



Aprovechamiento de los residuos madereros para la elaboración de hormigón

Use of wood waste for the production of concrete

Aproveitamento de sobras de madeira para a produção de concreto

Gabriel Marcelo Flores-Vaca^I
savchez19@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1116-6685>

Andrés Ángel Sánchez-Cordero^{II}
andresa.sanchez@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0052-9428>

Marco Raúl Chuiza-Rojas^{III}
mchuiza@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3808-3302>

Iván Fernando Huacho-Chávez^{IV}
ivan.huacho@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3144-3379>

María Augusta Guadalupe-Alcoser^V
maria.guadalupe@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0547-215X>

Correspondencia: savchez19@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 13 de octubre de 2022 * **Aceptado:** 28 de noviembre de 2022 * **Publicado:** 12 de diciembre de 2022

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Ecuador.
- V. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Ecuador.

Resumen

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo la utilización de residuos madereros de Eucalipto (*Eucalyptus*) de la ciudad de Riobamba, para la elaboración de hormigón mezclando éste con cemento y cal hidratada. La metodología constó de cuatro etapas, la primera fue la caracterización física del aserrín de Eucalipto mediante un análisis granulométrico obteniendo aserrín fino (partículas menores a 2mm) y aserrín grueso (partículas menores a 5mm y mayores a 2mm), pruebas de humedad presentando valores de 26,96 y 13,53 %, y, densidad con valores de 0,288 y 0,291 g/cm³ para aserrín fino y grueso respectivamente, la segunda etapa consistió en la elaboración de un diseño de mezclas con tres variables de entrada (composición de cemento, aserrín fino y aserrín grueso) y dos variables de respuesta (resistencia a la compresión y el peso), elaborando nueve mezclas con contenido de cemento de 500, 550 y 600 kg/m³, y un contenido de aserrín en relación fino-grueso de 60/40, 50/50, y 40/60 para cada una. La tercera etapa consistió en la elaboración de muestras de dichas mezclas y realización de pruebas de resistencia a la compresión de las mismas. Finalmente se realizó un análisis estadístico con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales con la ayuda del software Statgraphics, determinando que la mezcla que simultáneamente muestra una maximización en la resistencia a la compresión y una minimización del peso del hormigón es la mezcla C. compuesta por una cantidad de cemento de 500 kg/m³ y una relación de aserrín fino- grueso de 40/60, presentando una resistencia a la compresión de 45,58 kg/cm² y un peso de 2,31kg. Se recomienda realizar un estudio utilizando distintos tipos de cemento en el hormigón para determinar su influencia en los resultados finales.

Palabras clave: Hormigón; Aserrín; Cemento; Resistencia a la Compresión; Peso; Mezclas; Residuos Madereros.

Abstract

The objective of this research work was the use of *Eucalyptus* (*Eucalyptus*) wood residues from the city of Riobamba, for the preparation of concrete by mixing it with cement and hydrated lime. The methodology consisted of four stages, the first was the physical characterization of the *Eucalyptus* sawdust through a granulometric analysis obtaining fine sawdust (particles less than

2mm) and coarse sawdust (particles less than 5mm and greater than 2mm), humidity tests presenting values of 26.96 and 13.53 %, and, density with values of 0.288 and 0.291 g/cm³ for fine and coarse sawdust respectively, the second stage consisted in the elaboration of a mixture design with three input variables (cement composition, fine sawdust and coarse sawdust) and two response variables (resistance to compression and weight), preparing nine mixtures with a cement content of 500, 550 and 600 kg/m³, and a sawdust content in a fine-coarse ratio of 60 /40, 50/50, and 40/60 for each. The third stage consisted in the elaboration of samples of said mixtures and performance of compression resistance tests of the same. Finally, a statistical analysis was carried out with the results obtained in the experimental tests with the help of the Statgraphics software, determining that the mixture that simultaneously shows a maximization in the resistance to compression and a minimization of the weight of the concrete is the mixture C. composed of a quantity of cement of 500 kg/m³ and a ratio of fine-coarse sawdust of 40/60, presenting a compressive strength of 45.58 kg/cm² and a weight of 2.31kg. It is recommended to carry out a study using different types of cement in the concrete to determine their influence on the final results.

Keywords: Concrete; Sawdust; Cement; Compressive Strength; Weight; mixes; Wood waste.

Resumo

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi a utilização de resíduos de madeira de eucalipto (*Eucalyptus*) da cidade de Riobamba, para a preparação de concreto misturando-o com cimento e cal hidratada. A metodologia consistiu em quatro etapas, a primeira foi a caracterização física da serragem de eucalipto através de análise granulométrica obtendo serragem fina (partículas menores que 2mm) e serragem grossa (partículas menores que 5mm e maiores que 2mm), testes de umidade apresentando valores de 26,96 e 13,53%, e densidade com valores de 0,288 e 0,291 g/cm³ para serragem fina e grossa respectivamente, a segunda etapa consistiu na elaboração de um projeto de mistura com três variáveis de entrada (composição do cimento, serragem fina e grossa serragem) e duas variáveis de resposta (resistência à compressão e peso), preparando nove misturas com teores de cimento de 500, 550 e 600 kg/m³ e teores de serragem na relação fino-grosso de 60/40, 50/50, e 40/60 para cada. A terceira etapa consistiu na elaboração de amostras das referidas misturas e realização de ensaios de resistência à compressão das mesmas. Por fim, foi realizada uma análise estatística com os resultados obtidos nos ensaios experimentais com a

ajuda do software Statgraphics, determinando que a mistura que apresenta simultaneamente uma maximização na resistência à compressão e uma minimização do peso do concreto é a mistura C. composto por uma quantidade de cimento de 500 kg/m³ e uma relação serragem fina-grosseira de 40/60, apresentando resistência à compressão de 45,58 kg/cm² e peso de 2,31kg. Recomenda-se a realização de um estudo utilizando diferentes tipos de cimento no concreto para determinar sua influência nos resultados finais.

