

# Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento

## Physical and Mechanical Properties of Concrete Using Residual Powder from Organic Waste as Partial Cement Replacement

I. Soto Izquierdo <sup>1\*</sup>, O. Soto Izquierdo\*, M. Ramalho \*\*

\* Universidade Federal do Tocantins, Tocantins. BRAZIL

\*\* Universidade de São Paulo, São Paulo. BRAZIL

Fecha de Recepción: 06/08/2018

Fecha de Aceptación: 30/10/2018

PAG 229-240

### Abstract

The continued growth in demand for cement has raised concerns in the industry about environmental and sustainability issues. In addition, the worldwide generation of large quantities of solid waste threatens human health and on environmental quality. This paper proposes to assess the feasibility of using a residual powder derived from organic waste of vegetable or animal origin for replacing part of Portland cement during concrete production. Specifically, the powder is derived from a living being such as the remains of food (meat, vegetables, fruits and eggshells), paper, wood, bones and seeds. Its scientific contribution is a conscious change due to development of an alternative material to contribute with more sustainable processes in the construction industry. Three types of mixtures for cement content were studied: aggregate/cement (A/C) ratios of 15, 10 and 6. Concrete samples were then made by replacing the cement with organic waste powder in percentages of 5%, 10%, 15%, and 20%. These mixtures were evaluated for their physical and mechanical properties. The results showed that the reference concrete had higher compressive strength than the concrete with low cement content (A/C ratio of 15:1). However, samples made with 5% of powder and an A/C ratio of 10:1 presented values at least 2.1% greater than compressive strength of the reference concrete. Mixtures rich in cement (A/C ratio of 6:1) and the powder replacements of up to 10% showed in the best mechanical behavior in 13% in relation to the reference concrete. Therefore, waste powder can be used as filling material to replace part of the cement, resulting in denser and more resistant concrete, as well as less specific absorption and voids.

**Keywords:** Residual powder, organic waste, concrete, mechanical properties

### Resumen

Actualmente, el crecimiento continuo en la demanda de cemento genera preocupaciones ambientales y de sostenibilidad en la industria cementera. Por otra parte, la generación de grandes cantidades de residuos sólidos urbanos a nivel mundial provoca daños en la salud humana y en la calidad del medio ambiente. Por lo anterior, esta investigación propone evaluar la sustitución parcial del cemento Portland por un polvo residual obtenido de la descomposición química de residuos orgánicos de origen vegetal o animal, tales como restos de alimentos (carne, vegetales, frutas, cáscara de huevo), papel, madera, huesos y semillas. De esta forma, una contribución científica podría generar un cambio consciente en el desarrollo de un producto como material alternativo que contribuya con procesos más sostenibles en la industria de la construcción. Se estudiaron tres tipos de mezcla, variando el contenido de cemento, seleccionando las proporciones agregados/cemento (a/c) de 15, 10 y 6. Se prepararon hormigones sustituyendo el cemento por el polvo de residuo orgánico, en peso, en porcentajes de 5, 10, 15 y 20%. Se evaluaron sus propiedades físicas y mecánicas. Los resultados mostraron que el hormigón de referencia presentó mayor resistencia a la compresión que el hormigón con bajo contenido de cemento (proporción a/c de 15:1). Sin embargo, las mezclas preparadas con un 5% de polvo y razón a/c de 10:1 presentaron valores, de al menos, 2,1% superiores a la resistencia a la compresión del hormigón de referencia. Las mezclas ricas en cemento (razón a/c de 6:1) con reemplazo de polvo de hasta un 10% mostraron un mejor desempeño mecánico, 13% superior en relación al hormigón padrón. En consecuencia, se puede usar el polvo orgánico como material de relleno (filler) en el hormigón para sustituir parte del cemento puesto que se obtienen hormigones más resistentes y densos y con menor absorción específica e índice de vacíos.

**Palabras clave:** Polvo residual, residuo orgánico, hormigón, propiedades mecánicas

## 1. Introducción

El crecimiento económico genera la necesidad de invertir en infraestructura. A su vez, ésta aumenta la demanda de servicios en el mercado de la construcción. El consumo de cemento ha aumentado proporcionalmente con

el crecimiento de las economías y, en consecuencia, existe, a nivel global, una creciente demanda por el cemento. La producción de cemento consume entre un 12 y 15% de la energía total mundial y es responsable del 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el planeta, contribuyendo al calentamiento global (Ali et al., 2011). En la producción del cemento, las emisiones de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a la descomposición, en óxidos, de los carbonatos presentes en la piedra caliza. Para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, la industria cementera ha tomado diversas medidas para reducir el contenido de clinker, entre las que se encuentra su reemplazo por materiales residuales como el sílica activa,

<sup>1</sup> Autor de Correspondencia:

Universidade Federal do Tocantins (UFT), Tocantins, Brazil  
E-mail: indaritasi@uft.edu.br



ceniza volante o escoria de alto horno, y su uso como materia prima alternativa.

