

Empleo de residuos de la construcción civil como áridos reciclados. Producción de bloques de hormigón

Recycled construction debris as an aggregates. Production of concrete blocks

J. G. G. SOUSA; E. BAUER; R. M. SPOSTO

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidad de Brasília

Fecha de recepción: 18-XII-02

Fecha de aceptación: 20-V-03

BRASIL

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es contribuir en la producción de bloques de hormigón para muros de albañilería mediante el aprovechamiento de áridos provenientes del reciclaje de residuos de la construcción civil. Los estudios preliminares tuvieron inicio con la definición de los parámetros de mezcla para los materiales convencionales (tradicionalmente utilizados en la construcción de bloques de hormigón), donde se emplearon probetas cilíndricas (100x200 mm), moldeadas con la ayuda de una mesa vibratoria. Cumplidas estas definiciones, se estableció un rango granulométrico a partir de las composiciones de mejores resultados, donde se buscó ajustar la granulometría de los áridos reciclados. Concluidos los estudios preliminares, se moldearon los bloques de hormigón con dimensiones (100x190x390 mm). Los estudios presentan como resultado el comportamiento relativo a la humedad de moldeado, masa específica, absorción de agua y resistencia a la compresión, frente a las variaciones en el porcentual del material reciclado en la composición del árido total. Por lo general, los resultados señalan las potencialidades del árido reciclado para su utilización en la producción de bloques de hormigón o de cualquier elemento premoldeado.

SUMMARY

This paper analyzes the use of recycled construction and demolition debris as aggregate for the construction of concrete blocks to be used in sealing masonry. Initial studies addressed the definition of parameters used in the mix of conventional materials (traditionally used in the production of concrete blocks), involving cylindrical test specimens (100x200 mm), molded with the help of a vibratory table. In addition to these definitions, and based on the mixes showing the best results, a new granulometric range was established, against which the granulometry of the recycled aggregates was adjusted. After the initial studies, concrete blocks were molded with the following dimensions: 100x190x390 mm). Studies have determined the behavior of aggregates in relation to mold humidity, specific mass, water absorption, and compression resistance in view of the percentage of recycled debris that composes the total aggregate. For the most part, results suggest that construction and demolition debris can potentially be used in the production of concrete blocks, as well as in other pre-molded artifacts.

PALABRAS CLAVE: reciclaje de escombros, áridos reciclados, bloques de hormigón.

KEYWORDS: debris recycling, recycled aggregates, concrete blocks.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de componentes premoldeados de hormigón, a partir de la utilización de áridos reciclados de residuos de construcción se presenta como una

1. INTRODUCTION

The production of pre-molded concrete artifacts from recycled construction and demolition debris has been getting attention as a potentially more rational way to

propuesta potencial de destino racional para este tipo de residuo. Tal hecho se ve impulsado por diversos proyectos de plantas de reciclaje de residuos establecidos en las grandes ciudades, principalmente en aquellas que sufren con los problemas de generación de este tipo de residuo (1). No obstante, es evidente que, en la mayoría de las veces, los procesos de utilización de los áridos reciclados no están acompañados de estudios de carácter científico y tecnológico que señalen sus reales potencialidades de utilización, contribuyendo para la inviabilidad del proceso de reciclaje y de sus posibles aplicaciones (2).

Son pocos los estudios, hasta ahora, que plantean la producción de bloques de hormigón con árido reciclado. Además de las aplicaciones empíricas desarrolladas con propósitos específicos por algunas administraciones de ciudades, hay que poner de relieve el estudio desarrollado por De Pauw (3) y Pollet (4), una de las pocas publicaciones, de carácter técnico y científico, que evaluó el potencial de utilización de los áridos reciclados en la producción de bloques de hormigón. Por lo que se dijo, este trabajo presenta el objetivo de contribuir con las demás investigaciones hechas sobre el reciclaje de residuos, evaluando, específicamente, cómo dichos áridos pueden influir sobre el proceso de producción de bloques de hormigón, así como sobre las propiedades de estos elementos premoldeados.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

El cemento y los áridos de las series de referencia (Áridos A y B) fueron definidos en función de los materiales utilizados tradicionalmente en la producción de bloques de hormigón en la región de Brasilia (Brasil), es decir: Cemento CP II F32 (clasificación brasileña -Cemento Portland Compuesto con Filler), Áridos A -arena natural lavada de río y Árido B -roca caliza machacada con alto contenido en finos. Las muestras de residuos de construcción fueron escogidas en una cantera de obras de un edificio multipisos. Después, el material fue sometido a un proceso de trituración y criba hasta la obtención de áridos con un tamaño máximo equivalente al árido B. El residuo estaba compuesto por bloques de hormigón (25%), ladrillos (15%), mortero de revestimiento (35%), hormigón estructural demolido (15%) y un considerable contenido en suelo (10%), composición ésta identificada, en gran medida, visualmente.

La Tabla 1 presenta una síntesis de las propiedades de los materiales utilizados a lo largo de la investigación. La distribución granulométrica de los áridos se encuentra en la Figura 1.

dispose of such residues. The trend is pushed further in view of several projects currently in progress dealing with the installation of recycling plants in major urban centers, especially those where the accumulation of debris is particularly problematic (1). It is clear, however, that in most cases the process applied to the use of recycled debris lacks the necessary scientific and technologic studies that would be required to demonstrate the actual possibilities of application, which usually tends to render unviable the process of recycling and its potential applications (2).

At present, only a handful of studies address the issue of concrete block production from recycled aggregate. Beyond the empirical applications developed by the initiative of local authorities, the studies by De Pauw (3) and Pollet (4) stands out, as some of the few publications of scientific and technical value aimed at assessing the potential use of recycled aggregates in the production of concrete blocks. In this sense, this paper should attempt to contribute to other research efforts on the recycling of residue, in particular by analyzing the way in which such aggregates may influence the production process of concrete blocks as well as what the properties of such pre-molded artifacts would be.