Palavras-chave: Concreto; Serragem; Cimento; Força compressiva; Peso; misturas; Resíduos de madeira.

Introducción

La generación de residuos en la industria maderera constituye una problemática recurrente, en 2014 se estimó que la producción de residuos provenientes de la madera representa un 6,3% del total de residuos generados a nivel mundial (Chávez y Rodríguez, 2016, p. 92). La alta producción de materiales a partir de la madera como: papel, cartón, muebles, entre otros genera alrededor de 2,92 toneladas de residuos por mes en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo (Calva et al., 2018, p. 229). La manipulación y eliminación eficiente de estos residuos son barreras que caracterizan altos costos para la industria y contaminan el medio ambiente, desencadenando grandes cantidades de dióxido de carbono. Entre los residuos madereros están: aserrín, viruta y retazos. Estos últimos un potencial para la obtención de energía, combustible, carbón y usos agropecuarios, sin embargo, el aserrín es considerado como un desecho. El desconocimiento de este tipo de aprovechamientos en las industrias madereras de Riobamba establece la importancia de este proyecto de investigación.

Por otra parte, la producción de hormigón ordinario implica una composición de aproximadamente 12% de cemento y 80% de agregado por masa, siendo dicho agregado arena, grava, y roca triturada que implica un consumo aproximado de 10 a 11 billones de toneladas cada año. Los métodos de extracción, procesamiento, y transporte de agregado, consumen cantidades considerables de energía, y afecta la ecología (Kumar y Monteiro, 2013).

Una solución a este problema es la utilización de este tipo de desechos como materias primas para la elaboración de nuevos materiales. Por lo tanto, la presente investigación elaborará hormigón utilizando aserrín como materia prima.

El aserrín presenta una porosidad de retención de agua de $17,13 \text{ g/cm}^3$ (Gayosso et al., 2018, p. 645), al realizar hormigón con fibras de madera, las fibras controlan el comportamiento de la humedad en la pasta de cemento. La contracción de las fibras es controlada por el contenido de cemento de la mezcla, mientras las fibras naturales controlan el contenido de humedad del hormigón, en Indonesia se han construido pequeñas viviendas a partir de este material en donde se han producido paneles para paredes y losas prefabricados con hormigón alivianado con fibras de madera (Coronel y Rodríguez, 2016, p. 18).

Materiales y métodos

Materiales

El desarrollo experimental se desarrolló en cuatro etapas, en la primera se realizará la caracterización del aserrín de eucalipto y se seleccionará el que tenga un diámetro de partícula menor a 5 mm, en la segunda etapa se elaborará un diseño de mezclas utilizando un método simplex con $q=3$ variables las mismas que son: composición de aserrín fino, de aserrín grueso y de cemento y $y=2$ variables de respuesta resistencia a la compresión y peso del bloque. En la tercera etapa se elaborarán muestras cilíndricas de hormigón utilizando diferentes composiciones de aserrín grueso y fino, y cemento, se elaborarán varias muestras de cada composición y se realizarán pruebas de resistencia a la compresión y peso de las mismas a diferentes días de curado y en la cuarta etapa se realizará un análisis estadístico mediante el software Statgraphics el cual determinará cual es la mezcla óptima de componentes en el hormigón y su comparación con los resultados mostrados por una muestra elaborada con hormigón tradicional.

Para la determinación del tamaño se consideró como aserrín fino a aquellas partículas con un diámetro menor a 2mm, mientras que, para el aserrín grueso, a aquellas partículas con diámetro entre 5 y 2 mm.

Métodos de análisis

Para la realización de esta investigación se realizó un diseño de mezclas con 3 variables de entrada (cantidad de cemento, aserrín fino y aserrín grueso) y dos variables de respuesta (resistencia a la compresión y peso), utilizando un método simplex que consiste en representar mediante una figura las variables para determinar de manera geométrica las regiones de los experimentos con la mezcla. (Gutierrez y De la Vara, 2015, pp 482-486).

Al tener $q=3$ variables la representación se dará en un triángulo equilátero donde x_1 representa la cantidad de cemento, x_2 la cantidad de aserrín fino y x_3 la cantidad de aserrín grueso, dándose limitaciones de $0,17 \leq x_1 \leq 0,22$; $0,31 \leq x_2 \leq 0,50$; y, $0,31 \leq x_3 \leq 0,50$.

Realizado por: Los autores.

