

CONCRETO PREPARADO CON RESIDUOS INDUSTRIALES: RESULTADO DE ALIANZA EMPRESA UNIVERSIDAD

CONCRETE PREPARED WITH INDUSTRIAL WASTE: SUCCESSFUL COLLABORATIVE WORK BUSINESS-UNIVERSITY

María Fernanda Serrano Guzmán

Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Colombia)

Diego Darío Pérez Ruíz

Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia)

Resumen

El concreto es el material más utilizado en la construcción por sus propiedades mecánicas a largo plazo y por los acabados que se pueden lograr cuando las prácticas de colocación son eficientes. Para la preparación de mezclas de concreto se requiere la dosificación de cemento, arena, triturado, agua y en ocasiones aditivos. La producción de los agregados naturales se hace, por lo general, mediante la explotación o mediante la extracción mecánica o manual de estos materiales pétreos; actividades que generan un gran impacto en el ambiente por el desgaste del recurso suelo y por la alteración del paisaje y de la calidad del aire y agua, en algunos casos. Por esta razón, surge la iniciativa de proponer mezclas de concreto en las cuales se sustituyan proporciones de los agregados pétreos por residuos industriales. Este trabajo resume el desarrollo de dos investigaciones; en la primera de ellas se prepararon mezclas de concreto utilizando un total de 4 diferentes proporciones de agregados convencionales y no convencionales y se prepararon 180 especímenes de concreto que se probaron a compresión. En la segunda se reemplazaron proporciones de agregados por escombros de concreto y limalla; se analizaron un total de 4 diferentes proporciones de agregados y limalla y se prepararon un total de 144 muestras de concreto.

Los resultados demuestran que la incorporación de materiales no convencionales en la mezcla de concreto, dosificando las muestras con el menor porcentaje de vacíos, genera resultados favorables de resistencia a la compresión. Las mezclas de concreto preparadas con una relación agua cemento de 0.4 presentaron resistencias superiores a las de diseño (210 kg/cm²). Estas mezclas contenían las proporciones del 23% de agregado fino, 61% de agregado grueso, 10% de escombros y 6% de limalla fina y del 40% de agregado fino, 50% de grueso y 10% de escombros. El módulo de elasticidad determinado experimentalmente en estos casos presentó valores por encima de los valores estimados con las ecuaciones determinadas por la norma sismoresistente de 2010. Se recomienda la continuación de trabajos experimentales que permitan la validación de los diseños establecidos. Finalmente, los resultados aquí presentados constituyen un viable aporte de materiales a ser aprovechados en el sector de la construcción, por cuanto el concreto producido tiene un costo hasta un treinta por ciento menor que el concreto convencional. De esta forma, los residuos industriales utilizados empiezan a tener un valor comercial mayor que el valor actual. Adicionalmente, la práctica de aprovechamiento de residuos inertes en la producción de concreto favorece a la protección y conservación del ambiente. Ambos proyectos propiciaron la interacción con la empresa privada.

Palabras clave: concreto, concreto no convencional, porcentaje de vacíos

Abstract

Concrete is the most used material in building construction due to its mechanical properties and good finishes that may be achieved with efficient workability. Right proportions of cement, water, aggregates and sometimes additives are used to prepare concrete. The extraction of natural aggregates with mechanical or manual procedures causes a great impact on the environment, due to the affectation of soil and water resources. Because of that, this paper focuses in the developing of concrete mixtures using solid wastes that replace proportions of natural aggregates. This paper summarizes the development of two investigations. A total of 180 specimens were prepared in the first one, where a total 4 different proportions of conventional and non conventional aggregates (debris) were used. In the other hand, a total of 144 concrete specimens were prepared using 4 different proportions of aggregates and swarf.

The results indicated that the incorporation of unconventional materials in the concrete mixture shown favorable results of compressive strength in the concrete. Concrete mixtures prepared with W/C (water/cement ratio) of 0,4 shown higher strength than it was expected (210 kg/cm²). These mixtures were prepared with 23% of fine aggregate, 61% of coarse aggregate, 10% of debris and, 6% of fine swarf and with 40% of fine aggregate, 50% of coarse aggregate and 10% of debris. Elasticity modulus in both cases reported values above the estimated values with the equations determined using the NSR-2010. It is recommended continuing with experimental work to validate the proportions established in the concrete mixture. Finally, the results demonstrate that there is viable to use debris and inert solid waste to prepare concrete. Thus, the industrial waste would have a commercial value. This kind of research joins academy and industry to protect the environment.