2. CHARACTERIZATION OF MATERIALS

The cement and the aggregates comprising the reference series (Aggregates A and B) were chosen according to the materials traditionally used in concrete block production in the Brasilia area (Brazil), namely CP II F 32 Cement (Brazilian classification -Portland Cement Composed with Filler), Aggregates A -natural river-washed sand and Aggregate B -ground limestone with a high rock dust content. Samples of construction and demolition debris were collected from the construction site of a multi-story building. Once collected, the material was submitted to a process of grinding and sifting, until an aggregate was attained in which the maximum particle size was equivalent to that of Aggregate B. On the whole, it was visually determined that the residue was composed of concrete blocks (25%), ceramic blocks (15%), mortar (35%), demolished structural concrete (15%) and a considerable amount of soil (10%).

Table 1 summarizes the features of the materials used in the research. The granulometric distribution of the aggregates is shown on Figure 1.

TABLA 1/TABLE 1

Ensayos de caracterización de los áridos
Tests of characterization of the aggregates

Propiedad / Property	Áridos utilizados en el experimento <i>Aggregates used in the study</i>			Método de ensayo <i>Essay method</i>
	A	B	Reciclado / Recycled	
Módulo granulométrico <i>Refinement module</i>	1,64	4,25	3,47	NBR 7217
Tamaño máximo <i>Typical maximum size</i>	2,4 mm	9,5 mm	9,5 mm	NBR 7217
Contenido de partículas pulverizadas <i>Pulverulent material content</i>	2,40 %	6,72 %	14,23 %	NBR 7219
Absorción de agua-granulometría <i>Water absorption-granulometry</i> < 2,4 mm	5,9 %	1,3 %	9,9 %	NBR 9777
Absorción de agua-granulometría <i>Water absorption-granulometry</i> > 2,4 e < 9,6 mm	-----	2,5 %	16,5 %	NBR 9937
Masa unitaria/ <i>Unitary mass</i>	1108 g/dm ³	1614 g/dm ³	1272 g/dm ³	NBR 7251
Masa específica/ <i>Specific mass</i>	2614 g/dm ³	2770 g/dm ³	2481 g/dm ³	NBR 9776
Sales solubles / <i>Soluble salts (%)</i> ⁽¹⁾			0,72	NBR 9917
Reactividad con álcalis / <i>Reactivity with alkalis</i>			no reactiva <i>doesn't reactivate</i>	NBR 9774
Actividad puzolánica con el cemento (%) <i>Index of pozzolanic activity with the cement (%)</i>			45,3 no puzolánica <i>doesn't pozzolanic</i>	NBR 5752
Metales, vidrio, asfalto (%) <i>Metals, glass, asphalt (%)</i>			0%	Visual

⁽¹⁾ Las pruebas para evaluar la presencia del cloruros y los sulfatos dieron negativos

⁽¹⁾ The tests to evaluate the chlorides and sulphates gave negative

NBR - Norma brasileña registrada

NBR - Brazilian registered norm

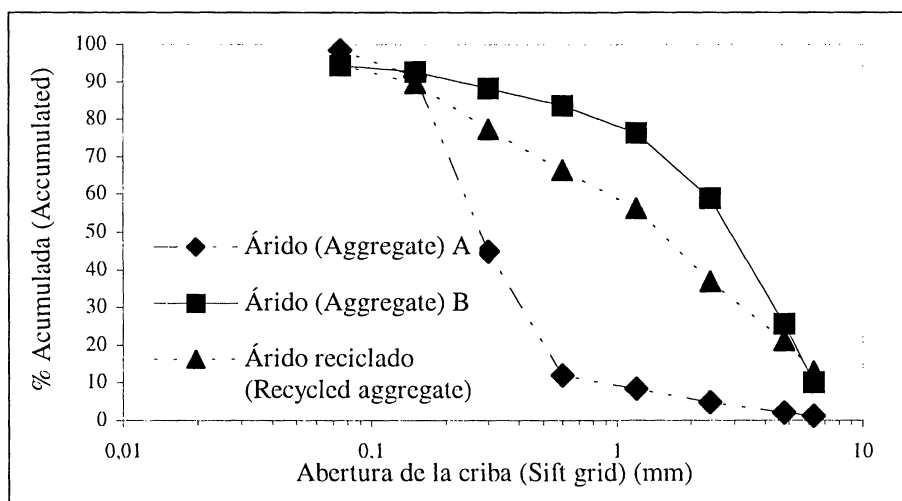


Figura 1.- Composición granulométrica de los áridos.

Figure 1.- Granulometric composition of aggregates.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental se basó en la necesidad de investigar los parámetros de mezcla y producción de bloques de concreto, además de averiguar cuáles composiciones serían evaluadas entre áridos reciclados y convencionales. Entre los distintos parámetros que interfieren en el proceso, se ha buscado poner de relieve aquéllos mencionados por la literatura sobre la producción de bloques de hormigón, destacándose (5-7).

– La consistencia del moldeado de los bloques, donde se buscó evaluar cuál es el contenido en humedad (humedad del moldeado) en la que la vibro-prensa ofrecería condiciones de moldeado de los bloques;

– La energía de compactación, definida a partir del tiempo necesario de funcionamiento de la vibro-prensa, para criterios relativos a la producción y a las propiedades de los bloques después que se retiren los moldes (relleno y compactación del material en los moldes de la vibro-prensa; textura de los bloques; resistencia de los bloques a la manipulación y transporte tras la retirada de los moldes; la productividad de las operaciones durante el proceso, por ejemplo);

– La composición granulométrica de los áridos, de tal modo que indicara un mejor ajuste entre las partículas.

