

Cómo citar este artículo:

Campoverde Bustos, F. M., Nieto Cárdenas, X., & Takeuchi, C. P. (2023). Análisis de ladrillos ecológicos fabricados con suelo limo-arenoso, cemento, viruta y papel, en base a resistencia, costo y deformación. *Project, Design and Management*, número monográfico, 37-56. 10.35992/pdm.mo2023.1842.

ANÁLISIS DE LADRILLOS ECOLÓGICOS FABRICADOS CON SUELO LIMO-ARENOSO, CEMENTO, VIRUTA Y PAPEL, EN BASE A RESISTENCIA, COSTO Y DEFORMACIÓN

Franklin Mauricio Campoverde Bustos

Universidad Católica de Cuenca (Ecuador)

frankline156@gmail.com

Xavier Nieto Cárdenas

Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

jnietoc@unal.edu.co

Caori Patricia Takeuchi

Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

cptakeuchit@unal.edu.co

Resumen. El ladrillo involucra en su fabricación la cocción de arcilla a grandes temperaturas, generando un consumo excesivo de energía y recursos. Por ello nace la necesidad de sustituir el ladrillo tradicional por un ladrillo ecológico. El objetivo de esta investigación es fabricar un ladrillo ecológico utilizando cemento, suelo limo-arenoso, viruta de madera y papel bond, buscando que aporten propiedades beneficiosas. Primero se clasificó y estabilizó el suelo con cemento Portland. Para evitar que la viruta y el papel bond absorban el agua de mezclado utilizada, se colocaron en saturación durante 48 horas. Se partió de la idea de utilizar una primera dosificación con la mitad del volumen con papel, viruta o ambos, para luego hacer una segunda y tercera dosificación con una variación de +/- 10%, respectivamente. Para realizar los ensayos necesarios, la normativa NTE INEN 3066 establece los requisitos y métodos de ensayo. Los resultados muestran que Un ladrillo ecológico con 40% de viruta resiste 39 kgf/cm² (28%) más que un tradicional, mientras que un ladrillo ecológico con 50% de viruta resiste 31 kgf/cm² (22%) más que un tradicional, además, el ladrillo tradicional es más económico, sin embargo, su elaboración se debe a un proceso industrializado lo que minimiza su costo frente a un ladrillo ecológico. La capacidad del ladrillo ecológico de deformarse y seguir recibiendo carga a diferencia de un ladrillo tradicional que alcanza su resistencia máxima sin mayor deformación, es importante pues le permitiría a una edificación tener un comportamiento más elástico.

Palabras clave: Compresión, deformación, dosificaciones, suelo limoso, viruta de madera.

ANALYSIS OF ECOLOGICAL BRICKS MANUFACTURED WITH SILT-SANDY SOIL, CEMENT, WOOD-LEFTOVERS AND PAPER, BASED ON HARDNESS, COST AND DISFIGUREMENT

Abstract. Brick for its manufacture involves firing clay at high temperatures, which generates excessive consumption of energy and resources. For this reason, there is a need to replace the traditional brick with an ecological brick. The objective of this research consists of manufacturing an ecological brick using cement, silty-sandy soil, wood-leftovers and bond paper, seeking that they provide beneficial properties. First, the soil is classified and then stabilized with Portland cement. To prevent the wood-leftovers and bond paper from absorbing the mixing water used, they were saturated for 48 hours. The idea was to use a first dosage with half the volume with paper, wood-leftovers or both, and then a second and third dosage with a variation of +/- 10%, respectively. NTE INEN 3066 establishes the requirements and test methods to carry out the necessary tests. The results show that an ecological brick with 40% wood-leftovers resists 39 kgf/cm² (28%) more than a traditional one, while an ecological brick with 50% wood-leftovers resists 31 kgf/cm² (22%) more than a traditional one. In addition, the traditional brick is more economical; however, its production is due to an industrialized process, which minimizes its cost compared to an ecological brick. The capacity of the ecological brick to be deformed and continue to receive load, contrary to a traditional brick that reaches its maximum resistance without major deformation, it is important because it would allow a building to have a more elastic behavior.

Keywords: Compressive-strength, disfigurement, dosages, silt-sandy soil, wood-leftovers.

Introducción

La construcción de edificaciones y viviendas es un aspecto fundamental en la actualidad debido al significativo crecimiento demográfico y poblacional, lo que provoca un aumento en la demanda de materiales de construcción, es por ello la importancia de buscar materiales alternativos que sustituyan a los tradicionales, reduzcan costos, brinden seguridad y disminuyan el impacto ambiental negativo, pues, diversos estudios han demostrado que la situación del medio ambiente es precaria, varias actividades humanas y, especialmente la obtención y fabricación de materiales de construcción producen un impacto ambiental negativo debido a diversos factores.

La viruta de madera y el papel son desperdicios comunes y abundantes en nuestro medio, la viruta de madera es un residuo que se obtiene en los aserríos, el papel lo encontramos como un desecho en establecimientos educativos, empresas, librerías, etc., y se busca la forma de reciclar estos materiales para darles un nuevo uso, ayudando a reducir el impacto ambiental negativo que se genera cuando se desechan. Estos materiales poseen una característica en común, que es su peso ligero, por lo que incluirlos en elementos como los ladrillos reduciría su peso, lo cual produciría beneficios constructivos y económicos. Otra característica de la viruta de madera y el papel es su elasticidad, lo que ayudaría a que un ladrillo tenga una gran deformación en lugar de “explotar” bruscamente como lo haría un ladrillo normal al ser sometido a una gran carga. Al ser la viruta y el papel bond materiales que luego de cumplir su función se convierten en un desecho, la viabilidad de este estudio es muy amplia ya que no demanda altos costos de fabricación, además de que su elaboración no involucra gran cantidad energía como lo haría un ladrillo normal que es cocido en hornos a altas temperaturas generando emisiones considerables de CO₂.