La generación de grandes cantidades de residuos sólidos municipales se ha convertido en un serio problema medio ambiental en todo el mundo (Bernardes et al., 2008). La disposición de la basura en rellenos sanitarios es un método simple y barato. Sin embargo, esta solución ha tenido como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, olores desagradables y contaminación del suelo. Los espacios para instalar los rellenos sanitarios son cada vez más escasos, especialmente en países muy poblados (Saikia et al., 2007). Los métodos alternativos para el tratamiento de los desechos sólidos consideran la incineración, el reciclaje de los materiales reutilizables y el procesamiento químico de los desechos orgánicos.

Actualmente, la incineración de los desechos sólidos es una de las medidas más utilizadas en los países industrializados. El proceso reduce hasta un 90% del volumen de desechos urbanos y permite la generación de energía (Shi y Kan, 2009). En general, en el proceso de incineración de los desechos sólidos se generan diferentes tipos de cenizas, dependiendo de la composición de los residuos sólidos. Estos varían en el tiempo y de país en país dependiendo de los diversos estilos de vida. La ceniza, subproducto de la incineración, es equivalente al 2 a 5% de los desechos municipales. Por lo que anualmente se producen grandes cantidades de ceniza que requieren un destino adecuado para su disposición. Según Guo et al. (2014), los principales componentes químicos de la ceniza pertenecen al grupo de los  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-}$  y pueden reemplazar al cemento. Muchos investigadores han estudiado el uso de la ceniza en la producción del cemento o como reemplazo de éste. En la investigación realizada por Saikia et al. (2007), el uso de ceniza en la fabricación de clinker de cemento permite una reducción de hasta un 20% de  $\text{CaCO}_3$ , que permite disminuir las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Ferraris et al. (2009) usaron la ceniza como relleno para reemplazar parte del cemento. Usaron concentraciones de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% en volumen, con una razón agua-cemento de 0,60 para la producción de morteros y hormigones. Los resultados señalan que la sustitución del relleno en hasta un 25% no afecta la resistencia a la compresión del hormigón. Wu et al. (2012) evaluaron el reemplazo de ceniza en la elaboración del cemento Portland y los resultados muestran que se puede reemplazar el 30% de la ceniza en la producción de cemento Portland. Sin embargo, pueden

encontrarse metales pesados en forma de ceniza volante o vapor en los gases de la combustión, lo que constituye la principal preocupación para su uso potencial como materia prima en la producción de clinker y otros productos.

Una alternativa práctica para la disposición de los desechos es a través de la descomposición por reacción química. Por el momento, este proceso químico se realiza solamente con desechos orgánicos y ha sido estudiado por muchos investigadores, entre ellos Carneiro (2013), Goyal et al. (2005) y Kejun et al. (2011). El producto del proceso de descomposición es un polvo que puede ser reutilizado como material de construcción.

Este estudio evaluó el uso potencial del polvo residual de los desechos orgánicos como un reemplazo para el cemento. El residuo se obtiene de los desechos urbanos que son recibidos por el camión recolector; se colocan sobre una estera seleccionadora que cuenta con un rodillo magnético para la extracción del material metálico. Mediante selección manual, se extraen todos los materiales inorgánicos como madera, vidrio, plástico, goma, baterías, etc., dejando los residuos orgánicos. Según la norma NBR 10004: 2004, este desecho se puede clasificar como "Residuos no peligrosos – Clase II A – Inertes". Se evaluó el uso del polvo residual en el hormigón con proporciones agregados/cemento de 15:1, 10:1 y 6:1 en peso (bajo, medio y alto contenido de cemento, respectivamente). Los porcentajes de polvo residual en el cemento fueron del 5%, 10% y 20%. Al comienzo, fue necesario caracterizar el polvo mediante Espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para determinar la composición química. Se realizaron ensayos de solubilidad y lixiviación para determinar si el residuo era un material inerte y no contaminante, adecuado para su uso en la matriz cementicia. Es posible ofrecer una alternativa para la disposición de los residuos orgánicos transformándolos en un polvo reutilizable.

## 2. Programa experimental

### 2.1 Caracterización de los materiales

#### 2.1.1 Cemento Portland

*En este estudio se usó cemento Portland con resistencia a temprana edad (brasileño, tipo CPV-ARI), disponible comercialmente en Brasil. La Tabla 1 resume las propiedades físicas y mecánicas del cemento.*

**Tabla 1.** Propiedades físicas y mecánicas del cemento (Auto elaboración)

Propiedades	Resultados
Masa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	3,12
Superficie específica, Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4.743
Tiempo de fraguado inicial (min)	110
Tiempo de fraguado final (min)	163
Expansión de volumen (mm)	3
Resistencia a la compresión a los 3 días (MPa)	44,40
Resistencia a la compresión a los 7 días (MPa)	47,90
Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	52,20

### 2.1.2 Agregados finos

Se usó arena y polvo de piedra calcárea como agregados finos. La caracterización de los agregados finos cumplió con los requisitos de las normas brasileras, entregando los siguientes resultados: masa específica (NBR NM 52, 2009) de 2.620 kg/m<sup>3</sup> y 2.890 kg/m<sup>3</sup>, densidad aparente (NBR NM 45, 2006) de 1.680 kg/m<sup>3</sup> y 1.720 kg/m<sup>3</sup>, y absorción de agua (NBR NM 30, 2001) de 0,87% y 1,02%, respectivamente. Según la norma brasileras (NBR 7211, 2009), la arena se podía clasificar como arena fina en la Zona 2 y el polvo de piedra, clasificar como arena gruesa en la Zona 4.

