

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADÉMICO		1(78)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	NELSON LEONARDO QUINTERO BECERRA CAMILO EUGENIO ROMERO MARQUEZ
FACULTAD	INGENIERIAS
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR	FERNANDO JESUS REGINO UBARNES CAROLINA ABRIL CARRASCAL
TÍTULO DE LA TESIS	DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SECADO SOSTENIBLE MEDIANTE AIRE FORZADO Y PRECALENTADO QUE PERMITA DISMINUIR EL TIEMPO DE PRODUCCION DE LOS LADRILLOS ARTESANALES EN LA PROVINCIA DE OCAÑA – NORTE DE SANTANDER

RESUMEN

(70 palabras aproximadamente)

ESTE PROYECTO CONSISTE EN EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SECADO SOSTENIBLE MEDIANTE AIRE FORZADO Y PRECALENTADO PARA DISMINUIR EL TIEMPO PRODUCCION DE LOS LADRILLOS ARTESANALES, POR LO QUE SE IMPLEMENTO UN SECADOR CON UN COLECTOR SOLAR PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA PROVENIENTE DE LA RADIACION SOLAR. SE TOMARON MUESTRAS DE LA PRODUCCION DE LA LADRILLERA EL TEJAR Y SE SECARON MEDIANTE ESTE DISPOSITIVO, LUEGO SE COMPARARON LOS TIEMPOS DE SECADO.

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 78	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:
-------------	---------	----------------	---------



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88 - Fax: Ext. 104
 info@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SECADO SOSTENIBLE MEDIANTE AIRE
FORZADO Y PRECALENTADO QUE PERMITA DISMINUIR EL TIEMPO DE
PRODUCCIÓN DE LOS LADRILLOS ARTESANALES EN LA PROVINCIA DE OCAÑA –
NORTE DE SANTANDER.

AUTORES

NELSON LEONARDO QUINTERO BECERRA

CAMILO EUGENIO ROMERO MÁRQUEZ

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero Civil

Directores

Ing. FERNANDO JESÚS REGINO UBARNES

Ing. CAROLINA ABRIL CARRASCAL

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Mayo, 2021

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas que nos han colaborado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primer lugar, quisiera a mis directores Ing. Fernando Jesús Regino Ubarnes y Ing. Carolina Abril Carrascal, por haberme orientado en todos los momentos que necesité sus consejos.

A todos mis amigos, vecinos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

A la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en estos años.

Índice

Capítulo 1. Desarrollo de un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado que permita disminuir el tiempo de producción de los ladrillos artesanales	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Formulación de la pregunta problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Justificación	3
1.5 Delimitaciones	5
1.5.1 Geográfica.....	5
1.5.2 Operativa.....	5
1.5.3 Temporal.....	5
1.5.4 Metodología.....	5
Capítulo 2. Marco Referencial.....	6
2.1 Marco Histórico	6
2.2 Marco Teórico.....	7
2.3 Marco Conceptual.....	15
2.3.1 Generador de Aire.	16
2.3.2 Calefactor.....	16
2.3.3 Alimentador..	16
2.3.4 Tipos de Secadores.....	17
2.4 Marco contextual	18
2.5 Marco legal	20
Capítulo 3 Metodología	22
Capítulo 4. Presentación de resultado.....	¡Error! Marcador no definido.
4.1 Recopilación de información científica sobre el proceso de producción de ladrillos artesanales, estableciendo los diferentes criterios de operación y medición.	25
4.1.1 Principios del secado térmico del ladrillo.....	26
4.1.2 Características del aire.	26
4.1.3 Identificación de las variables que intervienen en el proceso de secado.:.....	27
4.2 Selección del sistema de secado que mejor se adapte al proceso de producción de ladrillos artesanales de arcilla según los parámetros establecidos.....	30
4.3 Validación e implementación del sistema propuesto.....	33
4.3.1 Análisis de desempeño del sistema propuesto.....	34
4.3.2 Pruebas físicas de las muestras.	37
Capítulo 5. Conclusiones	55
Capítulo 6. Recomendaciones.....	62
Referencias.....	58
Apéndices.....	62

Lista de tablas

Tabla 1 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado.....	38
Tabla 2 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados al aire libre.	40
Tabla 3 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado.....	42
Tabla 4 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados al aire libre.	44
Tabla 5 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados a la intemperie.....	46
Tabla 6 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado.....	47
Tabla 7 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados al aire libre.	50
Tabla 8 Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado.....	50

Lista de figuras

Figura 1. Prueba de resistencia a la compresión	30
Figura 2. Cámara de secado con colector solar.....	31
Figura 3. Modelo del secador propuesto.....	32
Figura 4. diagrama del secador propuesto	32
Figura 5. Construcción del secador.....	32
Figura 6. Secador construido	33
Figura 7. Disposición de los ladrillos dentro del secador propuesto	33
Figura 8. Pérdida de peso diario para la muestra número 1	34
Figura 9. Pérdida de peso diario para la muestra número 2.....	35
Figura 11. Pérdida de peso diario para la muestra número 4.....	36
Figura 12. Pérdida de peso diario para la muestra número 5.....	36
Figura 13. Ensayo de resistencia a la compresión	37
Figura 14. Resistencia a la Compresión ladrillo secado en Horno de aire forzado	38
Figura 15. Resistencia a la Compresión ladrillo secado a la intemperie.	40
Figura 16. Ensayo de flexión	41
Figura 17. Maquina correspondiente al ensayo de flexión.	41
Figura 18. Flexión ladrillo secado a la intemperie.....	42
Figura 19. Peso ladrillo secado a la intemperie	43
Figura 20. Peso ladrillo secado mediante aire forzado. Fuente.	45
Figura 22. Resultados del ensayo (TIA) aplicado a los ladrillos secados a la intemperie	47
Figura 23. Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados al aire libre.....	49
Figura 24. Resultados del ensayo de absorción de agua aplicado a los ladrillos secados a la intemperie.	50
Figura 25. Resultados del ensayo de absorción de agua aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado.	51
Figura 26. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión.....	52
Figura 27. Resultados del ensayo de flexión	53
Figura 28. Resultados del ensayo (TIA) aplicado a los ladrillos	54
Figura 29. Resultados del ensayo de absorción de agua aplicado a los ladrillos.....	54

Lista de apéndices

Apéndice A. Certificados de las pruebas realizadas en laboratorio.....	63
--	----

Resumen

Este proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado para disminuir el tiempo producción de los ladrillos artesanales, por lo que se implementó un secador con un colector solar para el aprovechamiento de la energía proveniente de la radiación solar. Se tomaron muestras de la producción de la ladrillera el tejar y se secaron mediante este dispositivo, luego se compararon los tiempos de secado y sus propiedades físicas y mecánicas, encontrando que los ladrillos secados con el prototipo propuesto conservaban estas propiedades.

Se encontró que en cuanto a los ensayos de resistencia a la compresión para muestras de ambos procesos estaba alrededor de 30,6 y 31,2 kgf/cm², la deflexión dio alrededor de 1,2 y 1,3 kgf/cm², la tasa inicial de absorción dio alrededor de 0,3 y 0,4 g/cm²/min y por último el porcentaje de absorción para ambos procesos dio alrededor de 12,9 y 13,1 %. La diferencia radica en los tiempos de secado, ya que para el secado en las ladrilleras artesanales dura alrededor de 15 días en el secador propuesto demora 9 días, lo que resulta en una disminución del 40% en este proceso.

Introducción

Los ladrillos cerámicos son una parte fundamental de la industria de la construcción, estos ladrillos componen diferentes estructuras en edificaciones, en las que se someten a; impactos, vibraciones y a altas compresiones por lo que, sus características físicas, químicas y geométricas deben cumplir con normas y estándares específicos, para que sean considerados productos de calidad necesario para su utilización; es de vital importancia para cumplir con todas las características necesarias que se le aplique un estricto control en todo el proceso de su fabricación, en especial el proceso de secado ya que este es el que afecta directamente sus propiedades y es más sensible a cambios.

En el presente proyecto se registra una problemática encontrada en la producción de ladrillos artesanales, la cual es el tiempo de secado de estos, ya que por su producción artesanal no se le aplica ningún método de secado, simplemente se disponen para ser secados al sol. Se encontró que en esta parte del proceso demora de 15 a 22 días, es ahí en donde se plantea la idea de construir un prototipo que disminuya el tiempo de secado, mejorando los tiempos de producción de estos.

Con la implementación del prototipo de secador de ladrillos, surgen preguntas como ¿la implementación del prototipo disminuye el tiempo de secado de los ladrillos? y ¿la aplicación de un método de secado afecta las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos? Para responder para responder estas preguntas se secaron muestras en el prototipo y se registró su peso diariamente hasta llegar a una pérdida del 17% al 20% de su peso, lo que resulta en una

pérdida de humedad, todo esto con el fin de verificar la disminución del tiempo de secado, dando como resultado una disminución del 40% del tiempo de secado; ahora para verificar la conservación de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos se le realizaron a las muestras (tanto las secadas con el prototipo como las secadas en la ladrillera) ensayos de resistencia a la compresión, ensayos de flexión en sayos de tasa de absorción y de absorción de agua, dando como resultado la conservación de estas propiedades.

Este documento está dispuesto por capítulos en donde en el primer capítulo se resalta el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación, entre otros; en el capítulo dos se presentan los marcos históricos, teóricos y conceptuales; en el capítulo tres la metodología; en el capítulo cuatro se presenta el desarrollo del proyecto y finalmente las conclusiones del análisis realizado, la bibliografía y en los anexos los certificados de las pruebas realizadas en los laboratorios.

Capítulo 1. Desarrollo de un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado que permita disminuir el tiempo de producción de los ladrillos artesanales

1.1 Planteamiento del problema

Los ladrillos son parte esencial en los procesos de construcción, estos son usado desde hace unos 11.000 años teniendo sus comienzos en el neolítico, aunque no como los conocemos actualmente puesto que se ha innovado en su forma según las necesidades de la industria (Jan Lucassen, L. Ferrandis Garrayo, & José Antonio Carazo, 2003).

Es común encontrar ladrillos de diferentes dimensiones, formas y materiales según los requerimientos de la industria; esto ha sido posible gracias a los adelantos en el proceso de fabricación.

Aún con los avances e innovación en el proceso de fabricación de ladrillos es común encontrar fabricas artesanales, ya que estos procesos hacen parte de la tradición y cultura de muchas regiones, un estudio realizado por la cámara de comercio de Bogotá demuestra que en Colombia hay 1.343 ladrilleras y un 77% de ellas realizan su proceso de manera artesanal (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

Según el plan básico de ordenamiento territorial (PBOT) del municipio de Ocaña este cuenta con alrededor de 30 fábricas artesanales de ladrillos de arcilla, también conocidas como chircales (Guerrero Gómez, 2017).

El principal inconveniente en la producción de ladrillos de forma artesanal son los largos tiempos de secado que varían de cinco a siete días según las condiciones climáticas, pues para este proceso se aprovecha la acción natural del sol y el viento por lo que en los días nublados y lluviosos se detiene el proceso de secado, retrasando el proceso de producción (Arquíñigo Trujillo, 2011).

Al no tener control sobre las condiciones climáticas, el secado de los ladrillos no siempre se realiza de la mejor manera, ya que no se logra expulsar la cantidad necesaria de humedad del interior del ladrillo, haciendo que al momento de la cocción se presenten imperfecciones y muchos ladrillos no puedan ser vendidos generando pérdidas para estas pequeñas empresas.

Teniendo en cuenta que la mayor cantidad de tiempo del proceso de producción se invierte en la etapa de secado, se necesita desarrollar un sistema que le permita al productor artesanal reducir los tiempos de producción sin que haya un aumento significativo en los costos.

1.2 Formulación de la pregunta problema

¿Cómo se puede reducir el tiempo de secado de los ladrillos de arcilla utilizando energías renovables conservando sus propiedades físico mecánicas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General. Desarrollar un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado que reduzca el tiempo de producción de los ladrillos artesanales de arcilla.

1.3.2 Objetivos Específicos. Identificar las variables que intervienen en el proceso de secado de ladrillos de arcilla.

Seleccionar un sistema de secado se adapte al proceso de producción de ladrillos artesanales de arcilla según los parámetros establecidos.

Realizar un análisis comparativo entre las muestras secadas de forma convencional y las secadas con el modelo propuesto.

1.4 Justificación

Es importante resaltar la pertinencia de este proyecto, ya que uno de los motores que mueve la economía es el sector de la construcción (Rolón Nieto, 2012) del cual los ladrillos son parte fundamental, que el 77% de los ladrillos utilizado en dicho proceso en Colombia se fabrican de manera artesanal (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) y que en el municipio de Ocaña las ladrilleras artesanales suplen la mayor parte de la demanda de ladrillos para este sector.

Con base en lo anteriormente planteado, el desarrollo de un sistema de secado aplicado a este sector de la industria ladrillera se presenta como una oportunidad para integrar la academia y la con la industria local, proponiendo soluciones tecnológicas uso racional de la energía para mejorando dichos procesos, de ahí que el desarrollo de un sistema de secado que aproveche la energía solar para calentar el aire se propone como una solución que satisface la necesidad del mercado actual, contribuyendo con el desarrollo de la industria ladrillera en el municipio de Ocaña.

