

Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto

José Luis Chan Yam⁵⁵, Rómel Solís Carcaño⁵⁶, Eric Iván Moreno

RESUMEN

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. Este artículo presenta los avances recientes en el tema de los agregados para concreto y puede ser útil, tanto para el diseñador o el constructor de estructuras, como para el estudiante interesado en el tema de la tecnología del concreto, siendo una guía para lograr una mejor comprensión del importante papel que los agregados desempeñan en el material.

Palabras clave: Concreto, agregados, resistencia, durabilidad, zona de transición de la interfase.

INTRODUCCIÓN

El concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, de pasta y agregados minerales. La pasta se compone de cemento y agua, que al endurecerse une a los agregados formando un conglomerado semejante a una roca debido a la reacción química entre estos componentes. Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el concreto debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Palbol 1996).

El esfuerzo que el concreto puede resistir como material compuesto está determinado principalmente, por las características del mortero (mezcla de cemento, arena y agua), de los agregados gruesos y de la interfase entre éstos dos componentes. Debido a lo anterior, morteros con diferentes calidades y agregados gruesos con diferentes características (forma, textura, mineralogía,

resistencia, etc.), pueden producir concretos de distintas resistencias (Özturan y Çeçen 1997).

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan 1993).

La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos, especialmente de los agregados. Sin embargo, uno de los problemas que generalmente encuentran los ingenieros y los constructores al emplear el concreto, es la poca verificación de las características de los agregados pétreos que utilizan, lo que propicia con cierta frecuencia resultados diferentes a los esperados (Cerón et al. 1996).

⁵⁵ Estudiante del Programa de la Maestría en Ingeniería – Construcción, FIUADY

⁵⁶ Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Estructuras y Materiales, FIUADY

El objetivo del presente trabajo es presentar el estado del arte sobre los agregados y su influencia en las características del concreto tanto en estado fresco como endurecido.

Propiedades físicas de los agregados

El 100% de los concretos que se elaboran en México ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: en depósitos de origen natural (ríos, playas, etc.) y como productos de trituración de roca. En la tabla 1 se presenta información sobre el origen, características físicas distintivas y su influencia en el concreto (cuando se utilizan como agregados), de las 3 familias de rocas conocidas, que son: ígneas, sedimentarias y metamórficas (Uribe 1991).

Desde el punto de vista de su tamaño, los agregados se dividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 µm; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm (Neville 1999).

De acuerdo a su peso específico, los agregados se dividen en ligero, normal y pesado; estas diferencias los hacen aptos para producir

concreto con cierta variedad en el peso unitario, el cual es una característica básica del material (Alatorre y Uribe 1998).

Algunas otras importantes propiedades físicas de los agregados son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia, etc. También es de suma importancia la granulometría de los agregados, y el tamaño máximo del agregado (para la grava), tanto en el comportamiento del concreto en estado plástico, como en su estado endurecido.

La resistencia del agregado no es usualmente el principal factor que afecte la resistencia del concreto normal, porque la partícula del agregado suele ser mucho más fuerte que la matriz y la zona de transición. Empero, en ensayos realizados en especímenes de concreto preparados con agregados calizos de la Península de Yucatán, es común observar que la falla se presente principalmente en los agregados, especialmente para relaciones agua/cemento relativamente bajas (menores a 0.5). Otras características del agregado, distintas a la resistencia, tales como tamaño, forma, textura de superficie y mineralogía también pueden afectar la resistencia del concreto en grados distintos (Ezeldin y Aitcin 1991).

Tabla 1. Familias de rocas

	Tipo de roca y origen	Nombre	Componentes mineralógicos	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto
Ígneas	Plutónicas	Granito	Cuarzo, feldespatos, mica y plagioclase	Fanerítica	Batolitos cuerpos intrusivos	Fácilmente intemperizable en clima tropical, intemperismo esferoidal
		Diorita	Plagioclase y mica	Fanerítica	Cuerpos intrusivos	
		Gabro	Plagioclase y mica	Fanerítica	Cuerpos intrusivos	Alto peso específico
	Volcánicas piroclásticas	Riolita	Cuarzo, feldespato, plagioclase, vidrio y mica	Afanítica porfídica	Domos flujos de lava	Altamente reactiva con los álcalis del cemento
		Andesita	Plagioclase, vidrio y mica	Afanítica porfídica	Derrames de lava	