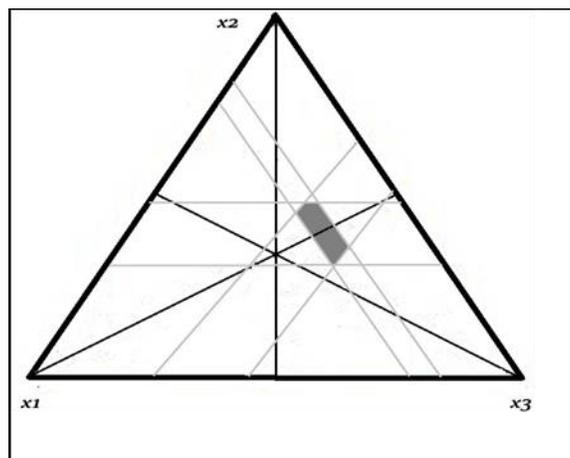


Figura 1. Método simplex del diseño de mezclas

Las muestras de hormigón elaboradas poseen una forma cilíndrica de 5cm de radio y 20 cm de altura, teniendo así:

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * (5cm)^2 * 20cm$$

$$V = 1570,79 \text{ cm}^3$$

Se van a elaborar un total de 9 mezclas con un contenido de cemento de 500,550 y 600 kg/m^3 , y una relación de aserrín fino y grueso de 60/40, 50/50 y 40/60 en cada una, con una cantidad de 4 muestras por cada mezcla para realizar ensayos a distintos días de curado, adicionalmente se elaboraron 4 muestras de hormigón simple para realizar la comparación respectiva.

- Cálculo del volumen de la muestra

Las muestras de hormigón elaboradas poseen una forma cilíndrica de 5cm de radio y 20 cm de altura, teniendo así:

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * (5cm)^2 * 20cm$$

$$V = 1570,79 \text{ cm}^3$$

Donde:

m_{af} = masa de aserrín fino

V_{af} = volumen de cemento

$V_{cemento}$ = volumen de aserrín fino

ρ_{af} = densidad de aserrín fino

V = volumen de la muestra

- Cálculo de la cantidad de Aserrín grueso

$$V_{ag} = (V - V_{cemento}) * 0,4$$

$$V_{ag} = (1570,79 \text{ cm}^3 - 280,499 \text{ cm}^3) * 0,4$$

$$V_{ag} = 516,11 \text{ cm}^3$$

$$m_{ag} = V_{ag} * \rho_{ag}$$

$$m_{ag} = 516,11 \text{ cm}^3 * 0,291 \text{ g/cm}^3$$

$$m_{ag} = 150,45 \text{ g}$$

Donde:

m_{ag} = masa de aserrín grueso

V_{ag} = volumen de cemento

$V_{cemento}$ = volumen de aserrín grueso

ρ_{ag} = densidad de aserrín grueso

V = volumen de la muestra

- Cálculo de la cantidad de Cal

$$m_{cal} = (m_{af} + m_{ag}) * 0,1$$

$$m_{cal} = (222,96 \text{ g} + 150,45 \text{ g}) * 0,1$$

$$m_{cal} = 37,34 \text{ g}$$

Donde:

m_{af} = masa de aserrín fino

m_{ag} = masa de aserrín grueso

m_{cal} = masa de cal

Resultados y discusión

Resultados del tamaño de partícula

Tabla 1. Granulometría del aserrín fino

MALLA N°	ASTM DIÁMETRO PARTÍCULA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	9,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
5	4,00	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
16	1,18	40,67	40,67	40,67	59,33
30	0,60	31,40	31,40	72,07	27,93
50	0,30	17,78	17,78	89,85	10,15
100	0,15	0,65	0,65	90,50	9,50
200	0,08	7,86	7,86	98,36	1,64
RESIDUO		1,64	1,64	100,00	0,00
SUMA		100,00			

Realizado por: Los autores 2022.

Realizado por: Los autores 2022.

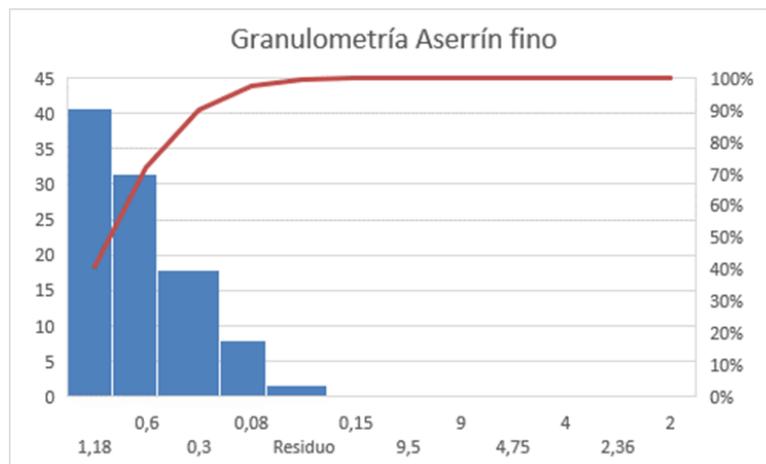


Gráfico 1. Histograma de granulometría del aserrín fino

Tabla 2. Granulometría del aserrín grueso

MALLA ASTM N°	DIÁMETRO PARTÍCULA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	9,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	9,95	9,95	9,95	90,05
5	4,00	31,45	31,45	41,40	58,6
8	2,36	49,78	49,78	91,18	8,82
10	2,00	8,82	8,82	100,00	0,00
16	1,18	0,00	0,00	100,00	0,00
30	0,60	0,00	0,00	100,00	0,00
50	0,30	0,00	0,00	100,00	0,00
100	0,15	0,00	0,00	100,00	0,00
200	0,08	0,00	0,00	100,00	0,00
RESIDUO		0,00	0,00	100,00	0,00
SUMA		100,00			

Realizado por: Los autores 2022.