Esencialmente el proceso de producción de ladrillos artesanales se divide en cuatro partes: Molienda, moldeado, secado y cocción; siendo la etapa de secado la que más tiempo consume, y es en esta etapa que se pretende intervenir para disminuir los tiempos de producción (Nuñez Ruiz, 2019).

El desarrollo de un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado para ladrillos artesanales, se centran en que el proceso de secado de estos ladrillos es bastante demorado, ya que se realiza al aire libre, depende directamente de las condiciones climáticas y no tiene un control de las variables que intervienen en el proceso (Koulibaly & Bayón González, 2015).

En Ocaña la producción de ladrillos en época de verano cuando el clima es más favorable para este proceso, la producción demora aproximadamente 20 días de los cuales 15 son de son de secado; la implementación del sistema propuesto permite abordar la problemática de las ladrilleras artesanales ya que pretende disminuir el tiempo de secado a la mitad reduciendo el

tiempo total de producción en un 35% aproximadamente, todo esto con el fin de promover un crecimiento económico que genere riqueza equitativa para todos sin dañar el medio ambiente, lo que resulta en un proceso sostenible(“¿Qué es la sostenibilidad?,” n.d.).

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Geográfica. Este proyecto se implementará en la Universidad Francisco De Paula Santander seccional Ocaña ubicada en Ocaña, Norte de Santander.

1.5.2 Operativa. Para el diseño de este proyecto se contará con la ayuda y asesoría de la ingeniera de materiales, encargada de la línea de investigación en Materiales y procesos industriales y del ingeniero a cargo del laboratorio de Automatización de la universidad Francisco de Paula Santander Sede Ocaña con el fin de obtener un funcionamiento óptimo en nuestro sistema de secado, el presente proyecto se enmarca dentro de la investigación cuantitativa ya que se utilizarán elementos de estadística descriptiva para el análisis de los datos recolectados.

1.5.3 Temporal. Este proyecto se desarrollará en las instalaciones del laboratorio de automatización de la universidad francisco de paula Santander seccional Ocaña y tendrá una duración aproximada de 4 meses comprendido en el periodo I semestre 2021. Con los resultados de la simulación, se realiza un análisis de rendimiento del sistema.

1.5.4 Metodología. Para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto se establece la metodología cuantitativa-cualitativa, con esta se desarrollará el proyecto en 3 fases.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

Sobre el proceso de producción de ladrillos en la región de Norte de Santander y las ladrilleras artesanales en el municipio de Ocaña se han realizado diferentes estudios, ya que dicho proceso hace parte de un sector de la economía tradicional de la región; por esto en 2003 se realizó la evaluación de las pérdidas de energía en el horno tipo colmena de tiro invertido en la ladrillera Cúcuta, en donde se realizó un balance de energético del sistema y se identificaron los puntos críticos de pérdida de energía; luego en 2005 se realizó el análisis termodinámico un horno tipo colmena de tiro invertido, de este se realizó una simulación y se validaron los resultados mediante un análisis comparativo con los datos reales.

De estos trabajos realizados se destacan por resaltar la importancia del estudio y análisis de este tipo de procesos y la importancia de la industria ladrillera en la región.

En 2012 se realiza un inventario de las empresas del sector cerámico ubicadas en el área metropolitana de san José de Cúcuta, identificando para cada una los tipos de hornos que utiliza, el combustible utilizado, su manejo y preparación, verificando las mejoras aplicadas a los diferentes tipos de hornos y se evaluó la eficiencia vista desde el proceso de combustión del carbón.

En 2013 se analizó la resistencia de la mampostería reforzada exteriormente usando malla electro-soldada con fines de reforzamiento, en este estudio se determinó las propiedades físico-

mecánicas como una medida de disminuir la vulnerabilidad sísmica; en 2014 se estudió la relación entre las propiedades físicas finales de los bloques cerámicos para mampostería encontrando que los métodos utilizados por algunas empresa impiden el control de las fases de cristalización y transformaciones del material cerámico, lo que se lleva a deformaciones y grietas del producto final, dando pie a la propuesta de mejoras en los procesos de producción.

Finalmente, en 2015 se desarrolló un instrumento virtual enfocado en la adquisición de datos para generar perfiles de temperatura en hornos, y con este método se logró realizar la evaluación termodinámica del proceso de cocción en hornos a cielo abierto y Hoffman evidenciando las pérdidas de calor presentes en cada uno de estos y caracterizando numéricamente la eficiencia energética de los mismos.

Con los anteriores estudios se evidencia la pertinencia de la investigación acerca de todo lo que tiene que ver con la producción de ladrillos en la región de norte de Santander, específicamente en la provincia de Ocaña, ya que los estudios realizados aportan mejoras a los procesos de producción de ladrillos y por ende al progreso de la región.

2.2 Marco Teórico

Estado del arte. Desarrollo de un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado que permita disminuir el tiempo de producción de los ladrillos artesanales en la provincia de Ocaña – Norte de Santander.

A continuación, se presentan algunos proyectos relacionados con esta investigación:

Autor: Vivek Gupta, Devesh Kumar Pathak, Rajesh, Kumar, Ankur Miglani, Salman Siddique, Sandeep Chaudhary, Fecha: 29 de enero de 2021. título: Production of colored bi-layered bricks from stone processing wastes: Structural and spectroscopic characterization

Objetivo: Producir de ladrillos de dos capas de colores a partir de residuos del procesamiento de piedra: caracterización estructural y espectroscópica

Resumen: Los residuos de procesamiento de piedra, al tener un color inherente, presentan una opción atractiva para desarrollar los productos de fachadas de edificios. En este estudio, se caracterizan cuatro tipos diferentes de residuos de procesamiento de piedra mediante difracción de rayos X, espectroscopias FTIR y Raman, y se evalúa su idoneidad para desarrollar los ladrillos bicapa coloreados.

Los desechos del procesamiento de piedra se mezclan con escoria de alto horno granulada molida para producir morteros de geopolímeros coloreados, y se comparan sus resistencias a la compresión. La incorporación de residuos de piedra disminuyó la resistencia a la compresión de los morteros geopolímeros.

En particular, los desechos de piedra ricos en Ca disminuyeron menos la resistencia a la compresión en comparación con los desechos de piedra ricos en sí. Sin embargo, los morteros de geopolímero mezclado con residuos de piedra todavía alcanzaron un valor superior a 10 MPa, al

tiempo que lograron la propiedad de color deseada. Esto corrobora el alto potencial de los desechos de piedra para producir ladrillos de mampostería de colores equivalentes a la designación de clase 10 ladrillos de cenizas volantes según IS 12894.

Los ladrillos de dos capas se conceptualizan para hacerlos económicamente viables y su fabricabilidad se demuestra a escala de laboratorio a través de un Proceso de cuatro pasos en una instalación industrial existente (utilizado para ladrillos convencionales de cenizas volantes). La viabilidad económica de estos ladrillos de dos capas de colores se compara con los ladrillos convencionales de cenizas volantes de una sola capa.

Se ha descubierto que los ladrillos de dos capas de colores tienen un enorme potencial de ahorro de hasta un 35% del costo total (teniendo en cuenta el costo de una superficie de ladrillo terminada). Este estudio presenta un estudio detallado, el primero en su tipo, para producir ladrillos de dos capas de colores utilizando desechos de procesamiento de piedra (Gupta et al., 2021).

Autor: Jittra Rukijkanpanich, Nattawoot Thongchai. Fecha: 5 junio de 2019.

Título: Burned brick production from residues of quarrying process in Thailand

Objetivo: Producir ladrillos quemados a partir de residuos del proceso de extracción en Tailandia

Resumen: En Tailandia, los residuos del proceso de extracción se clasifican como residuos industriales. Los residuos pueden obstruir el sistema de drenaje, provocando el problema de las inundaciones en el país. Esta investigación se centró en la producción de ladrillos quemados para la construcción con la utilización de los residuos. En este experimento, los residuos y la arcilla se mezclaron en diferentes proporciones: 0%, 40%, 50%, 60%, 70% y 80% en peso, y luego se quemaron a diferentes niveles de temperatura: 900 °C, 1000 °C y 1100 °C.

Los resultados mostraron que la condición de 50%-60% de contenido de los residuos, quemados a 1000-1100 °C dio la alta resistencia a la compresión de 42,50-43,67 MPa. Además, la combustión a 1000-1100 °C hizo que el proceso de sinterización diera lugar a una elevada resistencia a la compresión (Rukijkanpanich & Thongchai, 2019).

Autor: Celestino Grifaa Chiara Germinario, Alberto De Bonis, Mariano Mercurio, Francesco Izzo, Francesco Pepe, Piero Bareschino, Ciro Cucciniello, Vincenzo Monetti, Vincenzo Morra, Piergiulio Cappelletti, Giuseppe Cultrone, Alessio Langella.

Fecha: 6 de octubre de 2017

Título: Traditional brick productions in Madagascar: From raw material processing to firing technology

Objetivo: Caracterizar el proceso de producción tradicional de ladrillos en Madagascar

Resumen: Los ladrillos son los materiales de construcción más comunes de Madagascar debido a la gran disponibilidad de materia prima arcillosa, la tecnología simple de producción y la facilidad de uso. La producción de ladrillos se organiza principalmente en talleres locales cercanos al sitio de abastecimiento del depósito arcilloso donde se extraen los sedimentos, se moldean en ladrillos, se secan y luego se cuecen en hornos al aire libre.

El combustible varía desde suelos de turba hasta madera según la disponibilidad local. En consecuencia, el tiempo de cocción varía desde unos pocos días en hornos de leña hasta algunas semanas en hornos de turba. Se recolectaron y analizaron muestras de ladrillos y materias primas, así como combustible de turba, de cuatro talleres ubicados en el centro y suroeste de Madagascar para inferir las habilidades tecnológicas de la fabricación tradicional de ladrillos malgaches.

Los talleres de las Tierras Altas Centrales de Madagascar utilizan suelos lateríticos arcillosos formados a partir de la meteorización in situ de las rocas del basamento. El principal componente plástico de estos depósitos es la caolinita. Además, los sedimentos arcillosos del suroeste de Madagascar tienen caolinita junto con minerales arcillosos de bajo orden y carbonatos como la calcita y la dolomita menor rica en Sr.

En lo que respecta a los ladrillos cocidos, los datos experimentales evidenciaron temperaturas de cocción bastante bajas (por debajo de 600 ° C) en los dos hornos diferentes, independientemente del tipo de combustible. En lo que respecta al combustible de turba, su bajo poder calorífico junto con una gran cantidad de dispersión de energía del horno no permite

alcanzar las temperaturas requeridas para producir ladrillos de buena calidad, a pesar de un largo tiempo de cocción (algunas semanas).

Por otro lado, los hornos de leña en polvo, aunque proporcionan mucha más energía y un consiguiente proceso de cocción mucho más corto (pocos días), también sufren de dispersiones difusas de calor que concurren a la mala calidad del producto final.

La entrada de energía específica calculada para el horno tipo 1 (combustible de turba) oscila entre 0,09 MJ / kg y 0,18 MJ / kg de material arcilloso, lo que confirma un proceso de cocción bastante inadecuado para la producción de ladrillos de buena calidad, y una estimación aproximada indica que las relaciones de volumen entre turba y material arcilloso se debe utilizar tan solo 1: 1 para alcanzar aportes energéticos específicos "modernos" (Rukijkanpanich & Thongchai, 2019).

El proceso de secado consiste en quitar la humedad de un material, involucrando los fenómenos de transferencia de calor y masa, en forma simultánea. La transferencia de masa ocurre cuando el sólido pierde humedad, y la transferencia de calor se verifica cuando el medio ambiente (aire) entrega calor al sólido (Montoya y Arias, 2006).

La importancia del proceso de secado y el diseño de prototipos de secadores muestra su importancia mediante la publicación de los resultados de investigación como el de los autores (da Silva Almeida et al., 2013), que presentan un modelo matemático y una solución numérica para describir el secado de ladrillos huecos cerámicos en un secador túnel de tipo flujo cruzado a escala industrial.

El modelo se basa en balances de masa y energía escritos para un volumen diferencial ubicado en una posición arbitraria del material sólido e incluyen la condensación de agua.

Estas investigaciones también están orientadas hacia el desarrollo de prototipos de secadores como el propuesto por (Rabha, 2021) quien propone un prototipo de secador pasivo-activo con un calentador de biomasa y un intercambiador de calor de placas.

El secador desarrollado consta de un intercambiador de calor de placas vertical, una cámara de combustión de biomasa y una cámara de secado. Se puede ejecutar tanto en modo pasivo como activo.

A demás de los prototipos también se evalúan los métodos de secado desde el punto de vista energético como el propuesto por (Zhang, Zhang, Wang, Lu, y Jia, 2019), estos presentan un método de secado por deshumidificación que ahorra energía.

Con este método el contenido de humedad del ladrillo se ve afectado de manera extremadamente significativa por la temperatura de secado, la humedad relativa y el tiempo. La densidad y la tasa de encogimiento por secado del ladrillo en longitud se ven afectadas de manera extremadamente significativa por la temperatura y el tiempo de secado. La resistencia a la compresión del ladrillo se ve muy afectada por la humedad relativa, de ahí la importancia del este método de secado.