Las composiciones definidas fueron evaluadas según las propiedades indicadas:

Humedad de moldeado

Definida a partir de experimentos previos de evaluación de la consistencia que permitieran condiciones de moldeado de los bloques en la vibro-prensa utilizada en el experimento. Para todos los compuestos la evaluación se llevó a cabo según los mismos criterios de consistencia;

Masa específica en estado endurecido

Transcurridas 24 horas del moldeado, se determinó la masa específica a partir de la simple división entre la masa de los elementos (probetas y bloques de hormigón) y sus respectivos volúmenes, según NBR 9778 -Argamasa y hormigón endurecidos determinación de la absorción de agua por inmersión, índices de vacíos y masa específica;

Absorción por inmersión en agua

En el caso de las probetas según la NBR 9778 Argamasa y hormigón endurecidos determinación de la absorción de agua por inmersión, índice de vacíos y masa específica y para los bloques de hormigón, según

3. EXPERIMENTAL PROGRAM

The experimental program stemmed from the need to investigate the mix and production parameters adopted, as well as which ratios of recycled and traditional materials should be evaluated. Among the several parameters influencing the process, emphasis was given to those usually found in literature as fit for the production of concrete blocks, of which the following stand out (5-7).

– The blocks' molding consistence, attention given to the humidity content (molding humidity) at which the vibrating press would be ready to mold the blocks;

– The compression energy, defined as a function of the working time required by the vibrating press for production-related criteria and the achievement of properties of the blocks after demolding (e.g.: adequate filling and compactation of materials within the vibrating press molds; block texture; resistance to handling and transport right after unmolding; productivity of operations during the process);

– Granulometric composition of aggregates as an indication of better accommodation among particles (packing).

The compositions defined were evaluated against the properties indicated:

Molding humidity

Defined based upon preliminary consistence evaluation studies that created the right conditions for molding the blocks in the vibrating table used in the study. All the compositions (both the ones used as reference and the recycled debris) were evaluated using the same consistence criteria;

Specific mass at hardened state

24 hours after molding the specific mass was determined from simple division between the mass of the elements (cylindrical test specimens and concrete blocks) and respective volumes, according to NBR 9778 -Hardened mortar and concrete, determining absorption by water immersion, vacuum index and specific mass;

Absorption by water immersion

For cylindrical test specimens, according to NBR 9778 -Hardened mortar and concrete, determining absorption by water immersion, vacuum index and specific mass and for concrete blocks,

NBR 13118 -Bloques vaciados de hormigón simples para albañilería -Determinación de la absorción de agua, del contenido de humedad y del área líquida;

Resistencia a la compresión

En el caso de las probetas según NBR 5739 -Ensayo para la compresión de las probetas de hormigón, y para los bloques de hormigón según NBR 7184 -Bloques vaciados de hormigón simples para albañilería -Determinación de la resistencia a la compresión;

En la definición de la consistencia de moldeado se ha tomado como referencia el ensayo definido por la norma ASTM C1170 (8). De acuerdo con la referida norma, la consistencia está establecida en función del tiempo que una muestra del material lleva para compactarse bajo determinada energía, en una mesa vibratoria (Figura 2a). El tiempo medido, expresado en segundos, es definido como tiempo *Vebe*. Este tiempo fue definido y fijado en 10 s (se llevaron en cuenta las configuraciones de la mesa vibratoria presentada en la Figura 2a), para todas las composiciones estudiadas.

Una gran parte de los estudios de definición de los parámetros de mezcla y evaluación de las propiedades se realizó en probetas cilíndricas (100x200 mm), moldeadas en una mesa vibratoria (Figura 2b), en condiciones de compactación similares a la vibroprensa utilizada en el moldeado de los bloques de hormigón (Figura 2c). Este proceder se ha escogido porque permite un mayor control sobre la variabilidad de los ensayos que caracteriza el experimento con bloques de hormigón (principalmente en los resultados de resistencia a la compresión y absorción de agua) (5-7), favoreciendo una discusión más criteriosa sobre los resultados.

El tiempo de compactación, en la mesa vibratoria, utilizado como parámetro durante el moldeado de las probetas fue de 25 s (conforme el procedimiento propuesto por Sousa (9)), tiempo éste definido en función del suministro de una energía de compactación equivalente a la desarrollada en la vibroprensa durante el moldeado de los bloques. El tiempo de moldeado de los bloques de concreto en la vibroprensa presentó una variación oscilante, entre los 10 y los 15 s.

Además, es menester resaltar que en ese estudio se ha hecho la opción por un proceso de curado en cámara húmeda (por ser un proceso corriente en la evaluación experimental de los hormigóns). Para todas las probetas y bloques de hormigón producidos a lo largo de la investigación se adoptó el mismo procedimiento de curado, es decir, transcurridas 24 horas del moldeado fueron almacenados en la cámara húmeda por un período de 7 días. Cuando se terminó este período, fueron sometidos, para examen, a la cámara de compresión axial y a la absorción de agua por inmersión.

according to NBR 13118 -Hollow blocks of simple concrete for use in masonry -Establishing of water absorption, of humidity content and of liquid area;

Compression resistance

for cylindrical test specimens, according to NBR 5739 -Study on the compression of concrete cylindrical test specimens. Concrete blocks according to NBR 7184 -Hollow blocks of simple concrete for use in masonry -Determining the resistance to compression.

In defining the molding consistence, the essay defined by norm ASTM C1170 (8) was used as a reference. According to the said essay, consistence is determined as a function of the time a material specimen takes to thicken under the effect of a certain energy on a vibrating table (Figure 1a). The time elapsed in seconds is defined as the Vebe time. This time variable was defined and fixed in 10 s (for the vibrating table seen on (Figure 2a), for all compositions studied.

A large part of the studies to defined mixture parameters and evaluate the properties was done on cylindrical test specimens (100 x200 mm), molded on a vibrating table (Figure 2b) in densification conditions similar to those of the vibrating press used in the molding of concrete blocks (Figure 2-(c)). This procedure was adopted because it allows for a greater control of the variability of the tests that characterize the study of concrete blocks (especially in the results of compression resistance and water absorption) (5-7), favoring a more sensible discussion of the results.

The densification time on the vibratory table that was used as a parameter during the molding of the test specimens was 25 s. (according to procedure proposed by Sousa (9)) this time period was established because it supplies a densification energy equivalent to that of the vibrating press during the molding of the blocks. The molding time of the concrete blocks on the vibrating press varied between 10 and 15 s.

