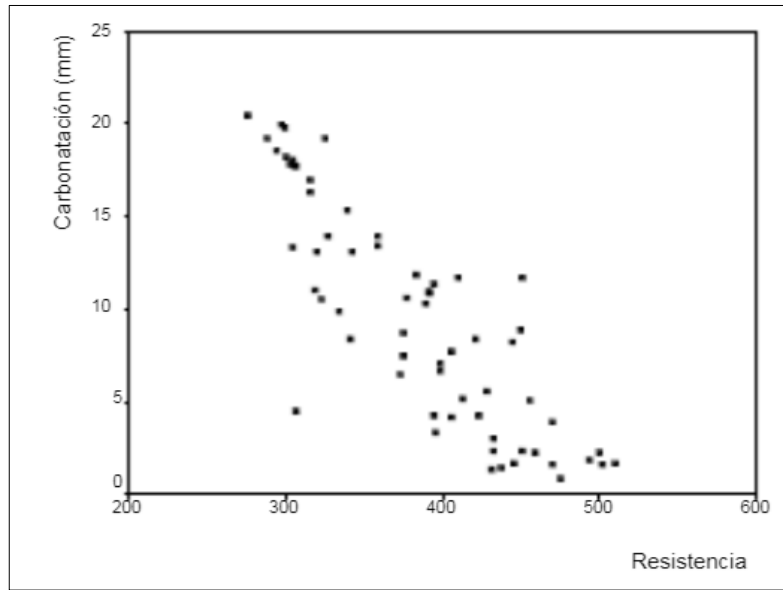


Figura 13. En esta imagen se muestra la dispersión entre la resistencia a la compresión y la profundidad de carbonatación, obtenido de (Solís-Carcaño, 2018).

En la imagen anterior se puede observar que, a mayor profundidad de carbonatación, su resistencia a la compresión disminuye notablemente.

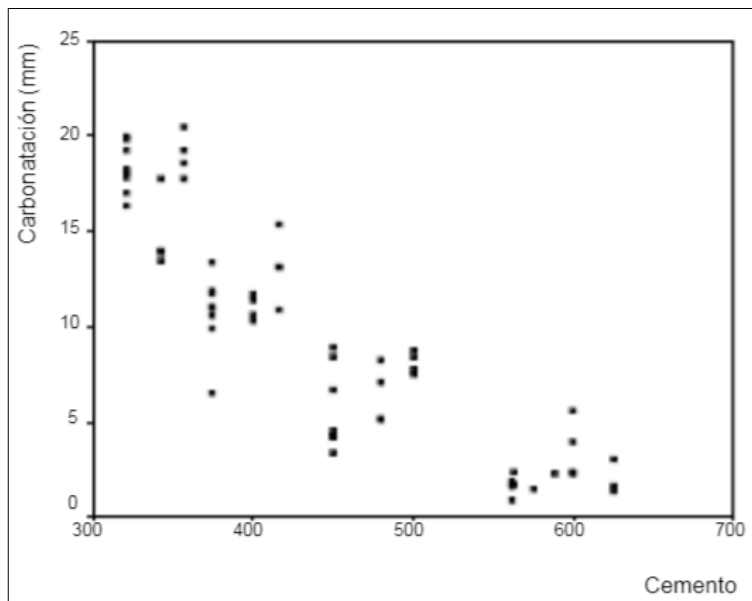


Figura 14. En esta imagen se muestra la dispersión entre la cantidad de cemento por m3 y la profundidad de carbonatación, obtenido de (Solís-Carcaño, 2018).

En el anterior gráfico también es posible visualizar que a mayor cantidad de cemento la profundidad de carbonatación es menor, lo cual nos evidencia menor impacto de agentes externos en nuestro concreto.

La relación agua – cemento mostró ser un factor determinante en la profundidad de carbonatación. Se encontraron correlaciones significativas entre la profundidad de la carbonatación y las variables: A/C, cantidad de cemento en la mezcla y resistencia a la compresión del concreto; siendo la mayor correlación la de la relación agua/cemento.⁵⁷

Cuando el frente de carbonatación alcanza las profundidades donde residen los refuerzos de acero del concreto, sigue siendo la principal preocupación de las investigaciones sobre la carbonatación del concreto, ya que está estrechamente relacionada con el inicio de la corrosión.⁵⁸

En el artículo “ Modelando los efectos del daño por fatiga en la carbonatación del concreto” de los autores Jiang Chao et al., presenta el modelo teórico del efecto del daño por fatiga sobre la carbonatación del hormigón. Se propuso un coeficiente de difusión de dióxido de carbono efectivo basado en la tensión residual en el concreto dañado por fatiga.

Los modelos de carbonatación propuestos pueden predecir las profundidades de la carbonatación en el concreto dañado por fatiga. Además, en los estados de servicio, el hormigón en las estructuras de puentes no solo sufre tensiones cíclicas inducidas por trenes o vehículos repetidos, sino que también soporta cargas muertas continuamente. Las cargas muertas sostenidas causarán microcracks, que es una indicación de falla material que puede conducir finalmente a una falla completa. Apertura y cierre, que también afectarán la difusión del dióxido de carbono. Las grietas inducidas por la fatiga pueden exponer algunos minerales no hidratados al agua, lo que provoca una hidratación posterior, que curará aún más las grietas.

Según la investigación realizada por Emeline Drouet et, al. El impacto de la temperatura en la carbonatación. Se analizaron dos pastas de cemento endurecido (CEM I y CEM V / A) entre 20 ° C y 80 ° C a diferentes niveles de humedad relativa (HR). La tasa de carbonatación del CEM I aumentó con la temperatura, mientras que la del CEM V / A alcanzó un máximo de alrededor de 50 ° C.