Keywords: concrete, non conventional concrete, voids percentage

Introducción

La mayoría de las actividades económicas que comprometen la transformación de materias primas generan desperdicios. La construcción, como actividad económica, produce por tanto un volumen significativo de residuos que se conocen con el nombre de escombros. De la misma forma, otros renglones de la economía como la industria metal-mecánica produce una cantidad de residuos sólidos que en ocasiones son recuperados y reutilizados en los procesos productivos.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en el comportamiento mecánico del concreto preparado con una proporción de agregados no convencionales, representados en residuos inertes: escombros y limalla. Los escombros se produjeron de la demolición de estructuras de concreto y desperdicios de ladrillo de las actividades de mampostería; éstos se obtienen de los centros de acopio dentro de la universidad en donde se realizó el estudio y de obras de la región. La limalla es un residuo que fue suministrado por

la empresa manufacturera privada LAVCO Ltda., ubicada en el sector metalmeccánico de partes para motor y áreas complementarias; la actividad de esta empresa es gerenciada por Olga Vesga, líder empresarial interesada en la producción limpia y en la conservación del ambiente.

Las pruebas de laboratorio para la elaboración del concreto fueron reportadas en Ferreira (2009) y Bautista y Parra (2010), y están documentadas en los informes de investigación de Serrano (2010a) y Serrano (2010b). Ferreira (2009) trabajó una metodología que permitió proponer el aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto. El material seleccionado estuvo conformado por arena extraída del río Pescadero; triturado proveniente de una trituradora del sector; y escombros de obras del área metropolitana de Bucaramanga. Posteriormente, Parra y Bautista (2010) incorporaron además de los escombros, la limalla. Las dosificaciones de mezclas probadas se hicieron mediante la combinación de los agregados, buscando el menor porcentaje de vacíos del material

pétreo. El concreto producido con la mezcla de agregados naturales y no convencionales fue utilizado y probado en la fabricación de adoquines.

Los resultados de estos trabajos representan la viabilidad en el uso en construcción de materiales inertes y sólidos, por cuanto con éstos, el concreto producido tiene un costo hasta un treinta por ciento menor que el concreto convencional. De esta forma, los residuos industriales utilizados empiezan a tener un valor comercial mayor que el valor actual. Adicionalmente, la práctica de aprovechamiento de residuos inertes en la producción de concreto favorece a la protección y conservación del ambiente. Ambos proyectos propiciaron la interacción con la empresa privada, especialmente con la empresa LAVCO Ltda.

Teoría del concreto

El concreto es un material compuesto que consiste en un medio de enlace dentro del cual se embeben partículas o fragmentos de agregado (Carino, 1994; Serrano y Pérez, 2010). Para ello se utiliza un cemento hidráulico, agua, triturado y Arena (ASTM, 1994) y en ocasiones aditivos que le confieren propiedades especiales a la mezcla.

El cemento es un material formado por minerales calcáreos como la piedra caliza y materiales arcillosos con contenido de alúmina y sílice. La producción de cemento se realiza en plantas cementeras provistas de hornos y en donde se establecen controles de calidad para garantizar un producto final acorde con las especificaciones técnicas. El agua, utilizada para mezclado, normalmente pudiera ser apta para consumo humano, siendo requerido un control en cuanto a sedimentos, cloruros y sulfatos, entre otras características químicas. En relación con los agregados, éstos pueden provenir de diferentes fuentes (canteras, fuentes superficiales) y ser obtenidos por diferentes mecanismos de explotación (extracción mecánica, voladura); la proporción de agregados oscila entre setenta a ochenta por ciento de la mezcla que se prepare (ASTM, 1994). La forma, textura y angularidad entre otras características del material pétreo tienen especial efecto en la resistencia y durabilidad del concreto (Al-Rousan et al., 2007; Serrano, 2010 a, b; Serrano y Pérez, 2010). El proceso de obtención

de los agregados puede alterar las características de los mismos así como también el comportamiento de la interfase agregado-pasta comprometiendo de esta forma las propiedades mecánicas de la mezcla final.

La valoración del comportamiento mecánico de una mezcla de concreto se hace mediante pruebas de resistencia a compresión y otras propiedades físico mecánicas como el Módulo de Elasticidad (E_c) (Serrano y Pérez, 2010). La resistencia a la compresión se verifica mediante la preparación de especímenes de concreto ensayados a los 7, 14 y 28 días después de fraguada la mezcla, según los criterios definidos por la norma Técnica Colombiana 673. El módulo de elasticidad estático (E_c), entre tanto, se determina a través de la prueba estándar de compresión definida en la Norma ASTM C469, en la cual se recomienda la preparación de cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, los cuales son sometidos a una carga axial incrementada gradualmente hasta que el cilindro de concreto falla (Serrano y Pérez, 2010).

