

# Evaluación del sustrato de cultivo de hongos como aditivo para hormigón de cemento Portland

## Evaluation of mushroom' culture substrate as admixture to portland cement concrete

---

Vitor Rogério Pires<sup>1</sup>, Valquíria Miwa Hanai-Yoshida<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 0000-0003-1756-5975. Universidade de Sorocaba, Sorocaba, Brasil, [vitor.pires@prof.uniso.br](mailto:vitor.pires@prof.uniso.br)  
<sup>2</sup> 0000-0003-2022-4485. Universidade de Sorocaba, Sorocaba, Brasil, [valquiria.yoshida@prof.uniso.br](mailto:valquiria.yoshida@prof.uniso.br)

Fecha de recepción: 25/01/2022

Fecha de aceptación del artículo: 05/09/2022

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.8393>

### Cómo citar

MIWA HANAI-YOSHIDA, V., & Rogério Pires, V. (2022). Evaluación del sustrato de cultivo de hongos como aditivo para hormigón de cemento Portland. *Avances Investigación En Ingeniería*, 19(2).  
<https://doi.org/10.18041/17944953/avances.2.8393>

---

### Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la posible aplicación del sustrato de producción de shiitake como aditivo al concreto, estudiando su constitución química y evaluar las probetas. En el análisis elemental de las muestras de sustrato realizado por fluorescencia de rayos X, la muestra bloques inoculados que no pudieron producir (SSP) mostró una disminución de calcio, silicio, fósforo, manganeso y zinc en comparación con las muestras bloques inoculados que están listos para iniciar la producción (SIP) y bloques inoculados al final de la producción (SFP). Las mezclas de concreto 1:1.5:2.2 y 1:2:3 después de 28 días de moldeado, cuando fue agregado 5 % del sustrato, causó resistencias mecánicas a la compresión de  $0.19 \pm 0.02$  MPa y  $0.30 \pm 0.03$  MPa, y absorción de agua de  $10.17 \pm 0.11$  % y  $9.03 \pm 0.22$  %, respectivamente. Con la adición de 1 % presentó  $18.87 \pm 1.16$  MPa y  $21.57 \pm 0.66$  MPa, y  $5.58 \pm 0.31$  % y  $6.44 \pm 0.04$  %, respectivamente. Sin aditivo,  $28.62 \pm 3.45$  MPa y  $17.28 \pm 0.81$  MPa, y  $6.23 \pm 0.11$  % y  $5.44 \pm 0.17$  %, respectivamente. La interacción entre los factores, tipo de hormigón y concentraciones de sustrato, fue significativa ( $p < 0.05$ ) solo en los ensayos con 14 días. Concluimos que el sustrato de shiitake puede tener aplicaciones en ingeniería civil cuando las características de drenaje del concreto son necesarias. Sin embargo, se requiere la validación de estas aplicaciones prácticas.

**Palabras claves:** Concreto, *Lentinula edodes*, Sustrato.

### Abstract

This work aimed to evaluate the possible application of the shiitake production substrate as an additive to concrete, studying its chemical constitution and evaluating the specimens. In the elemental analysis of the substrate samples performed by X-ray fluorescence, the sample inoculated blocks that could not produce (SSP) showed a decrease in calcium, silicon, phosphorus, manganese, and zinc compared to the samples inoculated blocks that were ready to start production (SIP) and blocks inoculated at the end of production (SFP). The concrete mixtures 1:1.5:2.2 and 1:2:3 after 28 days of molding, when 5% of the substrate was added, caused mechanical resistance to compression of  $0.19 \pm 0.02$  MPa and  $0.30 \pm 0.03$  MPa, and absorption of water of  $10.17 \pm 0.11\%$  and  $9.03 \pm 0.22\%$ , respectively. With the addition of 1%, it presented  $18.87 \pm 1.16$  MPa and  $21.57 \pm 0.66$  MPa, and  $5.58 \pm 0.31\%$  and  $6.44 \pm 0.04\%$ , respectively. Without additive,  $28.62 \pm 3.45$  MPa and  $17.28 \pm 0.81$  MPa, and  $6.23 \pm 0.11\%$  and  $5.44 \pm 0.17\%$ , respectively. The interaction between the factors, type of concrete, and substrate concentrations, was significant ( $p < 0.05$ ) only in the tests with 14 days. We conclude that the shiitake substrate can have applications in civil engineering when the drainage characteristics of concrete are necessary. However, validation of these practical applications is required.

**Keywords:** Concrete, *Lentinula edodes*, Substrate.

## 1. Introducción

Los hongos dependen de sustratos para la nutrición y el sustrato es normalmente una fuente de material lignocelulosa que apoya el crecimiento, desarrollo y fructificación de los hongos [1].

En la producción de *Lentinula edodes* (conocido comercialmente como shiitake), el aserrín es el ingrediente básico más popular utilizado en las formulaciones de sustratos sintéticos [2]–[4], con o sin otros ingredientes básicos como paja, mazorcas de maíz o ambos. Además, los suplementos a base de almidón sirven como nutrientes para proporcionar un medio de crecimiento ideal [4], [5].

Después de cosechar los hongos, se genera un subproducto, que es una traza de biomasa microbiana y biomasa vegetal. Esta biomasa vegetal está parcialmente degradada o deconstruida por la acción enzimática de los macrofungi. Este subproducto se llama sustrato de hongos gastado, conocido en inglés como *Spent Mushroom Substrate* (SMS), que podría traducirse libremente como biomasa poscultivo de hongos comestibles. [6]

Se generan aproximadamente 5 kg de SMS por kilogramo de setas frescas producidas [7]. Estos SMS a menudo se descartan en lugares

alejados del sitio de producción para evitar la proliferación de moscas, insectos y enfermedades. Sin embargo, este procedimiento puede contaminar el medio ambiente y los recursos de desechos naturales. [8], [9]

En lugares donde la legislación ambiental es más estricta, el SMS se somete a un proceso de esterilización o pasteurización, lo que encarece aún más el proceso de eliminación. El costo estimado de eliminación de SMS en Estados Unidos es de 7 millones de dólares anuales, y reciclar este material es una alternativa adecuada en términos ambientales y económicos. [6]

Por lo general, se tratan lo SMS como residuos agrícolas, normalmente se eliminan en vertederos, incineración o quema a cielo abierto, esparcimiento en la tierra o compostaje con estiércol animal sin una utilización adecuada. Esto ha planteado un desafío importante, ya que la eliminación inadecuada puede causar problemas ambientales como la contaminación del suelo y del aire y el agua [10]–[12].