La gran importancia del cemento en la actualidad se evidencia por el hecho de ser el material que más se produce en el mundo con cerca de 4070 millones de toneladas al año según la última estadística brindada por Index Mundi en 2013 en su reporte Hydraulic Cement: World Production, By Country. El crecimiento en el consumo de cemento se relaciona directamente

con el aumento de la población mundial y con el desarrollo de los países, pues esto involucra obras de ingeniería civil, infraestructuras, etc., según diferentes estudios señalan que, al menos a corto plazo, el hormigón y el mortero seguirán siendo los medios más baratos de construir y su consumo no cesará de aumentar proporcionalmente al crecimiento de la población y al desarrollo. Por estas razones es que este estudio busca utilizar cemento como un material en la fabricación de ladrillos ecológicos.

En nuestro medio aún no existen suficientes investigaciones sobre nuevos materiales de construcción que reemplacen a los materiales tradicionales parcialmente o en su totalidad, la falta de interés en el cuidado del medio ambiente por parte de la mayoría de profesionales y contratistas provoca que no se le dé la importancia suficiente a la búsqueda de nuevos materiales. Hablando de los ladrillos específicamente, dicha falta de interés en el medio ambiente genera daños ecológicos al momento de construir, al ser los ladrillos uno de los materiales de mayor demanda en el país y en América en general, y teniendo en cuenta que su fabricación genera emisiones considerables de CO₂, se debe procurar realizar más investigaciones sobre nuevos materiales ecológicos que sustituyan a los tradicionales, además de brindarle propiedades beneficiosas en cuanto a resistencia y economía.

Un material de construcción muy utilizado para mampostería es el ladrillo, el cuál involucra en su fabricación la cocción de arcilla a grandes temperaturas, lo que produce un consumo excesivo de energía y recursos irrecuperables, además de la generación de hollín y monóxido de carbono. Por dichas circunstancias nace la necesidad de buscar la manera de sustituir el ladrillo tradicional por un ladrillo ecológico que involucre en su fabricación materiales reciclados que sean comunes en nuestro medio y, además se eliminen ciertos procesos que no generen un excesivo consumo de recursos, puesto que generalmente son irrecuperables.

La viruta de madera y el papel son desperdicios comunes y abundantes en nuestro medio, la viruta de madera es un residuo que se obtiene en los aserríos, el papel lo encontramos como un desecho en establecimientos educativos, empresas, librerías, etc., y se busca la forma de reciclar estos materiales para darles un nuevo uso, ayudando a reducir el impacto ambiental negativo que se genera cuando se desechan. Estos materiales poseen una característica en común, que es su peso ligero, por lo que incluirlos en elementos como los ladrillos reduciría su peso, lo cual produciría beneficios constructivos y económicos.

Materiales

Se ha demostrado que el suelo estabilizado tiene una durabilidad y calidad técnica superior respecto al adobe o al suelo simple apisonado. La emergencia de la tecnología de producción de bloques de tierra comprimida, en países de Europa, África y Latinoamérica, y su aplicación en construcción desde la década de los años '50, ha continuado el progreso y experimentación científica, así como sus méritos técnicos, tal como lo afirma CRA Terre (como se citó en Gatani 2000). Un abundante cuerpo de conocimiento ha sido desarrollado por centros de investigación, industriales, empresarios y constructores, convirtiendo esta tecnología en alternativa a otras tecnologías de hoy.

Begliardo, Sánchez, Panigatti, Casenave y Fornero (2006) establecen que el suelo tratado con cemento puede ser hecho con:

- Suelo granular limpio.
- Mezcla de suelos granulares y finos, predominantemente limosos.
- Mezcla de suelos granulares y finos, predominantemente arcillosos.
- Suelos limosos.

- Suelos arcillosos.

Sin embargo, el suelo propicio para confeccionar ladrillos de suelo cemento es el de naturaleza arenosa, con una proporción de finos tal que le confiera baja plasticidad para su moldeo en bloque (Roseto 2006).

El Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN establece las normas para llevar a cabo los ensayos necesarios para determinar el índice de plasticidad del suelo.

- Análisis granulométrico de suelos (NTE INEN 696)

El análisis granulométrico consiste en separar una muestra en varias fracciones, Coyasamín (2016) enuncia que la muestra es separada de acuerdo a su tamaño a través del tamizado del material utilizando de una serie de mallas o tamices que se encuentran especificados en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 154, con sus medidas determinadas como se evidencia en la Tabla 1. La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 696 (2011) enuncia: Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la graduación de materiales (...). Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución granulométrica de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables y proporcionar la información necesaria para el control de la producción de diversos productos de áridos y mezclas que contengan áridos. (p.1)

- Determinación del límite líquido de suelos (NTE INEN 691)

El Instituto Ecuatoriano de Normalización en su Norma NTE INEN 691 (1982) define al límite líquido como: “Un método de ensayo que consiste en determinar el contenido de agua de un suelo, (...) valiéndose de un dispositivo mecánico (Copa de Casagrande) en el que, con un determinado número de golpes, se establece la fluencia del suelo en condiciones normalizadas.” (p.1). Además, establece que este ensayo debe hacerse únicamente con la fracción de suelo que pasa el tamiz de 425 µm (No. 40).