Realizado por: Los autores 2022.

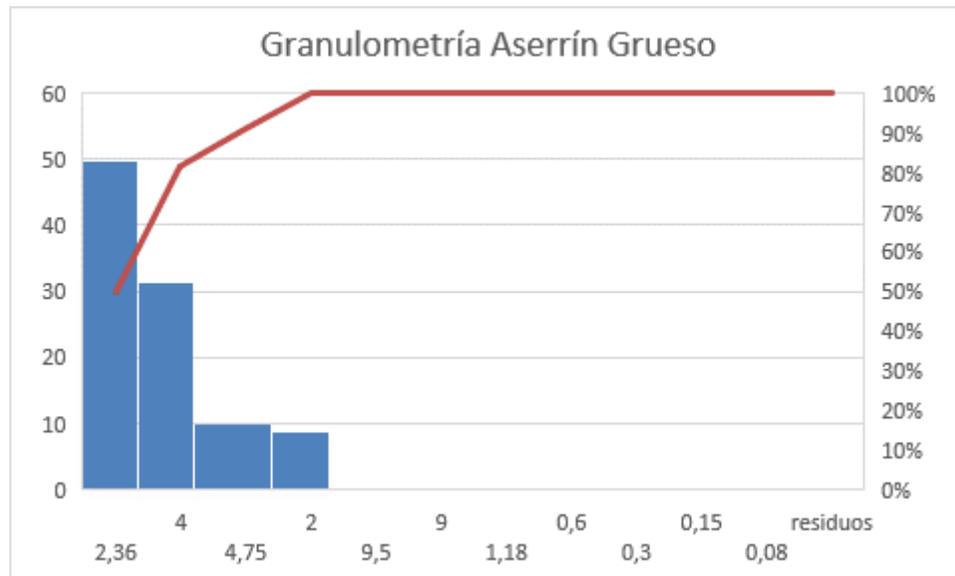


Gráfico 2. Histograma de granulometría del aserrín grueso

En las tablas 1 y 2 se muestra que el aserrín tanto grueso como fino presentan un tamaño de partícula adecuado para la realización del hormigón, dándole a éste el agregado fino y grueso que se necesita y reduciendo el peso del mismo.

Al realizar las pruebas de contenido de humedad tanto del aserrín fino como grueso arrojó un contenido de 26,96% de humedad en el aserrín fino y un 13,53% de humedad en el aserrín grueso, valores que cumplen con la cantidad de humedad presente en el aserrín establecida en estudios anteriores, en los que se establece que el aserrín debe contener menos del 50% de humedad para que pueda ser utilizado.

Tabla 3 Datos para determinar la densidad

Tipo de Aserrín	Masa (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Fino	5,76	20	0,288
Grueso	5,83	20	0,291

Realizado por: Los autores 2022.

Una vez realizados los respectivos cálculos se obtuvieron las siguientes formulaciones del hormigón en masa de cada componente para una muestra cilíndrica de 10cm de diámetro y 20cm de altura:

Mezcla A: Cemento 500 kg/m³, relación de aserrín 60% fino, 40% grueso. Cemento: 785,39 g; Aserrín fino: 222,96 g; Aserrín grueso: 150,45 g; Cal hidratada: 37,34 g

Mezcla B: Cemento 500 kg/m³, relación de aserrín 50% fino, 50% grueso. Cemento: 785,39 g; Aserrín fino: 185,80 g; Aserrín grueso: 187,74 g; Cal hidratada: 37,35 g

Mezcla C: Cemento 500 kg/m³, relación de aserrín 40% fino, 60% grueso. Cemento: 785,39 g; Aserrín fino: 148,64 g; Aserrín grueso: 225,28 g; Cal hidratada: 37,39 g

Mezcla D: Cemento 550 kg/m³, relación de aserrín 60% fino, 40% grueso. Cemento: 863,94 g; Aserrín fino: 218,12 g; Aserrín grueso: 146,93 g; Cal hidratada: 36,50

Mezcla E: Cemento 550 kg/m³, relación de aserrín 50% fino, 50% grueso. Cemento: 863,94 g; Aserrín fino: 181,76 g; Aserrín grueso: 183,66 g; Cal hidratada: 36,54 g

La densidad del aserrín se encuentra entre 0,1 a 0,5 g/ml, por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos, la densidad calculada se encuentra dentro del rango establecido.