El módulo de elasticidad del concreto (E_c) es utilizado por los calculistas en diseños estructurales para estimar las derivas y las deflexiones a que puede estar sometida una construcción. Por lo tanto, errores en el valor utilizado del módulo de elasticidad del concreto aumentan la incertidumbre en la estimación de la rigidez de los distintos elementos de la estructura (Cadoni et al., 2001). Se han desarrollado varios estudios para definir las ecuaciones para el cálculo del E_c siendo el procedimiento más común, la estimación de E_c como función de la resistencia a la compresión (Chen et al., 2003; Hernández, 2005; Ruiz et al., 2007; Serrano y Pérez, 2010). En el caso colombiano, la actual norma sismoresistente (NSR-2010) establece la expresión $E_c=4,700\sqrt{f'_c}$ (MPa).

Escombros de la construcción

La generación de residuos es tan antigua como el mismo ser humano y la producción de los mismos está particularmente relacionada con el nivel de ingreso (Murillo, 1995; LeRoy, 2005; Serrano, 2010a). Así mismo, la cantidad y composición química y física de los residuos tiene un comportamiento acorde con la evolución cultural y el desarrollo tecnológico

de las comunidades (Cadena, 1995; Dominique de Suremain, 1995; Jaramillo, 1995; Madrid y Peláez, 1995). En el caso de las obras civiles, las actividades de construcción, remodelación y demolición de edificaciones, vías y puentes y otras estructuras, generan gran cantidad de residuos, que son identificados como escombros. Parte de estos escombros pueden re-usarse o reciclarse (Ministerio del Medio Ambiente, 1995; Serrano y Pérez, 2011).

Existen varios estudios relacionados con el aprovechamiento de escombros, disminuyendo de esta forma la disposición incontrolada de grandes volúmenes de este material que en su mayoría es de naturaleza sólida e inerte (DAMA, 1998; Contacto PML, 2009; Quaranta y otros, 2009). Algunos resultados de estos estudios han mostrado resultados favorables cuando los escombros son utilizados en la producción de concreto. Ejemplo de ello son los trabajos adelantados en Medellín (Colombia) en donde los escombros han sido utilizados para producir concreto y otros subproductos aplicables a la construcción (Lopes y Rieradevall, 2004). Casos exitosos relacionados con el aprovechamiento de escombros, son los evidenciados en Fortaleza (Brazil) en donde la comunidad se ha involucrado en el proceso de selección de los escombros in situ, facilitando el re-uso de estos residuos (Lopes y Rieradevall, 2004). Así mismo, países como Chile (Sabater y Carvajal, 2003; Montemurro y Opazo, 2007) y España (Carratala y Scholtus, 2009) han desarrollado programas de gestión integral de

escombros que han favorecido el reuso de los mismos en la industria de la construcción.

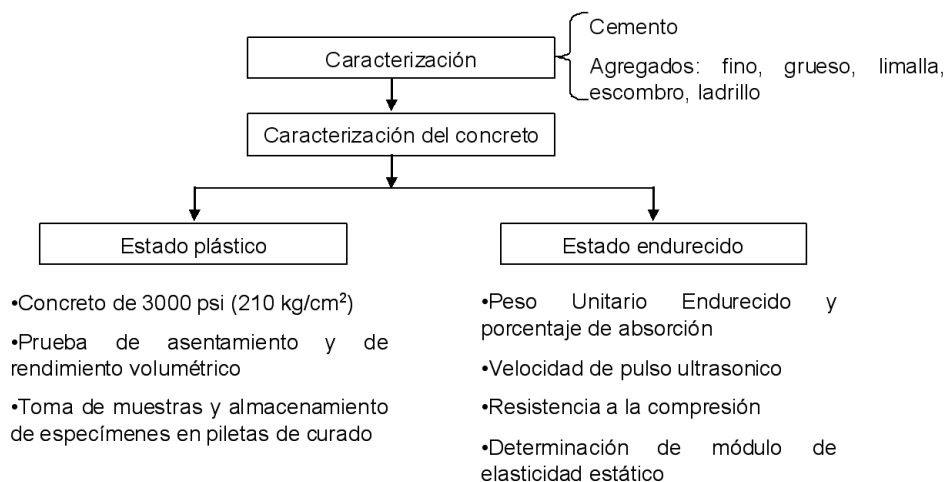
Producción de limalla

La limalla es un residuo industrial proveniente del clúster metalmeccánico. Para efectos del presente trabajo, éste residuo fue suministrado por la industria LAVCO Ltda., ubicada en la vía a Piedecuesta (Colombia). Este residuo surge de la producción de camisas para motores, es un residuo inorgánico potencialmente reciclable, y se puede encontrar con diferente forma y tamaño dependiendo de la etapa productiva de donde provenga (Bautista y Parra, 2010).

Metodología

Las mezclas de concreto requieren la selección previa de los materiales, así como también la definición de una relación agua/cemento que responda a un asentamiento y a una resistencia de diseño (Serrano y Ferreira, 2009; Bautista y Parra, 2010; Serrano, 2010). En el caso de mezclas con agregados no convencionales, se requiere una caracterización cuidadosa de los mismos con el fin de definir aquellos que se pueden utilizar para la preparación de la mezcla. El procedimiento a seguir para diseñar una mezcla de concreto con agregados no convencionales se resume en la figura 1.