- Determinación del límite de plasticidad de suelos (NTE INEN 692)

El Instituto Ecuatoriano de Normalización en su Norma NTE INEN 692 (1982) define al límite plástico de la siguiente manera: “Este método de ensayo consiste en determinar el contenido de agua de un suelo en el límite entre su comportamiento plástico y sólido, para lo cual se utiliza el proceso de rolado para evaporar gradualmente el agua hasta que comienza a fisurarse o disgregarse.” (p.1). Al igual que en el límite líquido, se especifica que este ensayo debe hacerse únicamente con la fracción de suelo que pasa el tamiz de 425 µm (No. 40).

Luego de los ensayos, es necesario definir el tipo de suelo de acuerdo a sus características tal y como lo mencionan Bañón y Beviá (2000) basados en la clasificación dada por la American Association of State Highway and Transportation Official- AASHTO (2009).

Para la determinación del índice de grupo y la clasificación del suelo se utiliza la dada por la American Association of State Highway and Transportation Official- AASHTO (2009). Considera siete grupos básicos de suelos, que se numeran desde A-1 hasta A-7, y a su vez, algunos presentan subdivisiones; A-1 y A-7 tienen dos subgrupos mientras que en A-2 encontramos cuatro, tal como lo mencionan Bañón y Beviá (2000). Así también, se enuncia que, si se desea determinar la posición relativa del suelo dentro del grupo, es necesario determinar el índice de grupo (IG) tal como se expresa en la ecuación [1], que se expresa como un valor entero comprendido entre 0 y 20, en función del porcentaje de suelo que pasa a través del tamiz #200 ASTM. (Bañón y Beviá, 2000).

$$IG=(F_{200}-35) [0.2+0.005(LL-40)]+0.01(F_{200}-15) (IP-10) \quad [1]$$

Donde:

F200 es el porcentaje de suelo que pasa el tamiz #200, expresado en número entero.

LL es el límite líquido del suelo, expresado en número entero.

IP es el índice de plasticidad del suelo, expresado en número entero.

Cadena (2013) define al cemento Portland como un cemento hidráulico que se compone principalmente de silicatos de calcio hidráulicos, los cuales fraguan y endurecen cuando se produce una reacción química con el agua, denominada hidratación. Durante dicha reacción el cemento se combina con el agua para formar una pasta que al agregarse arena se le denomina mortero. La norma ASTM C 150 define diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción, teniendo así:

Tipo I.- Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales. Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados. (Coyasamín, 2016, p11)

Tipo II.- El cemento Portland tipo II se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje. En casos donde se especifican límites máximos para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc. (Coyasamín, 2016, p12)

Tipo III.- Este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, como en el caso de carreteras y autopistas. (Coyasamín, 2016, p12)

Tipo IV.- El cemento Portland tipo IV se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo. Los usos y aplicaciones del cemento tipo IV están dirigidos a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas. (Coyasamín, 2016, p12)

Los cementos hidráulicos mezclados se han desarrollado por dos aspectos fundamentales, primero el interés de la industria por la conservación de la energía y segundo por la economía en su producción.

Para estabilizar el suelo este estudio aplicó cemento Portland, que es un cemento hidráulico que se compone principalmente de silicatos de calcio hidráulicos, los cuales fraguan y endurecen cuando se produce una reacción química con el agua, denominada hidratación (Cadena, 2013).

En cuanto al proceso que atraviesa el agua con el cemento, Del Campo (1963) afirma que, al amasar el cemento con una cierta cantidad de agua, se forma una masa plástica, moldeable, que poco a poco, en función del tiempo, va perdiendo su plasticidad, y va desapareciendo el aspecto mojado que al principio tenía. “Tecnológicamente se dice que la pasta está fraguando, el proceso continúa, y llega un momento en el que aquélla deja de ser plástica para transformarse en un cuerpo rígido. Cuando se produce ese cambio en su estructura, se dice igualmente que ha terminado el período de fraguado y se ha iniciado el endurecimiento.” (p.38)

La viruta de madera y el papel son desperdicios comunes y abundantes en nuestro medio, la viruta de madera es un residuo que se obtiene en los aserríos, el papel encontramos como un desecho en establecimientos educativos, empresas, librerías, etc., y se busca la forma

de reciclar estos materiales para darles un nuevo uso, ayudando a reducir el impacto ambiental negativo que se genera cuando se desechan. Estos materiales poseen una característica en común, que es su peso ligero, por lo que incluirlos en elementos como los ladrillos reduciría su peso, lo cual produciría beneficios constructivos y económicos. Otra característica de la viruta de madera y el papel es su elasticidad, lo que ayudaría a que un ladrillo tenga una gran deformación en lugar de “explotar” bruscamente como lo haría un ladrillo normal al ser sometido a una gran carga.

Ensayo de absorción

Para llevar a cabo los ensayos necesarios, el Instituto Ecuatoriano de Normalización en su normativa NTE INEN 3066 establece los requisitos y métodos de ensayo para bloques de hormigón, se escoge esta norma dado el uso de cemento en la fabricación de ladrillos ecológicos. En el anexo D de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 3066 se define el siguiente procedimiento para el ensayo de absorción:

“Sumergir en agua las unidades para ensayo a una temperatura entre 16 °C y 27 °C, durante un lapso de 24 horas a 28 horas.” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016)

“Determinar, entonces, la masa de las unidades completamente sumergidas, mientras están suspendida un alambre, y registrar este valor como M_i (masa de la muestra sumergida).” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016)