Por lo tanto, es esencial buscar formas de reciclar y utilizar SMS en diversas aplicaciones [10], incluido el reciclaje como sustrato para el nuevo ciclo de cultivo de hongos [13], biofertilizante y enmienda del suelo [14], alimentación animal [15], producción de energía renovable [15]–[17] y biorremediación de la contaminación [10].

Dado lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo evaluar la posible aplicación del sustrato del cultivo del hongo shiitake (en lo sucesivo denominado *Spent Shiitake Substrate* (SSS)) como aditivo de hormigón con cemento Portland en la construcción civil.

El hormigón se ha utilizado ampliamente para la construcción en diversas formas y estructuras. La intensa búsqueda de tecnología a lo largo de los años ha traído grandes mejoras y innovaciones para obtener y diversificar el uso de este material.

Las propiedades del hormigón pueden modificarse con la presencia de aditivos en su interior, actividad frecuente en la construcción civil. A menudo, la presencia de un aditivo en su composición es la única forma de obtener un cierto efecto, que puede ser conocido o no, por lo que requiere una prueba cuidadosa.[18]

## 2. Material y método

La investigación se llevó a cabo en el Laboratório de Materiais de Construção do Núcleo de Estudos Ambientais (NEAS), Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LAFINAU) y Laboratório de Nanotecnologia (LABNUS) de la Universidad de Sorocaba (UNISO) y el Laboratório de Solos, Laboratório de Concreto y Laboratório de Engenharia Mecânica del Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) en Itapetininga.

Los bloques de SSS fueron producidos por la empresa Yuri Cogumelos Ltda. Se utilizaron bloques de SSS en tres etapas de cultivo diferentes: 9 bloques inoculados que están listos para iniciar la producción (SIP); 9 bloques inoculados que no pudieron producir (SSP); 9 bloques inoculados al final de la producción (SFP) con un promedio de 10 semanas a partir de la fecha de inoculación con la spora del hongo. Por tanto, los bloques descartados en producción son de los tipos SSP y SFP.

Las muestras de bloques se pesaron individualmente (Urano, US 20/2 POP-S), se midió la dimensión externa (Starrett) y se identificaron adecuadamente.

### 2.1. Determinación de condiciones para secar SSS

Para interrumpir la producción de shiitake, mediante el secado de los bloques SSS, se realizó una prueba de estrés térmico para determinar los parámetros de temperatura adecuados y el tipo de invernadero. Las muestras fueron expuestas a condiciones ambientales de temperatura ( $25\pm 2^\circ\text{C}$ ) con una humedad relativa de 52% en promedio; sometidos a deshidratación ( $50^\circ\text{C}$  durante 30 min y  $150\pm 5^\circ\text{C}$  durante 120 min) en un horno de secado y esterilización (Deleo, Brasil); y también fueron sometidos a deshidratación ( $105\pm 5^\circ\text{C}$ ) en un horno con circulación y renovación de aire (Marconi, MA035, Brasil) hasta alcanzar una masa constante.

Las muestras se pesaron (Micheletti, MIC-15, Brasil) antes y después de la prueba para cuantificar la humedad perdida. Después de la prueba, las muestras se almacenaron en un lugar seco para su posterior uso en la prueba de resistencia adquirida (RA) a la compresión, pruebas de fluorescencia de rayos X y prueba de absorción de agua).

Las muestras se molieron en un molino de bolas (de fabricación propia) durante 3 h. El tamaño de partícula se estandarizó pasando a través de un tamiz n. 8 (malla con abertura de 2,36 mm). El material molido se pesó, se colocó en un paquete debidamente sellado y identificado.

### 2.2. Prueba de análisis elemental

Las muestras de SIP, SSP y SFP se analizaron en un equipo de espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF) (Amptek, Bedford MA, US). Este sistema está compuesto por un detector de silicio (Silicon Drift Detector), con un área

de 25 mm<sup>2</sup> por 500 μm de espesor y protegido por una ventana de berilio de 12,5 μm. La fuente de rayos X utilizada en la excitación de las muestras consiste en un mini tubo de rayos X, que opera con un voltaje y corriente máximo de 30 kV y 5 μA, respectivamente. El tubo de rayos X utiliza un objetivo Ag. El software utilizado en la adquisición y análisis de datos de fluorescencia fue Dpp MCA (Versión: 1.0.0.12, www.amptek.com) y XRF-FP (Versión: 5.2.9, www.amptek.com), respectivamente.

Se realizaron mediciones de fluorescencia de rayos X en la superficie de las muestras. El sistema de fluorescencia se calibró utilizando patrones que contenían concentraciones conocidas de los elementos de interés, además de moldear las probetas con hormigón.

### 2.3. Preparación de probetas

La preparación de las probetas se realizó según ABNT NBR 5738: 2016 - Hormigón - Procedimiento de moldeado y curado de probetas. Se realizaron diez probetas en forma cilíndrica de 100x200 mm para cada composición del hormigón estudiado. Todos los componentes del hormigón se secaron en las condiciones determinadas por la prueba de esfuerzo térmico.

Las probetas (Tabla I) se prepararon utilizando dos trazas de hormigón medidas en masa (1:1,5:2,2 y 1:2:3). Para cada traza de hormigón se utilizaron tres concentraciones de aditivo (0%, 1% y 5%) según la cantidad de cemento.