⁵⁷ Moreno, E., Solís-Carcaño, R., & Arias Palma, C. (2008). Desempeño de las pinturas Vinil Acrílicas contra la carbonatación del concreto.

⁵⁸ Jian Wang Han Su Jinsheng Du, (2018). Influencia de los efectos acoplados entre la tensión de tracción por flexión y el tiempo de carbonatación en la profundidad de carbonatación del hormigón.

3. APLICACIÓN DE LAS DUNITAS COMO AGREGADO PETREO

Los agregados son una mezcla de granulometría variable, el cuál comprende la mayor proporción del volumen de la mezcla cementicia. Estos son productos minerales generalmente de bajo costo y abundantes en la naturaleza.⁵⁹

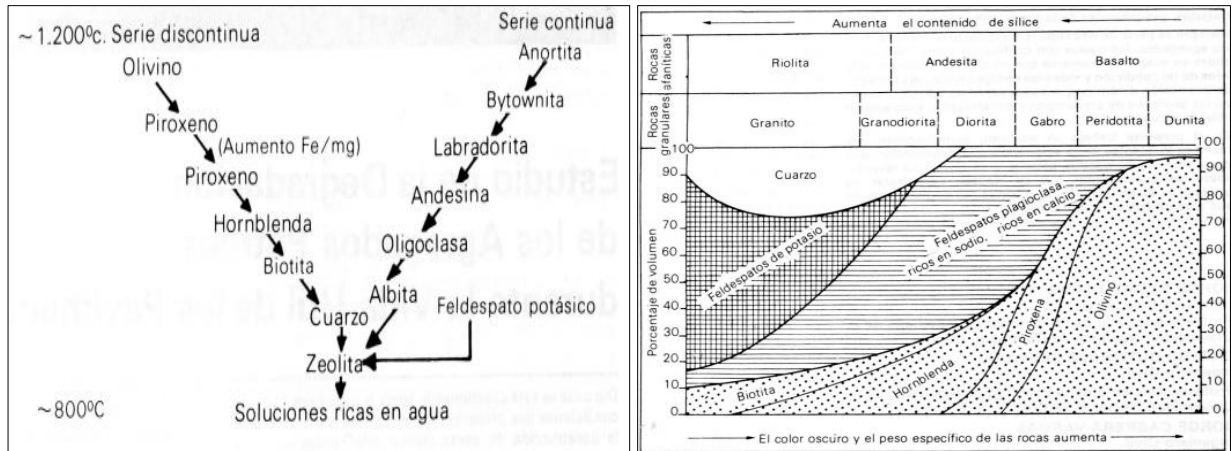


Figura 15. Serie de reacción de Bowen, descrito por Norman Bowen en 1915 y 1922, este gráfico nos proporciona una representación visual del orden en que los minerales cristalizan a partir de un magma, suponiendo que este magma se enfría muy lentamente en profundidad y en ambiente inalterable.

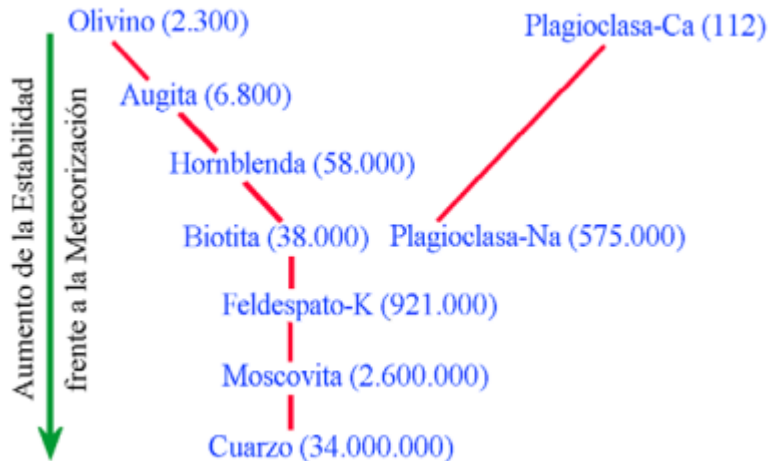


Figura 16. Serie de meteorización de Goldlich. Junto a cada mineral se indica, entre paréntesis, el tiempo medio de meteorización de cada uno de ellos para unas condiciones climáticas templadas y húmedas, tomado de Petrología de Víctor Barrientos.

⁵⁹ Instituto geológico y minero de España, Monografías de rocas industriales Dunita y Olivino.

Ciertos minerales están asociados porque cristalizan a temperaturas similares. Cuando se produce la cristalización en un magma, los cristales formados tienden a mantener un equilibrio con el fundido restante. Esta circunstancia se puede dar cuando la temperatura desciende muy lentamente y no existen procesos de segregación. Si el equilibrio se restablece mediante soluciones sólidas continuas, se produce una serie continua de cristalización, si es mediante transformaciones minerales abruptas, se produce una serie discontinua de cristalización. Bowen fue el primero que estableció estas series de cristalización para minerales característicos.⁶⁰

En la escala de cristalización propuesta por Bowen y el diagrama sobre los principales minerales de las rocas ígneas, se puede deducir que la resistencia a la degradación de los agregados pétreos se ve favorecida si se expone a una menor temperatura de cristalización y el mayor contenido de sílice.⁶¹

Petrográficamente las dunitas al ser de tipo equigranular con cristales muy finos, ofrece pocas variaciones en su composición y permanece ausente de carbonatos y sílice, con lo cual se puede dar una perspectiva interesante sobre su inclusión en agregados para la producción del concreto.

Son diversos los factores que causan el cambio de las propiedades de las rocas, de los cuáles se enuncian: la continuidad de la masa rocosa, las disconformidades, pliegues y diaclasas.