Figura 1. Metodología seguida en el estudio



Caracterización de los escombros y limalla

Los agregados naturales son usualmente caracterizados en parámetros como granulometría, masa unitaria, gravedad específica, resistencia química y humedad natural y absorción, atendiendo a las normas técnicas colombianas establecidas para estos ensayos. En el caso de agregados no convencionales, como los escombros y la limalla, es necesario caracterizarlos con el fin de verificar el cumplimiento de las propiedades para su uso en mezclas de concreto.

Preparación del diseño de mezcla con agregados no convencionales

Los resultados de la caracterización relacionados con la masa unitaria seca y compacta de diferentes proporciones de agregado grueso y fino naturales, y las proporciones de agregado seleccionado de la escombrera, de ladrillo y de limalla son utilizadas para llevar a cabo en el laboratorio el ensayo de determinación de masa unitaria resultante de la combinación de agregados según la mezcla en proporciones de cada uno.

El diseño de la mezcla se hizo considerando un diseño para una resistencia a la compresión de 3000 psi, 210 Kg/cm². Para ello fue necesario determinar previamente el tamaño máximo del agregado, el módulo de finura, la humedad de los agregados, la masa unitaria seca y compacta, los contenidos de agua y cemento, las condiciones de exposición del elemento y la resistencia. Las relaciones agua/cemento A/C que se comparan en este artículo fueron 0.4 y 0.45.

Propiedades para evaluar el concreto en estado endurecido

Las propiedades consideradas para caracterizar el concreto en estado endurecido fueron peso específico endurecido, resistencia a la compresión de concreto (NTC-673) y módulo de elasticidad estático. Estas propiedades se evaluaron a los 28 días, que es el tiempo en el que se considera que la mezcla ha adquirido la resistencia máxima. Para determinar el peso unitario de las muestras de concreto se determina el peso en estado seco, superficialmente seco internamente saturado (SSS) y peso sumergido en agua (Figura 2).

Figura 2. a) Espécimen de concreto sumergido en agua para peso sumergido, b) Proceso de secado manual para estado SSS del espécimen de concreto, c) Peso seco del espécimen de concreto



El ensayo de resistencia a la compresión (NTC-673) se hizo aplicando una carga a una velocidad entre 0,14–0.34 MPa/s hasta llevar la muestra a la falla.

Los escombros generados luego de la rotura de los cilindros se disponían en los sitios de acopio para su posterior uso.

Resultados

Respecto a los materiales pétreos se observó que la distribución granulométrica de la limalla y de los escombros presenta un comportamiento similar a la granulometría de los agregados naturales; así mismo, se observó que todos los agregados utilizados se aproximan a las curvas ideales tanto para agregados gruesos como para agregados finos (figuras 3 y 4). Adicionalmente, se encontró que los materiales analizados cumplen con la Norma Técnica Colombia NTC-174, la cual define las características de gradación y contenido de materia orgánica que deben cumplir los agregados para concreto (Tabla 1). En cuanto al cemento, se obtuvieron los valores del peso específico PE del cemento, valor que osciló entre 2.85

y 3.1 g/cm³, que es el PE del cemento comúnmente utilizado en obra.

Los resultados preliminares muestran que la adición de limalla y escombros a la mezcla de concreto genera aumento de la resistencia requerida del concreto del concreto (210kg/cm²) (tabla 2). Se observó adicionalmente que mezclas de concreto preparadas con 40% de arena, 50% de agregado grueso y 10% de escombros, con una relación A/C de 0.4, están reportando resistencias 6.5% superiores a la resistencia requerida. Adicionalmente, para los materiales pétreos utilizados (40% arena y 60% triturado) la relación A/C de 0.45 arrojó mejores resultados de resistencia que la relación 0.4 (tabla 2).

Figura 3. Curvas granulométricas de los agregados gruesos (naturales, no convencionales y la curva ideal promedio)