It is necessary to point out that in this study a humid chamber curing process was chosen (for it is the usual procedure in experimental evaluation of concrete). The same curing procedure was used for all cylindrical test specimens and concrete blocks used during the study, this means that they were stored in a humid chamber for 7 days 24 hours after molding. At the end of this period the axial compression and the absorption by water immersion were tested (According to the methods presented in Table 2).

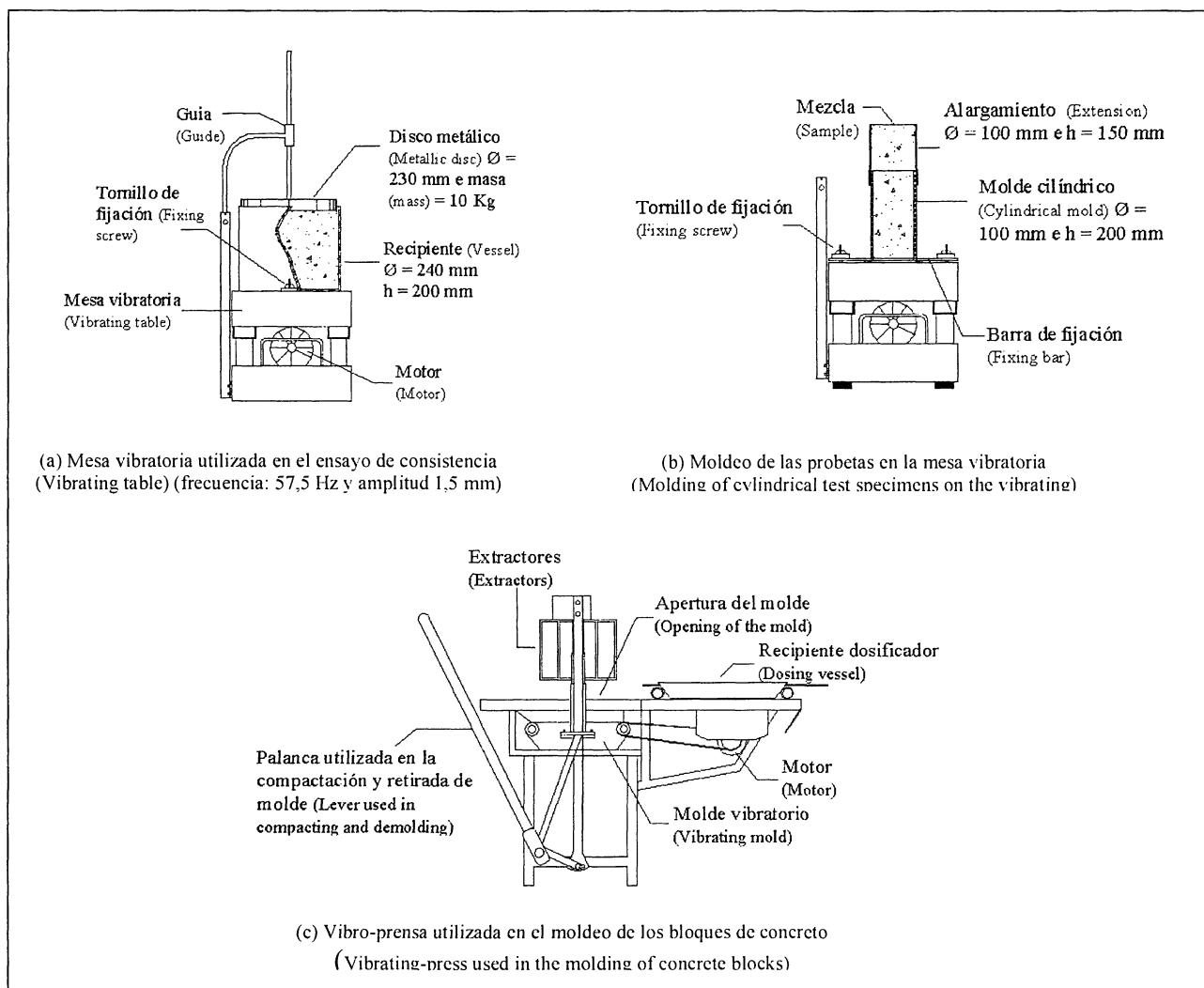


Figura 2.- Equipos utilizados durante el experimento.

Figure 2.- Equipments used during the study.

3.1. Definición de las series de experimentos

Las series de experimentos, en probetas y bloques de hormigón, evaluadas durante la investigación, están descritas en la Tabla 2. La composición de referencia fue definida en un estudio modelo donde se buscó establecer las composiciones (rango granulométrico) que proporcionaban resultados para las propiedades evaluadas en el estudio para los materiales convencionales, conforme descrito por Sousa (9). Todas las composiciones presentan una proporción cemento:árido en masa igual a 1:10.

El estudio en bloques de hormigón contempló, además, un análisis de la influencia de las partículas de árido reciclado inferiores a 2,4 mm en las propiedades de los bloques de hormigón (Serie BAEP10-20). En esta serie, dichas partículas fueron reemplazadas por el árido A (árido fino utilizado en las composiciones convencionales).

3.1. Defining the series of studies

The series, in cylindrical test specimens and concrete blocks, evaluated during the study are described in Table 2. The reference composition was defined in a pilot study in which an effort was made to establish which compositions (granulometric ranges) of conventional materials offered the best results for the qualities evaluated in the study, as described by Sousa (9). All compositions have cement: aggregate mass proportion equal to 1:10.

The study of concrete blocks also focused on an analysis of the influence of recycled aggregate particles of less than 2.4 mm in the properties of concrete blocks (BAEP10-20 series). In this series those particles were substituted by aggregate A (small aggregate used in conventional compositions).