Para uso en agregados se encuentran: homogeneidad, características del afloramiento, espesor de la cobertura y presencia de agua. Algunos con mayor incidencia que otros, pero todos afectan la resistencia en las rocas.⁶²

De acuerdo a información obtenida en la tesis de maestría de MARIA ISABEL RAMÍREZ ROJAS en valle de Aburrá, el cuál es una zona en donde anteriormente se mencionaba la mayor cantidad de existencia de rocas dunitas, se da a conocer la cantidad de materiales de construcción en dicho lugar, entre los que encontramos como reservas disponibles:

Tabla 4. Reservas aproximadas de materiales de construcción en valle de aburra. (Ramírez María Isabel, 2018).

Material	Reservas aproximadas en m³
Arena	17.186.360
Gravas y arenas	11.620.112
Arcillas	3.255.896

⁶⁰ Instituto geológico y minero de España, Monografías de rocas industriales Dunita y Olivino.

⁶¹ Tamayo Jorge, Gutiérrez Carlos y Cabrera Jorge, (2000). Estudio de la degradación de los agregados pétreos durante la vida útil de los pavimentos.

⁶² Tamayo Jorge, Gutiérrez Carlos y Cabrera Jorge, (2000). Estudio de la degradación de los agregados pétreos durante la vida útil de los pavimentos.

Triturados y arenas	36.411.584
Material de arrastre	80791

Las reservas para los materiales de arrastre deben reevaluarse ya que el material de arrastre se refiere al material aluvial de las quebradas afluentes al río Medellín, que se va depositando al presentarse eventos de crecientes.

En el municipio de caldas en gabro de romeral Comprenden rocas ultramáficas de dunitas y serpentinitas, asociadas a rocas básicas, localmente bandeadas, se localizan entre la falla romeral y la cascajosa, estos cuerpos rocosos presentan una alta serpentización de los ferromagnesianos, originando un color negro verdoso con lustre oscuro. (AMVA, 1999).⁶³

Esta unidad se encuentra en las vertientes occidentales de la cuenca del río Medellín en este municipio, se observa en las quebradas La Culebra, La Llorona, San Miguel, La Raya y La Bermejala.

Son rocas macizas con texturas de flujo primarias constituidos por plagioclasa, diálaga, diopsido, hornblenda primaria y secundaria y actinolita. Los mejores afloramientos se ubican en las quebradas La Bermejala, La Culebra, La Grande y en la Cantera Maracay, se utilizan como agregados pétreos.⁶⁴

A continuación, se observa de color verde los municipios de valle de Aburrá y de naranja los municipios que importan algún tipo de material de construcción.

⁶³ Área metropolitana del valle de aburra, 1999.

⁶⁴ Ramírez María Isabel, (2008). Sostenibilidad de la explotación de minerales de construcción en el valle de aburra.