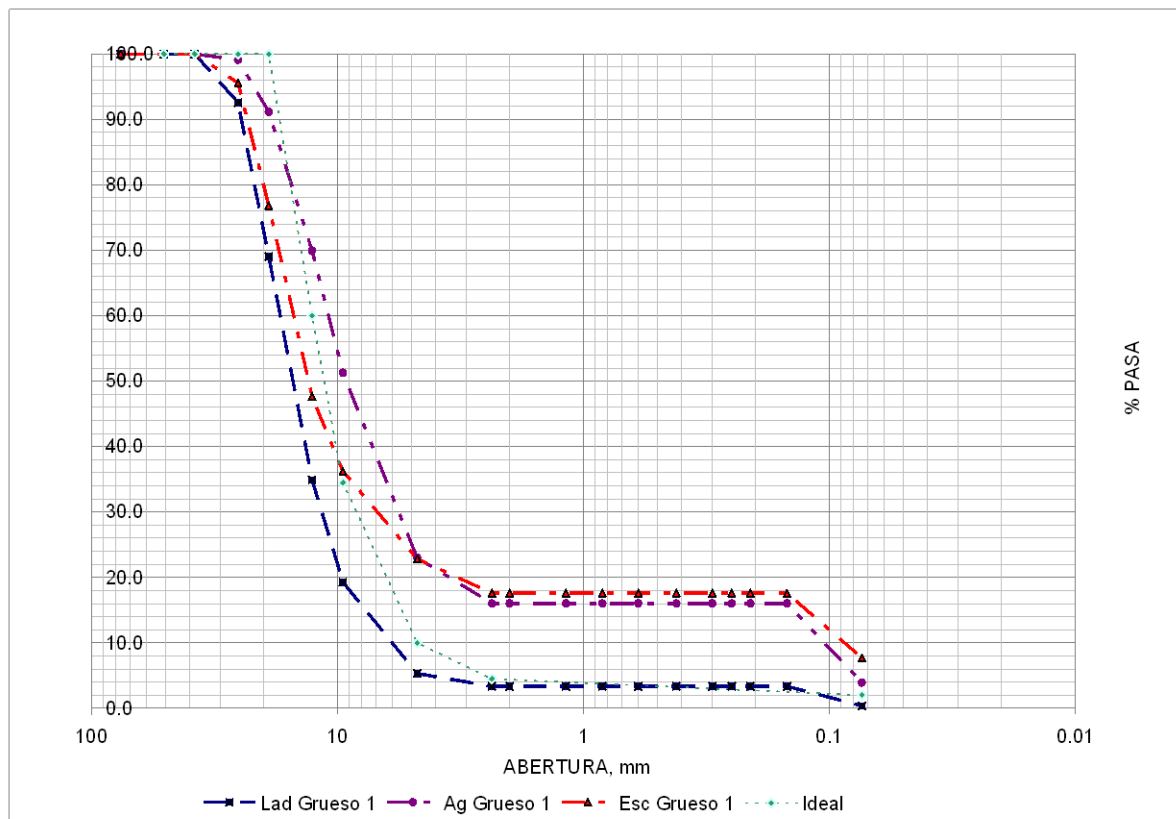


Figura 4. Curvas granulométricas de los agregados finos (naturales, no convencionales y la curva ideal promedio)