	Tipo de roca y origen	Nombre	Componentes mineralógicos	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto	
		Basalto	P1, V Y M	Afanítica vesicular	Derrames de lava	Alta resistencia a la compresión, porosa y resistente a la abrasión	
		Tobas	Variable	Porfídica	Pseudoestratificación	Dependiendo de la mineralogía pueden ser reactivas y algunas son muy deleznable	
Sedimentarias	Clásticas	Conglomerado	Fragmentos de roca y matriz	Fragmentos redondeados 2mm de diámetro	Estratificación gruesa, lentes rellenos de cauces, masiva		
		Arenisca	Qz, Pk, p1 y fragmentos de roca	Fragmentos 2mm a 1/16 mm de diámetro	Estratificación masiva lentes	Puede contener cementante sílico que es reactivo con los álcalis del cemento	
		Lutita	Materiales arcillosos	Fragmentos 1/6 mm de diámetro	Laminaciones masiva	Puede presentar fisibilidad, baja resistencia a la compresión, puede hidratarse a través de los materiales arcillosos	
	No clásticas	Caliza	Calcita	Cristalina	Estratificación masiva	Altamente soluble	
		Marga	Calcita y minerales arcillosos	Cristalina	Estratificación	Sus minerales arcillosos puede hidratarse fácilmente	
		Dolomita	Calcita y dolomita	Cristalina	Estratificación masiva	Sus componentes mineralógicos pueden provocar la reacción álcali-carbonato (a través de la desdolomitación)	
		Yeso	Yeso anhidrita	Cristalina	Vetas y lentes	Muy ligero, baja resistencia a la abrasión	
		Carbón	Carbón	Criptocristalina	Mantos, vetas, lentes	Ligero, deleznable y/o frágil, produce problemas durante la hidratación del cemento pórtland	
	Metamórficas	Foliadas	Pizarra pilita	Qz, micas, clorita, sericita.	Foliada de grano fino	Foliación	Deleznable
			Esquisto	Micas, Fk, clorita Qz, calcita y feldespatos	Foliada de grano medio	Foliación	A veces muy deleznable
Gneiss			Qz, feldespatos ferromagnesianos	Foliada de grano grueso	Foliación masiva		
No foliadas		Hornfels	Mica, granate, Px cuarzo, feldespatos	Afanítica	Masiva	Puede presentar sílice del tipo reactivo con los álcalis del cemento	
		Cuarcita	Qz, feldespatos sillimanita	Granoblástica	Masiva	Demhornfles	
		Mármol skarn	Calcita, Px y AN.	Granoblástica	Masiva		

Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto fresco

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 (Alaejos y Fernández 1996).

Por otro lado, si el contenido de cemento se incrementa, se afecta la consistencia del concreto; este incremento permite agregar más agua a la mezcla para una mantener la relación agua/cemento. Por lo tanto, en algunas ocasiones puede ser necesario aumentar el contenido de cemento en la mezcla, buscando mejores consistencias para mezclas de concreto de resistencias no muy altas.

La forma de los agregados tiene incidencia sobre la trabajabilidad del concreto fresco. Las formas básicas de éstos se pueden simplificar en 4 tipos, que son: equidimensional o esférica, prismática, tabular o elíptica, e irregular. De todas éstas, la que mayor problema puede ocasionar para la trabajabilidad es aquella de tipo tabular que además está alargada (conocidas como piezas planas y alargadas); estas piezas pueden provocar disminución en la trabajabilidad ya que muy fácilmente pueden orientarse de manera preferencial en un solo plano, de manera que el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas. Además, gravas con esta forma ocasionan mayores requerimientos de arena, y eso hace necesario un incremento en el volumen de agua para la mezcla (Uribe 1991). Es deseable, entonces, que los agregados particularmente los gruesos tengan una forma un tanto angular y cúbica (Chan 1993).

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 (Neville 1999).

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 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 (Kosmatka y Panarese 1992).

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2.2 y 3.1) y carecer de alguna clase granulométrica. Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3.1 (arena gruesa), en donde puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado (Uribe 1991).