“Sacarlas del agua y dejarlas que escurran durante 60 segundos \pm 5 segundos sobre una malla metálica, retirar el agua visible de la superficie con un paño húmedo, determinar su masa y registrar este valor. Repetir este procedimiento cada 24 horas hasta que la diferencia de la masa entre dos pesadas consecutivas sea inferior al 0,2 %. Registrar este resultado como M_s (masa de la muestra saturada).” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016)

“Secarlas en un horno ventilado, entre 100 °C y 115 °C. Pesar las unidades cada 24 horas hasta que la diferencia de la masa entre las dos pesadas consecutivas sea inferior al 0,2 %. Registrar este resultado como M_d (masas de la muestra seca al horno).” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016)

Una vez realizado el procedimiento descrito, el Instituto Ecuatoriano de Normalización ha establecido las siguientes ecuaciones para los cálculos:

$$\text{Absorción, (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_i} \times 1000 \quad [2]$$

Donde:

M_s es la masa de la unidad saturada (kg),

M_i es la masa de la unidad sumergida (kg),

M_d es la masa de la unidad seca al horno (kg).

Ensayo de compresión

Los parámetros para la preparación de las muestras a ser ensayadas se encuentran en el anexo E de la Norma Técnica Ecuatoriana 3066, en donde se enuncia que: Después de la entrega al laboratorio, almacenar las unidades (...) a una temperatura de 24 °C \pm 8 °C y a una humedad relativa inferior al 80 % por al menos 48 horas. Sin embargo, si se necesitan resultados de compresión más rápidamente, almacenar las unidades (...), con una corriente de aire proveniente de un ventilador eléctrico que pase por ellos, por un período de al menos 4 horas. No se debe utilizar el horno para secar estas unidades. (p19)

Así también establece la fórmula para determinar la resistencia a compresión:

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_n} \quad [3]$$

Donde

- $P_{m\acute{a}x}$. = carga máxima de compresión, (kgf)
- A_n = área neta de la unidad (cm²)

Método

Identificación y clasificación del suelo

El suelo natural se obtuvo del sector de Borma del cantón Déleg de la provincia del Cañar, teniendo como referencia las coordenadas UTM: 728813.73 E; 9687510 S; Zona 17M. Se trabajó con material que pase el tamiz N°4 y se observó que es un suelo limoso por lo que para reducir su plasticidad se optó por añadir arena, teniendo una relación suelo: arena de 1:1. Una vez establecidas estas condiciones, se realizaron los siguientes ensayos para clasificar el material.

De acuerdo al procedimiento establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 691, se calcula el límite líquido del suelo natural y luego el límite líquido del suelo adicionado con arena, como se muestra en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente.

Tabla 1

Contenido de agua del suelo natural

# de tarro	# de golpes	Peso Húmedo +Tarro (g)	Peso Seco +Tarro (g)	Peso del Tarro (g)	% Cont. de agua
16	43	28.64	25.62	17.57	27.28
15	30	27.66	24.83	17.81	28.73
9	21	28.24	24.92	17.07	29.72
6	13	28.36	24.82	16.96	31.05

Tabla 2

Contenido de agua del suelo más arena

# de tarro	# de golpes	Peso Húmedo +Tarro (g)	Peso Seco +Tarro (g)	Peso del Tarro (g)	% Cont. de agua
15	40	29.9	27.45	17.81	20.26
22	32	29.25	26.85	17.69	20.76
31	23	31.87	28.84	17.89	21.67
6	13	30.22	27.14	16.96	23.23

Resultados:

- Límite líquido del suelo natural = 29%
- Límite líquido de la arena = No plástico
- Límite líquido del suelo + arena = 21%

De acuerdo al procedimiento establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 692, se calcula el límite plástico del suelo natural y luego el límite plástico del suelo adicionado con arena, como se muestra en la Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente. Adicionalmente, aplicando la INEN 692, se calcula el índice de plasticidad de los materiales.

Tabla 3
Límite plástico de suelo natural

# de tarro	Peso Húmedo +Tarro (g)	Peso Seco +Tarro (g)	Peso del Tarro (g)	% Contenido de agua	Contenido de agua promedio (%)
27	8.38	7.99	6.05	16.74	17.0
24	9.01	8.54	6.21	16.79	
4	11.39	10.93	8.72	17.23	
34	9.24	8.71	6.21	17.49	

Tabla 4
Límite plástico de suelo más arena

# de tarro	Peso Húmedo +Tarro (g)	Peso Seco +Tarro (g)	Peso del Tarro (g)	% Contenido de agua	Contenido de agua promedio (%)
27	8.25	7.87	6.05	17.27	17.2
24	8.47	8.09	6.21	16.81	
4	11.64	11.13	8.72	17.47	
34	8.99	8.51	6.21	17.27	

- Índice de plasticidad del suelo natural = 29% - 17% = 12%
- Índice de plasticidad del suelo + arena = 21% - 17.2% = 3.8%

Posteriormente se procede a determinar la granulometría (Tabla 5).

Tabla 5

Granulometría del suelo más arena

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso retenido	% retenido	% que pasa
4		0.00	0.00	100.00
10	2	20.09	5.41	94.59
40	0.425	149.12	40.13	50.46
100		156.28	42.06	16.40
200	0.075	43.20	11.63	0.77

Con los resultados obtenidos con los ensayos anteriores se procede a clasificar el material, tal como se observa en la Tabla 6. En base a la clasificación obtenida, se confirma el uso beneficioso de utilizar suelo más arena en el estudio. Una vez encontradas las características deseables se procede a preparar los materiales restantes de la dosificación.