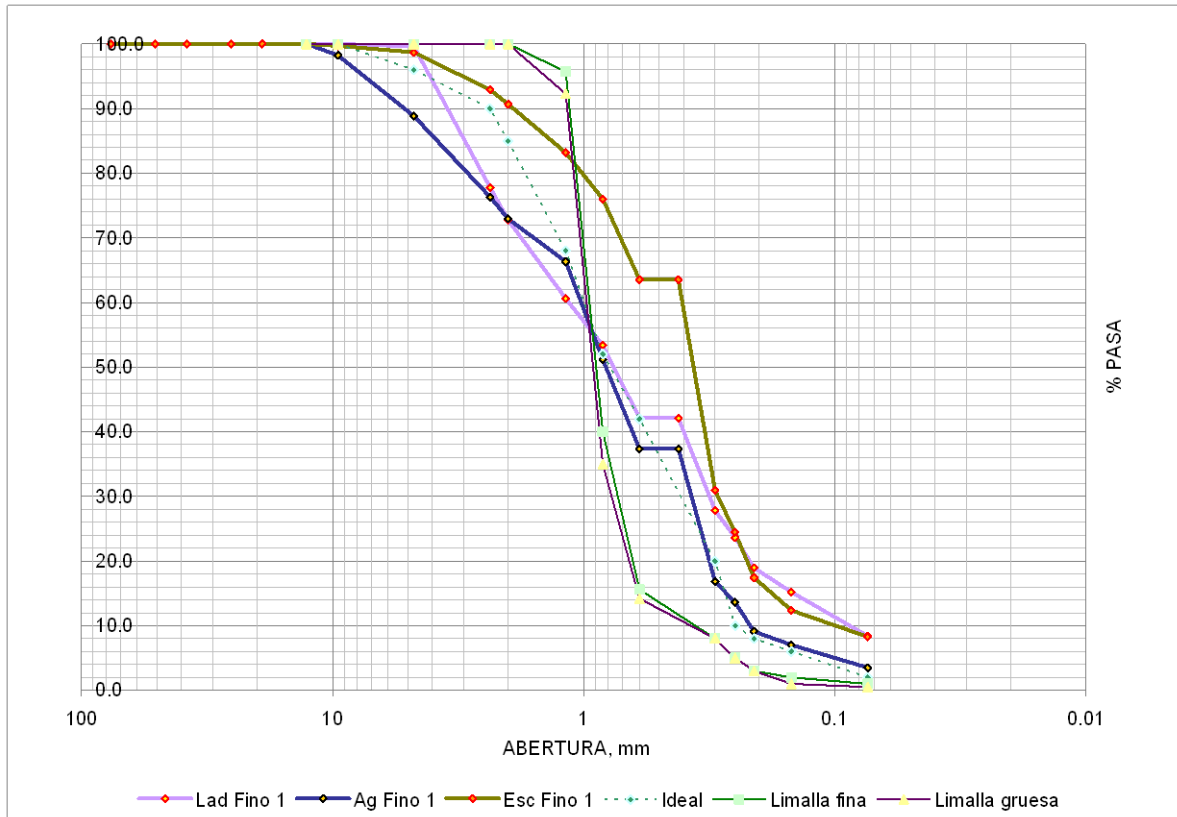


Tabla 1. Caracterización mecánica de los agregados naturales y no convencionales

ENSAYOS REALIZADOS		MUESTRA DE ENSAYO							NORMA
		AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO	ESCOMBRO GRUESO	LADRILLO FINO	LADRILLO GRUESO	LIMALLA FINA	LIMALLA GRUESA	
Porcentaje de material fino que pasa el tamiz de 75µm (No. 200) en los agregados (%)		2.2	3.5	7.6	7.8	0.2	0.1	0.1	INV E-214-07 NTC 78
Porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable (%)		4.4	0.2	0.4	1.8	0.3	No posee	No posee	INV E-211-07 NTC 589
Contenido aproximado de materia orgánica. Método con escala de vidrio de colores de referencia		3	-	-	0	-	No posee	No posee	INV E-212-07 NTC 127
Gravedad Específica (g/cm³)	Gravedad específica aparente 23/23°C	2.69	2.62	2.56	2.61	2.53	5.30	5.39	INV E-222-07 INV E-223-07 NTC 237 NTC 176
	Gravedad específica bulk S.S.S 23/23°C	2.56	2.58	2.36	2.29	2.15			INV E-222-07 INV E-223-07 NTC 237 NTC 176
	Gravedad específica bulk 23/23°C	2.48	2.55	2.24	2.09	1.90			INV E-222-07 INV E-223-07 NTC 237 NTC 176
Porcentaje de absorción (%)		3.1	1.1	5.6	9.6	13.1	No absorbe	No absorbe	INV E-222-07 INV E-223-07 NTC 237 NTC 176
Porcentaje de desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles (%)		-	38.0	41.3	-	93.4	No aplica	No aplica	INV E-218-07 NTC 98
Masas Unitarias (g/cm³)	Suelta	1.5	1.4	1.2	1.2	1.0	2.5	2.4	INV E-217-07 NTC 92
	Compacta	1.6	1.5	1.3	1.3	1.1	2.4	2.4	INV E-217-07 NTC 92

Tabla 2. Resultados de los ensayos a compresión

Mezcla	Proporciones de agregados en porcentaje						A/C	Resistencia (Kg/cm ²)	
	Arena	Triturado	Ladrillo Fino	Ladrillo Grueso	Escombros grueso	Limalla fina			Limalla gruesa
Mezcla 1	30	60		10				0.4	169.92
Mezcla 2	20	70			10			0.4	153.97
Mezcla 3	30	60	10					0.4	190.12
Mezcla 4	40	50			10			0.4	223.56
Mezcla 5	40	44			10		6	0.4	302.09
Mezcla 6	40	44			10		6	0.45	297.8
Mezcla 7	23	61			10	6		0.4	306.74
Testigo	40	60						0.45	248.74
Testigo	40	60						0.4	200.68

El módulo de elasticidad fue medido en la mezcla cuya adición incluyó la limalla por disponibilidad del equipo al momento de la elaboración de los especímenes de concreto. Se observó que el módulo de elasticidad medido experimentalmente en las mezclas 6 (40% fino, 44% Grueso, 10% Escombros y 6% Limalla gruesa) y 7 (23% fino, 61% Grueso, 10% Escombros y 6% Limalla fina) comprueban

que la calidad de los agregados está impactando positivamente la calidad mecánica del concreto (Tabla 3). En las mezclas 6, 7 y la testigo con A/C 0.45 presentaron valores de E_c sobreestimados, entre tanto que la mezcla 5 (40% fino, 44% Grueso, 10% Escombros y 6% Limalla gruesa A/C 0.4), los valores estimados por el NSR-10 están por debajo del E_c de los valores calculados según el código.