**Tabla I.** Composición de trazas de hormigón para moldeo de probetas.

Traza	Cemento (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Proporción a/c	Aditivo SSS	Ensayo
1:1,5:2,2	8	12	17,6	0,47	0	01 a 10

1:1,5:2,2	8	12	17,6	0,51	0,4	11 a 20
1:2:3	7	14	21	0,55	0	21 a 30
1:2:3	7	14	21	0,55	0,35	31 a 40
1:1,5:2,2	8	12	17,6	0,51	0	41 a 50
1:2:3	7	14	21	0,55	0,07	51 a 60
1:1,5:2,2	8	12	17,6	0,51	0,08	61 a 70

Nota: a/c = agua/cemento

Se preparó una traza de concreto 1:1.5:2.2 sin aditivos, pero con un cambio en el factor agua/cemento para verificar el RA a la compresión del material, bajo la influencia de la cantidad de agua en la traza.

Todo el material (Tabla I) se separó y se pesó (Mars, LS200). Los moldes cilíndricos se engrasaron con aceite para quitar los moldes de la muestra más fácilmente después del curado.

Para la fabricación del hormigón se utilizó una hormigonera (Motomil, MB-400L Super, Brasil) para homogeneizar los componentes, incluido el aditivo (SSS), en su caso, con una cantidad de agua de amasado.

Se inició el proceso de trazado con la imprimación (crema de cemento) durante 1 min. Luego, el agregado grueso se arrojó a la hormigonera con la adición del 50% del agua de amasado durante 3 min, y luego de este tiempo, se agregó el agregado fino, trazando por otros 3 min. Finalmente, se incorporó el cemento y el 50% restante del agua de amasado. El hormigón se homogeneizó en la hormigonera durante otros 5 min, cumpliendo con la norma técnica de ABNT NBR 12655: 2015 [19].

Una vez finalizado el trazado, se realizó la prueba de asentamiento (determinación de la consistencia del hormigón fresco por asentamiento del tronco del cono) de acuerdo con ABNT NBR 16889: 2020 [20]. Las muestras se moldearon, identificaron y almacenaron en un lugar seco y seguro para su curación.

Cumpliendo con la norma NBR 5738:2015 [21], luego de 24 h resultantes del moldeado

de las probetas, se las sacó cuidadosamente de los moldes y se almacenaron sumergidas en el tanque en agua saturada con cal, siendo retiradas de inmersión solo para realizar las pruebas de RA a la compresión y absorción de agua.

## 2.4. Diseño experimental (DoE) para lo ensayo de resistencia a la compresión mecánica

Para analizar la resistencia (RA) físico-mecánica de las probetas se seleccionó el diseño factorial completo por duplicado  $2^2$  [22] como método multivariado (DoE). Los procedimientos se realizaron de forma aleatoria para evitar la ocurrencia de distorsiones estadísticas en los resultados.

Se estudiaron los efectos de los factores 'concentración de SSS' y 'tipo de hormigón' sobre la fuerza aplicada (FA) (tnf) y el RA (MPa) a los 7, 14 y 28 días después de la preparación de la muestra. Como en este análisis la muestra es destructiva, se necesitaron seis muestras (n=2) para cada parámetro de estudio.

La prueba de RA a la compresión se llevó a cabo de acuerdo con la norma ABNT NBR 5739:2018 [23]. Las probetas se retiraron de la inmersión y se sometieron a una carga de 2000 kN en una prensa mecánica hidráulica (Emic, GR045).

## 2.5. Ensayo de absorción de agua por inmersión

El ensayo de absorción de agua por inmersión se realizó según la norma ABNT NBR 9778:2009 [24]. En esta prueba se utilizaron tres probetas (n=3) para cada composición de hormigón, totalizando 18 muestras.

Cuando las probetas alcanzaron los 28 días después del moldeo, se trasladaron del tanque de inmersión al horno a temperatura controlada de  $105 \pm 5$  °C hasta obtener masa constante. Luego, las muestras se almacenaron en un lugar seco y se enfriaron

naturalmente a temperatura ambiente. Después de enfriar, las muestras se identificaron, se pesaron (Bel Engineering, M5202) y se colocaron en un recipiente con un nivel de agua correspondiente a 1/3 de su volumen sumergido en las primeras 4 h. Luego, se aumentó el nivel a 2/3 del volumen de la muestra durante otras 4 h, estando completamente sumergido durante 64 h, totalizando 72 h de inmersión.

El recipiente con las muestras se mantuvo tapado en un lugar seguro, para que no hubiera interferencia en los resultados por el cambio en el volumen de agua por evaporación con el aumento de la temperatura ambiente, o incluso por la incidencia de lluvia. La masa de cada muestra se midió en una escala de precisión después de 4, 8, 24, 48 y 72 h de inmersión. Luego, la absorción de agua se calculó mediante la Ecuación 1.

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde,  $A$  es la absorción por inmersión (%);  $M_s$  es la masa de la muestra secada al horno (g);  $M_{sat}$  es la masa de la muestra saturada (g).

## 2.6. Análisis estadístico

En cuanto al DoE, los efectos de los factores principales y los efectos de interacción se calcularon en el software Action Stat 3.1, así como el análisis ANOVA, efecto, varianza, error estándar, error estándar de un efecto y prueba, de independencia del modelo, proporcionando datos suficientes para la interpretación de los resultados.

Con el error estándar podemos construir intervalos de confianza para los valores de los efectos, usando la distribución de Student (Ecuación 2).

$$\hat{\eta} - t_v \times s(\text{efecto}) < \eta < \hat{\eta} + t_v \times s(\text{efecto}) \quad (2)$$

Donde,  $\eta$  representa el verdadero valor de

un efecto, es decir, población;  $\hat{\eta}$  = indica la estimación de este valor obtenida en el experimento;  $t_v$  = libertad en la distribución t;  $s$  = error estándar del efecto. De acuerdo con esta ecuación, solo consideramos estadísticamente significativo, con un 95% de confianza, un efecto cuyo valor absoluto sea mayor que  $t_4 \times s(\text{efecto})$ .