Por último, en el agregado grueso un contenido excesivo de materiales finos puede provocar problemas similares en el concreto a los que suele causar una arena con un módulo de finura menor a 2.2. Por medio de la prueba de pérdida por lavado se puede determinar este contenido, cuyo resultado se expresa como un porcentaje de la muestra.

Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto endurecido

Frecuentemente la variación de la resistencia del concreto puede explicarse con el cambio de la relación a/c, no obstante existe evidencia en la literatura que éste no siempre es el caso. Además por consideraciones teóricas, independientemente de la relación a/c, las características de las partículas del agregado tales como el tamaño, la forma, la textura de

la superficie y el tipo de mineral, influyen en las características de la zona de transición, y por lo tanto, afectan la resistencia del concreto (Mehta y Monteiro 1998).

En cuanto a la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la textura superficial de éste es principalmente responsable de la adherencia. La roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado; aunque en la adherencia también tiene influencia la relación a/c que afecta tanto física como químicamente la zona de interfase. En un trabajo de investigación se encontró que concretos fabricados con agregados triturados resistieron más que los de canto rodado; el esfuerzo de compresión a los 28 días para los concretos hechos con agregados gruesos de grava redonda estuvo entre el 10 y 20 porciento más bajos que los concretos preparados con agregados triturados. Lo anterior puede ser atribuido tanto a la superficie lisa de los agregados de canto rodado, como a su posible menor resistencia, en relación a los agregados triturados, que fueron de basalto y caliza. (Özturan y Çeçen 1997).

El efecto del tamaño máximo del agregado en la resistencia también es conocido. La tendencia observada indica que mientras que el TMA disminuye, la resistencia decrece. Este fenómeno se ha observado para gravas de 75.0, 37.5, 19.0 y 9.5 mm (3", 1½", ¾", y ⅜"). En contraste, no sucede lo mismo para el concreto hecho usando un TMA de 4.75 mm. (No. 4), esto es atribuido al tamaño pequeño del agregado y al factor de que esta mezcla representa, básicamente, mortero o micro concreto (Sleiman 2000).

Se ha observado que concretos con bajos contenidos de agregados resisten altos esfuerzos a la edad de un día, excepto los hechos con grava triturada. En contraparte, los concretos con altos contenidos de agregados presentan bajas resistencias de compresión a edades tempranas, fallando probablemente por la concentración de esfuerzos alrededor de los agregados, ya que en éstos sus propiedades físicas no varían con el tiempo, mientras que la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta de cemento están todavía por debajo de su valor final (Cetin y Carrasquillo 1998).

Por otro lado, la capacidad de absorción de un material incide directamente sobre el grado de alteración que este mismo puede sufrir; la cantidad de espacios vacíos como los poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad de cualquier estructura de concreto. Un

ejemplo típico de esto son los concretos que se encuentran en sitios donde el proceso de congelamiento y deshielo es común, ya que el agua puede expandirse hasta un 9% al congelarse. Este cambio volumétrico puede alterar fuertemente la estructura interna del concreto.

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 del mismo. 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.

Por otro lado, es conocido que a mayor porosidad mayor fuerza de adhesión, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad, y como consecuencia menor adherencia y cantidad de finos que pasan por la malla N° 200 (Cerón et al. 1996).

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 del mismo. 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 (Uribe 1991).

Aunque de manera simplista pudiera pensarse que el agregado grueso actúa principalmente como un relleno para reducir el contenido de la pasta de cemento y moderar el esfuerzo en la matriz, sus contribuciones parecen ser más que eso. Un porcentaje máximo en volumen de agregados, sobre todo gruesos, tiene un efecto positivo tanto en su resistencia, como en sus características de flujo plástico, contracción por secado y permeabilidad, hecho que se presenta debido a que la pasta de cemento endurecido constituye el elemento más débil en lo que se refiere a las propiedades antes citadas (Palbol 1996).

La demanda de agua de los agregados determina el contenido de cemento y pasta para una determinada resistencia del concreto. Debido a que la pasta es la principal fuente de acortamiento y alargamiento en el concreto, agregados con bajas demandas de agua producirían concretos menos propensos a la deformación (acortamiento y alargamiento). Por esto, los agregados que mejor se acomodan en una mezcla producen concretos con menor inestabilidad volumétrica (Alexander 1996).

