

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO EN FORMULACIONES DE ADHESIVOS CERÁMICOS DE CONSTRUCCIÓN

PERFORMANCE ANALYSIS OF RECYCLED CONCRETE
AGGREGATES IN CEMENT-BASED TILE ADHESIVE FORMULATIONS

 **José Alejandro Espinosa Escorza***
 **Jorge Arturo García Pitol**

Universidad Autónoma de Querétaro,
Santiago de Querétaro, México

*espinoes@ gmail.com

Abstract

This study analyzes the performance of recycled fine aggregate concretes (RAC) as substitutes for calcium carbonates in formulations of economic or Type A construction ceramic adhesives. Tests were performed on the fresh state of the mixtures and the open time was evaluated according to the current standard NMX-C-420-1-ONNCCE. A control formula was developed with conventional aggregates and its performance was compared with RAC formulations. The results of the research suggest that the use of recycled aggregate concretes is feasible, as long as the effect of higher water demand, the particle size control and the use of cost-effective methods for the processing of concrete waste are taken into consideration.

Keywords: RAC, ceramic adhesives, recycled concrete aggregates, calcium carbonates, concrete waste.

Resumen

El presente estudio analiza el desempeño de agregados reciclados de concreto finos (ACR) como sustitutos de carbonatos de calcio en formulaciones de adhesivos cerámicos de construcción económicos o Tipo A. Se realizaron pruebas en estado fresco de las mezclas y se evaluó el tiempo abierto según la norma vigente NMX-C-420-1-ONNCCE. Se elaboró una fórmula de control con agregados convencionales y se comparó su desempeño contra formulaciones con ACR. Los resultados de la investigación sugieren que es factible el uso de agregados reciclados de concreto, siempre y cuando se tenga en consideración el efecto de mayor demanda de agua, control granulométrico e implementación de métodos económicos para el procesamiento de residuos de concreto.

Palabras clave: ACR, adhesivos cerámicos, agregados reciclados de concreto, carbonatos de calcio, residuos de concreto.



Introducción

Cada año a nivel mundial se extraen aproximadamente 50 000 millones de toneladas de arenas desde fuentes minerales no renovables, cuyo destino principal son las aplicaciones de construcción (PNUMA, 2019). El cemento es el material principal en la industria de la construcción; en 2020, su producción mundial alcanzó 4 400 millones de toneladas (Ali et al., 2011), y durante los próximos años se estima un incremento en la demanda que podría alcanzar hasta 23 % en 2050 (WBCSD, 2009). Más del 90 % del cemento generado se destina a la fabricación de distintos tipos de concreto.

“...la industria del cemento genera el 8 % de las emisiones globales de CO₂. La GCCA busca neutralidad de carbono para 2050 mediante eficiencia y reciclaje.

En cuanto a términos ambientales, el 8 % de las emisiones mundiales de CO₂ se atribuye a la industria cementera (Lehne y Preston, 2018); por cada tonelada producida se emiten alrededor de 900 kg de CO₂ (Mahasenan et al., 2003). La Asociación Mundial del Cemento y el Concreto (GCCA, por sus siglas en inglés) se ha propuesto alcanzar la operación de una industria neutra de carbono hacia 2050 vía la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de combustibles fósiles; otros objetivos de dicha agenda son la optimización del consumo de cemento y concreto, reciclaje, aprovechamiento y reutilización de residuos (GCCA, 2021).

El concreto residual puede ser recuperado en centros de acopio especializados en construcción y demolición, donde se clasifica, tritura y procesa en subproductos conocidos como agregados reciclados de concreto (ARC). Aunque los ARC presentan una mayor porosidad y demanda hídrica en comparación con los agregados vírgenes (Barra de Oliveira, 1997), constituyen un potencial sustituto de estos en la fabricación de concreto, siempre y cuando se dosifique correctamente la relación agua/cemento en las mezclas. Actualmente los ARC se emplean para construir rellenos y vialidades, sin embargo, urge desarrollar más aplicaciones para contribuir al logro de las metas del sector de fabricantes y la cadena de usuarios.