Por otro lado (Raju & Ravindhar, 2021) realizan un estudio comparativo sobre la

resistencia a la compresión de ladrillos tradicionales y ladrillos de arcilla convencionales, y utilizan la resistencia a la compresión de los ladrillos la vida útil futura de la estructura.

Ellos tomaron dos muestras de ladrillos de diferentes tamaños de una de las antiguas estructuras patrimoniales, el Templo Veetrirundha Perumal, Veppathur del distrito de Thanjavur, Tamil Nadu, India. Los ladrillos fueron probados para determinar su resistencia a la compresión siguiendo las normas ASTM.

Los resultados mostraron que la resistencia de los ladrillos heritage 1 y 2 era de 415 kN y 2354 kN, respectivamente, mucho más alta que la de los ladrillos convencionales.

Existen estudios enfocados hacia los materiales de los ladrillos y como estos pueden aumentar o disminuir el consumo energético, (Kurmus & Mohajerani, 2021) hablan acerca del ahorro de energía, de la conductividad térmica de ladrillos de arcilla cocidos si se les incorporan colillas de cigarrillos.

Los autores desarrollaron un método novedoso para monitorear el consumo de energía del horno durante el proceso de cocción, y se utilizaron imágenes de microscopía electrónica de barrido y tomografía microcomputada de rayos X para caracterizar la cantidad, distribución, tamaño, y forma de los poros a micro y macroescala de las muestras de ladrillos que incorporan colillas de cigarrillo.

Los ladrillos de arcilla mostraron un aumento de la porosidad y una disminución de la

densidad con el aumento del contenido de colillas de cigarrillo, lo que redujo la conductividad térmica. -1 K^{-1} con la adición de 2% de colillas de cigarrillo en peso. en comparación con los ladrillos de control.

Finalmente (Dabaieh, Heinonen, El-Mahdy, y Hassan, 2020) realizan un estudio comparativo de las emisiones de carbono del ciclo de vida y la energía incorporada entre ladrillos secados al sol y ladrillos de arcilla cocidos.

Ellos no se enfocan en el proceso de secado, pero hacen referencia al proceso de producción artesanal de los ladrillos y al final concluyen que una buena selección de los materiales de construcción puede minimizar el consumo de energía, los costos de producción y los efectos nocivos para el medio ambiente.

De los estudios presentados anterior mente, se puede decir que los ladrillos de arcilla, a pesar del tiempo aún siguen vigentes y en la actualidad aún son objeto de estudio.

La investigación acerca de la producción de estos así sea de forma artesanal sigue vigente y las mejoras en dichos procesos son evidentes en la literatura científica, como la presentada en este documento.

2.3 Marco Conceptual

En este proyecto se verán términos tales como:

2.3.1 Generador de Aire. Los secadores de aire deben de contar con un sistema que permita la entrada de aire a diferentes velocidades de flujo, por eso se utilizan ventiladores o motores que se utilizan en los sistemas de refrigeración y también extractores de aire los cuales son polarizados de manera inversa para trabajar como generadores de aire (Martínez-Pinillos Cueto, 2016).

2.3.2 Calefactor. En calefactores directos el aire es calentado cuando se combina con gases de combustión de escape. En calefactores indirectos en aire o producto es calentado a través de placas de resistencias eléctricas. El costo de los calentadores directos es más bajo que los indirectos, pero algunos productos se llegan a dañar o contaminar debido a los gases (Martínez-Pinillos Cueto, 2016).

2.3.3 Alimentador. Los alimentadores o “feeders” más comunes utilizados en los secadores para sólidos húmedos son los transportadores de tornillo, mesas rotantes y bandejas vibratorias.

Otros componentes que son utilizados en los secadores para verificar el estado dentro del mismo son: termómetros de mercurio, medidores de presión y humedad, y básculas que sensan la pérdida de agua del producto (Martínez-Pinillos Cueto, 2016).

Por lo general los secadores que se utilizan en los laboratorios de investigación cuentan con todos estos elementos con el propósito de hacer pruebas y de monitorear el comportamiento del secador y del producto que se está secando.

2.3.4 Tipos de Secadores. A continuación, se describen de manera simplificada algunos tipos de secadores que se utilizan en procesos de secado, así como sus ventajas y desventajas.

Secador de Horno. Granos, frutas y vegetales pueden ser procesados usando este tipo de secador. Este consiste en una construcción de dos secciones con un piso con ranuras que separa la sección de secado con la sección de calefacción.

El producto es colocado sobre una placa ranurada y el aire caliente es llevado de la sección baja hacia la sección de secado a través de la placa (Morejón-Mesa, Silva-Junco, y Reyes-Suárez, 2020).

Secador de Cabina o Bandeja. Este tipo de secador se caracteriza por tener una serie de bandejas en donde es colocado el alimento. Las bandejas se colocan dentro de un compartimiento del secador en donde es expuesto al aire caliente.

El secador cuenta con un ventilador y una serie de resistencias eléctricas a la entrada que permiten generar aire caliente el cual es llevado a través de la sección de bandejas (Morejón-Mesa et al., 2020).

Secadores de Túnel. Este tipo de secadores, los cuales se caracterizan por tener arriba de 24 metros de largo y una sección rectangular de casi 2 metros * 2 metros, consiste de una cabina equipada con rieles para mover unas cajoneras a lo largo de la cámara de secado. Un sistema de calefacción calienta el aire que entra a la cámara y este circula a través de las

cajoneras con alimentos (Morejón-Mesa et al., 2020).

Secadores con Cinta Transportadora. El principio de un secador con cinta transportadora es similar al del secador tipo túnel, excepto porque el producto es transportado por medio de un sistema sobre una cinta.

La configuración más comúnmente usada en la práctica consiste en pasar el aire caliente directamente a través de la cinta y capas del producto (Morejón-Mesa et al., 2020).

Secador de Bandeja para Laboratorio. Este secador de alimentos al igual que los anteriores tiene como función principal el deshidratar el producto y llevar el vapor de agua fuera del mismo.

La diferencia de este con los demás radica en el tamaño y la facilidad con que se puede manipular ya que el propósito de estos es netamente educacional. El objetivo es que se puedan utilizar en laboratorios y universidades para realizar pruebas experimentales con cantidades de producto muy pequeñas (Morejón-Mesa et al., 2020).

2.4 Marco contextual

Ocaña es un municipio del territorio colombiano que se encuentra localizado en el departamento de Norte de Santander, es conocida como la capital del Catatumbo, se encuentra conectado con las carreteras nacionales Bucaramanga, Santa Marta y Cúcuta.

Su temperatura promedio es de 22 grados, cuenta con aproximadamente 129.302 habitantes, su extensión es de 460 km² aproximadamente, lo que equivale al 2.2 % del departamento, el municipio fue fundada el 24 de diciembre de 1570 por Francisco Fernández de Contreras y recibió por nombre Ocaña en conmemoración a Fernández del bulto, procedente de la ciudad de Ocaña en España.

Ocaña es recordada nacionalmente e históricamente por la gran convención, que se dio el 9 de abril de 1828, donde se buscaba la reforma constitucional, firmada en Cúcuta, en 1821, se reunieron delegados de todos los departamentos de la gran Colombia en ese momento, sin embargo, esta reunión fue fallida, desatando aún más las rivalidades políticas y como consecuencia de esta la disolución de la gran Colombia.

Ocaña es reconocida nacionalmente por su variedad gastronómica como ejemplo las cebollitas ocañeras, el pan, las cocotas el barbatusco, entre muchas más. Es reconocida también por sus monumentos como la columna de los esclavos que es de las pocas obras que existen en el mundo para conmemorar la esclavitud en América Latina, el Cristo Redentor, y las iglesias de la ciudad.

Ocaña es considerada como la capital del Catatumbo, por lo que la convierte en un eje fundamental en la economía, gracias a que pertenecer al Catatumbo, la convierte en una población rica en productos estables y saludables de la canasta familiar. Esto la posiciona como herramienta principal de sostenimiento para los departamentos cercanos y para la ciudad de Cúcuta (capital del departamento norte santandereano).

Según un estudio realizado por el plan básico de ordenamiento territorial (PBOT), Ocaña cuenta con 30 ladrilleras que realizan el proceso de fabricación de ladrillos de manera artesanal, también conocidas como chircales.

2.5 Marco legal

Para el desarrollo de este proyecto se cuenta con la aprobación del comité curricular, y no se necesita ningún trámite legal para llevar a cabo este proyecto. Teniendo en cuenta que los objetivos del proyecto se encaminan hacia la sostenibilidad de los procesos, específicamente el secado de los ladrillos en dicho proceso de producción, Colombia cuenta con la resolución 909 del 5 de junio de 2008 como un método de prevención de la contaminación.

Como un método de freno a la problemática ambiental de los sectores productivos colombianos, el gobierno nacional, a través del ministerio del medio ambiente, ha definido dentro de sus políticas ambientales fundamentales incentivar “la prevención de la contaminación” en su origen, en lugar de tratarla una vez generada, desde la resolución 909 del 5 de junio de 2008 República de Colombia, en la cual establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.

Esta ley en el Artículo 30, 31 y 32. Establece los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para las industrias existentes de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla a condiciones de referencia y con oxígeno de referencia

del 18%. Dichos estándares deben cumplirse en cada uno de los puntos de descarga de las industrias para la fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla.

En el Artículo 33. Se refiere a la temperatura de los gases emitidos por las industrias de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla. Esta temperatura de los gases emitidos por los hornos continuos no debe exceder una temperatura de 180 °C. Para el caso de hornos discontinuos la temperatura no debe exceder temperatura 250 °C durante la etapa de máximo consumo de combustible.

Finalmente, en el Artículo 34. Se establecen las características de las mediciones directas en hornos en industrias de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla. Estas mediciones directas deben realizarse de acuerdo a lo establecido en el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas. Para efectos de la medición, el industrial debe informar a la autoridad ambiental competente, la fecha y hora en la que inició el proceso de cocción.

Capítulo 3 Metodología

Para el desarrollo de este proyecto, se llevará a cabo una investigación de profundidad descriptiva debido a que será posible obtener la información requerida a través de una descripción exacta de las actividades y procesos para realizar los diseños necesarios, especificando las propiedades importantes y relevantes para el desarrollo experimental del sistema.

Esta investigación tiene un enfoque Cuantitativo de carácter científico experimental, debido a que permite manipular y controlar las variables de investigación (temperatura y humedad). El diseño de esta investigación se cataloga como una investigación aplicada, puesto que se utilizarán los conocimientos adquiridos en la etapa de formación profesional para el desarrollo de este.

Teniendo en cuenta que el objetivo del proyecto se centra en el tiempo de secado de los ladrillos, y que este proceso se realiza al aire libre en todas las ladrilleras artesanales de la provincia de Ocaña, que según datos de la alcaldía municipal son alrededor de 30, de las cuales la población objetivo son las que se encuentran ubicadas en el sector de la vereda el estanco reduciendo el tamaño de la muestra a 3 ladrilleras artesanales las cuales poseen características de producción similares y se encuentran sobre la misma formación geológica.

Con base lo anteriormente planteado, se pretende verificar que si al aplicar un método de secado diferente al tradicional el ladrillo conserva sus características físicas y mecánicas

(Resistencia a la compresión), para esto se diseña un experimento en donde se comparan dichas características obtenidas en el desarrollo mediante proceso tradicional con las obtenidas utilizando el sistema propuesto y al final se sacan conclusiones al respecto.

Para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto y de esta metodología se establecen 3 fases a desarrollar:

Fase 1: Identificación de las variables que intervienen en el proceso de secado de ladrillos de arcilla.

En esta fase se hace la relación de los conceptos teóricos, científicos y matemáticos correspondientes al problema planteado. Para esto se plantean las siguientes actividades:

Actividad 1. Recopilación de información científica sobre el proceso de producción de ladrillos artesanales, estableciendo los diferentes criterios de operación.

Actividad 2. Identificación de las variables que intervienen en el proceso de secado.

Actividad 3. Análisis de las variables que representa la dinámica del proceso de secado de ladrillos artesanales.

Fase 2: Selección del sistema de secado que mejor se adapte al proceso de producción de ladrillos artesanales de arcilla según los parámetros establecidos.

En esta fase se determinará cual es el sistema más adecuado para realizar el proceso de secado y se construirá el sistema seleccionado teniendo en cuenta los requerimientos previamente.

Actividad 1. Recopilación de información científica sobre los diferentes sistemas de secado que existen en el mercado que se puedan aplicar en el proceso de producción de ladrillos artesanales. estableciendo los diferentes criterios de operación.

Actividad 2. Selección del sistema de secado que mejor se adapte al proceso de producción de ladrillos artesanales.

Actividad 3. Construcción del sistema seleccionado.

Fase 3: Validación e implementación del sistema propuesto.

En esta fase se construye y se valida el sistema propuesto, para ello se plantean las siguientes actividades.

Actividad 1. Análisis de desempeño del sistema

Actividad 2. Pruebas físicas de las muestras

Actividad 2. Análisis de comparativo de resultados las muestras secadas.