Influencia de los agregados en la zona de interfase y en el módulo de elasticidad

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 (Neville 1999).

La zona de interfase tiene su propia microestructura. La superficie del agregado se cubre con una capa de cristales orientados de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (hidróxido de calcio) con un espesor aproximado de $0.5 \mu\text{m}$, tras de ésta hay una capa de silicato de calcio hidratada, también de aproximadamente $0.5 \mu\text{m}$ de espesor; estas capas son conocidas como la película doble. Más alejada de los agregados está la zona de interfase principal de unos $50 \mu\text{m}$ de espesor, conteniendo productos de hidratación del cemento con cristales más grandes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pero menores que los de cualquier cemento hidratado (Neville, 1997).

La zona de interfase no sólo existe en la superficie de las partículas del agregado grueso sino también alrededor de las partículas de la arena, aquí el espesor de la zona de interfase es más pequeña, pero la suma de las zonas individuales generan un volumen muy considerable, al grado que el volumen total de la ITZ está entre un tercio y un medio del volumen total de la pasta de cemento endurecida. La microestructura de la zona de interfase es grandemente influenciada por la situación que existe en la cubierta final, en esta zona las partículas de cemento son incapaces de unirse estrechamente con las partículas relativamente grandes del agregado; en consecuencia, la pasta de cemento endurecida en la zona de interfase tiene una porosidad mucho mayor

que la pasta de cemento endurecida más alejada de las partículas del agregado.

Por otro lado, el módulo de elasticidad del concreto es afectado por el módulo de elasticidad del agregado y por el contenido volumétrico de éste en el concreto. Debido a que el módulo de elasticidad del agregado es raramente conocido, algunas expresiones para el módulo de elasticidad del concreto permiten que el del agregado se sustituya por un coeficiente que está en función de la densidad del concreto. En este sentido, la expresión del ACI 318-89 puede emplearse haciendo la consideración anterior para concretos hechos con agregados de peso normal y ligero; empero, ninguna de las expresiones para el cálculo del módulo de elasticidad considera la adherencia (plano de pegado) entre el agregado y la pasta endurecida de cemento cercana a la partícula. La adherencia depende de la ITZ, la cual tiene una microestructura diferente al de las grandes cantidades de cemento endurecido (Neville 1997).

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 (Centeno et al. 1994). 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 (Cetin y Carrasquillo 1998). 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, reconociendo a la interfase como un elemento de gran importancia en el modelo estructural del concreto.

Agregados de piedra caliza y su comportamiento en el concreto

En la Península de Yucatán los agregados provienen de la trituración de roca caliza cuyo origen geológico son las formaciones sedimentarias del Cenozoico. En el planeta, la piedra caliza es la más abundante de las rocas de carbonato; va del rango de la roca caliza pura, que consiste en el mineral calcita (carbonato cálcico), a la dolomita pura, que consiste

en el mineral dolomita (carbonato cálcico magnésico). Generalmente todas contienen además, en diferentes proporciones y cantidades, impurezas no carbonatadas, como son la arcilla y la arena (Mehta y Monteiro 1998).

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.

Comparada con otros agregados, la piedra caliza tiene gran influencia en la naturaleza y carácter de la microestructura de la ITZ; la reacción de este material se caracteriza por manchas café y muy alta porosidad. La interacción química entre algunas rocas y la pasta de cemento puede conducir a un incremento en la fuerza de la adherencia, en particular la piedra caliza reacciona con la pasta de cemento hasta producir una gran cantidad de poros en la ITZ, lo que resulta en una reducción en la fuerza de adherencia a edades tempranas; sin embargo, a mayor edad, estos poros se llenan con productos de reacción posteriores incrementando la fuerza de adherencia (Tasong 1999).

A pesar de esta ventaja en la adherencia, la baja resistencia mecánica de los agregados de roca caliza provoca una práctica de sobredosificación en cemento con miras a alcanzar concretos que cumplan con los esfuerzos de diseño (Centeno et al. 1994). Puesto que los agregados de piedra caliza proporcionan buena adherencia con la pasta de cemento, las resistencias obtenidas pueden aumentarse usando en la producción de los concretos piedra caliza más densa, con bajos coeficientes de desgaste (prueba de los ángeles), que agregaría el efecto de usar un agregado resistente a su buena adherencia con la pasta (Alaejos y Fernández 1996).