### 2.1.3 Agregados gruesos

Como agregado grueso se usó grava basáltica. La caracterización de los agregados gruesos entregó los siguientes resultados: masa específica (NBR NM 53, 2009) de 2.860 kg/m<sup>3</sup>, densidad aparente (NBR NM 53, 2009) de 2.700 kg/m<sup>3</sup> y dimensión característica máxima (NBR NM 248, 2003) de 9,50 mm.

### 2.1.4 Polvo residual de desechos orgánicos

Se analizó el polvo residual de desechos orgánicos mediante EDS y SEM para determinar la composición química y el tamaño de las partículas. Las muestras eran completamente planas, con inmersión en resina y se usó carbón como material de recubrimiento. Se analizó el contenido de metales pesados, área superficial específica, masa específica y granulometría de acuerdo a las normas brasileras NBR 10004, 2004; NBR NM 248, 2003; NBR NM

23, 2001 y NBR 11579, 2012, respectivamente.

El residuo orgánico fue separado de los residuos sólidos y pasado por un triturador. Luego, fue transferido a una cámara donde se le aplicó productos químicos como cal virgen y cloro para eliminar los residuos grasos, estiércol, gas metano, desechos humanos y animales y metales pesados químicamente encapsulados. Luego, del proceso químico, la masa resultante se llevó al horno a una temperatura de 300°C. A continuación, se convirtió en polvo mediante micronización en un molino de aire comprimido durante 20 minutos. La molienda se produce por golpe entre las partículas del producto que, al recibir la energía del aire comprimido, adquieren velocidades de hasta 500m/seg. Con el impacto y tiempo de molienda, las partículas pierden tamaño hasta alcanzar la calidad deseada.

### 2.2 Dosificación de la mezcla y análisis del hormigón

En la Tabla 2 se describen las mezclas para cada proporción a/c estudiada. El contenido de humedad se fijó en 6% y el porcentaje de aditivos orgánicos se mantuvo constante en 0,35% para todos los hormigones. En la investigación se empleó Glenium® 160 SCC, un aditivo orgánico desarrollado por BASF para la producción de hormigones autocompactantes de alta resistencia. Se trata de una cadena de éter policarboxílico modificada, que permite la reducción de agua. El Glenium® 160 SCC es de color café claro, tiene una densidad promedio de 1,11g/cm<sup>3</sup> y un contenido promedio de sólidos del 40%, según las especificaciones del fabricante.

**Tabla 2.** Dosificación de la mezcla para 1 m<sup>3</sup> de hormigón (Auto elaboración)

Materiales	Razón Agregado/Cemento		
	15:1	10:1	6:1
Cemento (kg)	141	205	322
Agregado grueso (kg)	846	820	773
Arena (kg)	508	492	696
Polvo de piedra (kg)	761	738	464
H <sub>2</sub> O (kg)	143,80	143,60	144,90
w/c	1,02	0,70	0,45
Contenido de mortero (%)	62,50	63,60	65,70
Aditivo en relación a la masa de cemento (%)	0,35		
Humedad (%)	6,00		



Para investigar la viabilidad del polvo residual como reemplazo del cemento en el hormigón, se prepararon cinco mezclas para cada proporción a/c. Los contenidos de la

sustitución en peso fueron de 5, 10, 15 y 20%. La Tabla 3 presenta la nomenclatura de cada tipo de hormigón.

**Tabla 3.** Nomenclatura de cada tipo de hormigón (Auto elaboración)

A/C	Razón del polvo residual orgánico que sustituye al cemento				
	0%	5%	10%	15%	20%
15:1	15-REF	15-R.P5	15-R.P10	15-R.P15	15-R.P20
10:1	10-REF	10-R.P5	10-R.P10	10-R.P15	10-R.P20
6:1	6-REF	6-R.P5	6-R.P10	6-R.P15	6-R.P20