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Determinación de condiciones para secar SSS

Como los materiales fueron almacenados en un lugar abierto sujeto a lluvia y mal tiempo, fue necesario eliminar la humedad para que no interfiriera en la producción de trazas de hormigón. La condición seleccionada fue una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 14 días en un horno con circulación de aire y renovación para alcanzar masa constante.

#### 3.2. Ensayo de compresión de bloques SSS

Los 27 bloques de SSS no presentaron RA en la prueba de compresión, tanto en la prensa electrohidráulica como en la prensa manual, lo que demuestra ser un material frágil y sujeto a deformación plástica. Probablemente, este material presenta porosidad, al secarse los espacios vacíos deben llenarse de aire y, cuando son sometidos al FA de compresión, las partes sólidas de este bloque llenan las partes vacías; este fenómeno se conoce como acomodación de partículas.

#### 3.3. Análisis elemental

Los resultados de los ensayos de fluorescencia de rayos X se compilaron en la Tabla II, que muestra las concentraciones de los elementos químicos cuantificados de las muestras de SSP (bloques inoculados que no pudieron producir), SIP (bloques inoculados que están

listos para iniciar la producción) y SFP (bloques inoculados al final de la producción con un promedio de 10 semanas a partir de la fecha de inoculación con la espora del hongo).

El análisis elemental de las muestras SFP (1) y SFP (2), que tienen el mismo origen, dio como resultado diferencias cuantitativas de los mismos elementos. Estas diferencias pueden explicarse por la imprecisión en la producción de formulaciones de SSS sintéticos. Es decir, variaciones en la cantidad y calidad del ingrediente básico y los complementos utilizados para enriquecerlo, manipulación de bloques en estantes y riego manual sin estandarización durante la producción en cámara frigorífica, entre otros factores.

Algunos elementos químicos presentaron disminuciones significativas, como Ca, Fe, Si, P y Mn (Tabla II). Se teorizó que estas diferencias podrían justificar la no producción de shiitake en los bloques SSP. Sin embargo, sólo el elemento hierro parece consumirse en la producción (ya que las concentraciones detectadas fueron  $\text{SIP} = 792 \pm 11$ ,  $\text{SFP}(1) = 106 \pm 1$  y  $\text{SFP}(2) = 54 \pm 1$ ) y todos los demás elementos estudiados mantuvieron sus concentraciones iniciales (SIP).

Aún, en el caso del hierro, en la muestra de SSP la concentración fue de  $406 \pm 8$  ppm, esto es prácticamente la mitad de lo detectado en SIP ( $792 \pm 11$  ppm). El hierro parece formar la biomasa de shiitake.

Se observó (Tabla II) que en la muestra de SSP la mayoría de los elementos químicos estaban en menor concentración en comparación con las muestras SIP y SFP.

**Tabla II.** Determinación cualitativa y cuantitativa de elementos químicos en muestras de SSS (Spent Shiitake Substrate).

Elemento	Muestra de SSS (concentración $\pm$ error (ppm))			
	SSP	SIP	SFP(1)	SFP(2)
Ca	1540 $\pm$ 38	4496 $\pm$ 81	4799 $\pm$ 85	4366 $\pm$ 79
Fe	406 $\pm$ 8	792 $\pm$ 11	106 $\pm$ 1	54 $\pm$ 1
Ti	124 $\pm$ 9	69 $\pm$ 6	204 $\pm$ 11	35 $\pm$ 5
Si	655 $\pm$ 142	3561 $\pm$ 317	6068 $\pm$ 374	1413 $\pm$ 195

P	1009 ± 72	1730 ± 109	2266 ± 132	1635 ± 91
S	252 ± 68	314 ± 49	321 ± 63	290 ± 40
K	449 ± 21	515 ± 23	685 ± 26	595 ± 23
Mn	58 ± 3	86 ± 3	83 ± 3	104 ± 4
Zn	37 ± 3	60 ± 3	54 ± 3	62 ± 3
Rb	11 ± 2	9 ± 5	7 ± 3	9 ± 6
Bi	116 ± 49	212 ± 45	115 ± 28	146 ± 39
Y	10 ± 2	9 ± 2	6 ± 2	10 ± 2

Nota: Bloques inoculados que están listos para iniciar la producción (SIP); bloques inoculados que no pudieron producir (SSP); y bloques inoculados al final de la producción (SFP).

La baja concentración relativa de elementos puede estar relacionada con la incapacidad de producir shiitake (ya que la muestra de SSP representa los bloques inoculados que no produjeron), lo que puede representar una deficiencia nutricional inicial.

No obstante, lo esencial para la aplicación aquí estudiada (como aditivo para hormigón de cemento Portland) sería más indicado un material derivado de la mezcla de bloques SSP y SFP para minimizar la influencia de la concentración de los elementos químicos en el SSS.

### 3.4. Ensayo de resistencia a la compresión de probetas

#### 3.4.1. DoE para estudiar los efectos del tipo de hormigón y la concentración del SSS sin y con 5% de aditivo

La traza de concreto 1:1.5:2.2 sin aditivos con el factor agua/cemento (a/c) = 0.51 fue más resistente a la compresión que a/c = 0.47 en la prueba inicial para seleccionar la proporción a/c adoptada en este estudio.

Los resultados del FA y la (RA) sobre las probetas (CP), obtenidos a los 7, 14 y 28 días después del moldeo y sumergidas en agua, fueron tabulados y mostrados en la Tabla III. Recordando que solo consideramos estadísticamente significativo, con un 95% de confianza, un efecto cuyo valor absoluto sea

mayor que  $t_4 \times s(\text{efecto})$  [22].