Tabla 3. Resultados de los ensayos a compresión

	Ec Medido	Ec calculado	
Mezcla	Kg/cm²	kg/cm²	% Error
Mezcla 5	229,228.33	258,322.62	-11.26
Mezcla 6	306,940.26	256,483.96	19.67
Mezcla 7	304,750.00	260,305.33	17.07
Testigo	295,789.00	234,404.70	26.19

Conclusiones

La caracterización mecánica de los escombros de demolición de concreto y la limalla muestran que estos agregados no convencionales pueden ser utilizados para preparación de mezclas de concreto. Se destaca que los escombros derivados del concreto presentan gravedades específicas similares a las gravedades específicas de los agregados naturales, mientras que la limalla presenta valores mayores; lo anterior puede explicarse en razón a las características metálicas de este material resultante de la fusión a altas temperaturas de la limadura de hierro, lo cual le confiere una mejor acomodación de las partículas que la conforman aumentando con ello la gravedad específica.

Para el diseño de mezclas de concreto se utilizó el criterio del menor porcentaje de vacíos en las

cantidades de los agregados. Tanto en la mezcla preparada con escombros como la mezcla preparada con escombros y limalla el porcentaje de vacíos de los agregados osciló entre 30 y 42%, y que en las proporciones evaluadas en este estudio la resistencia del concreto estuvo por encima del valor de la resistencia del concreto normal (210 kg/cm²). La mezcla 7 (23% fino, 61% Grueso, 10% Escombros y 6% Limalla fina A/C 0.4) y la mezcla 4 (40% fino, 50% Grueso, 10% Escombros A/C 0.4) presentaron valores de resistencia a compresión superiores a los valores requeridos en la mezcla original (210 kg/cm²). Los resultados preliminares de este estudio permiten concluir que la adición de limalla y escombros permite un aumento de la resistencia del concreto y un aprovechamiento de dos residuos sólidos provenientes de actividades industriales.

La determinación del E_c experimental en los especímenes que fueron preparados con escombros y limalla arrojó errores frente a los valores estimados con el código colombiano de construcciones sismo-resistentes NSR-2010. Sin embargo, es recomendable replicar el estudio incrementando el número de muestras mejorando las técnicas seguidas en el laboratorio para aumentar la confiabilidad en la técnica utilizada.

Los escombros que se seleccionaron, ladrillo y residuos de demolición y la limalla son agregados no convencionales que fueron utilizados para la preparación de concreto para adoquines. Esto refuerza la posibilidad de uso de este tipo de materiales en aplicaciones constructivas. Además, la utilización de estos residuos se perfila como una alternativa ambiental y próspera de la cual se pueden beneficiar un grupo numeroso de personas que podría encargarse de la separación *in situ*.

Así mismo, tanto el concreto producido con escombros como el concreto producido con escombros y limalla presentan una disminución en costos del concreto en obra. Esto demostró, que el aprovechamiento de residuos sólidos inertes representa un beneficio ambiental que conlleva a ahorros para la empresa. El uso de agregados no convencionales (residuos industriales inertes como escombros y limalla) es una práctica factible en la la preparación de concretos.

La propuesta es la utilización de estas mezclas en andenes y sardineles, y una vez perfeccionada la dosificación probar la mezcla a nivel estructural (cortante, esfuerzo cortante y torsión).

Es importante destacar que la alternativa de uso de la limalla fue una propuesta de la empresa LAVCO Ltda. De esta manera se consolidó un proyecto en el cual la interacción empresa-universidad contribuyó al progreso de la industria de la construcción mediante el aporte de dosificaciones de agregados en mezclas de concreto.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Rector de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga Monseñor Primitivo Sierra Cano, al Dr. Luis Felipe Casas R., a los Ing. Juan Sebastian Ferreira, Maria Alejandra Bautista y Katty Milena Parra por su colaboración en el trabajo de laboratorio y al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana. Igualmente, a la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y a la empresa LAVCO Ltda., en Santander. Agradecimientos especiales a la Pontificia Universidad Javeriana de Cali por facilitar la réplica de estos estudios.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Santa Fé de Bogotá (1998). Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), Guía Técnica para el Manejo de Escombros de la Construcción, Bogotá.
- Al-Rousan T.; Masad, E. Tutumluer, E. & Pan, T. (2007). Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics, *Journal of Construction and Building Materials*. Vol. 21, pp. 978-990.
- ASTM 125 (2009). Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates.
- ASTM (1994). Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. Ed. Klieger, P. y Lamond, J.F. pp. 630.
- ASTM C469 (1994). Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression, pp. 630. DOI: 10.1520/C0469-02E01, www.astm.org
- Bautista M.A. y Parra, K. (2010). Diseño de una mezcla de concreto utilizando residuos industriales y escombros. Tesis de grado. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Cadoni, E.; Labibes, K.; Berra, M.; Giangrosso, M. & Albertini, C. (2001). Influence of aggregate size on strain-rate tensile behavior of concrete. *ACI Materials Journal*, Technical Paper, May- June, pp. 220-223.
- Carino N.J. (1994). Nondestructive testing of concrete: History and Challenges. American Concrete Institute, ACI SP-144, Detroit, MI, pp. 623-678.
- Cadena, Amparo (1995). Aspectos técnicos en el manejo de los residuos sólidos. Hacia un pacto limpio. Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, pp. 237.