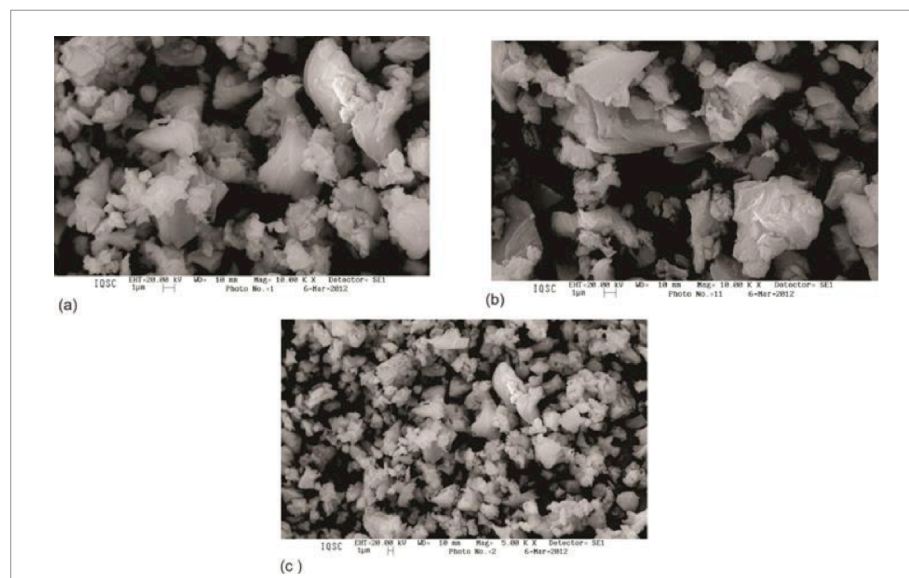
Se usaron probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro por 100 mm de alto para analizar las propiedades del hormigón en estado endurecido. Las probetas se colocaron dentro de una cámara a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad relativa del  $90 \pm 5\%$ . El análisis de la densidad aparente, absorción de agua por inmersión, índice de vacíos se realizó de acuerdo a la norma brasilera (NBR 9778, 2005) en cinco muestras para cada tipo de hormigón (15 tipos de hormigón, un total 75 muestras) a la edad de 28 días. La resistencia a la compresión se determinó mediante la norma brasilera (NBR 5739, 2007) en ocho muestras para cada tipo de hormigón (120 muestras en total) a la edad de 28 días. Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayos a una velocidad constante de 2,03 kN/s.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Polvo residual orgánico

La Figura 1 muestra las imágenes de diversas muestras de polvo residual usando SEM. El residuo es heterogéneo en la forma de las partículas por el aspecto laminar o circular de los granos.

Para la medición del tamaño de las partículas se usó el programa de procesamiento de imagen digital Image J y los resultados se encuentran en la Tabla 4. Se aprecian diversos tamaños de partículas en las muestras, lo que es favorable porque el material puede ocupar un mayor volumen de espacio, favoreciendo el empacamiento de la pasta de cemento.



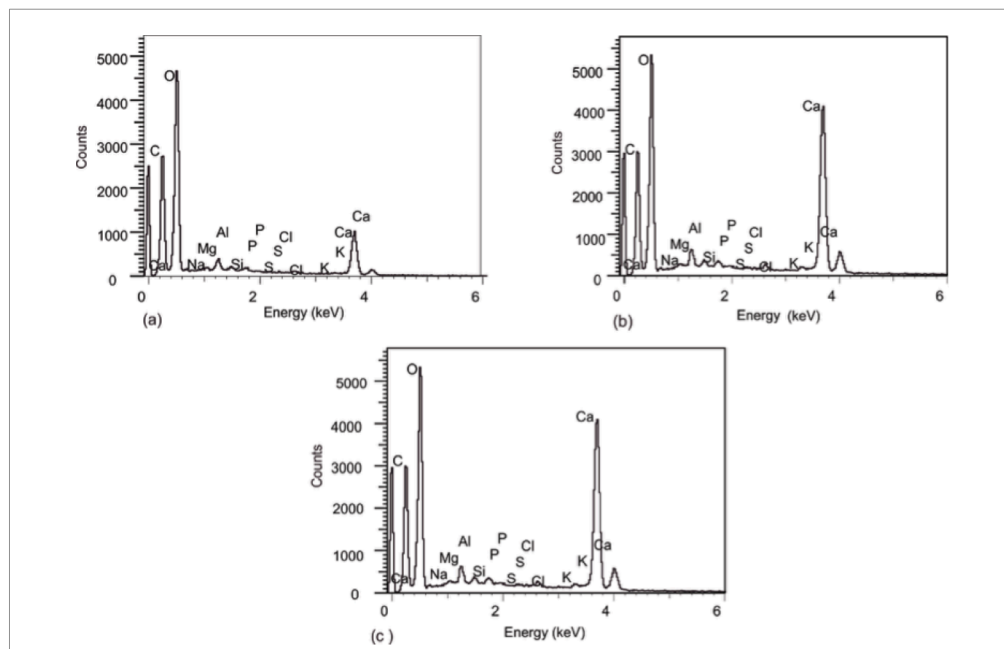
**Figura 1.** Imágenes SEM del polvo residual orgánico: (a) muestra 1, (b) muestra 2 y (c) muestra 3. (Auto elaboración)

**Tabla 4.** Tamaño de las partículas del polvo residual orgánico. (Auto elaboración)

	Muestra 1 ( $\mu\text{m}$ )	Muestra 2 ( $\mu\text{m}$ )	Muestra 3 ( $\mu\text{m}$ )
	3,88	2,94	4,56
	3,50	4,36	6,37
	5,03	2,08	3,82
	5,31	2,75	2,79
	1,89	5,27	7,31
	2,18	2,26	3,69
	2,89	2,95	2,16
	1,75	1,59	1,34
	2,74	2,07	1,47
	1,70	2,89	1,84
	5,46	1,63	2,13
	5,17	3,06	1,69
	2,95	4,56	3,95
<b>Promedio</b>	<b>3,28</b>	<b>3,16</b>	<b>3,26</b>

El análisis químico se realizó usando EDS. La Figura 2 ilustra el espectro EDS de tres muestras de polvo residual orgánico.