TABLA 2/TABLE 2

Series de ensayos en probetas y bloques de hormigón
Tests series in cylindrical test specimen and concrete blocks

Composición / <i>Composition</i>		Series / <i>Series</i>	% Áridos / <i>Aggregates</i>		
			% A	% Reciclado <i>Recycled</i>	% B
Probetas <i>Cylindrical test specimens</i> (100x200) mm	Referencia <i>Reference</i>	CAP10-20	20	0	80
	Árido reciclado <i>Recycled aggregate</i>	CEP10-70	0	70	30
		CEP10-60	0	60	40
		CEP10-50	0	50	50
		CEP10-40	0	40	60
		CEP10-30	0	30	70
Bloques de hormigón <i>Concrete blocks</i> (100x190x390) mm	Referencia <i>Reference</i>	BAP10-20	20	0	80
	Árido reciclado <i>Recycled aggregate</i>	BEP10-30	0	30	70
		BEP10-50	0	50	50
		BEP10-20/40	20	40	40

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el proceso de moldeo de las probetas se ha identificado visualmente que la mezcla en estado fresco presentaba comportamientos distintos de los observados con materiales convencionales. Básicamente, las alteraciones se resumen a un mayor grado de cohesión entre las partículas que el observado en los materiales convencionales y a una cierta dificultad de compactación de la mezcla durante el moldeo de las probetas. Estos comportamientos se pueden justificar mediante consideraciones relacionadas con la naturaleza de la composición del escombro, donde se destacan:

- La presencia de un considerable contenido en suelo, conforme se ha afirmado anteriormente en la descripción de la composición del residuo.
- El alto índice de partículas pulverizadas, que se comprobó por el ensayo de caracterización (14,23%, Tabla 1);
- La estructura de gran parte de los áridos originarios del residuo, muy porosa, compuesta por morteros endurecidos y trozos de cerámica, con influencia directa sobre el valor de absorción de los áridos (9,9%, para partículas < 2,4 mm y 16,5%, para partículas > 2,4 mm, Tabla 1).

4.1. Resultados de las series del experimento modelo (probetas cilíndricas)

Los resultados individuales obtenidos a través de la evaluación de las series de datos en probetas se encuentran en la Figura 3.

4. RESULTS AND DISCUSSION

During the process of molding the cylindrical test specimens it was visually established that the mixture in its fresh state showed a different behavior than that observed in conventional materials. The differences basically refer to a greater degree of cohesion between the particles than that observed in conventional materials and a certain difficulty in the densification of the mixture during the molding of the test specimens. These behaviors can be justified by considerations referring to the composition of the debris, among them:

- The presence of a considerable amount of soils, as was established earlier in the description of the composition of the residue;*
- A high index of pulverulent material was determined through a characterization test (14.23% , Table 1);*
- The extremely porous structure of a large part of the aggregates of the residue, composed by hardened mortar and ceramic fragments, which directly influences the water absorption of the aggregates (9.9% for the particles < 2.4 mm and 16.5%, for the particles > 2.4 mm, Table 1).*

4.1. Results of the series of the pilot study (cylindrical test specimens)

The individual results obtained through the evaluation of the series of data in test specimens are in Figure 3.

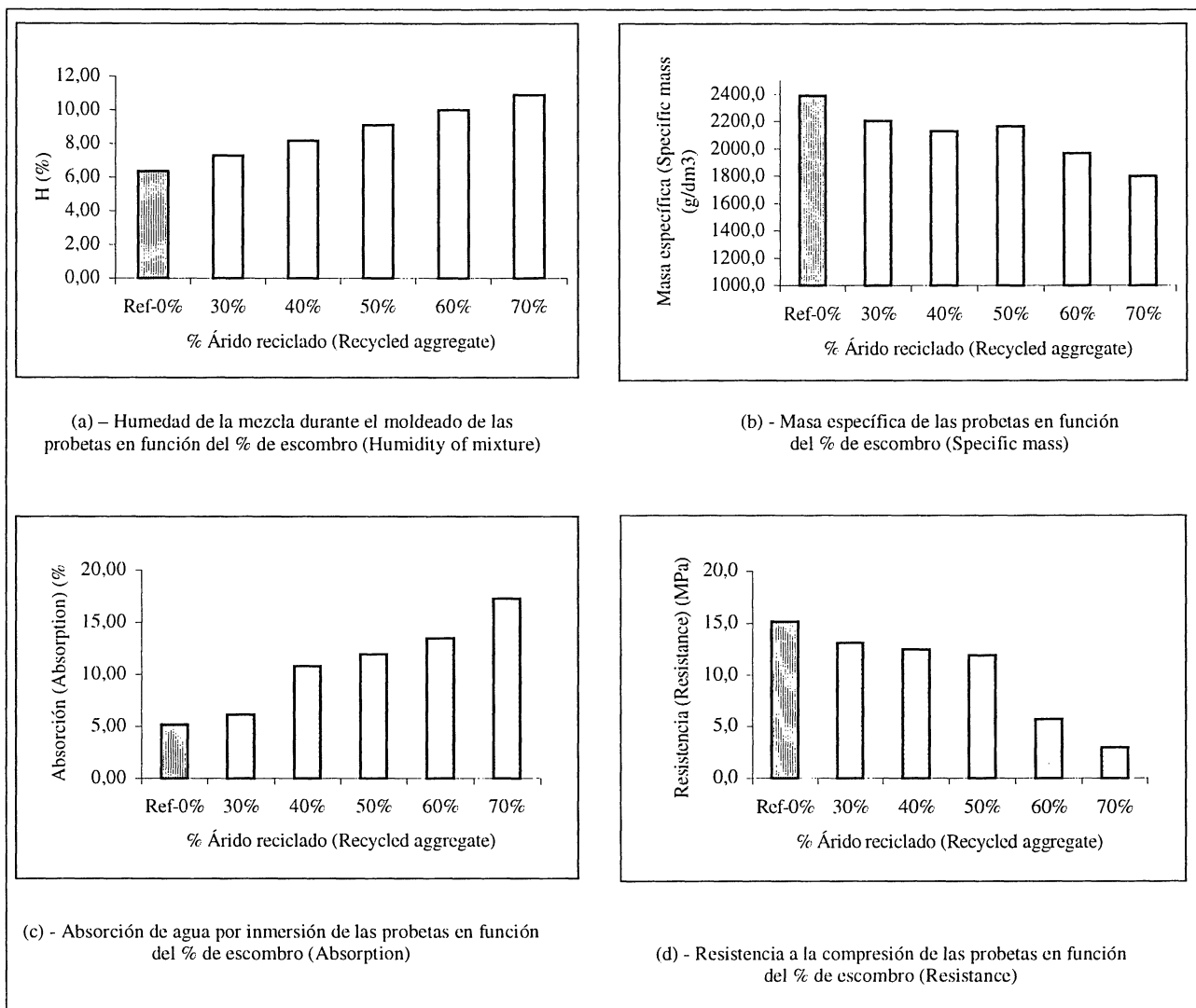


Figura 3.- Resultados individuales de las series de probetas.