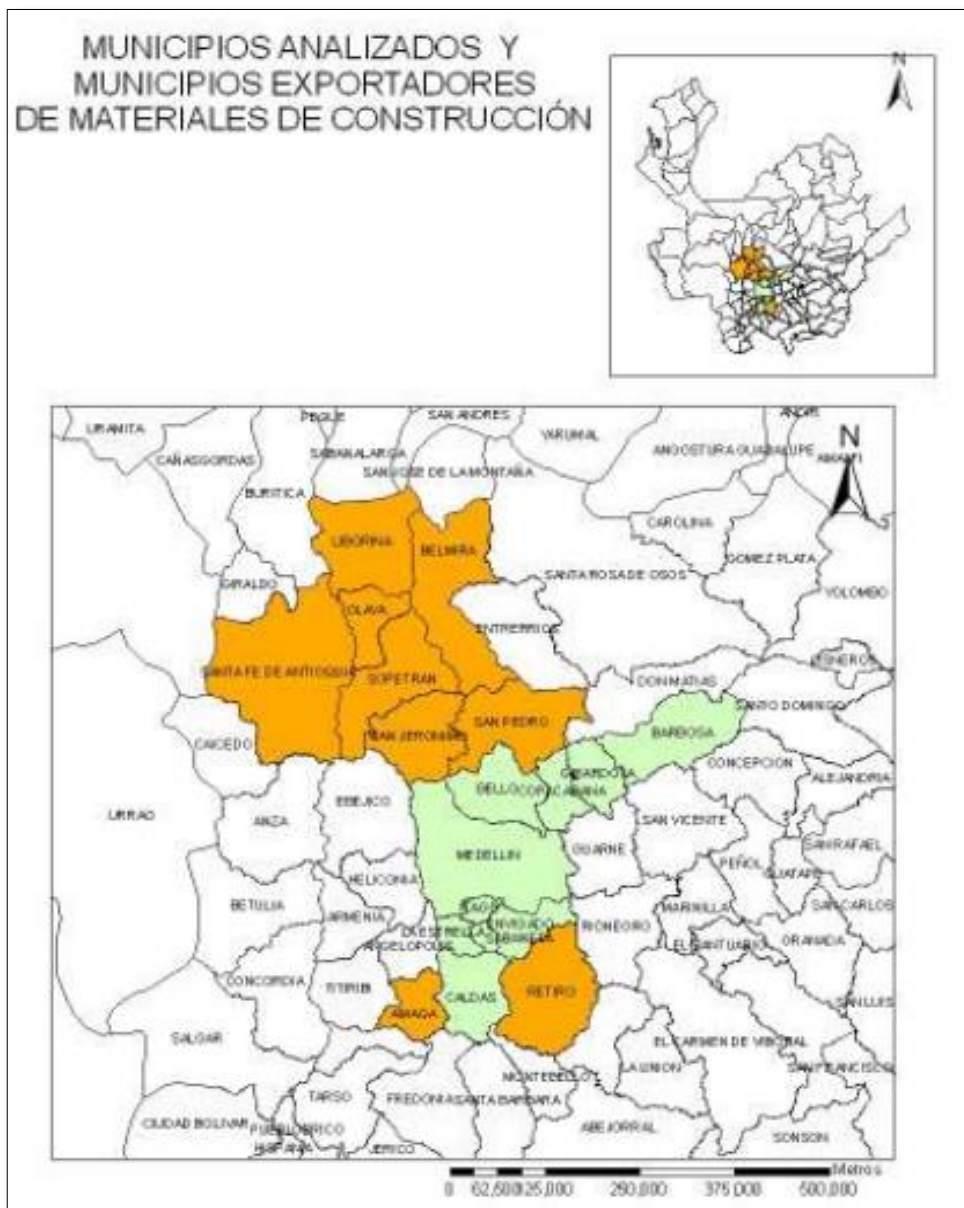


Figura 17. Municipios del departamento de Antioquia, importadores de materiales de construcción. (Santa Fe de Antioquia, Olaya, Sopetran, Liborina, Belmira, San Jerónimo, San Pedro, Bello, Medellín, Caldas, Itagüí, Sabaneta, Envigado, Retiro, Amagá), Tomado de Ramírez Isabel, 2018.

PROPIEDADES DE LAS DUNITAS

Las dunitas tienen como propiedades en el sector industrial las siguientes:

Tabla 5. Características de las dunitas tomadas del instituto geológico y minero de España.

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LAS ROCAS DUNITAS
• Aporta magnesio al lecho de fusión, dando escoria fácilmente eliminable.
• No es susceptible al choque térmico, lo que impide la aparición de finos.
• No sufre hinchamiento ni contracción.
• Posee dureza de 6,5 a 7.
• Tiene intervalo muy corto de fusión plástica, ofreciendo mayor continuidad en la permeabilidad de las cargas.
• Alta resistencia mecánica, igual o mayor que los minerales de hierro.
• Exenta de carbonatos.
• Aumenta el volumen útil de horno, la cual genera mayor productividad.
• Escasez o ausencia de feldespato.
• Cristaliza en el sistema rómbico.
• Color variado, en función de su composición, desde amarillo claro hasta verde oscuro, pasando por el verde olivo, lo que define su nombre.
• Brillo vítreo.
• Predominio mineralógico del olivino.

PARAMETROS DE EXIGENCIAS INDUSTRIALES

Tabla 6. Composición química de las dunitas tomadas del instituto geológico y minero de España.

Exigencias	Dunitas Serpentizadas
Contenido de Al ₂ O ₃ menor de 2.3%	0.26
Contenido de Fe ₂ O ₃ menor de 6%	8.82
Contenido de CaO menor de 1.5%	0.22
Relación MgO / SiO ₂ entre 0.94 y 1.33%	1.23

Entre los principales usos de las Dunita a nivel mundial se destacan los siguientes: Como fundente en los Altos Hornos, arena de fundición, industria de elaboración de acero, material de construcción, sand blasting. El sand blasting es un método utilizado para realizar tareas de limpieza y preparación de superficies en diferentes tipos de industrias como ser la construcción, metalmecánica, fundiciones, petróleo, minería, agricultura, etc. Para tratar tantos metales, cerámicas, concretos entre otros.⁶⁵

⁶⁵ Reynaldo La Rosa Vázquez, (2011). Utilización De Las Dunitas Asociadas A La Mineralización Cromifera De La Región De Camagüey Para La Elaboración De Ladrillos Refractarios.

3.1. INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS PETREOS EN LAS CARACTERISTICAS DEL CONCRETO

El concreto es un material compuesto, en el cual existe una gran variabilidad en las características de sus componentes, especialmente en los agregados pétreos. Siendo éstas de carácter físico y químico, producen diferentes efectos, tanto en la trabajabilidad del concreto como en su comportamiento en estado endurecido, el cual regirá su vida de servicio.⁶⁶

Los agregados son materiales granulares sólidos inertes de granulometría variable actuando como un conjunto de partículas inorgánicas de origen natural o artificial cuyas proporciones están comprendidas al formar parte del 65% al 75% del volumen de la mezcla cementicia.

La trabajabilidad del concreto es afectada por diversas características de los agregados, tales como: la absorción, la forma de las partículas, la textura superficial, el tamaño y la granulometría.⁶⁰

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas.⁶⁷

Los agregados se pueden calificar por su forma, en base a su grado de redondez y esfericidad, obteniéndose una medida relativa de carácter comparativo y descriptivo. La manera como esta característica puede influir en el concreto fresco es variable, logrando producir, por ejemplo, a mayor grado de redondeamiento menor relación de vacíos; pero por otra parte un menor valor de este parámetro reduce la capacidad de compactación.⁶¹

Por otro lado, la granulometría y el tamaño máximo del agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto. Cuando

⁶⁶ Chan Yam José Luis, Carcaño Romel Solís y Moreno Eric Iván. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto, (2003).

⁶⁷ Alaejos y Fernández 1996

los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco.⁶⁸

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad (≥ 2.25) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión de este. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla.