Los elementos presentes en menor proporción son: sodio, magnesio, aluminio, silicio, fósforo, azufre y cloro. Los más abundantes son: carbono, oxígeno y calcio.



**Figura 2.** Espectro EDS de tres muestras diferentes de polvo residual orgánico: (a) muestra 1, (b) muestra 2 y (c) muestra 3. (Auto elaboración)



La Tabla 5 muestra los metales analizados de las muestras de polvo residual. La nomenclatura <LOD indica que la concentración era muy baja y no fue posible cuantificarla con precisión. Según la norma brasilera (NBR 10004, 2004), los elementos considerados peligrosos por su toxicidad son: cromo, arsénico, cadmio, plomo y mercurio, en concentraciones muy bajas. Estas concentraciones cumplen con los límites impuestos por la norma. Como

resultado, el polvo residual estaba limpio, libre de toda contaminación por lo que fue clasificado como no peligroso. En consecuencia, sería posible eliminar estas sustancias de manera sustentable para el ambiente medio.

Respecto de la caracterización física, el polvo residual tenía una superficie específica de 4.370 m<sup>2</sup>/g, gravedad específica de 720 kg/m<sup>3</sup>, finos retenidos en tamiz #200 de 0,20% y finos retenidos en tamiz #325 de 1,50%.

**Tabla 5.** Metales pesados presente en el polvo de residuo orgánico. (Auto elaboración)

Metales	Valores (mg/l)	Límite máximo (mg/l)
Cobre	7,76	-
Cromo	< LOD	5,0
Arsénico	< LOD	1,0
Cadmio	< LOD	0,5
Plomo	< LOD	1,0
Cobalto	< LOD	-
Fósforo	72,59	-
Níquel	< LOD	-
Cinc	15,41	-
Mercurio	< LOD	0,1

### 3.2 Propiedades físicas del hormigón

Los ensayos de las propiedades físicas del hormigón endurecido realizados fueron: densidad, absorción de agua y contenido de vacíos. La Tabla 6 presenta los resultados de estos ensayos, para cada proporción a/c, incluyendo la

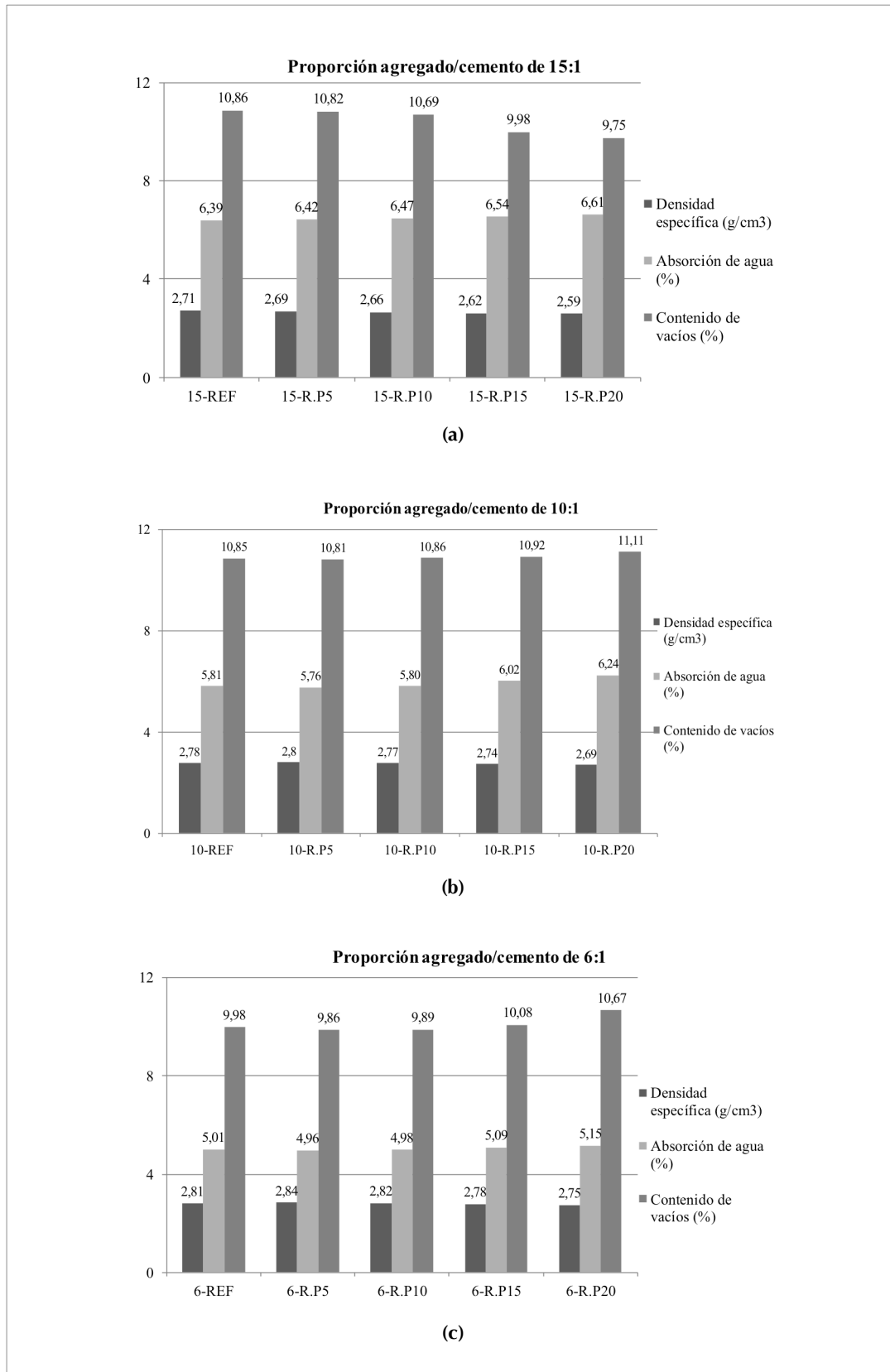
desviación estándar (Ds) y el coeficiente de variación (CV).