Figure 3.- Individual results of the series in cylindrical test specimens.

4.1.1. Humedad de la mezcla durante el moldeo

La Figura 3a presenta los resultados de humedad de moldeo, obtenidos en función del porcentaje de árido reciclado en la composición. Los resultados señalan que la humedad necesaria para obtener una consistencia específica aumenta considerablemente con el aumento del porcentaje de ese material. Este comportamiento es evidente en las composiciones con un 70% de árido reciclado (CEP10-70), donde el contenido de humedad es casi el doble para la composición de referencia (CAP10-20). Esta diferencia tiende a disminuir, siempre que se disminuya el porcentaje de escombros reciclados en la composición. La naturaleza de las partículas constituyentes del árido reciclado puede estar influyendo directamente sobre esta tendencia.

4.1.1. Humidity of mixture during molding

Figure 3a presents the results of molding humidity obtained according to the percentage of recycled aggregate in the composition. The results show that the humidity necessary to obtain a given consistency increases considerably with the increase in the percentage of recycled aggregate. This behavior can be found in compositions containing 70% of debris (CEP 10-70), where the humidity level is almost double than those of reference compositions (CAR 10-20). This difference tends to decrease as the percentage of recycled debris used in the composition is reduced. This tendency may be directly influenced by the nature of the particles that compose the recycled aggregate.

4.1.2. Masa específica en estado endurecido

Para los resultados de masa específica (Figura 3b), la composición con 70% de áridos reciclados (CEP10-70) ofrece un valor extremadamente bajo una vez comparado con el resultado de referencia (CAP10-20). Cuando el porcentaje oscila entre un 30 y un 50% (CEP10-30 y CEP10-50), la masa específica tiende a acercarse a los valores obtenidos con materiales convencionales (CAP10-20). Este comportamiento se justifica por los siguientes factores:

- La masa específica del material reciclado es relativamente menor que la del árido B, por lo que, al sustituir el árido B por árido reciclado, la masa específica tiende a disminuir (Árido reciclado = 2.481 g/dm³ y Árido B = 2.770 g/dm³);
- Las dificultades de compactación de la mezcla (observadas durante el moldeado), afectadas por los mayores porcentajes de árido reciclado en la composición, presentan, como resultado directo, el aumento del volumen de vacíos y, por ende, la reducción de la masa específica.

4.1.3. Absorción por inmersión

Los resultados de absorción indican que las composiciones con mayor porcentaje de árido reciclado presentan un mayor índice de absorción de agua (Figura 3c). Los valores para las composiciones con 60 y 70% (CEP10-60 y CEP10-70), son aproximadamente dos veces el valor de referencia. Este influencia disminuye siempre que se reduzca el porcentaje de ese material en la composición. Para este caso, la absorción por inmersión se acerca a los valores obtenidos con la serie de referencia (CAP10-20). Se cree que los factores determinantes para este comportamiento sean idénticos a los descritos para los resultados de masa específica, agudizándose aún más por la naturaleza de las partículas constituyentes del escombros.

4.1.4. Resistencia a la compresión

Para los valores de resistencia (Figura 3d), se observa que el porcentaje de árido reciclado influye considerablemente en los resultados si comparados a los materiales convencionales. Este comportamiento es semejante al obtenido con los resultados de masa específica, ya discutidos anteriormente. Para las composiciones entre un 60 y un 70% (CEP10-60 y CEP10-70) los valores de resistencia se acercan a un 40 y un 20%, respectivamente, a los valores obtenidos con la serie de referencia (CAP10-20). Las composiciones que se encuentran en el intervalo entre el 30 y el 50% (CEP10-30 y CEP10-50), presentaron valores de resistencia próximos al valor obtenido con la serie de referencia.

A partir del análisis de los resultados se observa que contenidos entre el 30 y el 50% son potencialmente utilizables en sustitución a los áridos convencionales.

4.1.2. Specific mass in hardened state

The results of specific mass (Figure 3b) of the composition containing 70% of recycled aggregates (CEP 10-70) are very low compared to reference results (CAP 10-20). Whenever the percentage is around 30 to 50% (CEP 10-30 and CEP 10-50), the specific mass tends to be closer to the values obtained with conventional materials (CAP 10-20). This behavior is justified by the following factors:

- The specific mass of the debris is relatively smaller than that of aggregate B, so, upon substituting aggregate B by debris, the specific mass tends to decrease (recycled aggregate = 2481 g/dm³ and aggregate B = 2770 g/dm³);*
- The difficulty in the densification of the mixture (observed during molding), influenced by the greater percentages of debris in its compositions, resulting in an increase of vacuum volume and consequently in a reduction of specific mass.*

4.1.3. Absorption by water immersion

The absorption results indicate that the compositions with the highest percentage of recycled aggregate have a higher water absorption index (Figure 3c). The values for the compositions containing 60 and 70% (CEP 10-60 and CEP 10-70), are approximately two times those of reference values (CAP 10-20). It is believed that the factors that determine this behavior are identical to those described for specific mass, and are aggravated even more by the nature of the particles that constitute the debris.