La presencia de un porcentaje importante de materia orgánica en los agregados puede provocar problemas en la fabricación de concreto, ya que trae consigo efectos como inhibir la adecuada hidratación del cemento y por lo tanto causar un retraso en el endurecimiento de este. Los agregados contaminados pueden ser causa de reducción de la resistencia a la compresión del concreto; y además, pueden contener sustancias nocivas que afecten químicamente al material de diversas formas.⁶²

Ante la aplicación de cargas en el concreto, el microagrietamiento se inicia generalmente en la zona de interfase (ITZ) entre el agregado grueso y el mortero que lo rodea; y posteriormente en el momento de la falla ante el incremento de las cargas, el patrón de grietas siempre incluye a la interfase; lo anterior subraya la importancia de esta zona del concreto. Por ello es necesario darle la debida importancia a las propiedades y el comportamiento de la zona de interfase.⁶⁹

La forma de las partículas del agregado grueso y sus características superficiales pueden influir también en el valor del módulo de elasticidad del concreto y en la curvatura de la gráfica que representa la relación esfuerzo-deformación. Algunas investigaciones han concluido que también el tamaño máximo del agregado incide en el módulo de elasticidad del concreto, incrementándose éste con los tamaños grandes de los materiales pétreos.⁷⁰

La diferencia entre los módulos de elasticidad del agregado y de la pasta de cemento endurecido influye en la tensión en la interfase de los dos materiales; una mejor conducta monolítica del concreto se logra cuando la diferencia entre los módulos de elasticidad es baja. Bajo este contexto, es importante considerar la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento endurecida que lo rodea,

⁶⁸ Kosmatka y Panarese, 1992, Diseño y control de mezclas en concreto.

⁶⁹ Neville A.M. 1999, "Tecnología del concreto", 1ª edición, Instituto mexicano del cemento y del concreto.

⁷⁰ Cetín y Carrasquillo, 1998, influencia de los agregados pétreos en las características del concreto.

reconociendo a la interfase como un elemento de gran importancia en el modelo estructural del concreto.⁷¹

Hay que hacer notar que, comparados con las rocas ígneas, los agregados producidos con sedimentos estratificados pueden variar ampliamente en sus características. Esto es debido a que las condiciones bajo las cuales fueron consolidadas son distintas según el área y estrato en que son extraídas. Las rocas tienden a ser porosas y débiles cuando se forman bajo presiones relativamente bajas; y son densas y resistentes si se forman bajo presiones altas.⁶⁵

Agregados que por sus características permitan la utilización de la menor cantidad de pasta de cemento producirán un concreto con mayor estabilidad volumétrica.⁶⁵

⁷¹ Chan Yam José Luis, Carcaño Romel Solís y Moreno Eric Iván. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto, (2003).

4. CONFLICTOS AMBIENTALES POR MINERÍA EN EL VALLE DE ABURRA

El conflicto ambiental “Es un tipo particular de conflicto social donde la temática en disputa se refiere a aspectos ambientales. Los temas convocantes usualmente tienen que ver con la calidad de vida de las personas o el medio ambiente.”⁷²

Los principales problemas ambientales que se generan en valle de aburra son los siguientes:

- Vertimiento de aguas residuales de la actividad minera sin tratamiento previo.
- Depositación y/o recepción de escombros en los antiguos frentes de explotación.
- Frentes abandonados expuestos a procesos erosivos que generan inestabilidad.
- Contaminación atmosférica (polvo) por tráfico de maquinaria pesada (Volquetas) y frentes antiguos sin mitigación.
- Generación excesiva de sedimentos que contaminan las aguas e impiden su captación a los vecinos que la usan aguas abajo.
- Captación excesiva de agua por parte de los dueños de canteras que impiden que el recurso llegue a los demás usuarios
- Afectación de paisajismo y del bosque nativo.
- Deterioro de las vías por el tráfico de maquinaria pesada.
- Desbordamiento de quebradas por la gran cantidad de material arrastrado.
- Daño de vías por el tráfico de maquinaria pesada, además el transporte del material no se realiza bajo las normas mínimas, tales como tapar el contenido de la parte posterior de las volquetas y retirar el exceso de pantano de las llantas.

Para el Valle de Aburrá, se tiene que el conflicto generado por minería aumenta, y por lo tanto para no dejarlo avanzar a otras fases de difícil concertación debe intervenir, tanto en la vigilancia y control de estas actividades, como en la

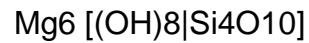
⁷² Ramírez María Isabel, (2008). Sostenibilidad de la explotación de minerales de construcción en el valle de aburra.

socialización de los beneficios que llegan a tener las empresas mineras, a pesar de que en muchos casos no se interesan por las labores sociales de aceptación que deben llevar a cabo.

María Isabel Ramírez recomienda estandarizar el proceso de recepción de quejas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, por medio de la implementación de un formato que permita analizar mejor los problemas que conducen a múltiples quejas, ya que se observó que la mayoría de las quejas llegan a modo de cartas o comunicados realizados por la comunidad, y son archivados en los expedientes.

GLOSARIO

- **SERPENTINA:** La serpentina es un silicato, se forma por metamorfismo a partir de magmáticas básicas, por ejemplo, peridotita que se transforman en pizarras cristalinas. Presenta sistema cristalino Monoclínico y presenta una dureza de 2,5 a 5 en la escala de Mohs. Presenta la siguiente fórmula química:



Fuente: Tomado de <https://www.cristalljoia.com/PROPIEDADES-DE-LOS-MINERALES-1/SERPENTINA>

- **PERIDOTITA:** La peridotita es una roca ígnea intrusiva ultra básica, es decir que contienen menor al 45% de sílice (SiO_2), tienen alto contenido en magnesio (MgO) mayor al 18%, por lo que son de color verdoso oscuro. Además, tienen alto porcentaje de olivino en su composición (mayor al 40%).

Las peridotitas mayormente contienen un grupo de minerales de roca llamado olivino (Mg_2SiO_4), básicamente forsterita y algunas veces fayalita.

En su composición química, estas rocas igualmente poseen una elevada presencia de magnesio (superior al 18 %), que le otorga su color verdoso. En cambio, su contenido de sodio (Na_2O) y potasio (K_2O) es muy pobre. Otros minerales presentes en las peridotitas, pero de forma accesoria son la espinela, el granate y la cromita.