Tabla 6

Clasificación AASHTO del material

Muestra	Grupo	Tipo de materiales característicos	Calificación
Suelo natural	A-2-6 (0)	Gravas y arenas limosas y arcillosas	Regular
Suelo+ Arena	A-1-b (0)	Fragmentos de grava, piedra y arena	Excelente a bueno

Muestreo y preparación de la viruta

La viruta escogida es mediana y fina, descartando viruta gruesa pues sus dimensiones podrían generar porosidades en los ladrillos. La viruta es proveniente de dos tipos de madera, roble y eucalipto. Para evitar que la viruta absorba en demasía el agua de mezclado utilizada, se procedió a dejarla en saturación durante 48 horas tal como se muestra en la Figura 1, y se optó por cubrirla para evitar su evaporación y así conservar la humedad.

Figura 1

Viruta y papel en proceso de saturación



Muestreo y preparación del papel bond

Se puede encontrar papel bond en las instituciones públicas y privadas como un desecho, pues luego de cumplir su función es considerado basura, para este estudio el papel bond fue obtenido y reciclado de la Universidad Católica de Cuenca sede Azogues.

Se optó por papel bond de 75gr. por ser el más utilizado en el medio. Para evitar que el papel absorba agua de mezclado utilizada, se procedió a dejarlo en saturación durante 48 horas tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Papel en proceso de saturación



Utilizando una batidora Hobart se procedió a homogenizar el papel bond de 75gr. triturándolo y adicionando agua hasta conseguir una consistencia uniforme, tal como se observa en la Figura 3.

Figura 3

Homogenización del papel bond



Elaboración de los ladrillos

Las medidas de los moldes se eligieron en función de los ladrillos tradicionales existentes en el mercado teniendo así dimensiones ya establecidas de 12cm x 24cm x 8cm.

Se mezclan los agregados finos (cemento y suelo más arena) en las proporciones previstas según la dosificación escogida, hasta homogenizarlos correctamente, tal como se muestra en la Figura 4. A esta mezcla se le adiciona el papel, la viruta o ambas, según sea el caso, y se mezcla y homogeniza nuevamente hasta obtener una trabajabilidad apropiada, en caso de ser necesario se adiciona agua a la mezcla para mejorar su manejabilidad y obtener una mezcla óptima para trabajar, como se observa en la Figura 5.

Figura 4

Mezcla en seco de cemento, suelo y arena



Figura 5

Homogenización de todos los materiales



Consecuentemente se coloca la mezcla en moldes de madera y se procede a dar golpes con un martillo de hule para conseguir que el material se acomode apropiadamente y se elimine exceso de aire. Luego de asegurar la correcta distribución del material y cubrir espacios vacíos, se retira el molde, quedando los ladrillos ecológicos tal como se observan en la Figura 6, donde además se evidencia la presencia de una placa metálica utilizada para nivelar la cara superior que recibirá carga en los ensayos de compresión.

Figura 6

Ladrillos desmoldados con presencia de placa para nivelación



Dosificaciones

Para esta investigación se trabajó con una relación en volumen de suelo-cemento de 1:1.5 pues se busca que el “mortero ecológico” posea buen porcentaje en cemento para aumentar la resistencia.

Se inicia las mezclas con el 50% del volumen de un ladrillo con papel, viruta o ambos, según sea el caso. Con ese punto de partida se consideró realizar dosificaciones que contengan un 60% y otra con un 40% de los materiales mencionados, es decir, se partió de la idea de utilizar una primera dosificación con la mitad del volumen con papel, viruta o ambos, para luego hacer una segunda y tercera dosificación con una variación de +/- 10%, respectivamente. En la Tabla 7 se muestran los volúmenes de cada material utilizado en las dosificaciones.

Tabla 7

Volúmenes de material necesario para fabricar una unidad de ladrillo ecológico

Material	40% V (cm ³)	50% V (cm ³)	60% V (cm ³)	40% P (cm ³)	50% P (cm ³)	60% P (cm ³)	40% P+V (cm ³)	50% P+V (cm ³)	60% P+V (cm ³)
Cemento	1656	1380	1104	1656	1380	1104	1656	1380	1104
Suelo más arena	1104	920	736	1104	920	736	1104	920	736
Papel	----	----	----	1840	2300	2760	920	1150	1380
Viruta	1840	2300	2760	----	----	----	920	1150	1380

Ensayos de absorción y compresión

La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 3066 establece los parámetros para llevar a cabo los ensayos de absorción y compresión en bloques de hormigón, aplicando las ecuaciones siguientes. Una vez realizado el procedimiento descrito (Figura 7), el Instituto Ecuatoriano de Normalización ha establecido las siguientes ecuaciones para los cálculos:

$$\text{Absorción, (\%)} = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \quad [4]$$

Donde:

M_s es la masa de la unidad saturada (kg),

M_d es la masa de la unidad seca al horno (kg).

Así también establece la fórmula para determinar la resistencia a compresión:

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_n} \quad [5]$$

Donde

$P_{m\acute{a}x}$. = carga máxima de compresión, (kgf)

A_n = área neta de la unidad (cm^2)

Figura 7.

Ensayo de compresión de un ladrillo ecológico con viruta



Resultados

Resistencia a la compresión y deformación

Una vez realizados los ensayos de compresión se observa que el esfuerzo que resisten los ladrillos ecológicos que contienen papel en su dosificación se encuentran por debajo del esfuerzo que resisten los ladrillos tradicionales. Así también, se observa que los ladrillos ecológicos con contenidos de 40% y 50% de viruta superan al esfuerzo resistido por los ladrillos tradicionales en un 28% y 22% respectivamente, el efecto del curado en los ladrillos no varía más que en $10\text{kg}/\text{cm}^2$, por lo cual no se toma en cuenta el efecto. Las siguientes gráficas esfuerzo-deformación muestran el comportamiento del ladrillo tradicional vs. Ladrillos ecológicos.