Las materias primas típicas para la fabricación de adhesivos cerámicos básicos o de Tipo A (también denominados adhesivos de Tipo C₀) son el cemento, carbonatos de calcio y éteres de celulosa. Esta clasificación se recomienda para instalación de elementos cerámicos de alta y media absorción en espacios interiores (ONNCCE, 2017). El presente trabajo tiene como objetivo validar el potencial aprovechamiento de ARC como sustituto

del carbonato de calcio, comúnmente utilizado en México para la manufactura de adhesivos cerámicos de construcción. La intención es reutilizar residuos de concreto, lo que reportaría dos beneficios: la disminución del volumen en residuos captados por vertederos y la conservación de materiales pétreos provenientes de fuentes no renovables.

Procedimiento

Se tomó en consideración la clasificación de adhesivos cerámicos de acuerdo con la norma mexicana **NMX-C-420-1-ONNCCE**; en ese sentido, se evaluaron formulaciones de adhesivos Tipo A en términos del parámetro de *tiempo abierto*, y se cuantificaron las propiedades de peso y densidad en estado fresco de los morteros adhesivos.

Caracterización de los agregados reciclados de concreto

Para preparar las muestras de **ARC**, se utilizaron residuos de cilindros de concreto convencional, cuya resistencia de compresión ($f'c$) es de **250 kg/cm²**. Se estableció la meta de obtener **ARC** con granulometría de malla **No. 40 (0.425 mm)**, en línea con las especificaciones usuales en el uso de carbonatos de calcio gruesos, también conocidos como marmolinas. La distribución granulométrica normativa de tamices se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1.

Distribución granulométrica en milímetros según la Normativa **SCT M-MMP-1-06, 2003 (SCT, 2003)**.

MALLA		VARIACIÓN PERMISIBLE DE LA ABERTURA PROMEDIO CON RESPECTO A LA DENOMINACIÓN DE LA MALLA	ABERTURA MÁXIMA PERMISIBLE PARA NO MÁS DEL 5 % DE LAS ABERTURAS DE LA MALLA	ABERTURA MÁXIMA INDIVIDUAL PERMISIBLE	DIÁMETRO NOMINAL DEL ALAMBRE
DESIGNACIÓN	ABERTURA NOMINAL				
No. 10	2.000	±0.070	2.135	2.215	0.900
No. 20	0.850	± 0.035	0.925	0.970	0.510
No. 40	0.425	± 0.019	0.471	0.502	0.290
No. 60	0.250	± 0.012	0.283	0.306	0.180
No. 100	0.150	± 0.008	0.174	0.192	0.110
No. 200	0.075	± 0.005	0.091	0.103	0.053

FIGURA 1.

Residuos de cilindros de concreto utilizados para ensayos a compresión realizados en el Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.



Los residuos de cilindros fueron sometidos a un proceso de trituración primaria utilizando una trituradora de materiales pétreos.

FIGURA 2.

Izquierda: material resultante de la trituración primaria de residuos de cilindros de concreto. Derecha: trituradora de materiales pétreos

FI-UAQ.



El material obtenido de la trituración primaria fue sometido a un proceso subsecuente de molienda en el equipo denominado "máquina de abrasión Los Ángeles", el cual consta de un contenedor cilíndrico de acero que pulveriza materiales pétreos por medio de un conjunto de esferas metálicas en su interior. La maquinaria opera sobre un eje rotatorio a una velocidad estimada de 30 a 33 rpm con un motor eléctrico de 1 HP.

FIGURA 3.
Izquierda: equipo de
abrasión Los Ángeles
FI-UAQ. Derecha:
esferas de molienda.



Después de la operación del equipo Los Ángeles por un periodo de 30 minutos, se procedió al tamizado con malla No. 40. Se pesaron las porciones resultantes de agregados reciclados de concreto que pasaron el tamiz y las que fueron retenidas en él. Los resultados del tamizaje se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2.
Control granulométrico de ACR obtenidos.

DESCRIPCIÓN	%
Material retenido en malla No. 40	39
Material que pasa malla No. 40	61

FIGURA 4.
Control granulométrico de agregados
reciclados de concreto.



Formulaciones de adhesivos cerámicos

Se elaboraron tres formulaciones de adhesivos cerámicos Tipo A: una fórmula control a base de materiales convencionales y dos fórmulas con dosis de sustitución del carbonato de calcio malla No. 40 por ARC, al 50 % y 100 % respectivamente. Las dosificaciones de las formulaciones de adhesivos cerámicos evaluados se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3.
Formulaciones de adhesivos cerámicos.