Mezcla F: Cemento 500 kg/m³, relación de aserrín 40% fino, 60% grueso. Cemento: 863,94 g; Aserrín fino: 145,41 g; Aserrín grueso: 220,39 g; Cal hidratada: 36,57 g

Mezcla G: Cemento 600 kg/m³, relación de aserrín 60% fino, 40% grueso. Cemento: 942,48 g; Aserrín fino: 213,26 g; Aserrín grueso: 143,66 g; Cal hidratada: 35,69 g

Mezcla H: Cemento 600 kg/m³, relación de aserrín 50% fino, 50% grueso. Cemento: 942,48 g; Aserrín fino: 177,72 g; Aserrín grueso: 179,58 g; Cal hidratada: 35,73 g

Mezcla I: Cemento 600 kg/m³, relación de aserrín 40% fino, 60% grueso. Cemento: 942,48 g; Aserrín fino: 142,18 g; Aserrín grueso: 215,49 g; Cal hidratada: 35,77 g

Mezcla J: Hormigón simple f'c 210 kg/cm²; Cemento: 781,25 g; Agregado fino (macadán): 1535,63 g; Agregado grueso (ripio): 2341,88 g

Tabla 4. Resultados de la mezcla A (Cemento 500 kg/m³, relación de aserrín 60% fino, 40% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	11/1/2021	18/1/2021	7	101,00	200,70	1607,98	2,24	1,39	37,83
2	11/1/2021	25/1/2021	14	100,50	201,00	1594,48	2,24	1,40	40,79
3	11/1/2021	1/2/2021	21	100,00	201,30	1581,01	2,34	1,48	48,03
4	11/1/2021	8/2/2021	28	100,00	201,00	1578,65	2,26	1,43	48,33
Promedio							2,27	1,43	43,75

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 5. Resultados de la mezcla B (Cemento 500 kg/m³, relación de aserrín 50% fino, 50% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	11/1/2021	18/1/2021	7	101,00	200,00	1602,37	2,26	1,41	39,97
2	11/1/2021	25/1/2021	14	100,50	200,30	1588,92	2,20	1,38	43,85
3	11/1/2021	1/2/2021	21	100,50	201,70	1600,03	2,34	1,46	48,74
4	11/1/2021	8/2/2021	28	101,00	201,00	1610,38	2,36	1,47	48,54
Promedio							2,29	1,43	45,28

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 6. Resultados de la mezcla C (Cemento 500 kg/m³, relación de aserrín 40% fino, 60% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	11/1/2021	18/1/2021	7	101,00	201,70	1615,99	2,30	1,42	39,87
2	11/1/2021	25/1/2021	14	100,50	201,70	1600,03	2,26	1,41	44,36
3	11/1/2021	1/2/2021	21	100,50	200,00	1586,54	2,36	1,49	48,33
4	11/1/2021	8/2/2021	28	101,00	200,00	1602,37	2,32	1,45	49,76
Promedio							2,31	1,44	45,58

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 7. Resultados de la mezcla D (Cemento 550 kg/m³, relación de aserrín 60% fino, 40% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	11/1/2021	18/1/2021	7	101,00	200,70	1607,98	2,32	1,44	38,85
2	11/1/2021	25/1/2021	14	100,00	201,00	1578,65	2,32	1,47	44,97
3	11/1/2021	1/2/2021	21	101,00	200,70	1607,98	2,36	1,47	52,31
4	11/1/2021	8/2/2021	28	101,00	200,00	1602,37	2,34	1,46	52,72
Promedio							2,34	1,46	47,21

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 8. Resultados de la mezcla E (Cemento 550 kg/m³, relación de aserrín 50% fino, 50% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12/1/2021	19/1/2021	7	101,00	201,00	1610,38	2,32	1,44	37,52
2	12/1/2021	26/1/2021	14	100,50	204,70	1623,83	2,32	1,43	42,52
3	12/1/2021	2/2/2021	21	100,00	200,70	1576,29	2,36	1,49	51,49
4	12/1/2021	9/2/2021	28	101,00	202,00	1618,39	2,36	1,46	55,57
Promedio							2,34	1,46	46,78

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 9. Resultados de la mezcla F (Cemento 550 kg/m³, relación de aserrín 40% fino, 60% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12/1/2021	19/1/2021	7	100,50	200,70	1592,09	2,34	1,47	36,51
2	12/1/2021	26/1/2021	14	100,50	200,00	1586,54	2,32	1,46	49,35
3	12/1/2021	2/2/2021	21	100,50	201,30	1576,29	2,34	1,47	50,68
4	12/1/2021	9/2/2021	28	101,00	201,30	1612,78	2,34	1,45	50,78
Promedio							2,34	1,46	46,83

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 10. Resultados de la mezcla G (Cemento 600 kg/m³, relación de aserrín 60% fino, 40% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12/1/2021	19/1/2021	7	100,50	201,00	1594,48	2,34	1,47	35,18
2	12/1/2021	26/1/2021	14	100,50	200,70	1592,09	2,32	1,46	42,01
3	12/1/2021	2/2/2021	21	100,50	202,30	1604,79	2,40	1,50	53,94
4	12/1/2021	9/2/2021	28	100,50	201,30	1596,87	2,38	1,49	55,27
Promedio							2,36	1,48	46,60

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 11. Resultados de la mezcla H (Cemento 600 kg/m³, relación de aserrín 50% fino, 50% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12/1/2021	19/1/2021	7	101,00	200,30	1604,77	2,38	1,48	36,10
2	12/1/2021	26/1/2021	14	100,00	201,00	1578,65	2,38	1,51	45,27
3	12/1/2021	2/2/2021	21	100,50	200,70	1592,10	2,28	1,43	49,76

4	12/1/2021	9/2/2021	28	100,50	201,70	1600,03	2,38	1,49	58,12
Promedio							2,36	1,48	47,31