Para el FA promedio aplicada para romper el bloque de concreto, el factor de tipo de concreto fue significativo en la prueba de 7 días; el factor de concentración de SSS fue significativo tanto en la prueba de 14 días como en la de 28 días; y ambos factores fueron significativos en las pruebas de 28 días. Estas deducciones estadísticas corroboran la evidencia empírica de que a adición del 5% del SSS, en ambos tipos de hormigón, provocó una disminución significativa del RA a la compresión ( $f_{ck}$ ) en comparación con los mismos hormigones sin aditivo, lo que hizo más frágil el hormigón con SSS (Tabla III).

**Tabla III.** Resultados del diseño factorial completo de 2<sup>2</sup> por duplicado para estudiar los efectos del tipo de hormigón y la concentración del SSS sin y con 5% de aditivo sobre el FA necesaria para romper las probetas.

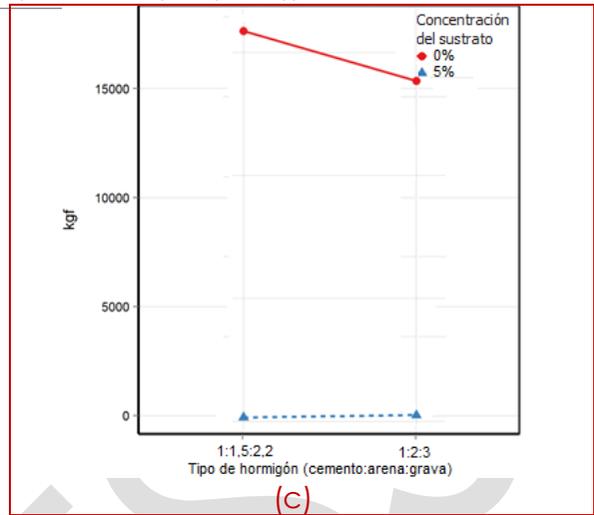
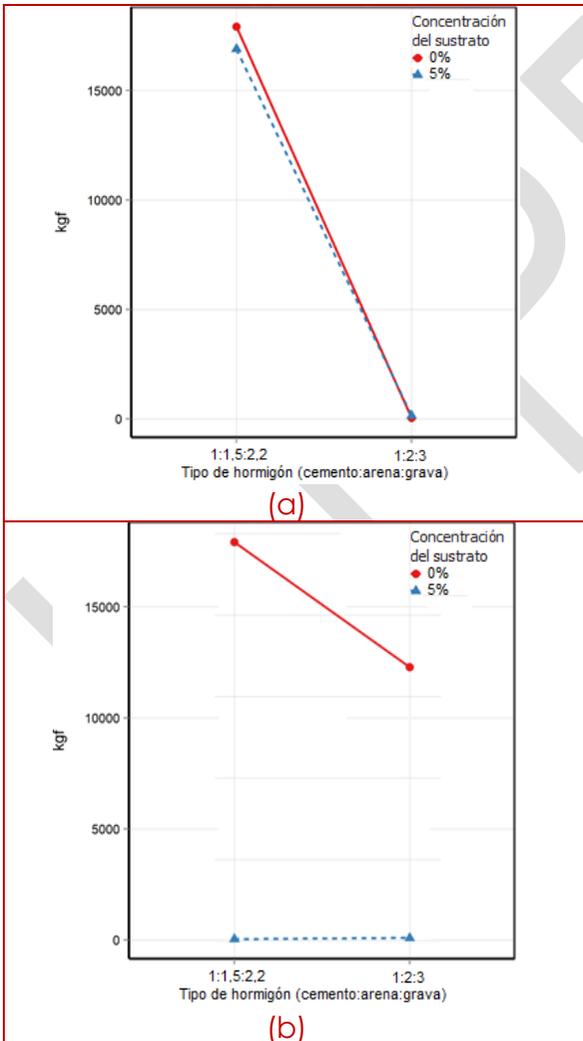
<b>Fatores:</b>				(-)	(+)	
A: Tipo de hormigón (cemento:arena:grava)				1:1,5:2,2	1:2:3	
B: Concentración del SSS (%)				0	5	
i	A	B	AB	<b>Fuerza media aplicada (tnf)</b>		
				7 días	14 días	28 días
1	-	-	+	17,93	24,49	15,87
2	-	+	-	0,05	0,11	0,15
3	+	-	-	16,90	16,90	13,84
4	+	+	+	0,15	0,17	0,24
<b>Efectos:</b>				<b>Fuerza aplicada (tnf ± s(efecto))</b>		
				FA7d	FA14d	FA28d
A				-34,63±1,58	-7,62±1,29	-1,94±1,85
B				-1,03±1,12	-4,38±0,91	-5,72±1,31
AB				1,13±1,58	7,74±3,87	2,12±1,85
$t_4 \times s(\text{efecto})$				2,24	1,83	2,61
i	A	B	AB	<b>Resistencia media (MPa)</b>		
				7 días	14 días	28 días
1	-	-	+	22,39	30,58	19,82
2	-	+	-	0,06	0,14	0,19
3	+	-	-	21,10	21,00	17,28
4	+	+	+	0,19	0,22	0,30
<b>Efectos:</b>				<b>Resistencia adquirida (MPa ± s(efecto))</b>		
				RA7d	RA14d	RA28d
A				-43,24±1,98	-51,22±1,62	-36,62±2,31
B				-1,29±1,40	-9,59±1,14	-2,54±1,63
AB				1,41±1,98	9,66±1,62	2,66±2,31
$t_4 \times s(\text{efecto})$				2,80	2,28	3,26

Nota: SSS (Spent Shiitake Substrate), Prueba experimental (i), Tonelada fuerza (tnf), con 4 grados de libertad en la distribución t de Student y con un 95% de confianza, del error estándar de un efecto ( $t_4 \times s(\text{efecto})$ ), Efectos principales (A) y (B), Efecto de interacción (AB).