La Figura 3 muestra los gráficos de cada mezcla estudiada que permite una mejor interpretación de los resultados de las propiedades físicas del hormigón.

**Tabla 6.** Características físicas del hormigón endurecido. (Auto elaboración)

Hormigón	Densidad específica – estado endurecido (g/cm <sup>3</sup> )			Absorción de agua (%)			Contenido de vacíos – estado endurecido (%)		
	Media	Ds	CV (%)	Media	Ds	CV (%)	Media	Ds	CV (%)
Proporción agregado/cemento de 15:1									
15-REF	2,71	0,03	1,26	6,39	0,27	4,27	10,86	0,56	5,21
15-R.P5	2,69	0,03	1,06	6,42	0,32	4,98	10,82	0,52	4,80
15-R.P10	2,66	0,03	1,19	6,47	0,25	3,86	10,69	0,59	5,52
15-R.P15	2,62	0,04	1,36	6,54	0,31	4,74	9,98	0,57	5,71
15-R.P20	2,59	0,03	1,30	6,61	0,36	5,44	9,75	0,61	6,25
Proporción agregado/cemento de 10:1									
10-REF	2,78	0,05	1,88	5,81	0,29	4,96	10,85	0,49	4,55
10-R.P5	2,80	0,05	1,67	5,76	0,30	5,25	10,81	0,45	4,16
10-R.P10	2,77	0,05	1,88	5,80	0,33	5,62	10,86	0,50	4,60
10-R.P15	2,74	0,05	1,85	6,02	0,33	5,54	10,92	0,41	3,75
10-R.P20	2,69	0,05	1,68	6,24	0,32	5,05	11,11	0,46	4,14
Proporción agregado/cemento de 6:1									
6-REF	2,81	0,05	1,82	5,01	0,28	5,58	9,98	0,47	4,72
6-R.P5	2,84	0,05	1,83	4,96	0,31	6,25	9,86	0,49	4,97
6-R.P10	2,82	0,05	1,75	4,98	0,29	5,82	9,89	0,42	4,25
6-R.P15	2,78	0,06	1,99	5,09	0,32	6,28	10,08	0,46	4,56
6-R.P20	2,75	0,05	1,76	5,15	0,27	5,24	10,67	0,50	4,68





**Figura 3.** Propiedades físicas del hormigón: (a) 15:1 razón a/c, (b) 10:1 razón a/c, (c) 6:1 razón a/c. (Auto elaboración)



Las muestras de ensayo con razón a/c de 6:1 presentaron los valores de densidad más altos. Las muestras de ensayo con razón a/c de 10:1 y 15:1 presentaron los valores más bajos para absorción y contenido de vacíos. Por lo que se concluyó que el incremento en el consumo de cemento en la mezcla fue proporcional a la mayor densidad y menor absorción de agua y contenido de vacíos.

En la mezcla 15:1, el polvo residual no produjo mejoras en los resultados. Los valores para densidad específica en el hormigón modificado fueron menores, y los valores para absorción de agua y contenido de vacíos fueron mayores en relación al hormigón de referencia. Para las muestras con razón a/c de 10:1, el hormigón con un contenido del 5% de polvo residual tuvo una masa específica mayor, menor absorción de agua e índice de vacíos en comparación con el hormigón sin adición de polvo. Las mezclas con mayor cantidad de cemento y con porcentajes de 5 y 10% reflejaron los mejores valores para las propiedades físicas. Estos hormigones con mejor comportamiento presentaron mayor densidad y menor absorción de agua y contenido de vacíos debido al refinamiento de los poros de la pasta de cemento.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las mezclas con razones 10:1 y 6:1, algunos investigadores como Lagerblad y Vogt (2008), y Vogt (2010) han demostrado que el uso de material de relleno en reemplazo de una parte del cemento produce mejoras en las propiedades físicas del hormigón endurecido, tales como mayor masa específica, menor contenido de vacíos debido a un mejor empaquetamiento en la mezcla.

Elyamany et al. (2014) evaluaron el efecto de diversos tipos de relleno en las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Los resultados de los ensayos señalan que el tipo de material de relleno tiene un efecto significativo en la absorción de agua. El uso de cenizas no puzolánicas reduce, en un 10%, la absorción de agua y los vacíos en comparación con los rellenos puzolánicos.