- Carratala, S. y P. Scholtus (2006), Reciclando escombros. R3 Project. Consultado en Junio de 2009 en <http://r3project-castellano.blogspot.com/2006/06/reciclando-escombros.html>
- Chen, How-Ji; Yen, Tsong & Chen, Kuan-Hung (2003). Evaluating elastic modulus of lightweight aggregate. *ACI Materials Journal*, technical paper. Vol. 100, Issue 21, pp. 108-113.
- Contacto PML (2004), Recuperación, reciclaje y reintegración de escombros. Boletín trimestral. May-July. Año 6, No. 20, pp. 9. Consultado en junio de 2009 en www.cnpml.org/html/archivos/Boletines/.
- Dominique de Suremain, Marie (1995). La participación de las organizaciones no gubernamentales en el manejo de los residuos sólido y el reciclaje. Hacia un pacto limpio. Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, pp. 237.
- Ferreira, J.S. (2009). Aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto. Tesis de grado, Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, pp.117.
- Hernandez A. (2005). Determinación de los módulos de elasticidad del concreto producido con los diferentes materiales existentes en Bucaramanga y su área metropolitana. Tesis de grado, Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.
- Jaramillo, G. A. (1995). Que nada ni nadie sea desecho: aspectos educativos en el manejo de residuos sólidos. Hacia un pacto limpio. Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, pp. 237.
- Leroy, J.B. (2005). Guía para la elaboración de un proyecto de tratamiento de residuos urbanos. *Residuos*, Vol. 82, julio-agosto, pp. 46-64.
- Lopes de Oliveira, José Danilo y Rieradevall, Joan (2004). Reciclaje de residuos sólidos urbanos en Fortaleza (Brasil). *Residuos*. Vol. 79, pp. 160-168.
- Madrid G. y L. Peláez (1994). La mampostería de concreto en la vivienda de interés social en Colombia. Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Vol. 558, serie 5, N°. 558.
- Ministerio del Medio Ambiente (1995). Guía técnica para el manejo de escombros en las obras de construcción. Unidad de Soporte para el Control de la Contaminación Industrial, Bogotá.
- Montemurro, A. M. y Opazo, N. (2007). Chile - La importancia de educar para reciclar. Organización de Estados Iberoamericanos, OEI. Consultado en junio de 2009 en www.oei.es/noticias/
- Murillo, Everardo (1995). Para un sistema eficaz de recolección de residuos en los proceso de comercialización. Hacia un pacto limpio. Reunión sobre manejo de residuos sólidos y reciclaje, Bogotá, Ministerio de Medio Ambiente, pp. 237.
- NSR-10 (2010), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10. Bogotá D.C., pp. 1625.
- Quaranta, N. M.; Caligaris, H.; López y Unsen, M. (2009). Uso de residuos de construcción y demolición cuando contienen sustancias peligrosas, Grupo de Estudios Ambientales. Facultad Regional San Nicolás. Universidad Tecnológica Nacional. Colón 332, San Nicolás, Argentina.
- Ruiz Valencia, Daniel; Vacca G., Hermes A. y León Neira, María (2007). Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, N°. 67, pp. 7-15.
- Sabater, J. y Carvajal, C. (2003). Diagnóstico del sector de la recuperación de madera en España. *Residuos*. Vol. 71, pp. 110-113.
- Serrano, M. F. (2010a). Elaboración de adoquines utilizando escombros como una proporción del agregado grueso. Reporte de Investigación financiada por la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Serrano, M. F. (2010b). Influencia de las propiedades mecánicas de los agregados en el módulo de elasticidad del concreto. Reporte de Investigación financiada por la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Serrano, M.F. y Pérez, D.D. (2010). Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*. Vol. 2, N°. 1, Julio – Diciembre, pp. 17- 30.
- Serrano, M.F. y Pérez, D.D. (2011). Use of recycling materials to build paver blocks for low volume roads in developing countries. *Journal Transportation Research Record*. Publisher: Transportation Research Board of the National Academies, July.

Sobre los autores

Maria Fernanda Serrano Guzman

Ingeniera Civil de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Especialista en Gerencia de Proyectos de Construcción de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Especialista en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga. Magíster en Ingeniería en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico, Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico. Desde el 2009 es la Directora General de Investigaciones de la

Universidad Pontificia Bolivariana y es docente de la Facultad de Ingeniería Civil.

Diego Dario Pérez Ruiz

Ingeniero Civil de la Universidad del Cauca, Magíster en Ingeniería de Tránsito y Transporte de la Universidad del Cauca, Master en Ciencias en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico, Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Texas en Arlington. Actualmente Profesor Asistente de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.