Con la adición del 1% del SSS, el concreto con una traza de 1:1.5:2.2 mostró una pequeña disminución en los valores de  $f_{ck}$  en comparación con esta misma traza sin aditivo. En el hormigón con traza 1:2:3, con la misma adición de 1% del SSS, los valores presentados fueron cercanos a la RA a la compresión ( $f_{ck}$ ) de este hormigón sin aditivos.

### Gráficos de interacción

El gráfico de interacción tiene como objetivo identificar visualmente si los factores tienen un efecto conjunto o si son independientes. La interacción ocurre entre dos o más factores si el efecto de un factor en la respuesta depende del nivel de los otros factores [22], [25].



**Figura I.** Gráficos de interacción de efectos para la fuerza variable a los 7, 14 y 28 días en las pruebas de probetas sin y con 5% de SSS.

La Figura I muestra las gráficas de interacciones en los diferentes tiempos de moldeo de las probetas, con 7 días (Figura Ia), 14 días (Figura Ib) y 28 días (Figura Ic). En las Figuras Ib y Ic, la interacción ocurre entre los dos factores, ya que el efecto de la cantidad de SSS sobre el parámetro de RA del material depende del tipo de hormigón. El análisis de varianza (ANOVA) utilizado para estudiar los efectos del tipo de hormigón (Factor A) y la concentración de SSS utilizado (Factor B), además de la interacción entre estos factores (AB) sobre la FA requerida para la falla y la RA de la muestra ( $p < 0.05$ ) se muestra en la Tabla IV.

**Tabla IV.** Resultados de ANOVA respecto a los efectos del tipo de hormigón y la concentración del sustrato, además de la interacción de estos factores sobre la fuerza requerida para romper las probetas con y sin sustrato al 5%.

<i>Fuerza aplicada a los 7 días (kgf)</i>					
<i>Factor</i>	<i>GL</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Estad. F</i>	<i>P-valor</i>
A	1	$56,3 \times 10^3$	$56,3 \times 10^3$	0,04	0,85
B	1	$45,0 \times 10^7$	$45,0 \times 10^7$	319,25	0,00
AB	1	$9,5 \times 10^3$	$9,5 \times 10^3$	0,01	0,94
Residual	4	$5,6 \times 10^6$	$1,4 \times 10^6$		

<i>Fuerza aplicada a los 14 días (kgf)</i>					
<i>Factor</i>	<i>GL</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Estad. F</i>	<i>P-valor</i>
A	1	$8,8 \times 10^6$	$8,8 \times 10^6$	2,02	0,23

B	1	43,9x10 <sup>7</sup>	43,9x10 <sup>7</sup>	101,28	0,00
AB	1	9,3x10 <sup>6</sup>	9,3x10 <sup>6</sup>	2,14	0,22
Residual	4	1,7x10 <sup>7</sup>	0,4x10 <sup>7</sup>		

**Fuerza aplicada a los 28 días (kgf)**

Factor	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Estad. F	P-valor
A	1	2,5x10 <sup>6</sup>	2,5x10 <sup>6</sup>	3,48	0,14
B	1	51,2x10 <sup>7</sup>	51,2x10 <sup>7</sup>	700,42	0,00
AB	1	2,2x10 <sup>6</sup>	2,2x10 <sup>6</sup>	2,95	0,16
Residual	4	2,9x10 <sup>6</sup>	0,7x10 <sup>6</sup>		

Nota: Tipo de hormigón (A), Concentración de sustrato (B), Interacción (AB), Grados de libertad (GL)

El modelo calculado por regresión lineal con dos factores balanceados y con efectos cruzados de interacción, para las pruebas de RA a los 7, 14 y 28 días, viene dado, respectivamente, por las ecuaciones 3-5:

$$Y_{7\text{días}} = 7510 + 168A - 746B - 69AB \quad (3)$$

$$Y_{14\text{días}} = 8598 - 2092A - 8486B + 2152AB \quad (4)$$

$$Y_{28\text{días}} = 7630 + 1128A - 7480B - 1038AB \quad (5)$$

Los resultados de ANOVA (Tabla IV) muestran la significancia de la cantidad de SSS en los tres tiempos evaluados, donde los valores de P-value = 0 dado el análisis (p < 0.05). Este resultado difiere del significado encontrado en la Tabla III, donde en la prueba de 7 días  $t_4 \times s(\text{efecto}) = 2.24$  tnf está por encima del rango de efecto de concentración de SSS, que fue  $|1.03 \pm 1.12|$  tnf, a pesar de que los valores son muy cercanos.

**3.4.2. DoE para estudiar los efectos del tipo de hormigón y la concentración del SSS con 1% y 5% de aditivo**

También se realizó el DoE para evaluar los efectos principales y de interacción de los factores FA y RA en muestras con sustrato al 1% y 5%. Como resultado, para las muestras 7 días después del moldeo, hubo significación en el efecto solo de la concentración de SSS, tanto para FA  $|1,49 \pm 0,59|$  tnf como para RA  $|18,64 \pm 0,74|$

MPa, sin interacción entre los factores para estas muestras. Esto significa que el aumento de la concentración de SSS reduce significativamente la necesidad de FA. Estos datos se reprodujeron en el gráfico de interacción y se validaron en el análisis de varianza (ANOVA).

Los factores 'tipo de hormigón'  $|4,19 \pm 1,47|$  tnf y 'concentración de SSS'  $|16,97 \pm 1,04|$  tnf y la interacción entre los factores de  $|4,31 \pm 1,47|$  tnf fueron significativos para la FA en las muestras 14 días después de la preparación. Aun así, con respecto al RA, la interacción calculada fue  $|5,23 \pm 1,84|$  MPa para el 'tipo de hormigón' y  $|21,19 \pm 1,30|$  MPa para la 'concentración de SSS', con una interacción entre los dos de  $|5,38 \pm 1,84|$  MPa.