### 3.3 Resistencia a la compresión del hormigón

Para la resistencia a la compresión, la Tabla 7 presenta la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación del hormigón para cada razón a/c.

**Tabla 7.** Resistencia a la compresión del hormigón para cada proporción agregado/cemento. (Auto elaboración)

Concretos	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Media	Ds	CV (%)
	Proporción agregado/cemento de 15:1		
15-REF	22,03	0,56	2,49
15-R.P5	20,63	0,87	4,19
15-R.P10	16,43	0,91	5,47
15-R.P15	11,50	0,79	6,80
15-R.P20	3,05	0,69	21,69
Proporción agregado/cemento de 10:1			
10-REF	33,62	0,91	2,69
10-R.P5	34,34	0,92	2,66
10-R.P10	28,18	1,13	3,96
10-R.P15	19,97	0,90	4,47
10-R.P20	10,24	0,86	8,13
Proporción agregado/cemento de 6:1			
6-REF	50,49	0,88	1,73
6-R.P5	57,37	1,13	1,96
6-R.P10	57,24	0,92	1,60
6-R.P15	35,06	0,97	2,74
6-R.P20	20,84	0,93	4,40



Con relación a la proporción a/c de 15, cabe señalar que el mayor valor corresponde al concreto de referencia. En la mezcla con proporción a/c de 10, el hormigón con un contenido de residuo orgánico del 5% logró resultados superiores a los de la mezcla padrón. Para las probetas con mayor consumo de cemento (proporción a/c de 6), el concreto producido con 5 y 10% de polvo residual obtuvo valores de resistencia más altos que los del hormigón 6-REF.

Los hormigones preparados con polvo residual como reemplazo del cemento no mostraron resultados satisfactorios, como se aprecia en la Tabla 7. En las mezclas con un menor contenido de cemento y mayor contenido de agregados (razón a/c de 15:1) existe mayor área superficial de los agregados y, por lo tanto, mayor área de interface. Es probable que la proporción de cemento, junto con cada uno de los porcentajes de polvo estudiados no haya permitido el empacamiento correcto de la matriz de cemento. Se observó que el reemplazo de cemento por un 5% de polvo residual en hormigones con proporción a/c de 10 mejoró la pasta y produjo un hormigón más resistente. Es posible que el empacamiento del polvo residual junto con las partículas de cemento hayan provocado un mayor refinamiento de los poros y una disminución de la cantidad de vacíos. El incremento de la resistencia en las mezclas con 5 y 10% de polvo, con proporción a/c de 6, pudo ser debido a un hormigón más denso y menos poroso.

Se practicó un análisis estadístico mediante el Análisis de Varianza (ANOVA) para comparar la resistencia media a la compresión de las probetas para cada razón a/c. Los resultados se muestran en el Anexo A, Tabla A.1.

Con el análisis ANOVA se conoció que el valor P es considerablemente menor que  $\alpha = 0,05$ , por lo tanto,  $H_0$  (hipótesis nula) no es cierta para ninguna de las tres mezclas (15:1, 10:1 y 6:1). De esta forma, se puede concluir que el polvo residual como reemplazo del cemento afecta significativamente la resistencia media a la compresión del concreto.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las mezclas 10:1 y 6:1 se puede inferir que el polvo residual orgánico actúa como material de relleno en el hormigón permitiendo llenar los vacíos entre las partículas de cemento, promoviendo un incremento en la compacidad de la mezcla y, en consecuencia, la disminución de los poros. Rebmann (2011) encontró el mismo comportamiento en su investigación en el hormigón con bajo contenido de cemento. Basándose en los conceptos de empacamiento de los agregados y uso de rellenos en la pasta de cemento, se obtuvieron hormigones de mayor resistencia con una reducción de hasta un 30% de cemento.

Corinaldesi et al. (2010) evaluaron los efectos del polvo de mármol en morteros y hormigones. En términos del comportamiento mecánico, la sustitución de un 10% de arena por polvo de mármol en presencia de un aditivo superplastificante produjo una resistencia a la compresión mayor, en el mismo nivel de trabajabilidad, comparable al de la mezcla de referencia a los 28 días de curado. Además, un efecto aún más positivo del polvo de mármol es evidente a edades tempranas, debido a su capacidad de relleno.

Felekoğlu et al. (2006) estudiaron el efecto de la ceniza volante y rellenos de piedra caliza en la resistencia a la compresión de los morteros de reparación autocompactantes. Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión muestran que rellenos de piedra caliza fueron más efectivos que la ceniza volante en términos de ganancia de resistencia a temprana edad. Sin embargo, después de los 28 días, las mezclas con ceniza volante ganaron valores de resistencia mayores que las mezclas de control debido al efecto puzolánico de la ceniza.