Capítulo 4. Presentación de resultados

Como respuesta a la pregunta problema *¿Cómo se puede reducir el tiempo de secado de los ladrillos de arcilla utilizando energías renovables conservando sus propiedades físico mecánicas?* Se propuso *desarrollar un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado que reduzca el tiempo de producción de los ladrillos artesanales de arcilla*; este sistema cuenta con una entrada de aire forzado que circula a través de un colector solar el cual se encarga de calentar el aire y disminuir su porcentaje de humedad relativa, esta etapa es importante ya que el aire seco con humedad relativa baja, es el encargado de retirar la humedad de los ladrillos, el aire seco se inyecta en la cámara de secado en donde están dispuestos los ladrillos, y finalmente en la parte superior de la cámara de secado se dispone la extracción del aire húmedo.

A continuación, se presenta el resultado de las actividades propuestas en el diseño metodológico para el desarrollo del proyecto. En la primera fase se estableció como objetivo *Identificación de las variables que intervienen en el proceso de secado de ladrillos de arcilla*.

4.1 Recopilación de información científica sobre el proceso de producción de ladrillos artesanales, estableciendo los diferentes criterios de operación y medición.

Recopilación de información científica sobre el proceso de producción de ladrillos artesanales, estableciendo los diferentes criterios de operación.

4.1.1 Principios del secado térmico del ladrillo. El secado consiste en extraer el exceso de agua que contiene el ladrillo en el menor tiempo, al menor costo y obteniendo la mejor calidad posible.

En el proceso de secado térmico el aire calienta el ladrillo y evacúa la humedad que se encuentra en él. Es necesario conocer una serie de características y propiedades físicas del aire y del ladrillo para comprender este proceso (Valdez Loaiza, Aguilar Franco, Sánchez Vargas, Alatrística Góngora, y Figueroa Dianderas, 2020).

4.1.2 Características del aire. El aire debe tener unas condiciones particulares de humedad, temperatura, velocidad y presión para poder realizar un buen secado.

Humedad Relativa del Aire. El aire ambiente contiene agua en forma de vapor. La humedad relativa indica el contenido de vapor de agua, es decir, la humedad del aire y depende de la presión atmosférica y de la temperatura del lugar, las cuales varían dentro de ciertos límites para un lugar determinado; por esta razón se calcula una humedad relativa promedio.

En el proceso de secado el aire se comporta como una esponja; entre más seco, mayor su capacidad para absorber vapor de agua, hasta llegar a un tope máximo de contenido de agua.

La medición de humedad relativa puede hacerse por medio de un sensor HTU21D, el cual tiene una precisión de temperatura de $\pm 0,3$ ° C en condiciones normales de funcionamiento y una precisión típica de $\pm 2\%$ para la HR (El-Baz, Honold, Hardi, & Tzscheuschler, 2018).

Temperatura del Aire. A medida que aumenta la temperatura del aire, también aumenta su capacidad para secar o absorber humedad. Para aumentar la temperatura del aire es necesario suministrar energía. Las fuentes corrientes de energía son: carbón, ACPM, gas natural, electricidad, energía solar utilizada directamente sobre el ladrillo o captada por colectores solares que calientan el aire suministrado a una cámara de secado (El-Baz et al., 2018) (Tarminzi et al., 2021).

Velocidad de Aire. El aire caliente debe circular a través de los ladrillos a una velocidad tal que garantice la evacuación del agua contenida en estos. El aire es en general propulsado por ventiladores eléctricos, que consumen no menos de la cuarta parte de la energía eléctrica requerida para calentar el aire.

La velocidad del aire se calcula a partir del caudal de los ventiladores y de la distribución del ladrillo dentro de la cámara. Se mide por medio del anemómetro (León-Medina, Torres-Díaz, Lozano-Násner, & Rueda-Martín, 2018).

Presión del Aire. Debe ser suficiente para que circule de manera uniforme a través de todos los ladrillos distribuidos dentro de la cámara. Es una característica de los ventiladores que se calcula a partir de las restricciones impuestas al recorrido del aire se mide por medio de un manómetro (León-Medina et al., 2018).

4.1.3 Identificación de las variables que intervienen en el proceso de secado. En un proceso de secado adecuado es necesario controlar su cantidad de agua o contenido de humedad, el Contenido de Humedad del Ladrillo. La arcilla es un material poroso que contiene agua bajo tres formas:

Agua Libre: Es el agua que llena las cavidades entre las células. Es fácil de evacuar con poco consumo de energía.

Agua Higroscópica: Es el agua contenida en las paredes de las células. Para evacuarla es necesario suministrar al ladrillo mayor cantidad de energía.

Agua de Constitución: Forma parte integral de la estructura molecular que compone la arcilla. Solo puede evacuarse mediante la cocción.

Se considera seco el ladrillo cuando ha perdido toda el agua libre y parte del agua higroscópica, hasta llegar a un contenido de humedad de equilibrio con la humedad relativa del aire ambiente.

Para un lugar con temperatura y humedad relativa determinadas existe entonces un contenido de humedad de equilibrio del ladrillo que es el valor mínimo al cual puede mantenerse, en ese lugar, el contenido de humedad del material.

Al perder toda el agua higroscópica se conoce como Arcilla Anhidra y el contenido de humedad es nulo. El contenido de humedad se define como la relación, medida en porcentaje %, entre el peso del agua contenida y el peso de la arcilla anhidra o sin agua.

$$CH = \frac{PH - PA}{PA} \times 100\%$$

La diferencia entre el peso húmedo y el peso anhidro es el peso de agua que contiene el material.

Las propiedades físico – mecánicas que se tienen en cuenta para este proceso son:

La resistencia a la compresión: Mínima resistencia nominal de la mampostería a compresión, medida sobre el área transversal neta y sobre la cual se basa su diseño (Afanador García, Guerrero Gómez, & Monroy Sepúlveda, 2012)(RESISTENTES, n.d.). En la figura 1 se presenta la imagen de la prueba de laboratorio realizada a los ladrillos.



Figura 1. Prueba de resistencia a la compresión. Fuente Autores

El módulo de rotura es una propiedad importante como criterio de durabilidad y para entender el mecanismo de falla de la mampostería cuando se solicitan esfuerzos de compresión y flexión, casos muy comunes en la mampostería (Afanador García et al., 2012) (RESISTENTES, n.d.)

La tasa inicial de absorción (TIA) Medida de la cantidad de agua que absorbe una unidad de mampostería de arcilla en contacto con el agua por unidad de área, durante un minuto

(Afanador García et al., 2012) (RESISTENTES, n.d.).

La absorción de agua Se sumergen los especímenes secos y fríos, sin inmersión parcial preliminar, en agua limpia (blanda, destilada o de lluvia) entre 15,5 °C y 30 °C durante 24 h. Se retira el espécimen, se seca el exceso de agua con un paño húmedo y se pesa. El pesaje de cada espécimen se debe hacer antes de que pasen 300 s de retirado del agua (Afanador García et al., 2012) (RESISTENTES, n.d.) (“Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla,” n.d.).

4.2 Selección del sistema de secado que mejor se adapte al proceso de producción de ladrillos artesanales de arcilla según los parámetros establecidos.

Existen diferentes tipos de secadores, como los secadores de horno, los de bandejas, los secadores de túnel, los secadores de cinta transportadora entre otros. Para este proyecto se seccionó un secador o cámara de secado con inyección de aire forzado, y como componente adicional se utilizó un colector solar para para calentar el aire que entra en la cámara; teniendo en cuenta las características de la producción de ladrillos artesanales se escogió este modelo ya es relativamente económico comparado con los anteriormente mencionados, ya que la energía requerida para su funcionamiento es relativamente baja, ya que la mayor parte de la energía utilizada en el proceso de secado proviene del sol.

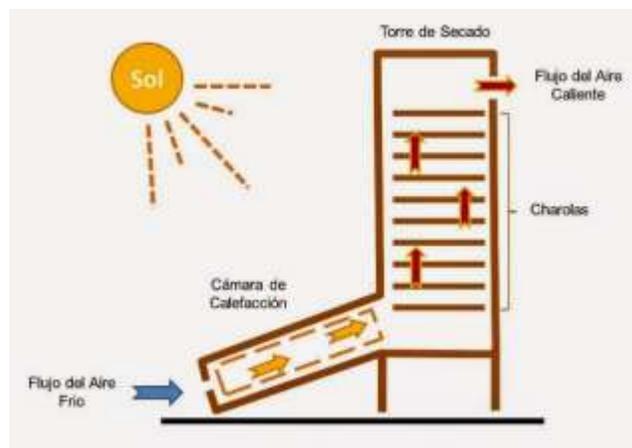


Figura 2. Cámara de secado con colector solar (“Secador Solar,” n.d.).

La configuración básica de un secador de aire forzado es una cámara especial donde el producto es colocado, este está equipado con sistema generador de aire caliente y una serie de conductos que permiten la circulación de aire caliente alrededor y a través del producto como se observa en la figura 3. El agua es removida de la superficie del material y llevada hacia afuera en una sola operación. El aire es calentado mientras entra al secador por medio de un colector solar.

Construcción del sistema seleccionado. Para la construcción del secador se tuvo en cuenta el modelo de la figura 4 y además de esto la cantidad de muestras a secar y la disposición dentro de este, el secador se construyó para almacenar dos bandejas con seis muestras cada una. Las medidas de este se pueden observar en la figura 5, en donde el colector solar ocupa la mayor parte del diseño, y las imágenes del proceso de construcción se presentan en la figura 6, y el secador finalizado se muestra en la figura 7.



Figura 3. Modelo del secador propuesto. Fuente: Autores del proyecto

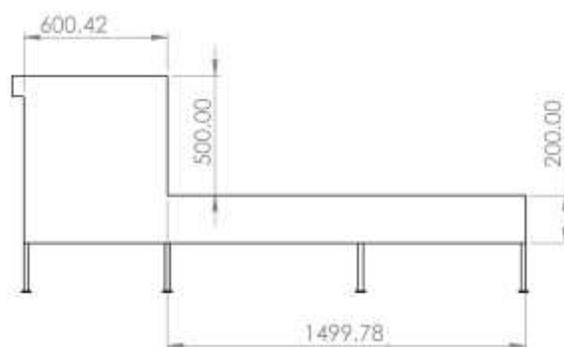


Figura 4. diagrama del secador propuesto. Fuente: Autores del proyecto



Figura 5. Construcción del secador. Fuente: Autores del proyecto



Figura 6. Secador construido. Fuente: Autores

4.3 Validación e implementación del sistema propuesto

El proceso de validación del sistema propuesto consistió en tomar muestras de ladrillo húmedas de la ladrillera artesanal el estanco, se sacaron cinco muestras y se secaron en el prototipo propuesto, todo esto con el fin de tomar el tiempo que le tomaba a la muestra llegar al porcentaje de humedad apto para la cocción. El objetivo de esto además de verificar si existe una disminución en el tiempo de secado, era comprobar si estos después del proceso de cocción conservaban las propiedades físico mecánicas.



Figura 7. Disposición de los ladrillos dentro del secador propuesto. Fuente: Autores del proyecto

4.3.1 Análisis de desempeño del sistema propuesto. Para medir el desempeño del sistema propuesto frente al proceso tradicional de las ladrilleras artesanales, dispusieron 5 muestras las cuales se etiquetaron y se pesaron diariamente hasta que alcanzaron una pérdida de peso que oscila entre el 17% y el 20%, lo que indica que el ladrillo está listo para pasar al horno.

En las figuras 8 a la 12 se puede ver de manera gráfica el proceso diario de secado de cada una de las muestras.

Se puede decir que al comparar el proceso de secado al aire libre el cual tiene una duración de 15 días aproximadamente para el mejor de los casos, el secado mediante el prototipo propuesto tuvo una duración de 9 días, lo que resulta en una reducción del 40% en el tiempo de secado.