Por lo tanto, para los rasgos 1:1,5:2,2 y 1:2:3, cuanto mayor sea la concentración de SSS, menor será el FA y, en consecuencia, menor será el RA. Este efecto fue mayor para el rasgo 1:1,5:2,2; es decir, este rasgo tenía menos RA que el rasgo 1:2:3. Fue posible visualizar este hallazgo en el gráfico de interacción, pero en el ANOVA solo el factor 'concentración SSS' fue significativo (p < 0.05). Asimismo, en las muestras 28 días después de la preparación, los resultados de los cálculos indicaron un efecto significativo de los factores 'tipo de hormigón'  $|2,26 \pm 0,60|$  tnf y 'concentración de sustrato'  $|14,96 \pm 0,43|$  tnf, y la interacción entre factores en FA  $|2,08 \pm 0,60|$  tnf. Para el factor 'tipo de hormigón' el RA fue  $|2,85 \pm 0,76|$  MPa, para la 'concentración de SSS' fue  $|18,69 \pm 0,53|$  Mpa y para la interacción entre los dos fue  $|2,56 \pm 0,76|$  MPa. Las consideraciones descritas para las muestras 14 días después de la preparación, con respecto a los efectos de los factores individuales, las interacciones entre estos factores y el ANOVA, se aplican a las muestras 28 días después de la preparación. Difiriendo solo en la mayor importancia de los efectos durante 14 días en comparación con los efectos durante 28 días.

### 3.5. Determinación de la absorción de agua por inmersión

Los resultados de la prueba de absorción de agua ( $n = 3$ ) de los cuerpos se agruparon en la Tabla V. Las probetas con 5% de aditivo en su composición absorbieron más agua en ambas trazas de hormigón (1:1,5:2,2 y 1:2:3 absorbieron  $10,17 \pm 0,11\%$  y  $9,03 \pm 0,22\%$ , respectivamente), que las otras composiciones sin y con 1% de aditivo. Se supone que la concentración de aditivo en el hormigón lo hace más poroso y, en consecuencia, tiene más espacios vacíos para acomodar el agua. Esta hipótesis sobre la porosidad del material debido a la presencia de un aditivo en su composición corrobora las ideas de Neville y Brooks [10].

**Tabla V.** Resultados de la prueba de absorción de agua. ( $n=3$ )

Trazas de hormigón	Aditivo (%)	Masa seca $\pm DP$ (g)	Absorción agua $\pm DP$ (%)
1:1,5:2,2	0	3532 $\pm$ 22	5,83 $\pm$ 0,11
1:1,5:2,2	5	3148 $\pm$ 15	10,17 $\pm$ 0,11
1:2:3	0	3595 $\pm$ 9	5,44 $\pm$ 0,08
1:2:3	5	3076 $\pm$ 86	9,03 $\pm$ 0,22
1:2:3	1	3477 $\pm$ 7	6,44 $\pm$ 0,31
1:1,5:2,2	1	3538 $\pm$ 8	5,58 $\pm$ 0,04

En las formulaciones con 1% de aditivo, las probetas, con una traza de hormigón 1:1,5:2,2, presentaron absorción de agua (10,43% en promedio) que la misma traza sin aditivo. En el caso del concreto con traza 1:2:3 con la misma adición de 1% del SSS, las probetas ensayadas absorbieron un promedio de 18,38% más de agua al sumergirlas en el tanque. Por lo tanto, cuanto mayor sea la concentración de SSS agregado a la composición del concreto, mayor será la absorción de agua.

En las formulaciones con 1% de aditivo, las muestras absorbieron  $6,44 \pm 0,31\%$  y  $5,58 \pm 0,04\%$

de agua en ambas trazas, 1:2:3 y 1:1,5:2,2, respectivamente. Estos valores son mucho más bajos en comparación con la absorción de agua de muestras con SSS al 5%. Este hecho refuerza la teoría de que el SSS aumenta la porosidad independientemente del tipo de hormigón, entre los aquí estudiados.

La absorción de agua para el aditivo al 1% no fue diferente para los dos tipos de trazas (1:2: y 1:1,5:2,2 con absorción de agua de  $6,44 \pm 0,31\%$  y  $5,58 \pm 0,04\%$ , respectivamente). Asimismo, estuvo muy cerca de las mismas líneas sin aditivos (1:2:3 y 1:1,5:2,2 con absorción de agua de  $5,44 \pm 0,08\%$  y  $6,23 \pm 0,17\%$ , respectivamente). Siguiendo la teoría propuesta, esta observación indica que la porosidad del material depende de la concentración de aditivo SSS utilizado.

### 4. Conclusión

En este trabajo se encontraron diferentes concentraciones de elementos químicos para bloques del tipo SSP y SFP, por lo que un material derivado de la mezcla de este tipo de bloques sería más adecuado al ser utilizado como aditivo para el concreto de cemento Portland, para minimizar la influencia de la concentración de elementos químicos en el SSS.

A través de esta investigación, fue posible evaluar los efectos de dos tipos de concreto, a saber, una traza 1:1,5:2,2 y una traza 1:2:3, agregadas con sustrato del cultivo del hongo *Lentinula edodes* (shiitake), en concentraciones de 0%, 1% y 5%. La evaluación de estos factores, en función del RA y la absorción de agua por las muestras de hormigón, indicó que cuanto mayor es la concentración de aditivo, menos resistente es el hormigón. La concentración del 1% de sustrato en la traza 1:2:3 se puede aplicar en obra civil cuando se necesita un hormigón con cierta porosidad, por ejemplo, en suelos drenantes. Sin embargo, se necesitan estudios para probar este tipo de aplicación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo del Programa de Posgrado en Procesos Tecnológicos y Ambientales, la Universidad de Sorocaba (UNISO) y el Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de São Paulo (IFSP) de Itapetininga por apoyar esta investigación.