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 12 Resultados de la mezcla I (Cemento 600 kg/m³, relación de aserrín 40% fino, 60% grueso)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12/1/2021	19/1/2021	7	101,00	201,30	1612,78	2,36	1,46	35,59
2	12/1/2021	26/1/2021	14	101,00	200,00	1602,37	2,34	1,46	44,76
3	12/1/2021	2/2/2021	21	100,50	201,70	1600,03	2,40	1,50	55,57
4	12/1/2021	9/2/2021	28	100,50	201,30	1596,86	2,42	1,52	61,08
Promedio							2,38	1,49	49,95

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 13. Resultados de la mezcla J (Hormigón simple f'c 210 kg/cm²)

Muestra N°	Fecha Elaboración	Fecha Ensayo	Días de curado	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso (kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	19/1/2021	26/1/2021	7	100,50	200,30	1588,92	3,70	2,33	108,39
2	19/1/2021	2/2/2021	14	100,50	201,70	1600,03	3,76	2,35	161,42
3	19/1/2021	9/2/2021	21	100,50	201,30	1596,86	3,78	2,37	184,97
4	19/1/2021	17/2/2021	28	101,00	202,30	1620,79	3,76	2,32	214,95
Promedio							3,75	2,34	167,43

Realizado por: Los autores 2022

Tabla 14. Resumen de los resultados de las diferentes mezclas

Muestra	Aserrín fino %	Aserrín grueso %	Cemento %	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (kg)
A	49,28	32,86	17,85	43,75	2,27
B	41,07	41,07	17,85	45,28	2,29
C	32,86	49,28	17,85	45,58	2,31
D	48,21	32,14	19,64	47,21	2,34
E	40,18	40,18	19,64	46,78	2,34
F	32,14	48,21	19,64	46,83	2,34
G	47,14	31,43	21,43	46,60	2,36
H	39,28	39,28	21,43	47,31	2,36
I	31,43	47,14	21,43	49,95	2,38

Realizado por: Los autores 2022

Resultados del análisis estadístico

Al realizar el análisis al diseño se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 15. Efectos Estimados del Modelo Completo para Resistencia a la Compresión (kg/cm²)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Media	19533,8	1	19533,8		
Lineal	18,0362	2	9,01811	10,71	0,0105
Cuadrático	1,24735	3	0,415782	0,33	0,8079
Cúbico Especial	0,82635	1	0,82635	0,55	0,5339
Error	2,97804	2	1,48902		
Total	19556,9	9			

Realizado por: Los autores. 2022

En esta tabla se muestran los resultados de ajustar los datos de la Resistencia a la Compresión a los diferentes modelos. Cada uno de éstos se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo al ser comparado con el cuadrado medio del término de abajo.

Se selecciona el modelo que presente un valor-P menor que 0,05, trabajando con un nivel de confianza del 95,0%. De acuerdo con este criterio, el modelo lineal es adecuado para los datos.

Tabla 16. Resultados del Modelo Completo

Modelo	ES	R-Cuadrada	R-Cuadrada Ajd.
Lineal	0,917582	78,12	70,83
Cuadrático	1,12611	83,52	56,06
Cúbico Especial	1,22025	87,10	48,41

Realizado por: Los autores. 2022

En esta tabla se muestran los valores de R2 (variación de la resistencia a la compresión) ajustada la misma que mientras más se acerca a 1 representa un ajuste lineal mejor, además del error estándar del mismo.

Realizado por: Los autores. 2022

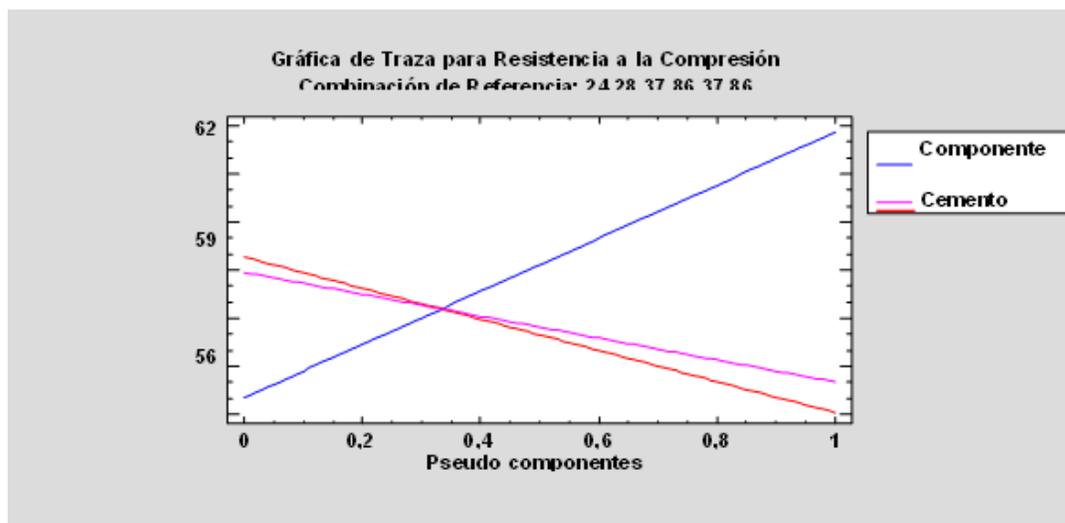


Gráfico 3. Gráfico de Trazas de la Resistencia a la Compresión.