Figura 8

Esfuerzo vs. Deformación, ladrillo tradicional y ladrillos con viruta

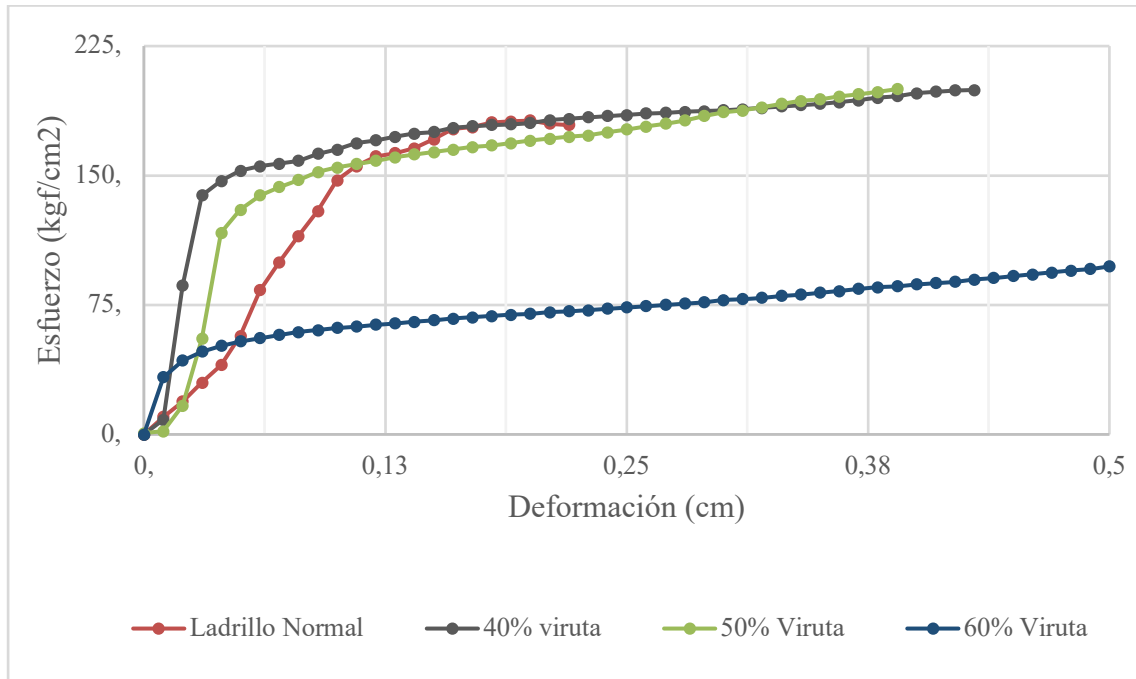


Figura 9

Esfuerzo vs. Deformación, ladrillo tradicional y ladrillos con papel

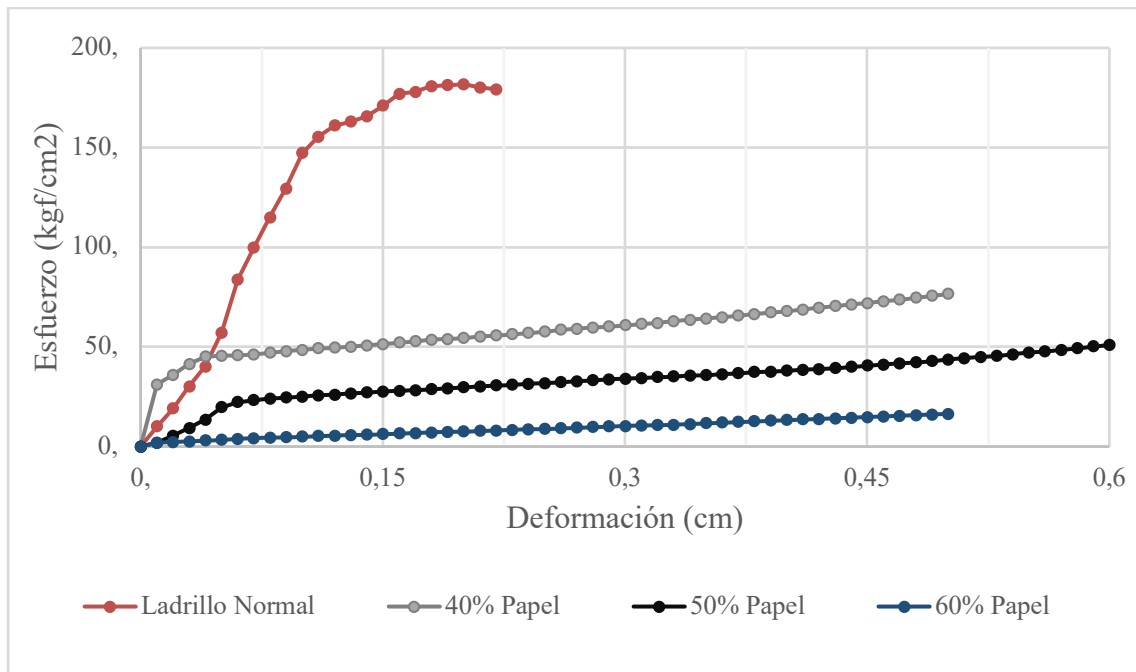
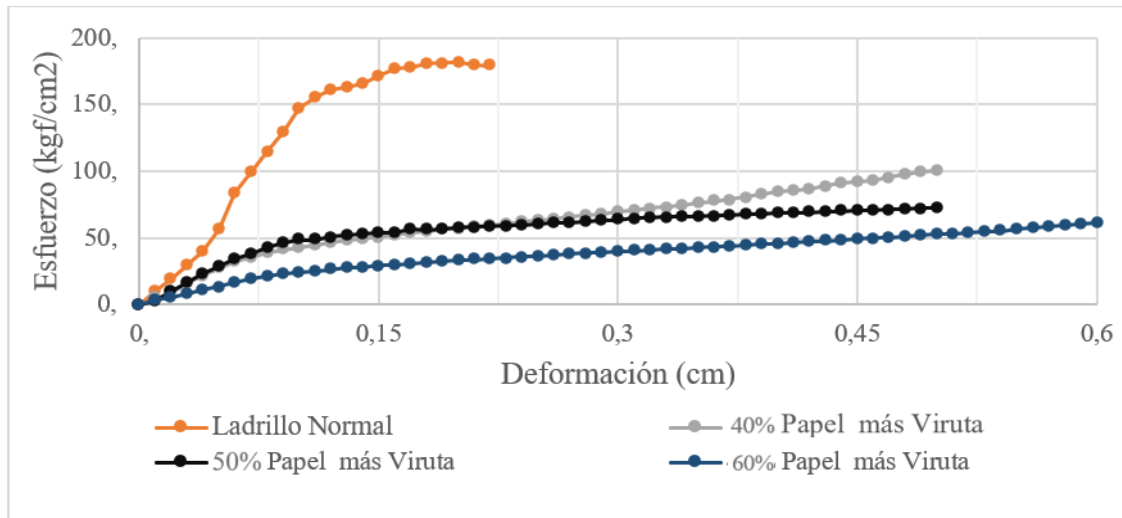