	FÓRMULA 1	FÓRMULA 2	FÓRMULA 3
FORMULACIÓN ADHESIVO C ₀	CONTROL	50 % ARC	100 % ARC
Cemento gris	216.00	216.00	216.00
Carbonato calcio malla No. 200	539.75	539.75	539.75
Carbonato calcio malla No. 40	441.61	220.81	0.00
ARC	0.00	220.81	441.61
Metilcelulosa	2.64	2.64	2.64
Total (g)	1200.00	1200.00	1200.00

Evaluación propiedades en estado fresco

Se llevaron a cabo pruebas en estado fresco de las mezclas de morteros adhesivos a fin de conocer su comportamiento con respecto a trabajabilidad y consistencia; tales propiedades se determinaron a través de los parámetros de demanda de agua, densidad y viscosidad.

Demanda de agua

Se midió el contenido de agua requerido para dar una consistencia adecuada a 100 g de cada adhesivo. Se utilizó una báscula digital calibrada y se incorporó paulatinamente agua a la mezcla hasta lograr una consistencia equilibrada; finalmente, se determinó el porcentaje de agua total adicionada en relación con el peso del mortero. Una vez definido el contenido preciso, se consideró el mismo porcentaje de agua para preparar las mezclas a evaluar posteriormente.

Densidad



FIGURA 5.
Medición de la
densidad en
mezclas de adhe-
sivos cerámicos.

La cuantificación de la densidad se efectuó con la ayuda de un cilindro metálico de dimensiones estandarizadas. El contenedor se rellenó del mortero adhesivo evaluado, para posteriormente compactar y enrasar el material en la superficie del contenedor cilíndrico. Tal procedimiento se repitió con cada una de las mezclas evaluadas.

La densidad en g/cm^3 se calculó por medio de la Ecuación (1)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde:

m representa el peso de los adhesivos cerámicos contenidos en el cilindro;

v es el volumen del cilindro de acuerdo con los datos reportados por el fabricante.

Viscosidad



FIGURA 6.
Equipo Brookfield
utilizado para lecturas
de viscosidad de
adhesivos cerámicos.

Se graduó la viscosidad en centipascales mediante la implementación de un viscosímetro rotativo Brookfield. En primera instancia, se tomó una lectura con el equipo operando a 5 rpm; después, se realizó una segunda lectura a 10 rpm. Los resultados para las mediciones de viscosidad ofrecen registros sobre la consistencia y trabajabilidad de las mezclas de adhesivos cerámicos evaluadas.

Tiempo abierto NMX-C-420-1-ONNCCE

La NMX-C-420-1-ONNCCE define el tiempo abierto como el intervalo máximo después de que el adhesivo se ha extendido en el sustrato, durante el cual

las piezas pueden ser debidamente colocadas y quedar adheridas, antes de la formación de una película superficial que evita la humectación y adherencia de la pieza (ONNCCE, 2017).

Se evaluó el parámetro de tiempo abierto de conformidad con lo especificado en la NMX-C-420-1-ONNCCE. Dicha norma prescribe que el tiempo abierto para adhesivos cerámicos Tipo A debe ser de 10 minutos o más. Esta métrica, sumada a los parámetros de las mezclas en estado fresco previamente evaluados, se utilizó como un indicador inicial del desempeño que tendrá la mezcla de adhesivo cerámico. En caso de cumplir con la normativa, será necesario efectuar *a posteriori* las pruebas restantes descritas en la NMX-C-420-1-ONNCCE y enlistadas en la Tabla 4.

TABLA 4.

Especificaciones para adhesivos cerámicos de Tipo A de acuerdo con la NMX-C-420-1-ONNCCE (2017).