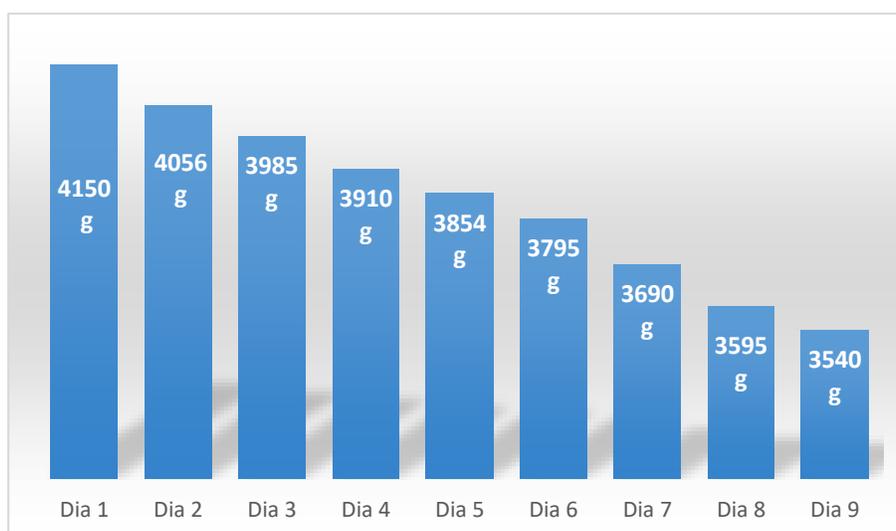


Figura 8. Pérdida de peso diario para la muestra número 1. Fuente: Autores del proyecto

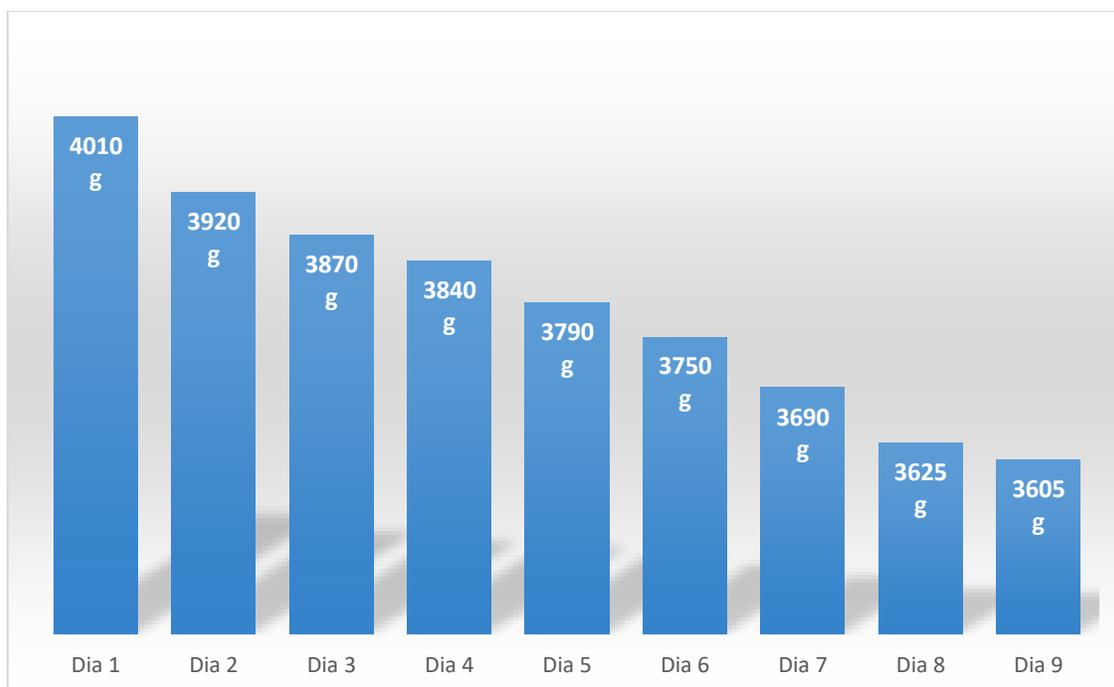


Figura 9. Pérdida de peso diario para la muestra número 2. Fuente: Autores del proyecto

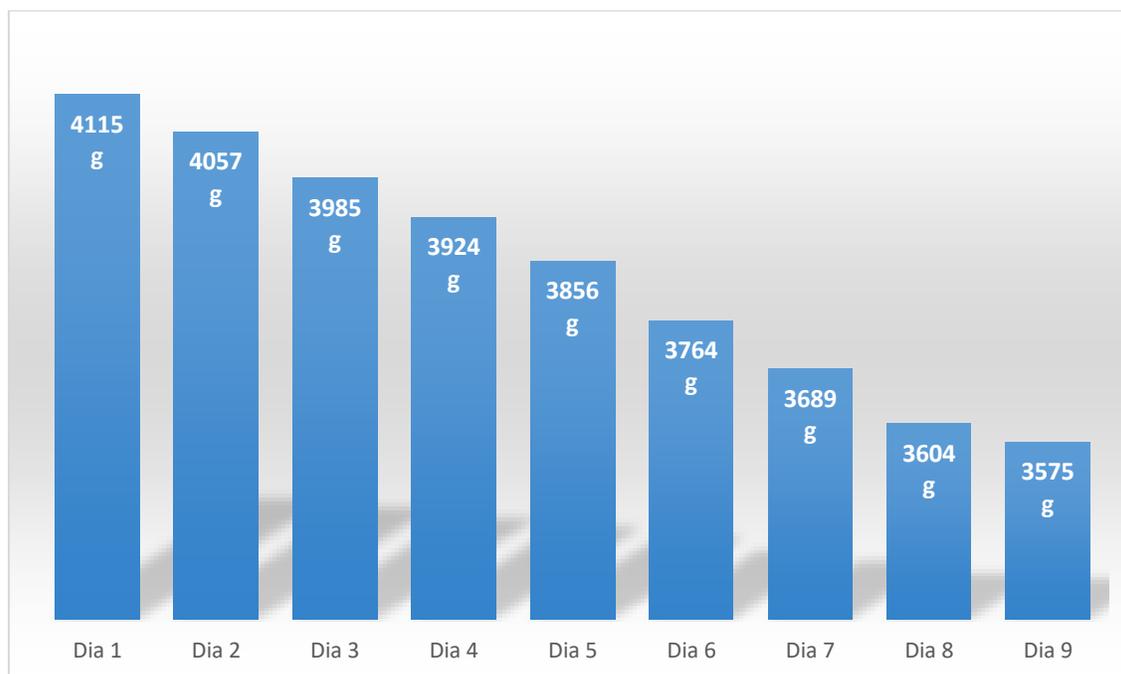


Figura 10. Pérdida de peso diario para la muestra número 3. Fuente: Autores del proyecto



Figura 11. Pérdida de peso diario para la muestra número 4. Fuente: Autores del proyecto

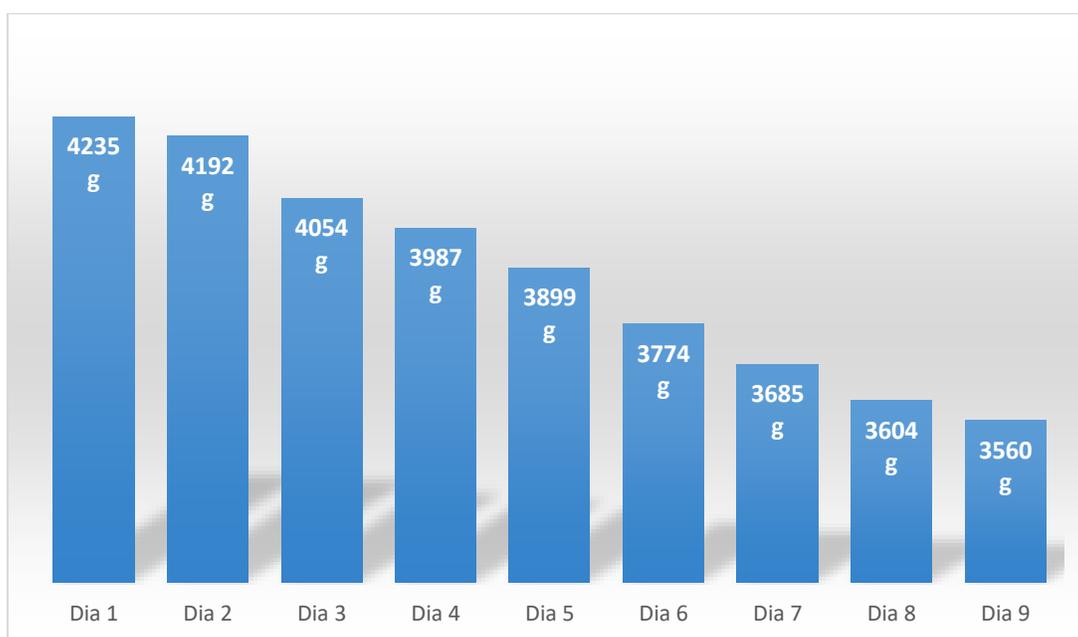


Figura 12. Pérdida de peso diario para la muestra número 5. Fuente: Autores del proyecto

4.3.2 Pruebas físicas de las muestras. Ensayo de compresión. En ingeniería civil, el ensayo de compresión es un procedimiento enfocado a determinar la resistencia de un material, así como su deformación ante un esfuerzo de compresión. Este ensayo se realiza en concretos y metales, o en cualquier material al que se desee medir su resistencia.

La finalidad de este ensayo comprende en medir la resistencia a la compresión de los ladrillos secados mediante el prototipo y los ladrillos secados a la intemperie y comparar sus propiedades físico mecánicas. Este ensayo se realiza sobre los ladrillos previamente cocidos, los cuales poseen las mismas dimensiones como se muestra en la figura 13.



Figura 13. Ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Autores

En la tabla 6 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados en el prototipo, así mismo en la figura 14 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de $30,6 \text{ kgf/cm}^2$ presentando una tendencia alrededor de este punto.

Tabla 1

Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado

RESULTADO DE MUESTRA			
Muestra	Ruptura kN	Área m ²	σ kgf/cm ²
1	157,6	5,28x10 ²	30,4
2	152,3	5,28x10 ²	29,4
3	160,2	5,28x10 ²	30,9
4	149,8	5,28x10 ²	28,9
5	154,5	5,28x10 ²	29,8
6	165,4	5,28x10 ²	31,9
7	170,4	5,28x10 ²	32,8
8	151,8	5,28x10 ²	29,3
9	186,4	5,28x10 ²	35,9
10	165,2	5,28x10 ²	31,8
11	149,5	5,28x10 ²	28,8
12	142,5	5,28x10 ²	27,5
		Promedio	30,6

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 14 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 30,65 kgf/cm² presentando una tendencia alrededor de este punto.



Figura 14. Resistencia a la Compresión ladrillo secado en Horno de aire forzado. Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 2 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados a la intemperie, así mismo en la figura 15 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de $31,21 \text{ kgf/cm}^2$ presentando una tendencia alrededor de este punto.

Tabla 2

Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados al aire libre

RESULTADO DE MUESTRAS			
Muestra	Ruptura kN	Área m ²	σ kgf/cm ²
1	162,8	$5,28 \times 10^2$	31,4
2	159,4	$5,28 \times 10^2$	30,7
3	157,2	$5,28 \times 10^2$	30,3
4	154,6	$5,28 \times 10^2$	29,8
5	154,5	$5,28 \times 10^2$	29,8
6	166,2	$5,28 \times 10^2$	32,8
7	159,8	$5,28 \times 10^2$	30,8
8	161,8	$5,28 \times 10^2$	31,2
9	169,5	$5,28 \times 10^2$	32,7
10	163,3	$5,28 \times 10^2$	31,5
11	165,7	$5,28 \times 10^2$	31,9
12	165,4	$5,28 \times 10^2$	31,9
		Promedio	31,2

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 15 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de $31,21 \text{ kgf/cm}^2$ presentando una tendencia alrededor de este punto.

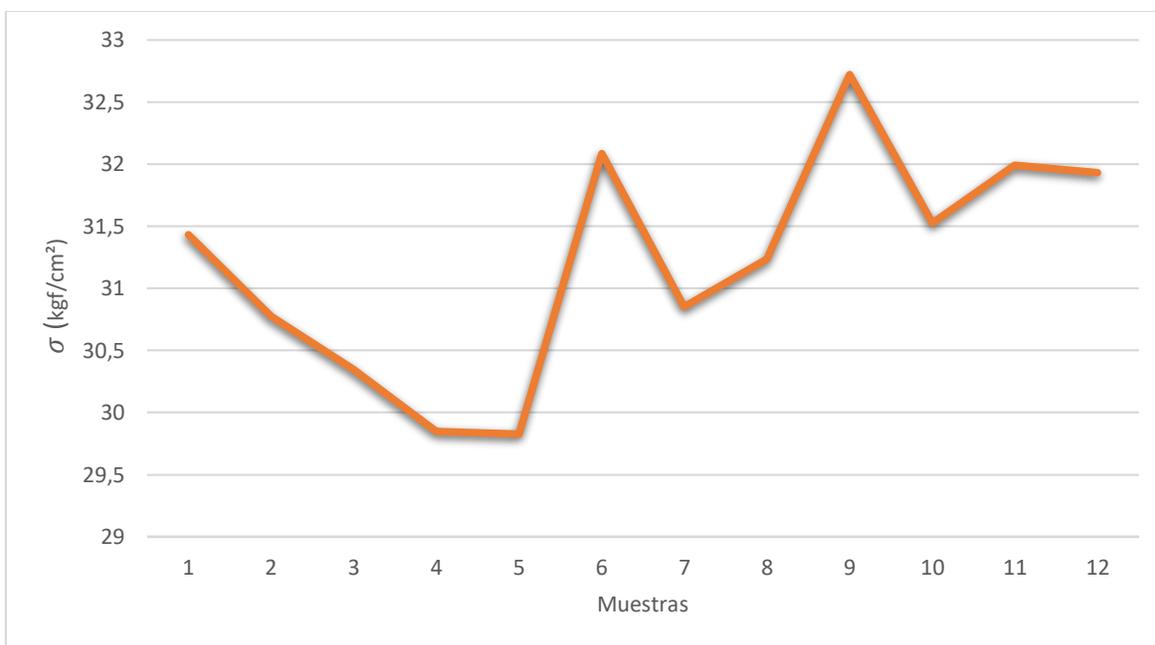


Figura 15. Resistencia a la Compresión ladrillo secado a la intemperie. Fuente: Autores del proyecto

Ensayo de flexión. El ensayo de flexión permite evaluar el comportamiento ante la flexión de un material, se considera flexión a la deformación que presenta un elemento sobre dirección perpendicular a su eje longitudinal como se observa en la figura.