Fuente: tomado de https://www.lifeder.com/peridotita/#Composicion_quimica

- **METEORIZACIÓN:** La meteorización es la descomposición de las rocas que se encuentran en la superficie de la Tierra, por medio de la acción del agua de lluvia, viento, nieve y por los cambios extremos de temperatura y la actividad biológica.

La meteorización puede ser de tres formas diferentes: la física, química y la biológica.

Física: consiste en la degradación que se da en las rocas en fragmentos de menor tamaño, pero este cambio no afecta su naturaleza. Por lo general se producen como resultado de cambios bruscos de temperatura.

Química: en este caso se dan alteraciones en la composición química de las rocas, transformándolas en sustancias completamente diferentes. El principal responsable de este tipo de meteorización es el agua.

Biológica: Se produce meramente por la acción que ejercen los seres humanos en las rocas de la tierra. Algunos animales y seres vivos también juegan un papel importante, entonces, por ejemplo, los animales que escarban los suelos pueden llegar a desmenuzar las rocas para formar cuevas, y las raíces de las plantas y árboles al crecer, fracturan las rocas, cambiando su forma.

Fuente: tomado de <https://www.euston96.com/meteorizacion/#Tipos>

- **MATERIAL REFRACTARIO:** Es el material capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas, durante un período económicamente rentable. Las condiciones del medio no incluyen únicamente el efecto de la temperatura, sino también la resistencia al ataque por fundidos, al choque térmico, y en general, todas aquellas sollicitaciones a la que vaya a estar sometido el material en servicio.

Fuente: tomado de <https://www.ecured.cu/Refractario>

- **ZONA DE SUBDUCCIÓN:** Se refiere a aquellas zonas donde las placas chocan entre sí, en esta zona estas placas se consumen entre sí. Se localizan en las fosas oceánicas, de los márgenes continentales activos. La subducción es un mecanismo consistente en la introducción de la placa bajo otra a favor de un plano de fallo, que recibe el nombre de plano de Benioff.

Fuente: tomado de <http://cienciageografica.carpetapedagogica.com/2012/10/zonas-de-subduccion.html>

- **METASÓMATISMO:** Cambio metamórfico que lleva consigo la introducción de material procedente de una fuente externa. El que exista o no la expulsión de material correspondiente del sistema dependerá de las condiciones. Bajo ciertas circunstancias el metasómatismo puede ser el resultado de la sustitución completa de un mineral por otro sin perder la textura original. Si los fluidos metasomáticos son suficientemente energéticos, la recristalización puede acompañar al metasomatismo.

Fuente: tomado de [Metasomatismo \(Geología\) © https://glosarios.servidor-alicante.com](https://glosarios.servidor-alicante.com)

- **TEXTURA HOLOCRISTALINA:** Cuando más del 90% en volumen de la roca está compuesta por cristales. El enfriamiento lento de las rocas plutónicas hace que normalmente el porcentaje de cristales en ellas sea del 100%.

Fuente: tomado de <https://petroigne.wordpress.com/esta-es-la-segunda-pagina/texturas-en-rocas-plutonicas/texturas-que-definen-el-tipo-de-roca-igneas/textura-holocristalina/>

- **PLAGIOCLASA:** Las plagioclasas es un silicato, son un subgrupo de feldespatos que constituyen una disolución sólida, una serie isomórfica, entre la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), los dos minerales principales. La albita también forma la serie isomórfica de los feldespatos alcalinos, con los feldespatos potásicos (KAlSi_3O_8). Presenta sistema cristalino Triclínico y tiene una densidad de 2.25 a 2.63 g/cm^3 .

Fuente: tomado de https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-26865-DETALLE_REPORTAJESABUELO

- **ESPINELA (MINERAL):** La espinela es un mineral de fórmula química MgAl_2O_4 . Pertenece al grupo de los óxidos, cristaliza en sistema cúbico, tiene una dureza de 8 en la Escala de Mohs, fractura irregular, brillo vítreo y raya blanca. La espinela constituye una familia de gemas de colores muy diversos debidos a la presencia de impurezas en sus cristales. La más popular de todas ellas, la espinela roja, era muy apreciada en la Edad Media.

Fuente: tomado de <https://www.asturnatura.com/mineral/espinela/877.html>

- **OROGÉNESIS:** Es la formación o rejuvenecimiento de montañas y cordilleras causada por la deformación compresiva de regiones más o menos extensas de litosfera continental. Se produce un engrosamiento cortical y los materiales sufren diversas deformaciones tectónicas de carácter compresivo, incluido plegamiento, fallamiento y también el corrimiento de mantos.

Fuente: tomado de *Conjunto de enciclopedias EcuRed.*

- **ROCAS MAGMÁTICAS:** Las rocas magmáticas, también conocidas como rocas ígneas, se originan a partir del magma que se encuentra en el interior de la tierra. La formación de estas rocas puede ser debida a la disminución de la temperatura del magma o de la presión a la que se encuentra.

Fuente: tomado de <http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/2ESO/tierrin/contenidos13.htm>

- **ROCAS PLÚTONICAS:** Se forman en el interior de grandes cámaras magmáticas, dando lugar a enormes masas rocosas llamadas plutones, el enfriamiento del magma es lento y los cristales que se forman son grandes;

por ello, se denominan microcristales. Estos cristales confieren a la roca un aspecto granuloso, como es el caso del granito o la sienita.

Fuente: tomado de <http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/2ESO/tierrin/contenidos13.htm>

- **DUCTILIDAD:** es una superficie que posee la capacidad de modificar su estructura al ejercerle una fuerza potente sobre ella, permitiendo así la formación de un ducto (agujero) o cambiar de forma sin quebrantarse ni romperse, un ejemplo de estos materiales es el asfalto, objetos metálicos, entre otros.