4.1.4. Compression resistance

The debris percentage considerably influences the results of resistance values (Figure 3d) when compared to conventional materials. This behavior is similar to that obtained from the results of specific mass discussed previously. For compositions between 60 and 70% (CEP 10-60 and CEP 10-70), resistance values are close to 40 and 20% respectively of the values obtained from the reference series (CAP 10-20). The compositions in the interval between 30 and 50% (CEP 10-30 and CEP 10-50) show resistance values close to those obtained with the reference series.

Analyzing the results it can be seen that proportions between 30% and 50% are potentially usable as substitutes for conventional aggregates.

4.2. Bloques de hormigón

Los valores presentados en este apartado son resultados de la evaluación de los bloques de hormigón moldeados a partir de las composiciones que presentaron mejores resultados en los experimentos con probetas cilíndricas (30 y 50% de áridos reciclados). En total fueron moldeados 12 bloques de hormigón por serie, de los cuales, 8, fueron para ensayos de resistencia a la compresión axial y 4 para ensayos de absorción de agua por inmersión. Los resultados individuales para cada serie están en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

4.2. Concrete blocks

The values shown in this item are the result of the evaluation of concrete blocks molded with the compositions that yielded the best results in the cylindrical test specimen studies (30 to 50% of recycled aggregates). A total of 12 concrete blocks were molded per series; among them 8 were tested for resistance to axial compression and 4 were tested for absorption by water immersion. The individual results for each series are shown in Tables 3 and 4 respectively.

TABLA 3/TABLE 3

Resultados de resistencia a compresión de las series en bloques de hormigón
Results of compression resistance of the series in concrete blocks

Bloques de hormigón Concrete blocks	BAP10-20 (MPa) Referencia-0% Reference - 0%	BEP10-30 (MPa) 30% de árido reciclado 30% recycled aggregate	BEP10-50 (MPa) 50% de árido reciclado 50% recycled aggregate	BEP10-20/40 (MPa) 40% de árido reciclado-20% árido A 40% recycled aggregate-20% aggregate A
R1	3,0	1,9	1,6	2,1
R2	3,4	2,4	1,5	3,8
R3	2,5	2,1	3,3	2,9
R4	4,9	1,8	2,0	2,8
R5	3,5	1,5	2,3	2,3
R6	4,0	1,8	2,1	2,6
R7	3,1	2,1	2,5	2,3
R8	2,8	1,9		1,9
Promedio/Average	3,4	1,90	2,20	2,60
Desvío Patrón Standard Deviation	0,76	0,27	0,59	0,58

TABLA 4/TABLE 4

Resultados de absorción de agua por inmersión de las series en bloques de hormigón
Results of absorption by water immersion of the series in concrete blocks

Bloques de hormigón Concrete blocks	BAP10-20 (%) Referencia Reference	BEP10-30 (%) 30% de árido reciclado 30% Recycled aggregate	BEP10-50 (%) 50% de árido reciclado 50% Recycled aggregate	BEP10-20/40 (%) 40% de árido reciclado-20% árido A 40% recycled aggregate-20% aggregate A
A1	9,65	12,48	13,96	8,88
A2	9,31	13,53	14,14	11,86
A3	8,83	12,87	13,61	9,65
A4	7,90	13,59	16,37	10,75
Promedio/Average	8,90	13,10	14,50	10,30
Desvío Patrón Standard Deviation	0,76	0,53	1,25	1,30

Del análisis de los resultados obtenidos en el experimento teniendo por base la norma NBR 7173 -Bloques huecos de hormigón simples para albañilería sin función estructural, que especifica los límites de resistencia a la compresión y absorción por inmersión de agua para bloques de hormigón simples sin función estructural (valores individuales de resistencia ≥ 2 MPa, con un promedio de $\geq 2,5$ MPa y valores individuales de absorción $\leq 15\%$ con un promedio de $\leq 10\%$), se observa que todos los valores relacionados con la serie de referencia (BAP10-20, con 0% de árido reciclado) están en sintonía con lo recomendado.

Para los resultados individuales de las series en bloques con áridos reciclados, es posible observar que los valores inferidos para cada propiedad evaluada son relativamente inferiores a los valores de referencia. Este comportamiento también se identificó en los resultados de la serie BEP10-20/40 (donde la partida de escombros, inferior a 2,4 mm, fue sustituida por el árido A).

En lo que dice respecto a las recomendaciones de la norma NBR 7173, por lo general, los resultados no han sido satisfactorios. Para las series BEP10-30 y BEP10-50, la gran mayoría de los valores individuales de resistencia a la compresión, así como los valores medios, están por debajo de los especificados (2,0 MPa y 2,5 MPa, respectivamente). En lo que concierne a la absorción por inmersión, aunque los valores individuales están de acuerdo (15%), el valor medio sobrepasa en mucho lo especificado (10%).

Los resultados de las dos series consideradas denuncian el influencia del árido reciclado en las propiedades evaluadas, es decir, reducen la resistencia o aumentan considerablemente la absorción de los bloques. Este comportamiento se puede justificar a partir de factores idénticos a los ya descritos en el experimento con probetas cilíndricas (la presencia considerable de impurezas como limo y arcillas; el alto índice de partículas pulverizadas; la estructura extremadamente porosa de gran parte de los áridos originarios del residuo, entre otras causas). Agravándose aún más por los factores que caracterizan el proceso de producción de los bloques (espesor de la forma de la vibro-prensa, energía de compactación, dimensiones de los bloques, entre otros).

Para la serie BEP10-20/40 (en la que se retiraron las partículas del árido reciclado inferiores a 2,4 mm), se observa un incremento en los resultados con relación a las series anteriores. En relación a las recomendaciones de la norma NBR 7173, los valores están en gran medida de acuerdo con lo especificado para la resistencia a la compresión y a la absorción. Para esta serie se puede observar la influencia negativa de las partículas del árido, inferiores a 2,4 mm, en las propiedades de la mezcla, evidenciándose dicha influencia principalmente en la absorción por inmersión.