Por otro lado, los módulos de elasticidad de los concretos que contienen agregados de piedra triturada, piedra de río y piedra caliza de dolomita, son subvalorados en todas las edades por las ecuaciones empíricas recomendadas por los comités del ACI 363 y 318. Sin embargo, aquellos elaborados con piedra caliza pueden ser representados por la ecuación sugerida por el ACI 363 para módulos de

elasticidad de concretos de alta resistencia (Cetin y Carrasquillo 1998).

CONCLUSIONES

Para obtener un concreto óptimo se debe buscar una estructura de agregados con la forma y secuencia de tamaños adecuados, para que se acomoden lo más densamente posible (logrando la más alta compacidad), combinándose esta estructura con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos entre las partículas pétreas.

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.

Los agregados influyen en las características del concreto endurecido, tanto por su propia resistencia, como por la cantidad y tamaño de las partículas, y sobre todo, aquellas que facilitan la adherencia entre las dos fases (matriz y agregados). La mayor porosidad de los agregados propicia una mejor adherencia, aunque generalmente va acompañada de mayor desgaste.

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

Actualmente el modelo del concreto debe considerar, además de la matriz y los agregados, un tercer elemento muy importante: la zona de interfase entre la pasta y los agregados.

Los agregados de piedra caliza presentan una amplia variabilidad en sus características de acuerdo a las condiciones geológicas en las que se sedimentaron.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue financiado por el CONACyT por medio de los apoyos al Programa de Maestría en Ingeniería - Construcción de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y de los proyectos de investigación 34428-U y J34433-U.

REFERENCIAS

- Alaejos P., Fernández M. (1996). High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning. "ACI Materials journal," (U.S.A.), 93 (3), p. 236.
- Alatorre J., Uribe R. (1998). Agregados para concreto: cada cual por su nombre. "Construcción y tecnología," (México), 10 (121), pp. 13-14.
- Alexander M. (1996). Aggregates and the deformation properties of concrete. "ACI Materials journal," (U.S.A.), 93 (6), p. 576.
- Centeno R., Duarte F., Castillo W., Chim S. (1994). Propiedades mecánicas del concreto elaborado con agregados pétreos de la península de Yucatán. "Boletín académico FIUADY," (México), (25), p.35.
- Cerón M., Duarte F., Castillo W. (1996). Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida. "Boletín académico FIUADY," (México), (31), p. 27.
- Cetin A., Carrasquillo R. (1998). High-performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical properties. "ACI Materials journal," (U.S.A.), 95 (3), p. 253.
- Chan P. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. "ACI Materials journal," (U.S.A.), 90 (4), p. 357.
- Ezeldin A.S., Aitcin P.C. (1991). Effect of coarse aggregate on the behavior of normal and high-strength concretes. "Cement and concrete aggregates," (U.S.A.), 13 (2), pp. 121-124.
- Issa S.A., Islam M.S., Issa Ma.A., Yousif A.A., Issa Mo.A. (2000). Specimen and aggregate size effect on concrete compressive strength. "Cement, concrete and aggregates," (U.S.A.), 22 (2), p. 107.
- Kosmatka S., Panarese W. (1992). "Diseño y control de mezclas de concreto," IMCYC, México, 1992, pp. 32-34.
- Mehta K., Monteiro P. (1998). "Concreto, estructura, propiedades y materiales," IMCYC, México, p. 38.
- Neville A. (1997). Aggregates bond and modulus of elasticity of concrete. "ACI Materials journal," (U.S.A.), 94 (72), p.72.
- Neville A. (1999). "Tecnología del concreto," IMCYC, México, p. 163.
- Özturan T., Çeçen C. (1997). Effect coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. "Cement and concrete research," (U.S.A.), 27 (2), p. 165.
- Palbol L. (1996). Optimización de los agregados para concreto. "Construcción y tecnología," (México), 9 (100), p.30.
- Tasong W. (1999). Aggregate-cement paste interface, Part I; Influence of aggregate geochemistry. "Cement and concrete research," (U.S.A.), 29 (7), p. 1019.
- Uribe R. (1991). El control de calidad en los agregados para concreto 3ª parte. "Construcción y tecnología," (México), (40), p. 34.