En esta gráfica se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de cemento en el hormigón, también lo hace la resistencia a la compresión, por otra parte, al aumentar la cantidad de aserrín la resistencia a la compresión se ve disminuida, se observa que el aserrín fino presenta una menor resistencia a la compresión que el aserrín grueso

El aserrín presenta un tamaño de partícula de hasta 10 mm y un contenido de humedad del 25 al 40%, y la viruta de madera tiene un tamaño de partícula de hasta 12 mm y un contenido de humedad de 10.20% (Serret, Giralt y Quintero, 2016, p. 470), el aserrín fino presenta un tamaño de partícula menor a 2mm y un contenido de humedad del 26,96%, y el aserrín grueso un tamaño de partícula entre 2 y 5mm y una humedad del 13,53%, en este caso el contenido de humedad presente en el aserrín fino si cumple con los parámetros establecidos, por otro lado el aserrín grueso al tener un tamaño de partícula mayor puede ser considerado como virutas por lo cual su contenido de humedad si corresponde a los valores determinados en el estudio bibliográfico.

El aserrín posee una densidad entre 0,1 a 0,45 g/cm³, (Pineda et al., 2012, p. 97), y la densidad del aserrín fino obtenida experimentalmente fue de 0,288 g/cm³, mientras que la densidad del aserrín grueso fue de 0,291 g/cm³, valores que se encuentran dentro del rango establecido en bibliografía.

Al realizar mezclas de hormigón con cantidades de cemento de 300, 400 y 500 kg/m³ a distintos porcentajes de aserrín fino y grueso se obtuvieron valores de resistencia a la compresión entre 1,47 a 30,68 kg/cm² y densidad entre 0,63 a 0,97 g/cm³ (Garcés, 2004, pp. 52-54), de igual manera en otro estudio al reemplazar el 30% del contenido de arena del hormigón por aserrín se obtuvo una resistencia a la compresión de 72 kg/cm³ y una densidad de 1,91 g/cm³ (Sánchez, 2017, p. 64), mientras que en el presente estudio se realizaron mezclas con contenido de cemento de 500, 550, y 600 kg/m³ con distintos porcentajes de relación entre aserrín fino y grueso, obteniendo valores de resistencia a la compresión entre 37,83 a 61,08 kg/cm², así como densidades entre 1,38 y 1,52 g/cm³, con respecto al primer estudio la resistencia a la compresión y la densidad aumentan debido al contenido de cemento presente en las mezclas ya que éste material es más pesado que el aserrín aumentando la densidad del hormigón y al tener un mayor porcentaje del volumen de la mezcla hace que ésta tenga una mejor resistencia a ser comprimido, mientras que los resultados obtenidos son inferiores al segundo estudio debido a que en éste, el aserrín sustituye solo un porcentaje del contenido de arena en el hormigón, mientras que en el presente estudio el aserrín reemplaza de manera completa a la arena provocando que el hormigón sea más liviano y tenga una resistencia menor.

Conclusiones

El aserrín utilizado se dividió en aserrín fino aquel aserrín que presentó un diámetro de partícula menor a 2mm, y aserrín grueso a aquel que presentó un diámetro de partícula mayor a 2mm y menor a 5mm, el análisis granulométrico del aserrín fino presentó porcentajes de 40,67%, 31,40%, 17,78%, 0,65%, 7,68% y 1,64% de partículas de 1,18mm, 0,6mm, 0,3mm, 0,15mm, y 0,08mm de diámetro respectivamente, un contenido de humedad del 29,96% y una densidad de 0,288 g/cm³, mientras que el análisis del aserrín grueso presentó porcentajes de 9,95%, 31,45%, 49,78% y 8,82% de partículas de 4,75mm, 4mm, 2,36mm y 2mm de diámetro respectivamente, un contenido de humedad del 13,53% y una densidad de 0,291 g/cm³. □ Se elaboró un diseño de mezclas siguiendo un modelo simplex con restricciones, el mismo que consta de q=3 variables de entrada que son: contenido de cemento, aserrín fino y aserrín grueso, y dos variables de respuesta que son: resistencia a la compresión y peso del hormigón, en donde se establecieron 9 mezclas que fueron elaboradas experimentalmente y se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en las mismas (Tablas 4). □ Se determinó la combinación óptima de materiales con la ayuda del software Statgraphics, en donde se registraron los resultados de las pruebas realizadas, y mediante un análisis estadístico de deseabilidad entre ambas variables de respuesta, la combinación que presentó una maximización de resistencia a la compresión y, simultáneamente minimización del peso del hormigón, fue la mezcla C misma que posee una composición de 500 kg/m³ de cemento (17,85% en volumen), y una relación de aserrín fino-grueso de 40/60 (32,86% y 49,28% en volumen). □ El hormigón elaborado con aserrín con la combinación óptima de materiales presentó una resistencia a la compresión de 45.58 kg/cm² y un peso de 2,31 kg, por otro lado, el hormigón tradicional de tipo simple presentó una resistencia a la compresión de 167,43 kg/cm² y un peso de 3,75 kg, en donde se puede evidenciar que el hormigón tradicional presenta una mejor resistencia a la compresión, mientras que el hormigón elaborado con aserrín presenta un menor peso.