Upon analyzing the results obtained in the study based upon norm NBR 7173 -Simple hollow concrete blocks used in masonry with no structural function, that specifies the limits of compression resistance and absorption by water immersion for simple concrete blocks without a structural function (individual resistance values ≥ 2.0 MPa and in average ≥ 2.5 MPa and, individual absorption values $\leq 15\%$ and in average $\leq 10\%$) it is observed that all the values referring to the reference series (BAP 10-20, with 0% recycled aggregate) are in accordance to the recommended values.

The values obtained for each quality evaluated in the individual results of the series in blocks made with recycled aggregates are relatively lower than reference values. This behavior can also be identified in the results of series BEP 10-20/40 (series in which less than 2.4 mm of the debris was substituted by aggregate A).

As to the recommendations of norm NBR 7173, the results were generally not satisfactory. For series BEP 10-30 and BEP 10-50, the biggest part of individual values of compression resistance as well as the average values are below the specified values (2.0 MPa and 2.5 MPa respectively). As to absorption by water immersion, although the individual values are compatible (15%), the average value is way above the specified one (10%).

The results of the two series analyzed demonstrate the influence of the recycled aggregate on the evaluated properties: it reduces the resistance or increases the absorption of the blocks considerably. This behavior can be justified by the same factors described in the study of cylindrical test specimens (the presence of a considerable amount of clay, the high level of pulverulent material, the very porous structure of a large part of the residual aggregates, among others). The behavior is exacerbated even more by the factors that characterize the production of the blocks (the thickness of the form of the vibrating press, the densification energy, the dimension of the blocks, among others).

In series BEP 10-20/40 (in which the recycled aggregate particles that were smaller than 2.4 mm were taken out) a certain improvement was observed in the results compared to those of previous series. As to the recommendations of norm NBR 7173, the values of the results mostly agree with what is specified for compression and absorption resistance. In this series the negative influence of aggregate particles smaller than 2.4 mm in the properties of the mixture are evident, especially in absorption by water immersion.

5. CONCLUSIONES

Como conclusión corresponde subrayar los siguientes aspectos:

I) Con respecto al experimento modelo (probetas cilíndricas)

– El árido reciclado ejerció una influencia extremadamente significativa sobre los resultados de las propiedades evaluadas, destacándose: la reducción en los valores de masa específica y resistencia a la compresión, y aumento, extremadamente considerable, en los valores de absorción por inmersión. Las series donde esa influencia fue más visible fueron las composiciones con un 60 y 70% de árido reciclado;

– Composiciones con cerca del 30% de árido reciclado (en los experimentos en probetas), se muestran potencialmente utilizables, sin grandes alteraciones en lo que concierne a los resultados de referencia.

II) En relación a los bloques de hormigón

– Para los bloques de la serie de referencia (BAP10-20) los resultados de las propiedades evaluadas se muestran satisfactorios en lo tocante a los valores especificados por la NBR 7173;

– En las series con bloques con árido reciclado, la influencia de este material en las propiedades de los bloques de hormigón es extremadamente considerable. Para las series BEP10-30 y BEP10-50, el promedio y la mayor parte de los resultados individuales de resistencia y absorción presentan valores inferiores a los obtenidos con la serie de referencia, además de que no se encuentran de acuerdo con las especificaciones de la norma para muros de albañilería;

– Para la serie BEP10-20/40 (sin considerar la partida del árido reciclado inferior a 2,4 mm), se observa una evidente mejora en los resultados (aumento de la resistencia a la compresión y reducción de la absorción de agua). Tanto el promedio como todos los valores individuales están de acuerdo con las especificaciones de la referida norma para muros de albañilería.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) T. P. Pinto. Resultados da gestão diferenciada. *Téchne*. São Paulo, Pini. n. 31, p. 31-34. nov./des., 1997.
- (2) V. M. John. Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 102 p. tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- (3) C. De Pauw. Recyclage des décombres d'une ville sinistree. *CSTC Revue* n. 4, p.12-28. dez., 1982.
- (4) V. Pollet. et al. Recycled aggregates: alternative resources for the construction industry. In: *International Conference Buildings and the Environment*, 2., Proceedings, Paris, 1997. p. 635-642.
- (5) J. Bresson. La vibration dans les machines a blocs. CERIB (Centre d'Etudes et de Recherche de l'Industrie du Béton Manufacturé). Publication Technique n. 58, 35 p. 1981.
- (6) C. E. S. TANGO. Blocos de concreto: dosagem, produção e controle de qualidade. 1 ed. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas -IPT, 1984, v.1.
- (7) J. S. Medeiros. Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. São Paulo, 1993. 449 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- (8) ASTM. Standard test methods for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table – ASTM C1170. Philadelphia, 1991.
- (9) J. G. G. Sousa. Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – Aplicação ao uso de entulho como árido reciclado. Brasília, 2001. 124 p. Dissertação (Mestrado) – PECC, Universidade de Brasília.

5. CONCLUSIONS

In conclusion, the following aspects are worth mentioning:

I) Regarding the pilot study (cylindrical test specimens)

– The recycled aggregate had an extremely significant influence on the results of the evaluated properties, especially on: the decrease in the values of specific mass and compression resistance and the considerable increase in the values of absorption by water immersion. This influence was strongest in the series composed of 60% to 70% of recycled aggregate;

– Compositions of about 30% of recycled aggregate (in test specimen studies), proved potentially useful, showing no significant alterations regarding reference values.

II) Regarding concrete blocks

– The results of the evaluated properties for the blocks of the reference series (BAP 10-20) proved satisfactory when compared to the values specified by NBR 7173;

– In the series of blocks containing recycled aggregate, the influence of this material on the properties of the concrete blocks is considerable. For series BEP 10-30 and BEP 10-50, the average and most of the individual resistance and absorption results are much lower than the values obtained with the reference series. They also do not agree with the specifications for the norm for sealing masonry;

– For series BEP 10-20/40 (not considering the part of the recycled aggregate smaller than 2.4 mm), a considerable improvement in the results was observed (increase in compression resistance and reduction of water absorption). Both the average and all individual values agree with the specifications of the said norm for sealing masonry (NBR 7173).