CARACTERÍSTICA	REQUERIMIENTO MÍNIMO
Tiempo abierto	10 minutos
Resistencia a la tensión función tiempo abierto	0.5 N/mm ² en losetas colocadas después de 10 minutos
Resistencia a la tensión en condiciones estándar	0.5 N/mm ²
Resistencia a la tensión posterior a la inmersión en agua	0.5 N/mm ²
Resistencia a la tensión posterior al envejecimiento por calor	0.5 N/mm ²
Resistencia a la compresión	7 N/mm ²
Deslizamiento promedio	Menor o igual a 0.5 mm para adhesivos de bajo deslizamiento

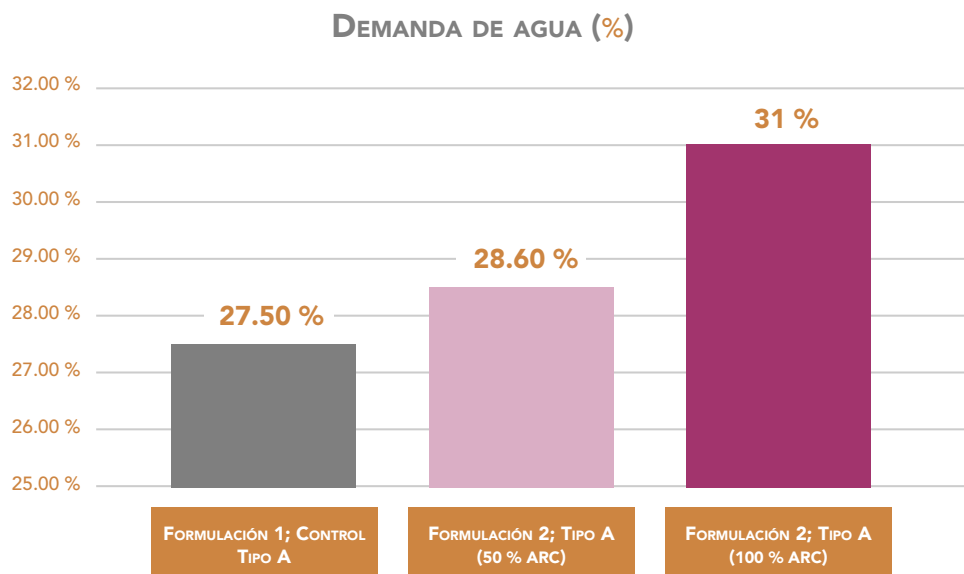
Resultados y discusión

Los resultados de las propiedades en estado fresco de las tres formulaciones evaluadas en el presente estudio se muestran a continuación:

Demanda de agua

El contenido de agua demandado por las mezclas de adhesivos evaluados se muestra en la Figura 7.

FIGURA 7.
Resultados de demanda de agua en % mezclas de adhesivos evaluados.

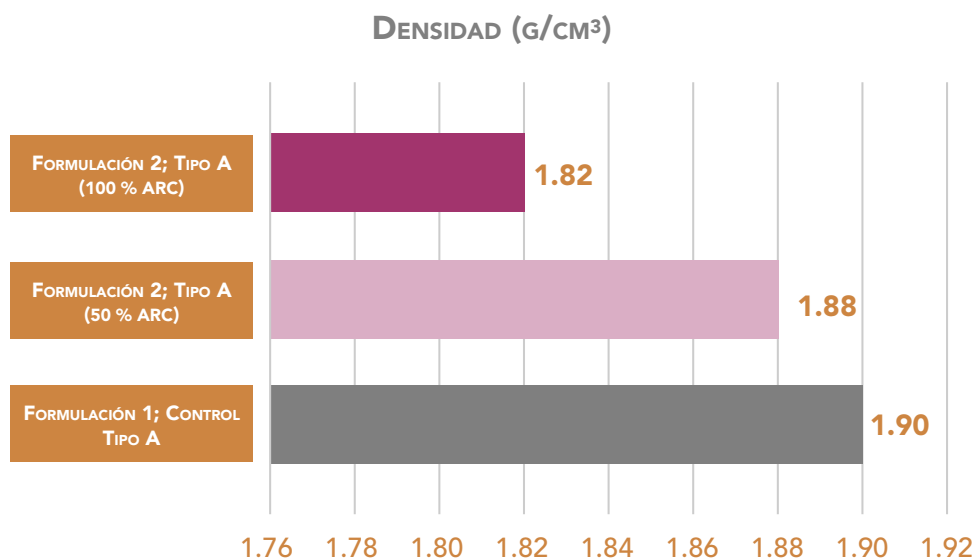


Se comprobó el efecto de mayor demanda de agua identificado por Barra de Oliveira (1997) en las mezclas que contienen agregados reciclados con respecto a aquellas con agregados convencionales. La mezcla con mayor proporción de ARC demandó 31 % de contenido de agua; la fórmula control fue la que demandó menor contenido, con 27.5 %.