Figura 10

Esfuerzo vs. Deformación, ladrillo tradicional y ladrillos con viruta más papel



En las gráficas de las figuras 8, 9 y 10 se observa que los ladrillos ecológicos poseen la capacidad de continuar recibiendo carga y seguir deformándose a diferencia de un ladrillo tradicional que llega a su esfuerzo último y deja de resistir carga, es decir, se observa que los ladrillos tradicionales presentan falla frágil, mientras que los ecológicos muestran falla dúctil. Además, desde el punto de vista sísmico, una edificación más liviana genera menores esfuerzos inerciales laterales. De la misma manera, el fallo que presentan los ladrillos ecológicos permitiría que las personas no sean afectadas por la caída de paredes durante un sismo, por su deformación, sin fallo frágil (Figura 11).

Figura 11

Fracaso de mampostería en Escuela del Milenio – Pedernales Ecuador



Nota. Elaborado por Ing. Xavier Nieto Cárdenas

Resistencia a la compresión y deformación

El peso obtenido evidencia una ventaja en los ladrillos ecológicos al ser más livianos que los ladrillos tradicionales, tal como se observa a continuación en la Tabla 8. Esta diferencia de pesos en comparación con ladrillos tradicionales es de aproximadamente 1 kilogramo, dicha diferencia puede magnificarse al momento de analizar el peso de una pared hecha con ladrillos de arcilla cocida, por lo tanto, si el peso es mayor la estructura soportante deberá ser más resistente, lo cual aumentará su costo.

Tabla 8
Peso de los ladrillos ensayados

Descripción	Peso
Ladrillo Tradicional	4.13 kg
Ladrillo con 40% Viruta	3.46 kg
Ladrillo con 50% Viruta	3.30 kg
Ladrillo con 60% Viruta	2.70 kg
Ladrillo con 40% Papel	3.15 kg
Ladrillo con 50% papel	2.44 kg
Ladrillo con 60% papel	1.88 kg
Ladrillo con 40% viruta más papel	2.98 kg
Ladrillo con 50% viruta más papel	2.94 kg
Ladrillo con 60% viruta más papel	2.48 kg

Comparación de costos

Al ser los ladrillos con porcentajes de 40% y 50% de viruta los que alcanzan la misma resistencia de un ladrillo tradicional, se realizó un análisis de los costos solo de estos elementos. Para el análisis de las tablas 9 y 10 se consideró solamente el valor de los materiales utilizados, dejando de lado los procesos de producción puesto que un ladrillo tradicional se produce en fábricas a grandes escalas, mientras que esta investigación de ladrillos ecológico al ser innovadora se fundamenta en la producción por unidades.

Tabla 9
Costo de fabricación de un ladrillo con 40% de viruta

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO
Cemento Portland	kg	3.98	0.15	0.597
Arena limpia	m3	0.000552	10.25	0.006
Suelo natural	m3	0.000552	0.1	0.0001
Viruta de madera	m3	0.001840	1.00	0.001
TOTAL				0.60

Tabla 10
Costo de fabricación de un ladrillo con 50% de viruta

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO
Cemento Portland	kg	3.31	0.15	0.496
Arena limpia	m3	0.000460	10.25	0.005
Suelo natural	m3	0.000460	0.00	0.0001
Viruta de madera	m3	0.002300	1.00	0.001
TOTAL				0.50

Discusión y conclusiones

Una vez obtenidos los resultados del estudio, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

Las dosificaciones propuestas dieron como resultado diferentes valores, luego del ensayo de compresión simple, siendo evidente una resistencia superior para las dosificaciones que contienen mayor cantidad de cemento, así también se observa que la viruta de madera proporciona ligereza al ladrillo y una resistencia óptima, mientras que el papel, si bien logra reducir significativamente el peso, reduce la resistencia del ladrillo. Las dosificaciones que alcanzan y superan la resistencia de un ladrillo tradicional, son las que contienen viruta de madera en un 40% y 50%.