## Referencias

- [1] S. T. Chang and P. G. Miles, *Mushrooms: Cultivation, nutritional value, medicinal effect, and environmental impact*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.
- [2] M. W. Miller and S. C. Jong, "Commercial Cultivation of Shiitake in Sawdust Filled Plastic Bags," *Developments in Crop Science*, vol. 10, pp. 421–426, 1987, doi: 10.1016/B978-0-444-42747-2.50049-X.
- [3] D. J. Royse and J. E. Sanchez-Vazquez, "Influence of substrate wood-chip particle size on shiitake (*Lentinula edodes*) yield," *Bioresource Technology*, vol. 76, no. 3, pp. 229–233, 2001, doi: 10.1016/S0960-8524(00)00110-3.
- [4] D. J. Royse, "Speciality Mushrooms and Their Cultivation," in *Horticultural Reviews*, Volume 19., J. Janick, Ed. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 59–97. doi: 10.1002/9780470650622.ch2.
- [5] I. H. Rossi, A. C. Monteiro, J. O. Machado, and J. C. Barbosa, "Supplementation of sugarcane bagasse with rice bran and sugarcane molasses for shiitake (*Lentinula edodes*) spawn production," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 34, no. 1, pp. 61–65, Apr. 2003, doi: 10.1590/S1517-83822003000100013.
- [6] F. G. Siqueira *et al.*, "Aplicações biotecnológicas para biomassas do pós-cultivo de cogumelos comestíveis," in *8th International Symposium on Mushrooms in Brazil and 7th National Symposium on Edible Mushrooms*, 2015, pp. 137–153.
- [7] C. Paredes, E. Medina, M. A. Bustamante, and R. Moral, "Effects of spent mushroom substrates and inorganic fertilizer on the characteristics of a calcareous clayey-loam soil and lettuce production," *Soil Use and Management*, vol. 32, no. 4, pp. 487–494, Dec. 2016, doi: 10.1111/sum.12304.
- [8] R. X. Lopes, D. C. Zied, E. T. Martos, R. J. de Souza, R. da Silva, and E. S. Dias, "Application of spent *Agaricus subrufescens* compost in integrated production of seedlings and plants of tomato," *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, vol. 4, no. 3, pp. 211–218, Sep. 2015, doi: 10.1007/s40093-015-0101-7.
- [9] C. O. Carmo, M. S. Rodrigues, F. Silva, T. G. M. Irineu, and A. C. F. Soares, "Spent mushroom substrate of *Pleurotus ostreatus* kummer increases basil biomass and essential oil yield," *Revista Caatinga*, vol. 34, no. 3, pp. 548–558, Sep. 2021, doi: 10.1590/1983-21252021v34n306rc.
- [10] Y. K. Leong, T.-W. Ma, J.-S. Chang, and F.-C. Yang, "Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review," *Bioresource Technology*, vol. 344, p. 126157, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126157.
- [11] H. Jiang *et al.*, "Characteristics of bio-oil produced by the pyrolysis of mixed oil shale semi-coke and spent mushroom substrate," *Fuel*, vol. 200, pp. 218–224, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.03.075.
- [12] S. S. Lam *et al.*, "Microwave vacuum pyrolysis conversion of waste mushroom substrate into biochar for use as growth medium in mushroom cultivation," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 94, no. 5, pp. 1406–1415, May 2019, doi: 10.1002/jctb.5897.
- [13] D. C. Zied, J. E. Sánchez, R. Noble, and A. Pardo-Giménez, "Use of spent mushroom substrate in new mushroom crops to promote the transition towards a circular economy," *Agronomy*, vol. 10, no. 9. MDPI AG, Sep. 01, 2020. doi: 10.3390/agronomy10091239.
- [14] Z. Lou, Y. Sun, S. Bian, S. Ali Baig, B. Hu, and X. Xu, "Nutrient conservation during spent mushroom compost application using spent mushroom substrate derived biochar," *Chemosphere*, vol. 169, pp. 23–31, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.044.
- [15] B. Najafi, S. Faizollahzadeh Ardabili, S. Shamshirband, and K. wing Chau, "Spent mushroom compost (SMC) as a source for biogas production in Iran," *Engineering Applications of Computational Fluid*

- Mechanics, vol. 13, no. 1, pp. 967–982, Jan. 2019, doi: 10.1080/19942060.2019.1658644.
- [16] F. Chen, S. Xiong, M. Latha Gandla, S. Stagge, and C. Martín, "Spent mushroom substrates for ethanol production – Effect of chemical and structural factors on enzymatic saccharification and ethanolic fermentation of *Lentinula edodes*-pretreated hardwood," *Bioresource Technology*, vol. 347, p. 126381, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126381.
- [17] J. Huang, J. Liu, K. Chang, M. Buyukada, and F. Evrendilek, "(Co-)pyrolytic performances and by-products of textile dyeing sludge and spent mushroom substrate," *Journal of Cleaner Production*, vol. 261, p. 121195, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121195.
- [18] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Tecnologia do concreto*, 2nd ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [19] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 12655:2015 Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*. Brasil, 2015, p. 29.
- [20] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 16889:2020 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Brasil: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2020, p. 5.
- [21] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5738:2015 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Brasil, 2015, p. 9.
- [22] B. Barros Neto, I. S. Scarminio, and R. E. Bruns, *Como fazer experimentos: Aplicações na ciência e na indústria*, 4th ed. Bookman, 2010.
- [23] ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5739/2018 Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Brasil, 2018, p. 4.
- [24] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 9778:2019 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Brasil, 2019, p. 4.
- [25] V. M. H. Yoshida *et al.*, "Development and Preliminary Assessment of Hemoperfusion Cartridge with Tannic Acid for Toxic Proteins' Precipitation: An In Vitro Model," *Recent Advances in Biology and Medicine*, vol. 3,

pp. 62–70, 2016.