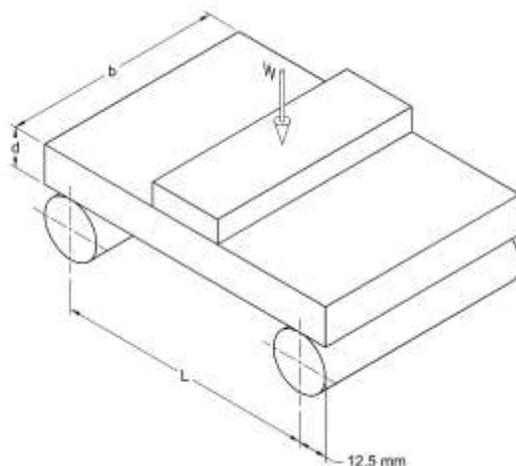


Figura 16. Ensayo de flexión (“Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla,” n.d.).

Esfuerzo: Es la resistencia que ofrece un área unitaria (A) del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa (fuerza, F).

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ Esfuerzo axial}$$

Deformación: Se define como el cambio sobre el tamaño o forma del elemento en análisis debido a esfuerzos internos producidos por fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

Deformación elástica: es aquella la cual permite regresar al elemento a sus dimensiones iniciales previas a la realización del ensayo; es reversible luego de retirar las cargas que generan su deformación.

Deformación plástica: es irreversible o permanente. Modo de deformación en el que el material o no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.

$$\sigma = \frac{PL}{AE} \text{ Deformación por carga}$$



Figura17. Máquina correspondiente al ensayo de flexión. Fuente, autores del proyecto

En la tabla 3 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados en el prototipo es de notar que los datos se encuentran alrededor de 1,3 kgf/cm² presentando una tendencia alrededor de este punto.

Tabla 3

Resultados del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado

RESULTADO DE MUESTRAS				
Muestra	Peso gr	Ruptura kN	Área m ²	σ kgf/cm ²
1	2984	3,5	2,64x10 ²	1,3
2	3056	3,4	2,64x10 ²	1,3
3	3012	3,7	2,64x10 ²	1,4
4	2946	3,2	2,64x10 ²	1,2
5	3015	3,1	2,64x10 ²	1,1
Promedio				1,3

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 18 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados en el prototipo de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 1,3 kgf/cm² presentando una tendencia alrededor de este punto.

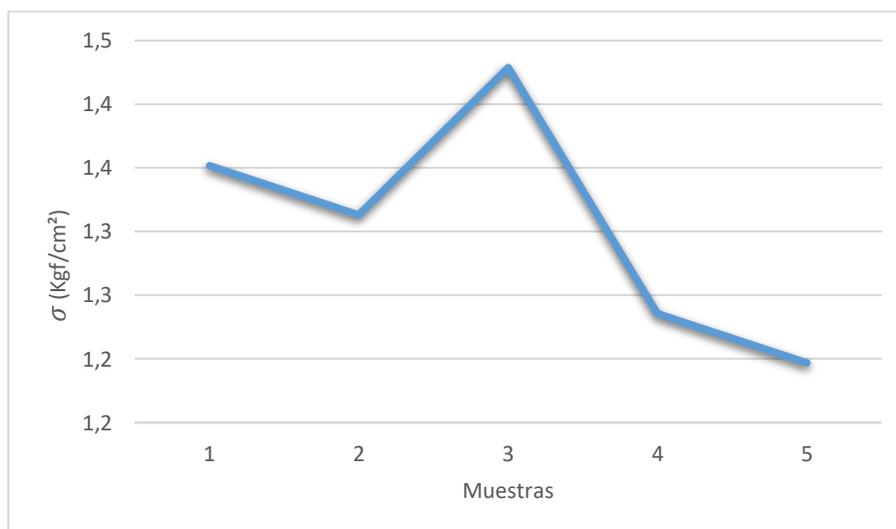


Figura 18. Flexión ladrillo secado a la intemperie Fuente: Autores del proyecto

En la figura 19 se presenta el peso de las muestras de manera gráfica, los cuales se encuentran alrededor de los 3000g.

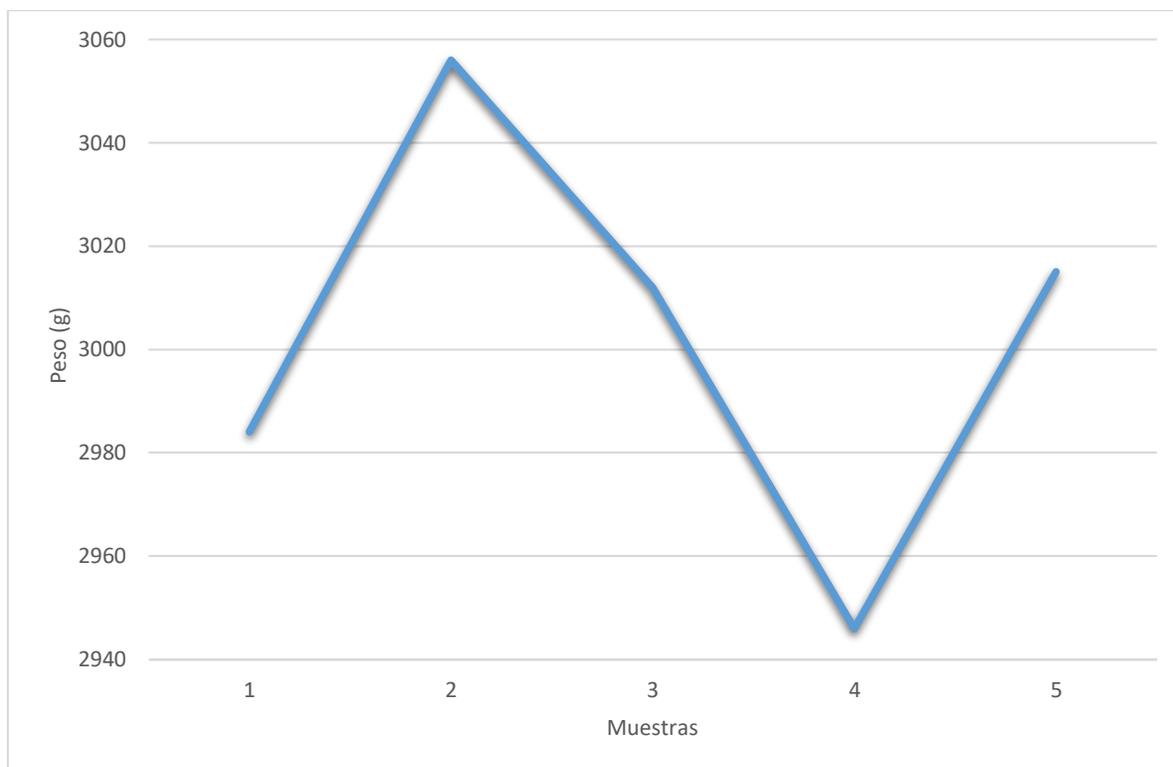


Figura 19. Peso ladrillo secado a la intemperie Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 4 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados en el prototipo, así mismo en la figura 20 se presentan estos de manera gráfica.

Es de notar que los datos se encuentran alrededor de $1,3 \text{ kgf/cm}^2$ presentando una tendencia alrededor de este punto también se presenta el peso de las muestras de manera gráfica en la figura 21.

Tabla 4

Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados al aire libre

Muestra	Peso gr	Ruptura kN	Área m ²	σ Kgf/cm ²
1	3026	3,3 (1,2)	2,64x10 ²	1,2
2	2958	3,1 (1,1)	2,64x10 ²	1,1
3	2949	3,5 (1,3)	2,64x10 ²	1,3
4	3050	3,2 (1,2)	2,64x10 ²	1,2
5	2995	3,4 (1,3)	2,64x10 ²	1,3
Promedio				1,2

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 20 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 1,3 kgf/cm² presentando una tendencia alrededor de este punto.

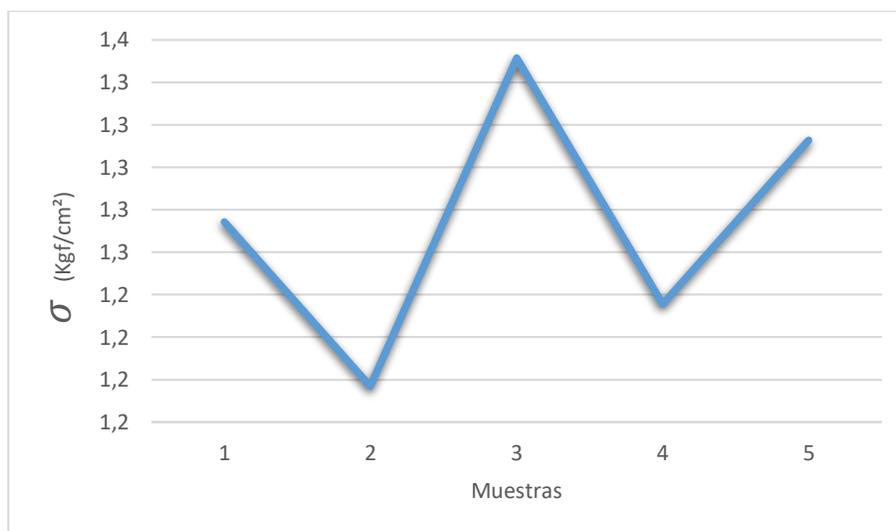


Figura 20. Flexión ladrillo secado mediante forzado. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 19 se presenta el peso de las muestras de manera gráfica, los cuales se encuentran alrededor de los 3000g.

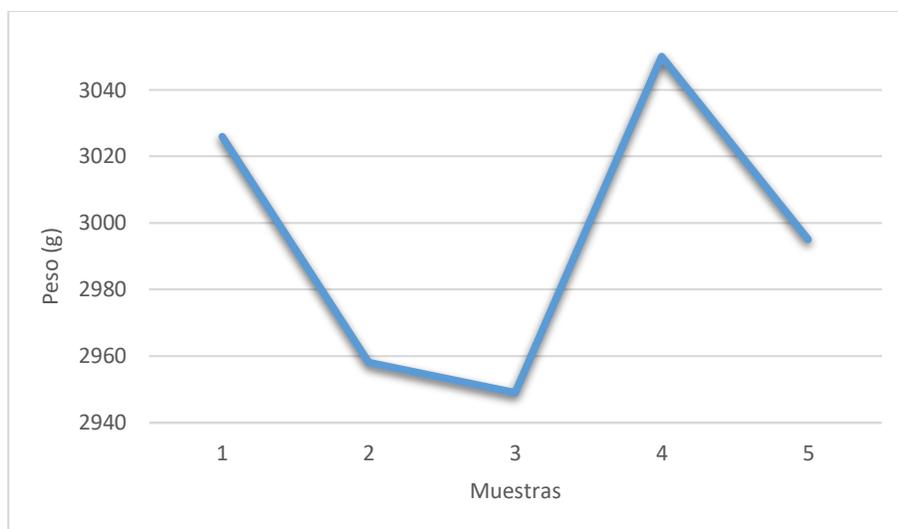


Figura 21. Peso ladrillo secado mediante aire forzado. Fuente: Autores del proyecto

Tasa inicial de absorción (TIA) y la absorción de agua. Entre las propiedades físicas que se estudiaron en los ladrillos se encuentran, la tasa inicial de absorción y la absorción de agua. La tasa inicial de absorción (TIA), dada en $\text{g/cm}^2/\text{min}$, mide la cantidad de agua que absorbe el ladrillo en un minuto, pues los poros de los ladrillos funcionan como capilares en presencia de agua.

Cuando se coloca el mortero de pega o de relleno de las unidades, succiona parte del agua del mortero, que afecta su adherencia y la consistencia del mortero. Una adherencia deficiente afecta la resistencia de la mampostería, la durabilidad y penetración de agua. El ensayo consistió en determinar la masa seca y la masa final del ensayo, registrando la TIA que se calculó con la ecuación:

$$TIA = \frac{m_f - m_i}{A_{\text{contacto}}} \times 100 \%$$

En donde m_f es la masa final de ladrillo, m_i es la masa inicial del ladrillo y

$A_{contacto}$ es el área de contacto con el agua.

La capacidad de absorción de agua de un ladrillo se define como el cociente entre el peso de agua que absorbe y su propio peso cuando está seco. Se expresa en tantos por ciento. Según está definición:

$$\text{Capacidad de absorción de agua} = \frac{P_{Sat} - P_{Sec}}{P_{Sec}} \times 100 \%$$

Donde P_{Sat} es el peso del ladrillo saturado de agua, P_{Sec} es el peso del ladrillo seco

En la tabla 5 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados a la intemperie, así mismo en la figura 22 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 0,39015 g/cm²/min presentando una tendencia alrededor de este punto.