En dosificaciones con un 36% de cemento, 24% de suelo más arena y 40% de viruta o papel, el costo de producción, manejando solo valores de materiales, sería de 60 centavos de dólar o en otras palabras un 71% más que un ladrillo tradicional, mientras que en dosificaciones con un 30% de cemento, 20% de suelo más arena y 50% de viruta o papel, el costo de producción, manejando solo valores de materiales, sería de 50 centavos de dólar o lo que es igual a 43% más que un ladrillo tradicional.

El costo de un ladrillo ecológico es superior, pero se debe tener en cuenta otros factores como el peso, pues al ser aproximadamente 1kg más liviano implica que la estructura base deberá soportar menos peso lo que reduciría costos en la construcción.

Un ladrillo ecológico con 40% de viruta resiste 39 kgf/cm² (28%) más que un ladrillo tradicional, mientras que un ladrillo ecológico con 50% de viruta resiste 31 kgf/cm² (22%) más que un ladrillo tradicional. La resistencia de las otras dosificaciones se encuentra por debajo de la resistencia de un ladrillo tradicional, pero podrían compararse con la resistencia de un bloque de hormigón clase B.

Un factor importante es la capacidad del ladrillo ecológico de deformarse y seguir recibiendo carga a diferencia de un ladrillo tradicional que alcanza su resistencia máxima sin mayor deformación. Esta capacidad es importante pues le permitiría a una edificación tener un comportamiento más elástico.

En el aspecto ecológico los ladrillos de esta investigación presentan varias ventajas frente al ladrillo tradicional, empezando por su elaboración que no necesita hornos de cocción lo que conduce a que no se generen grandes emisiones de CO y hollín, reduciendo así el impacto ambiental negativo.

Otro factor importante es el material que se utiliza, pues al reciclar un material común como la viruta, contribuimos de una excelente manera al cuidado del medio ambiente.

Así también, se pueden establecer las siguientes recomendaciones:

En cuanto al proceso de esta investigación se debe tener en cuenta el índice de plasticidad del suelo natural y tratar de reducirlo si es necesario, pues es fundamental para lograr una mezcla apropiada con el cemento y conseguir la resistencia requerida.

Se debe procurar utilizar moldes con superficies lisas que aseguren un buen acabado del ladrillo, esto es importante al momento del ensayo de compresión simple pues la carga se distribuirá de manera uniforme. Finalmente, se deberá respetar el tiempo de curado de 28 días de curado.

Continuar con la investigación de materiales ecológicos que puedan reemplazar a los tradicionales, profundizar más sobre el aspecto económico de los ladrillos con un porcentaje de viruta considerando otros factores importantes al momento de construir.

Comparar con otros elementos como bloques de pómez y de hormigón, y variar las dimensiones de los elementos utilizados en esta investigación.

Referencias

- Bañón , L., & Beviá, J. F. (2000). *Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento* (Vol. 2). Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A. <http://hdl.handle.net/10045/1787>
- Barrientos, M., & Soria, C. (2013). Index Mundi. <https://www.indexmundi.com/>
- Begliardo, H., Sánchez, M., Panigatti, M. C., Casenave, S., & Fornero, G. (2006). Ladrillos de suelo-cemento elaborados con suelos superficiales y barros de excavación para pilotes. Ponencia. *Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP) PROCQMA*.
- Cadena, G. (2013). , *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de concretos puzolánicos para incrementar su resistencia ante ataques de sulfatos*. Universidad Autónoma de Querétaro. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/364>
- Coyasamín, O. (2016). *Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigón adicionado con cenizas de cáscara de arroz (cca) y hormigón adicionado con cenizas de bagazo de caña de azúcar (cbc)*. [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Ambato. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23482>
- Das, B. M. (1995). *Fundamentos de Ingeniería geotécnica*. Thompson Learning.
- Del Campo, M. (1963). La determinación del agua de amasado en morteros y hormigones fraguados. *Materiales de Construcción*, 13(111), 36-45. <https://doi.org/10.3989/mc.1963.v13.i111.1798>
- Gatani, M. (2000). Ladrillos de suelo-cemento: Mampuesto tradicional en base a un material sostenible. *Informes de la Construcción*, 51(466), 35-47. <https://doi.org/10.3989/ic.2000.v51.i466.713>
- Instituto Ecuatoriano De Normalización. (1982). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 691: Mecánica de suelos. Determinación del límite líquido*. Publicación Oficial.

- Instituto Ecuatoriano De Normalización. (1982). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 692: Mecánica de suelos. Determinación del límite plástico*. Publicación Oficial.
- Instituto Ecuatoriano De Normalización. (2011). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 154. Tamices de ensayo. Dimensiones nominales de las aberturas. Publicación Oficial.
- Instituto Ecuatoriano De Normalización. (2011). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 696: Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. Publicación Oficial.
- Instituto Ecuatoriano De Normalización. (2016). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 3066. Bloques de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*. Publicación Oficial.
- Instituto Nacional De Vías. (2007). *Norma INV. E 102. Descripción e identificación de suelos (Procedimiento visual y manual)*. Publicación Oficial.
- Piedra, B. (2014). *Estudio para analizar el ladrillo de suelo cemento o ecológico en Cuenca* [Tesis de pregrado]. Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/3638>
- Roseto, O. (2006). Bloques con Mezclas Hipercomprimidas de Suelo-Cemento. *Revista Cemento*, 7, 11-13.