## 4. Conclusiones

Este trabajo propone investigar la factibilidad de usar el polvo residual obtenido de los desechos orgánicos para reemplazar parte del cemento Portland en la fabricación del hormigón. Su contribución científica es el desarrollo de un material alternativo que aporte a la sustentabilidad en la industria de la construcción, puesto que sus conclusiones son:

- El polvo residual proveniente de desechos orgánicos, por su procedencia, posee concentraciones muy bajas de metales pesados y, por lo tanto, se puede manipular de manera segura.
- El polvo está compuesto por partículas pequeñas de diversos tamaños y forma, que rellena los vacíos en la pasta de cemento.
- En la mezcla de hormigón, el grado de comportamiento exitoso varía según la proporción agregado/cemento y la proporción de polvo residual que reemplaza al cemento.
- En el hormigón con bajo contenido de cemento, el polvo no queda ordenado correctamente en la matriz cementicia, posiblemente debido a una mayor cantidad de agregados y mayor área superficial en la mezcla.
- En las mezclas con un consumo promedio de cemento, el hormigón con un 5% de polvo residual orgánico mostró mayor resistencia a la compresión que el concreto de referencia. El resultado fue un concreto más denso, de menor absorción y vacíos.
- En las mezclas ricas en cemento, el reemplazo con hasta un 10% de polvo dio como resultado el mejor comportamiento mecánico del hormigón. Por lo tanto, el correcto ordenamiento del polvo permite rellenar los vacíos y disminuir los poros de la pasta de cemento.
- Es posible ofrecer una alternativa para el desecho de los residuos orgánicos, transformándolos en un polvo reutilizable que puede ser usado como material de relleno para reemplazar parte del cemento en la preparación del hormigón.
- A futuro, es importante estudiar y evaluar la durabilidad del hormigón con incorporación de polvo residual orgánico, la reactividad puzolánica de estos materiales con el cemento y los cambios volumétricos que ocurren en la mezcla.



**Tabla A.1.** Ensayo ANOVA para resistencia a la compresión del hormigón para una razón agregado/cemento de 15:1 (Auto elaboración)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado promedio	F	Valor P
Columnas	1912,69	4	478,17	826,45	4,14 E-34
Error	20,25	35	0,58		
Total	1932,94	39			

**Tabla A.2.** Ensayo ANOVA para resistencia a la compresión del hormigón para una razón agregado/cemento de 10:1. (Auto elaboración)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado promedio	F	Valor P
Columnas	3324,19	4	831,05	933,27	5,04 E-35
Error	31,17	35	0,89		
Total	3355,36	39			

**Tabla A.3.** Ensayo ANOVA para resistencia a la compresión del hormigón para una razón agregado/cemento de 6:1. (Auto elaboración)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado promedio	F	Valor P
Columnas	8102,52	4	2025,63	2378,99	4,32 E-42
Error	29,80	35	0,85		
Total	8132,32	39			

## 6. Referencias

- NBR NM 23 (2001)**, Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR. NM 52 (2009)**, Agregado miúdo. Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009.
- NBR NM 30 (2001)**, Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR NM 45 (2006)**, Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR NM 53 (2009)**, Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro; 2009.
- NBR NM 248 (2003)**, Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 5739 (2007)**, Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 7211 (2009)**, Agregados para concreto: Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 9778 (2005)**, Argamassas e concretos endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.



- NBR 10004 (2004)**, Resíduos sólidos:Classificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 11579 (2012)**, Cimento Portland: Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Ali M. B., Saidur R., Hossain M. S. (2011)**, A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 5, p. 2252-2261.
- Bernades A. et al. (2008)**, Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 3, p. 65-76.
- Carneiro M. S. (2013)**, Processo otimizado de beneficiamento de lixo urbano. BRPI1004545 (A2) .
- Corinaldesi V., Moriconi G., Naik T. R. (2010)**, Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and building materials*, v. 24, n. 1, p. 113-117.
- Elyamani H. E., Abd Elmoaty A. E. M., Mohamed B. (2014)**, Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. *Alexandria Engineering Journal*, v. 53, n. 2, p. 295-307.
- Felekoglu B. et al. (2006)**, The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and concrete research*, v. 36, n. 9, p. 1719-1726.
- Ferraris M. et al. (2009)**, Use of vitrified MSWI bottom ashes for concrete production. *Waste Management*, v. 29, n. 3, p. 1041-1047.
- Goyal S., Dhull S. K., Kapoor K. K. (2005)**, Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresource Technology*, v. 96, n. 14, p. 1584-1591.
- Lagerblad B., Vogt C. (2008)**, Fillers and ultrafine fillers to save cement and improve concrete properties. *Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High Strength and High Performance Concrete*, p.168-176.
- Rebmann M. (2011)**, Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência. Dissertação, Mestrado. Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 211 p.
- Montgomery D. C., Runger G. C. (2010)**, Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 0470053046.
- Saikia N., Kato S., Kojima T. (2007)**, Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. *Waste Management*, v. 27, n. 9, p. 1178-1189.
- Shi H.-S., Kan L.-L. (2009)**, Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete. *Journal of Hazardous Materials*, v. 164, n. 2-3, p. 750-754.
- Vogt C. (2010)**, Ultrafine particles in concrete. PhD Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Wu K. et al. (2012)**, Preparation of alinite cement from municipal solid waste incineration fly ash. *Cement & Concrete Composites*, v. 34, n. 3, p. 322-327.