Densidad de las mezclas de adhesivos evaluados

Los resultados de densidad se muestran en la Figura 8.

FIGURA 8.
Densidad de las mezclas de adhesivos evaluados.

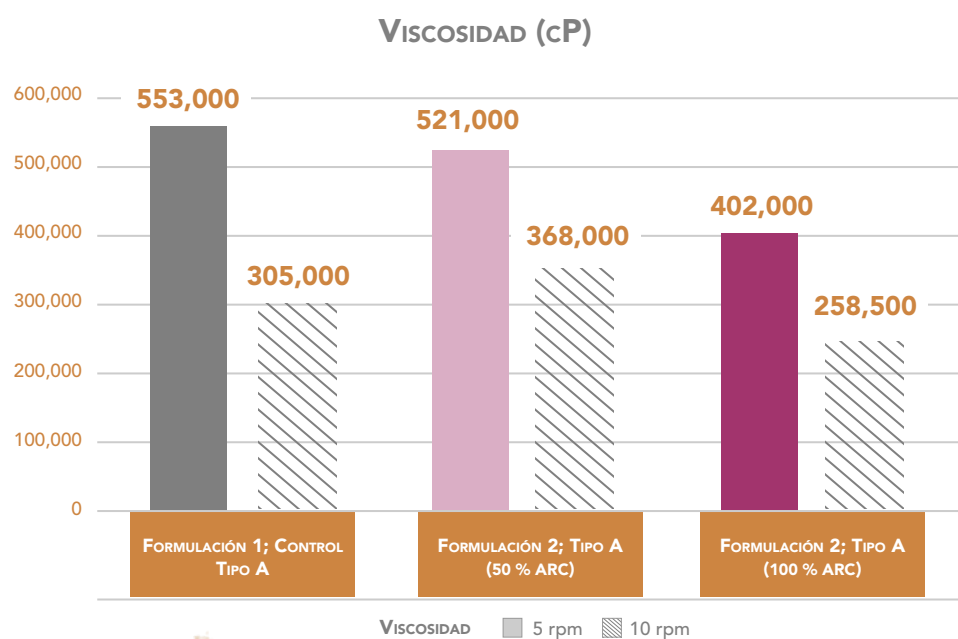


La densidad en la fórmula control fue **4.4 %** mayor en comparación con la fórmula 3, constituida **100 %** por **ARC**. Resalta que, a pesar de que las formulaciones 2 y 3 demandaron mayor contenido de agua, sus lecturas de peso y densidades fueron menores; es decir, las mezclas elaboradas con **ARC** son más ligeras que las mezclas de adhesivos convencionales.

Viscosidad

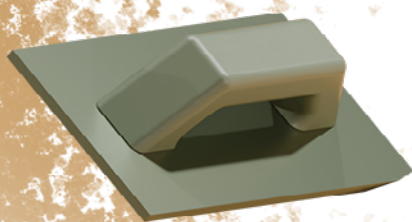
En este apartado, las lecturas de viscosidad tomadas con el viscosímetro Brookfield se muestran en la Figura 9. Como se mencionó anteriormente, se realizaron mediciones a **5 rpm** y **10 rpm** por cada mezcla.

FIGURA 9.
Lecturas de viscosidad a **5 rpm** y **10 rpm** tomadas con viscosímetro rotativo Brookfield para prototipos de adhesivos evaluados.



Tiempo abierto según NMX-C-420-1-ONNCCE

Los resultados tras la evaluación del tiempo abierto se muestran en la Figura 10. Se registraron lecturas del tiempo abierto a **5, 10, 15 y 20 minutos** correspondientemente.