Tabla 5

Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados a la intemperie

Muestra TIA en un tiempo de 60 segundos.						
Ancho (m)	0,11					
Largo (m)	0,24					
Alto (m)	0,07					
Area (m2)	0,0264					
Volumen (m3)	0,00185					
Ladrillo de arcilla común de ladrillera artesanal						
Muestra	Peso seco g	Peso Húmedo g	Humedad %	Altura lamina agua cm	TIA g/cm ² /min	
1	3040	3125	2,72	1	0,3	
2	3030	3140	3,50	1,2	0,4	
3	3026	3120	3,01	1,1	0,3	
4	2949	3054	3,44	1,3	0,3	
5	3042	3166	3,92	1,4	0,4	
6	2995	3092	3,14	1	0,3	
7	3045	3151	3,36	1,2	0,4	
				Promedio	0,39	

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 22 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de $0,39015 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ presentando una tendencia alrededor de este punto.

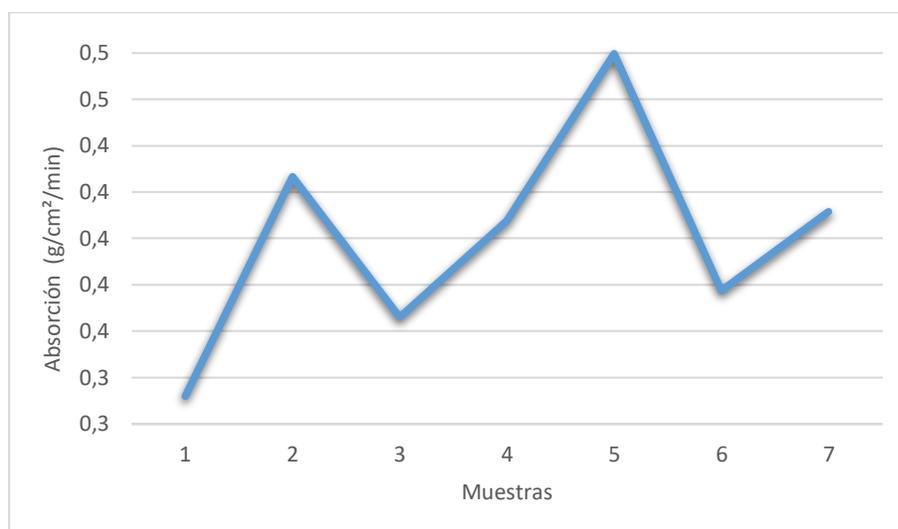


Figura 22. Resultados del ensayo (TIA) aplicado a los ladrillos secados a la intemperie Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 6 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados en el prototipo, así mismo en la figura 23 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de $0,45 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ presentando una tendencia alrededor de este punto.

Tabla 6

Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado

Muestra TIA en un tiempo de 60 segundos.					
Ancho (m)	0,11				
Largo (m)	0,24				
Alto (m)	0,07				
Área (m ²)	0,0264				
Volumen (m ³)	0,00185				
Ladrillo de arcilla secado en horno de aire forzado					
Muestra	Peso seco g	Peso Húmedo g	Humedad %	Altura lamina agua cm	TIA g/cm ² /min

Tabla 6. (Continuación)

1	3064	3165	3,19	1	0,3
2	3026	3132	3,38	1,2	0,4
3	3019	3143	3,95	1,1	0,4
4	2994	3120	4,04	1,3	0,4
5	2991	3123	4,23	1,4	0,5
6	3001	3112	3,57	1	0,4
7	3024	3156	4,18	1,2	0,5
				Promedio	0,4

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 23 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 0,45 g/cm²/min presentando una tendencia alrededor de este punto.

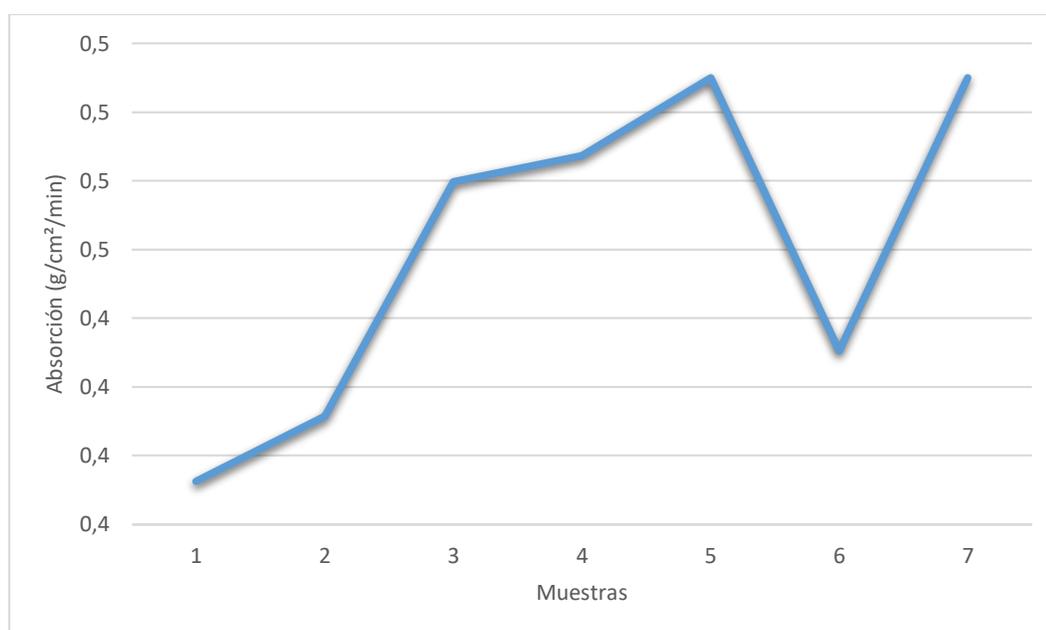


Figura 23. Resultados del ensayo (TIA) aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado. Fuente. Autores del proyecto

En la tabla 12 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados en el prototipo, así mismo en la figura 24 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 12,98% presentando una tendencia alrededor de este punto.

Tabla 7

Resultados de del ensayo aplicado a los ladrillos secados al aire libre

Porcentaje de absorción del ladrillo sumergido 24H ladrillo común

Ancho (m)	0,11
Largo (m)	0,24
Alto (m)	0,07
Área (m ²)	0,0264
Volumen (m ³)	0,00185

Muestra	Peso Seco gr	Peso Húmedo gr	% Absorción
1	3095	3540	12,57
2	3210	3705	13,36
3	3254	3710	12,29
4	3079	3555	13,39
5	2965	3412	13,10
6	3091	3520	12,19
7	3067	3564	13,95
	promedio		12,98

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 24 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 12,98% presentando una tendencia alrededor de este punto.

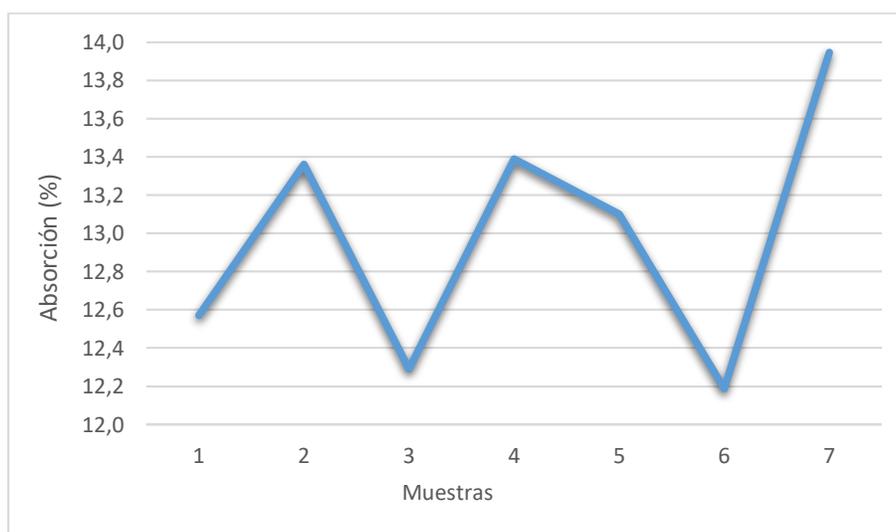


Figura 24. Resultados del ensayo de absorción de agua aplicado a los ladrillos secados a la intemperie. Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 8 se presentan los datos del ensayo realizado a los ladrillos secados en el prototipo, así mismo en la figura 25 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 13,19% presentando una tendencia alrededor de este punto.

Tabla 8

Resultados del ensayo aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado

Porcentaje de absorción del ladrillo sumergido 24H ladrillo secado en horno de aire forzado			
Ancho (m)		0,11	
Largo (m)		0,24	
Alto (m)		0,07	
Área (m ²)		0,0264	
Volumen (m ³)		0,00185	
	Muestra	Peso Seco g	Peso Húmedo g % Absorción
	1	3045	3468 12,20
	2	3120	3568 12,56
	3	3046	3521 13,49
	4	3084	3561 13,40
	5	2995	3461 13,46
	6	3024	3489 13,33
	7	3018	3504 13,87
		Promedio	13,19

Nota. Fuente: Autores del proyecto

En la figura 25 se presentan estos de manera gráfica. Es de notar que los datos se encuentran alrededor de 13,19% presentando una tendencia alrededor de este punto.

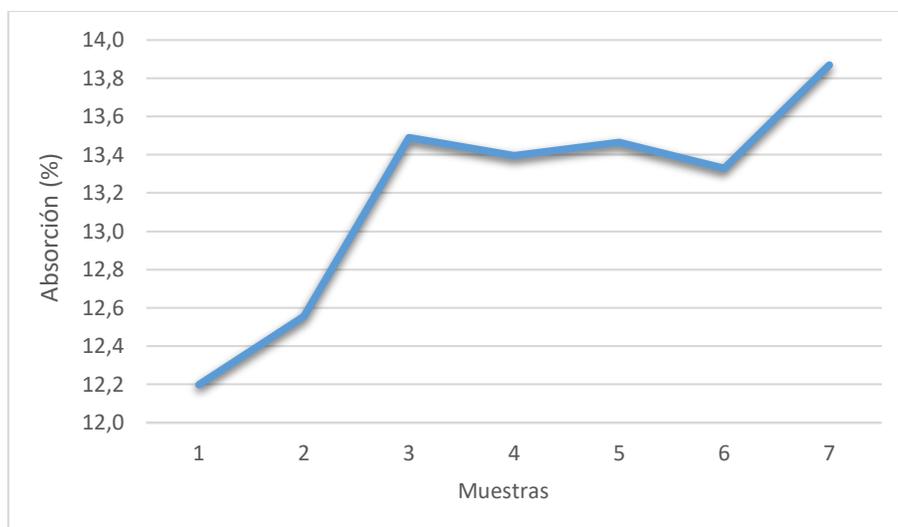


Figura 25. Resultados del ensayo de absorción de agua aplicado a los ladrillos secados mediante aire forzado. Fuente: Autores del proyecto

Análisis comparativo de resultados las muestras secadas. La primera variable a tener en cuenta en este análisis es el tiempo de secado, este proceso en las ladrilleras artesanales se realiza a la intemperie, si se compara el mejor de los casos que se da en época de verano cuando hay mayor exposición al sol, el proceso dura alrededor de 15 días. Al comparar el tiempo de secado de las ladrilleras artesanales con el tiempo de secado en el prototipo se registra una reducción del 40% del tiempo de secado ya que con el prototipo se alcanzan a secar las muestras en un periodo de 9 días.

Las otras variables a tener en cuenta son las que se relacionan con la conservación de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos, por lo que se realizaron las pruebas sobre muestras secadas en la ladrillera y muestras secadas con el prototipo.

De lo anterior se puede decir que las propiedades se conservan, ya que los datos de resistencia de las muestras secadas en la ladrillera y las muestras secadas en el prototipo, son similares, ya que estas fallaron en promedio a $30,6 \text{ kgf/cm}^2$ y $31,2 \text{ kgf/cm}^2$ como se muestra en la gráfica 26, en cuanto a la flexión, esta propiedad también se conserva puesto que estas fallaron en promedio a $1,2 \text{ kgf/cm}^2$ y $1,3 \text{ kgf/cm}^2$ como se muestra en la gráfica 27, la TIA también se conserva puesto que se encuentran en promedio alrededor de $0,39 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ y $0,45 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ como se observa en la gráfica 28 y por último la absorción de agua también se conserva puesto que se encuentran en promedio alrededor de $12,98\%$ y $13,19\%$ respectivamente como se observa en la figura 29.