Fuente: tomado de <https://conceptodefinicion.de/ductilidad/>

- **TEXTURA NEMATOBLÁSTICA:** La roca metamórfica es caracterizada por la presencia de cristales columnares prismáticos, por ej. por anfíboles prismáticos en un esquisto de antigorita o por sillimanitas prismáticas en un gneis.

Fuente: tomado de <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap06b.htm>

- **PLEOCROISMO:** Es la facultad que presentan algunos minerales de absorber las radiaciones luminosas de distinta manera en función de la dirección de vibración.

Por esta propiedad, un mismo cristal puede aparecer con coloraciones diferentes dependiendo de la orientación en que haya caído en la preparación microscópica.

Fuente: tomado de <http://edafologia.ugr.es/optmine/ppl/pleo.htm>

- **FANERÍTICA:** Es la estructura de grano grueso que muestran las rocas ígneas que se forman cuando grandes masas de magma se solidifican lentamente bastante por debajo de la superficie. Estas rocas consisten en una masa de cristales intercrecidos que son aproximadamente del mismo tamaño y lo suficientemente grandes. Como se forman en el interior de la corteza terrestre, su exposición en el interior de la corteza de la Tierra sólo ocurre después de que la erosión elimina el recubrimiento de rocas.

Fuente: tomado de <https://post.geoxnet.com/textura-faneritica-feldespatos-plagioclasa-cuarzo/>

5. DISCUSIÓN

Después de realizado este estado del arte se puede deducir que, si es viable incluir las dunitas como agregado pétreo para el concreto por las propiedades que dicho material presenta como su alta dureza lo cual puede favorecer la resistencia del concreto, preferiblemente se recomienda su uso para concretos simples en pavimentos de vías, no se recomienda en concretos reforzados por qué puede verse comprometida la resistencia de este al presentar problemas de corrosión debido al acero.

En cuanto a la carbonatación se encontraron medidas para minimizar el impacto negativo debido a la carbonatación, lo cual se puede implementar a la hora de realizar su proceso de producción y así evitar problemas futuros.

También se logró identificar varios depósitos de rocas dunitas a nivel mundial y en Colombia, para su extracción y producción de dicho material, el cual a su vez ayuda a incentivar e implementar el uso de materiales ecológicos en la ingeniería.

Hay una ventaja del uso de las dunitas como agregado en el concreto y es su composición química, teniendo en cuenta que son básicamente olivinos que tienen altos contenidos de magnesio. Según la literatura el magnesio ayuda a secuestrar el CO₂, generado por procesos de difusión carbonatos de magnesio hidratados que permiten disolver el CO₂, en los poros del concreto seguido por una reacción química que genera los carbonatos en mención.⁷³

⁷³ Dung, N.T., Cement and Concrete Research (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.011>.

CONCLUSIONES

- Se identificaron yacimientos de dunitas en el departamento de Antioquia, allí es donde se evidencia la mayor extensión de depósitos de rocas dunitas en Colombia.
- Se puede concluir que si es viable utilizar rocas dunitas como agregado pétreo en el concreto simple. No es viable en concretos reforzados, debido a que su interacción con el acero puede causar daños, por la generación de carbonatos al poseer contenidos de magnesio que al interactuar con el CO₂ y el agua generan carbonatos de magnesio hidratados causantes de los problemas de corrosión en las estructuras metálicas.
- Se identifico que las rocas dunitas serpentinizadas se caracterizan por poseer la siguiente composición promedio: Olivino, 95-97 %; Piroxeno 3-5 %; Espinelas clomíferos 0,5-1,0.
- El uso de dunitas es sugerido para el concreto debido a su densidad que oscila entre 2,7–3,5 g/cm³, debido a que si se emplea un material con una buena densidad es decir mayor o igual a 2.25, el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión de este.
- El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características de este en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla.
- Es mejor utilizar dunitas poco serpentinizadas ya que la presencia de la serpentina disminuye la concentración del magnesio en la materia prima y aumenta el contenido de las perdidas por ignición, lo cual no permitiría la absorción del CO₂, fundamental para este trabajo.
- Los agregados que por sus características permitan la utilización de la menor cantidad de pasta de cemento producirán un concreto con mayor estabilidad volumétrica.
- Los tipos de variables que intervienen en el proceso de carbonatación son: Relación agua/cemento, porosidad, humedad relativa y grado de exposición.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pons-Herrera, J., Leyva-Rodríguez, C., Rodríguez- Martínez, G. y Ramírez-Pérez, M., (2000). Características físico – químicas de las dunitas serpentizadas de la región de Moa – Baracoa (zonas Amores y Miraflores).
- [2] Pons-Herrera, J., & Leyva-Rodríguez, C. (2007). Diferentes usos de las dunitas en la industria metalúrgica de cuba. Ingeniería Investigación Y Desarrollo, 4(1), 2-6. Recuperado a partir de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/840
- [3] Reynaldo La Rosa Vázquez, (2011). Utilización De Las Dunitas Asociadas A La Mineralización Cromifera De La Región De Camagüey Para La Elaboración De Ladrillos Refractarios.
- [4] Wolfgang Griem. (2017). Museo virtual geología, <https://www.geovirtual2.cl>
- [5] Rodríguez Losada José Antonio, Las islas canarias y el origen y clasificación de las rocas ígneas, (2008).
- [6] Castellanos Alarcón, O., & Ríos Reyes, C. (2005) Microsonda electrónica: Principios de funcionamiento.
- [7] Bin Su, Yi Chen, Shun Guo, Jingbo Liu, (2015). Orígenes de las dunitas orogénicos: Petrografía, geoquímica e implicaciones.
- [8] Geología y geofísicas rusas, (2016) Petrogénesis de dunitas del macizo ultrabásico de Guli (Plataforma siberiana septentrional.)
- [9] (2017) Deformación a alta presión y alta temperatura de dunita, eclogita, clinopiroxenita y granate usando difracción de rayos X in situ.
- [10] Euricio Pereira et al. (2006) contribución al conocimiento de las anfibolitas y dunitas de Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá).
- [11] Julián Restrepo (2008), Obducción y metamorfismo De Ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera central De Colombia.
- [12] Laura Gonzalez (2016) Petrogenesis de los complejos ultrámáficos de Heliconia – Angelópolis y del oriente de Medellín, Antioquía, Colombia.
- [13] Gabriel Rodríguez & Lina cetina (2016), caracterización petrográfica y química de rocas de corteza oceánica del complejo quebradagrande y comparación con rocas de la unidad diabasas de san José de Urama.