Las formulaciones 1 (control) y 3 (100% ARC) cumplieron con la especificación de tiempo abierto mínimo de 10 minutos para adhesivos Tipo A requerida por la NMX-C-420-1-ONNCCE (2017). La formulación 2 (50 % ARC) está fuera de especificación, ya que únicamente logró un tiempo de 5 minutos. Destaca que ninguna de las tres formulaciones evaluadas alcanzó un tiempo abierto mayor a 10 minutos.

Conclusiones

Para lograr el cumplimiento de tiempo abierto en adhesivos Tipo A en las tres formulaciones, se plantea hacer ajustes en los porcentajes de dosificación a fin de balancear las proporciones de carbonatos de calcio finos y gruesos. Asimismo, se prospecta la inclusión de algún grado especializado de metilcelulosa que ayude a extender el tiempo abierto y contrarrestar el efecto de mayor demanda de agua en las mezclas de adhesivos con ARC. Una vez alcanzado el cumplimiento de especificaciones del tiempo abierto en las tres formulaciones, se evaluarán las mezclas de adhesivos en función de los requisitos adicionales advertidos por la norma NMX-C-420-1-ONNCCE.

Aunque el desempeño en términos del tiempo abierto marcado por la normativa fue insatisfactorio en las tres formulaciones evaluadas, el comportamiento de los agregados reciclados de concreto en las pruebas en estado fresco fue promisorio. La viscosidad y densidad más bajas para las formulaciones con ARC respecto al control podrían contribuir a generar adhesivos cerámicos más ligeros, lo que representaría mejor trabajabilidad de mezclado y potencialmente mayor rendimiento del producto; ambos atributos son apreciados por los instaladores de este tipo de materiales.

Se concluye que es factible la inclusión de ACR como sustituto de carbonatos de calcio, siempre y cuando haya un control granulométrico adecuado y los métodos de captación y transformación de los residuos de concreto sean costeables. Es necesario continuar con la evaluación para satisfacer la normatividad mexicana vigente mediante el desarrollo de productos que promuevan el aprovechamiento de los residuos de concreto al alcance del instalador de materiales cerámicos.

La introducción de insumos de construcción basados en ACR representaría un hito en la industria mexicana de adhesivos cerámicos, pues al momento ninguno cuenta con estas características. A todo esto se suman los beneficios de disminuir los volúmenes de residuos expulsados de la construcción y demolición desechados diariamente en los vertederos y el fomento de una disposición controlada de los mismos, así como la concientización respecto al consumo de agregados vírgenes provenientes de fuentes minerales no renovables.

Referencias

Ali, M. B., Saidur, R. y Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252-2261. DOI: [10.1016/j.rser.2011.02.014](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014).

Barra de Oliveira, M. (1997). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. *Informes de la construcción*, 48(447), 50. <https://informesdelaconstruccion.com>.

revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/articulo/view/976

Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible. (2009).

Iniciativa por la sostenibilidad del cemento. Reciclando concreto. Suiza: Atelier Point Virgule. https://docs.wbcsd.org/2009/06/e-CSI_Recycling_Concrete_Spanish.pdf

Global Cement and Concrete Association. (2021). *Futuro del hormigón. Plan de trabajo hacia una industria del cemento y hormigón neutra en carbono para 2050* de la Asociación Mundial de Productores de Cemento y Hormigón. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/11/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Spanish.pdf>

Lehne, J. y Preston, F. (2018). *Making concrete change: Innovation in low carbon cement and concrete, de Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete.* Reino Unido: The Royal Institute of International Affairs.

Mahasen N., Smith S. y Humphreys, K. (2003). *The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions.*

Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference. Kioto, Japón. DOI: [10.1016/B978-008044276-1/50157-4](https://doi.org/10.1016/B978-008044276-1/50157-4)

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2017). *Industria de la construcción. Mezclas adhesivas para instalación de recubrimientos cerámicos y piedras naturales (NMX-C-420-1-ONNCCE-2017).*

PNUMA. (2019). *En busca de la extracción sostenible de arena.* <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/en-busca-de-la-extraccion-sostenible-de-arena#:~:text=50.000%20millones%20de%20toneladas%20de,agua%2C%20arena%20y%20grava>

SCT. (2003). *Normativa SCT M-MMP-1-06/03; Métodos de muestreo y prueba de materiales. Suelos y materiales para terracería. Granulometría de materiales compactables para Terracerías.* México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