Referencias

1. CALVA, M.A.G., HARO, S.C.R., CÓRDOVA, G.B.M. y GUAMÁN, D.J.Q., Estimación De

2. Los Residuos Forestales En Los Aserraderos De Tres Cantones, Zona 3 Interandina, Ecuador. *European Scientific Journal, ESJ*, 2018. vol. 14, no. 30, pp. 228. ISSN 18577881. DOI 10.19044/esj.2018.v14n30p228.
3. CHÁVEZ PORRAS, Á. y RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, A., Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. *Revista Academia & Virtualidad [en línea]*, 2016. vol. 9, no. 2, pp. 90-107. DOI <https://doi.org/10.18359/ravi.2004>. Disponible en:
4. <http://bbibliograficas.ucc.edu.co:2063/lib/ucooperativas/detail.action?docID=11045964&p00=elias+castells>.
5. CORONEL, J. y RODRÍGUEZ, P., Análisis del comportamiento de mezclas cementicias con la inclusión de fibras de madera. Universidad de Especialidades Espíritu Santo. S.l.: 2016.
6. GARCÉS RIFFO, L.E., Hormigón de Aserrín. Universidad Austral de Chile. S.l.: 2004.
7. GAYOSSO-RODRÍGUEZ, S., BORGES-GÓMEZ, L., VILLANUEVA-COUOH, E.,
8. ESTRADA-BOTELLO, M. y GARRUÑA, R., Caracterización Física Y Química De Materiales Orgánicos Para Sustratos Agrícolas. *Agrociencia [en línea]*, 2018. vol. 52, pp. 639-652. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n4/2521-9766-agro-52-04-639.pdf>.
9. GUTIERREZ PULIDO, H. y DE LA VARA SALAZAR, R., Análisis y Diseño de
10. Experimentos. 2. S.l.: Mc Graw Hill. 2015. ISBN 9789701065266.
11. HERGUEDAS, A., TARANCO, C., RODRÍGUEZ, E. y PANIAGUA, P., Biomasa,
12. Biocombustibles Y Sostenibilidad [en línea]. S.l.: Graficolor-Palencia S.L. 2012. ISBN 978-84- 931891-5-0. Disponible en: <http://sostenible.palencia.uva.es/content/biomasa-biocombustibles-y-sostenibilidad>.
13. HERMOSILLA HERNÁNDEZ, G.A., ENSAYOS EN ALBAÑILERÍA DE BLOQUE Y
14. TABLEROS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN DE ASERRÍN. Universidad Austral de Chile. S.l.: 2006.
15. HOLCIM, Evolución de las normas para la Fabricación de Cemento. [en línea]. S.l.: 2016.
16. Disponible en: <http://www.camicon.ec/wp-content/uploads/2015/11/EVOLUCIÓN-DE-LAS-NORMAS-Y-CONTROL-DE-CALIDAD.pdf>.

17. KUMAR MEHTA, P. y MONTEIRO, P., Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th. S.l.: McGraw Hill Professional. 2013. ISBN 9780071797870.
18. MARTINES, E. y LIRA, L., Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. Centro de Metrología [en línea], 2010. pp. 1-6. Disponible en: <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>.
19. MEJÍA, J.I.R., Reacción asistida por microondas para la obtención de hidrocarburos a partir de aserrín de madera [en línea]. Universidad Central del Ecuador. S.l.: 2013. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1868/1/T-UCE-0008-02.pdf>.
20. MUÑOZ, H., REYES, I. y SALAZAR, E., Física 1. S.l.: Limusa. 2003.
21. PINEDA-PINEDA, J., DEL CASTILLO, F.S., RAMÍREZ-ARIAS, A., CASTILLO-GONZÁLEZ, A.M., VALDÉS-AGUILAR, L.A. y DEL CARMEN MORENO-PÉREZ, E.,
22. Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. Revista Chapingo, Serie Horticultura [en línea], 2012. vol. 18, no. 1, pp. 95-
23. 111.ISSN1027152X.Disponible en:
24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027152X2012000100007&lng=es&nrm=iso.
25. REZOLA IZAGUIRRE, J., Características y correcta aplicación de los diversos tipos de cemento. S.l.: s.n. 1976. ISBN 9788471460851.
26. SÁNCHEZ GARCÍA, C.N., Comportamiento del aserrín sobre la resistencia a la compresión, absorción, densidad y asentamiento del concreto para bloques en la construcción. Universidad Privada del Norte. S.l.: 2017.
27. SERRET-GUASCH, N., GIRALT-ORTEGA, G. y QUINTERO-RÍOS, M., Caracterización
28. de aserrín de diferentes maderas. Tecnología Química, 2016. vol. XXXVI, no. 3, pp. 468-479. ISSN 0041-8420.
29. Tipos de hormigón y sus propiedades. [en línea], S.l.: 2007. Disponible en:
30. http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod_resource/content/1/Hormigon_02._Tipos_y_pro_piedades.pdf.

31. VALDEZ GUZMÁN, L. y SUAREZ ALCIVAR, G., Hormigones Livianos. ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL. S.l.: 2010.
32. VELÁZQUEZ VERTTI, C. y CUAN ALARCÓN, M., Tesauro: cal. En: L. FLORES RIVERA
33. (ed.) [en línea]. 1st. S.l.: 2019. Disponible en: <https://oxical.mx/Tesauro.pdf>.

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).