- [14] Hastie, A., Kerr, A., Pearce, J., and Mitchell, S. 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*
- [15] Nivia, A., Marriner, G., Kerr, A., and Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*.
- [16] Oscar Egidio et al. (2014) Revisión teórica de evaluación del potencial de colapso en las dunitas de Medellín.
- [17] Moreno Eric, Gerardo G. Domínguez Lara, Enrique J. Cob Sarabia and Francisco Duarte Gómez. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.
- [18] Moreno Eric, (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación.
- [19] Serrano Ixtapan D and Moreno Eric I. (2006), Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado.
- [20] Trocónis de Rincón, O., et al., (2003). "*Materiales y sistemas de rehabilitación*," en Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón, P. Helene y F. Pereira, eds., Sao Paulo, pp. 215-250.
- [21] Mejía Ruby, Rodríguez Cesar, Rodríguez Erich, Torres Janneth, Delvasto Silvio, (2009). Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros.
- [22] Rafael Calvo y Mario Sierra, (2015). Proceso De Carbonatación De Los Concretos Hidráulicos Para Pavimento Rígido.
- [23] Argos, 2013. 360° EN CONCRETO. Recuperado el 8 de Octubre de 2018, [http://360gradosblog.com/index.php/resistencia-mecanica-del-concreto y resistencia-a-la-compresion/](http://360gradosblog.com/index.php/resistencia-mecanica-del-concreto-y-resistencia-a-la-compresion/)
- [24] Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales, (2005).
- [25] Chávez, Reyes, Pérez, Corvo, & Osorno, 2010.
- [26] Galán, I. (2011). Carbonatación del Hormigón: Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- [27] Moreno, E., Solis-Carcaño, R., & Arias Palma, C. (2008). Desempeño de las pinturas Vinil Acrílicas contra la carbonatación del concreto.

- [28] Silva, A., Neves, R., & Brito, J. (2013). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete.
- [29] Solís Carcaño Rómel G. (2013), Carbonatación natural del concreto a cuatro años.
- [30] Chao Jiang, Qing-Hua Huang, Xiang-Lin Gu, Wei-Ping Zhang, (2018). Modelando los efectos del daño por fatiga en la carbonatación del concreto.
- [31] Jinzhi Tang, Jin Wu, Zhenghao Zou, Anyi Yue y Andrea Mueller, (2018). Influencia de la carga axial y de la edad de carbonatación en la resistencia a la carbonatación del concreto agregado reciclado.
- [32] Chenhui Zhu, Yonghao Fang y Hua Wei, (2018). Carbonatación-cementación de polvo de pasta de cemento endurecido reciclado.
- [33] Jian Wang Han Su Jinsheng Du, (2018). Influencia de los efectos acoplados entre la tensión de tracción por flexión y el tiempo de carbonatación en la profundidad de carbonatación del hormigón.
- [34] Zhanqun Liu, Wenlong Hu, Ming Pei y Dehua Deng, (2018). El papel de la carbonatación en la aparición de la angustia por cristalización de $MgSO_4$ en el hormigón.
- [35] Jie Li, (2018). Investigación de las propiedades mecánicas y carbonatación de materiales de construcción y demolición junto con caucho.
- [36] Emeline Drouet, Stéphane Poyet, Patrick Le Bescop, Jean-Michel Torrenti y , (2018). Carbonatación de pastas de cemento endurecido: Influencia de la temperatura.
- [37] Duygu Ergenç y Rafael Fort, (2018). Aceleración de la carbonatación en morteros a base de cal en ambientes con alto contenido de CO_2 .
- [38] Tamayo Jorge, Gutiérrez Carlos y Cabrera Jorge, (2000). Estudio de la degradación de los agregados pétreos durante la vida útil de los pavimentos.
- [39] Ramírez María Isabel, (2008). Sostenibilidad de la explotación de minerales de construcción en el valle de aburra.
- [40] Instituto geológico y minero de España, Monografías de rocas industriales Dunita y Olivino.
- [41] Chan Yam José Luis, Carcaño Romel Solís y Moreno Eric Ivan. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto, (2003).
- [42] Amaya Itzel, Cruz Cesàr, García Pedro, Rodríguez José y Torres Luis. Materiales de Construcción.

[43] Montantes Pons Jesús Emmanuel, Estudio del efecto de la radiación laser CO2 en concretos autos – compactables, (2018).

[44] Jara Salvador Héctor, Manual De Procedimientos Analíticos Para Suelos Y Agregados De Construcción (2014).

[45] Ramos canals Susan, Almacenamiento de dióxido de carbono (CO2) en rocas ofiolíticas de composición máficas (gabro y basalto) bajo condiciones controladas - Lima, 2018.

[46] Dung, N.T., Cement and Concrete Research (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.011>