En la siguiente figura (26) se logra evidenciar el comportamiento mecánico a compresión que poseen las muestras, tanto secadas en aire forzado y secadas al sol. Se denota una variación en cada una de las muestras ensayadas, donde se puede concluir que ninguna de ellas presenta un comportamiento mecánico lineal puesto que estos parámetros están involucrados directamente con las fases iniciales de producción del ladrillo artesanal y no con el sistema de secado

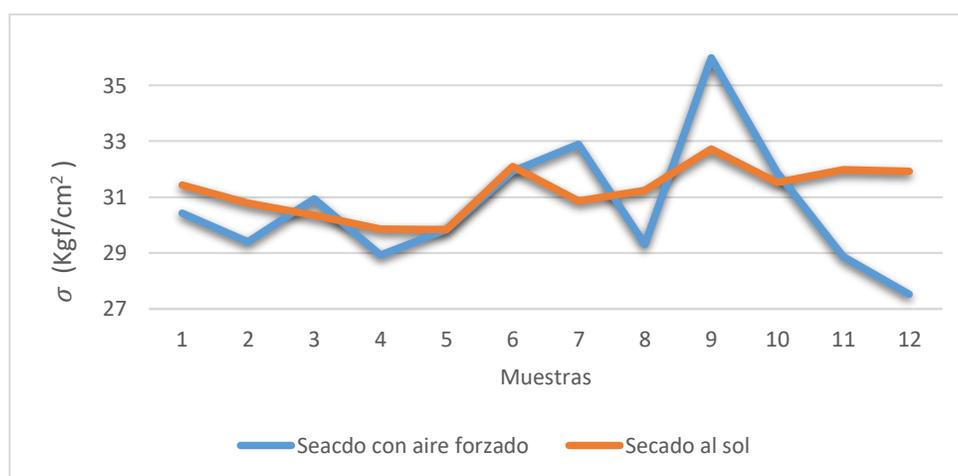


Figura 26. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Autores del proyecto

En cuanto a la figura (27) es posible decir que el secado que se realiza al sol es mucho mayor, la resistencia al esfuerzo de flexión en comparación a la resistencia del ladrillo artesanal secado en el prototipo

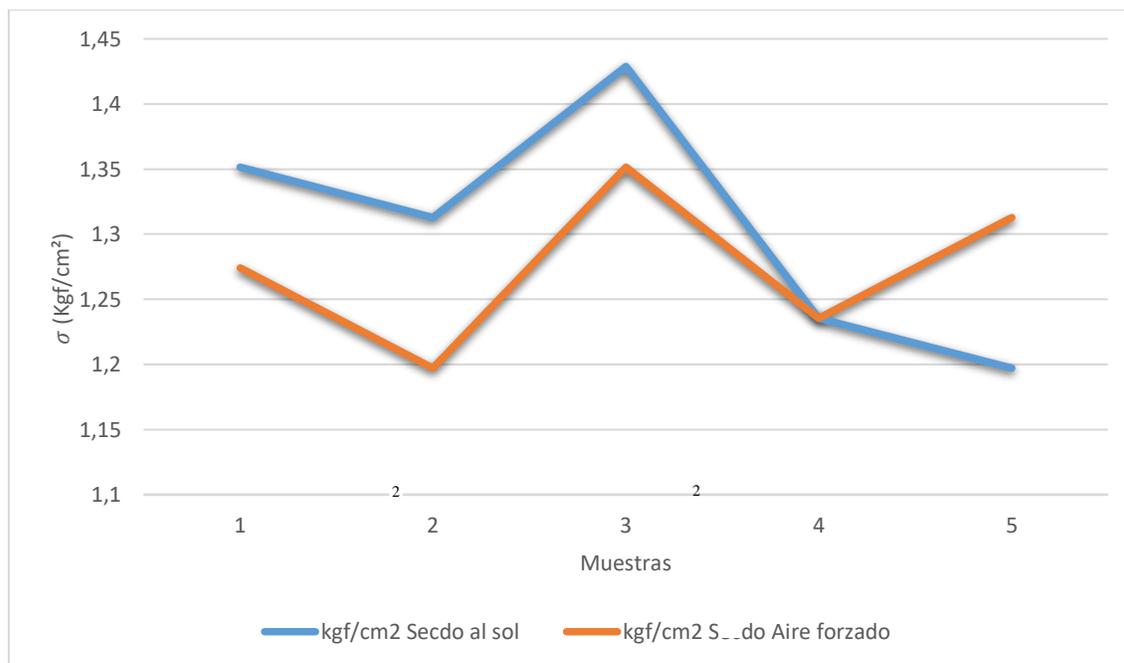


Figura 27. Resultados del ensayo de flexión.4: Fuente Autores del proyecto

La variación del resultado establecido para la tasa inicial de absorción de agua por minuto muestra una absorción mayor cuando el ladrillo artesanal es secado en el prototipo, tal como se evidencia en la figura (28).

Cuando hablamos de una absorción para el ladrillo convencional secado al aire libre se encontró que dicha absorción es menor; pero no presenta una dispersión de datos

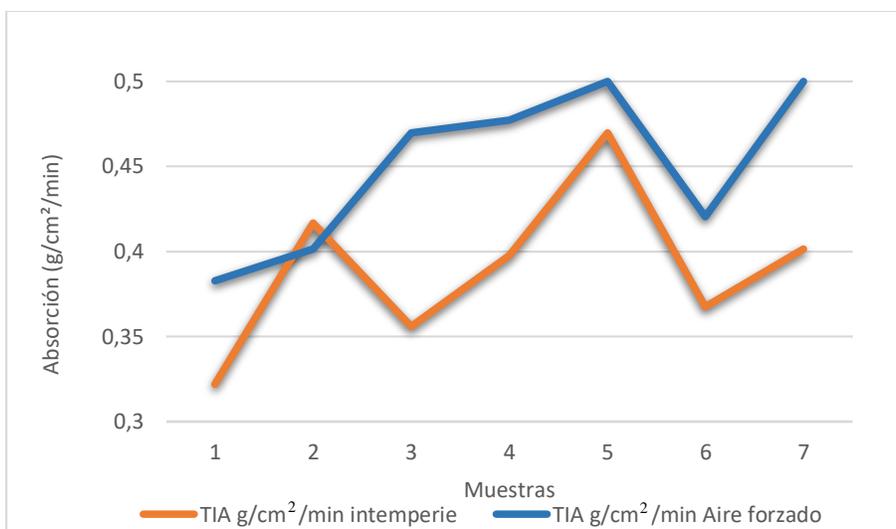


Figura 28. Resultados del ensayo (TIA) aplicado a los ladrillos. Fuente: Autores del proyecto

El porcentaje de absorción de agua del ladrillo artesanal es uno de los parámetros que presenta mayor influencia, puesto que este determina el uso a ser empleado sea para interiores o exteriores; es por ello que en la figura (29) se evidencia un porcentaje de absorción más estable para las muestras secadas en el prototipo elaborado

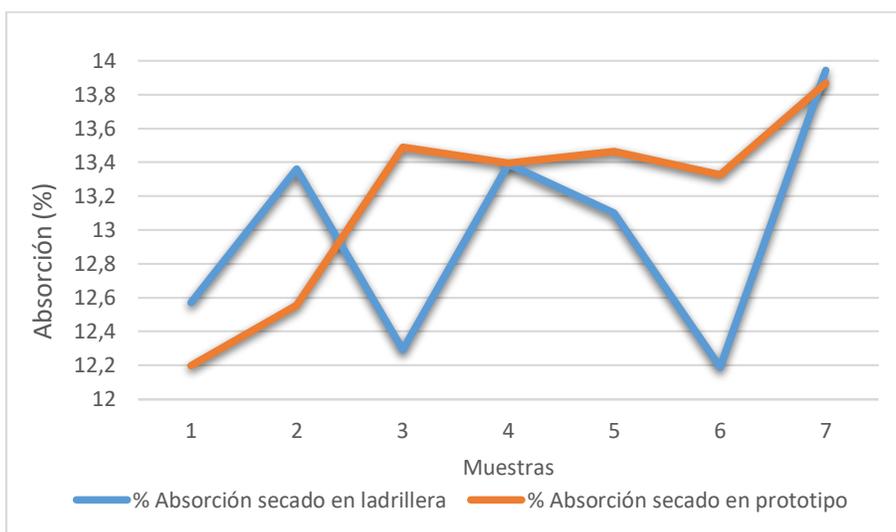


Figura 29. Resultados del ensayo de absorción de agua aplicado a los ladrillos. Fuente: Autores del proyecto

Capítulo 5. Conclusiones

La problemática planteada inicialmente, en cuanto al secado de los ladrillos, y que sobre esta se planteó el objetivo de desarrollar un sistema de secado sostenible mediante aire forzado y precalentado para reducir el tiempo de producción de los ladrillos artesanales de arcilla. En cuanto a esto se puede decir que se cumplió a cabalidad con el objetivo, ya que se construyó un prototipo de secador, el cual utiliza aire calentado mediante un colector solar, la implementación de este secador cumple también con lo estipulado en cuanto a la reducción del tiempo de secado del ladrillo, ya que este se redujo en un 40%.

La resistencia a la compresión, flexión, absorción de agua entre otras pruebas físicas aplicadas a los ladrillos secados en la ladrillera como a los secados en el secador, se encuentran en un rango muy cercano de dichas características físicas y mecánicas, concluyendo que estas no se afectan negativamente al utilizar el prototipo.

Se puede decir que a pesar de que los tejares o ladrilleras ubicadas en la vereda El Estanco tienen no conocimiento sobre el proceso de elaboración y fabricación del ladrillo, este no garantiza una resistencia mecánica homogénea lineal en todas sus muestras, pues no cumplen lo contemplado en la NTC 4205 y NTC 4017 ya que esto se debe a que no tienen control directo de las variables del proceso de producción del ladrillo.

También se puede decir que, al comparar el método tradicional de secado de las ladrilleras artesanales, con el secado mediante el prototipo propuesto, se evidencia que en el

método tradicional no existe un control de las variables que intervienen en el proceso de secado, lo que al comparar este método con el método de secado propuesto este provee a las muestras un ambiente controlado, reduciendo las pérdidas de material.

los materiales seleccionados para la construcción del equipo fueron adecuados, ya que estructuralmente le dieron estabilidad. En el caso de colector solar, la utilización de vidrio en vez de policarbonato o plástico transparente fue acertada, ya que este deja pasar mayor cantidad de radiación solar, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía.

Capítulo 6. Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis de las variables desde el punto de vista termo económico, con el fin de encontrar la relación costo – energía utilizada.

Se recomienda probar con diferentes diseños de colectores solares, y si esto afecta los tiempos de secado.

Se recomienda realizar un análisis en CFD para verificar el comportamiento de los fluidos dentro del prototipo.

Referencias

- Afanador García, N., Guerrero Gómez, G., & Monroy Sepúlveda, R. (2012). *MECHANICAL & PHYSICAL PROPERTIES OF SOLID, MASONRY CERAMIC BRICKS*, 22(1), 43–58. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91125275003>
- Aguilar-Castro-Franco, (. (2013.). *Control PID Desacoplado para un Sistema de Tanques Interactuantes-Automatiza*.
- Alexander, N. V. (2013). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para el control automático de un sistema de nivel de agua para el laboratorio de redes industriales y control de procesos de la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga*. Ecuador.
- Ardila, O. (2004). *Diseño, Construcción y puesta en marcha de un sistema de control multiproceso*.
- Arquñigo Trujillo, W. N. (2011). Propuesta para mejorar la calidad estructural de los ladrillos artesanales de arcilla cocida de huanuco.
- Bautistamilton. (s.f.). *Medición y control del nivel de líquido un sistema Scada*.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). La Cámara de Comercio de Bogotá promueve articulación de actores del sector ladrillero para incidir en la política pública.
- Cast, R. G. (2010). *Diseño e implementación de un módulo didáctico de monitoreo y control del nivel de agua basado en un computador a través del PLC utilizando LabView para el laboratorio de control*. Riobamba-Ecuador.
- Castelo, G. (s.f.). *Informática, D. De, & Córdoba, U. De. (n.d.). ACOPLADOS*.
- Castillo, P. S. (2016). *Modelación y control de un sistema de cuatro tanques acoplados*. Perú: universidad de Piura.
- Coque, R. P. (2007). *Diseño y construcción de un módulo didáctico para control de nivel de líquidos, de la Escuela Politécnica Nacional*. Quito- Ecuador.
- Da Silva Almeida, G., Barbosa da Silva, J., Joaquina e Silva, C., Swarnakar, R., de Araújo Neves, G., & Barbosa de Lima, A. G. (2013). Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: Modeling and simulation applied to hollow bricks. *Applied Thermal Engineering*, 55(1–2), 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.042>
- Dabaieh, M., Heinonen, J., El-Mahdy, D., & Hassan, D. M. (2020). A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122998. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122998>
- Duque, I. (2018). *Plan nacional de desarrollo 2018-2022*. Bogota D.C.

- El-Baz, W., Honold, J., Hardi, L., & Tzscheuschler, P. (2018). High-resolution dataset for building energy management systems applications. *Data in Brief*, 17, 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.12.058>
- Fernando, E. L. (2012). *Control y monitoreo de una potabilizadora de agua por medio de una red Controlnet*. México D.F: Instituto Politécnico Nacional.
- Guerrero Gómez, G. (2017). Hornos de combustión: alternativas de reducción de emisiones e incremento de rentabilidad.
- Haleco. (s.f.). *Tanques de almacenamiento: qué es, tipos, materiales y usos*.
- Jan Lucassen, M., L. Ferrandis Garrayo, & José Antonio Carazo. (2003). La fabricación de ladrillos en Europa occidental y la India: un intento de historia comparada del trabajo. *Historia Social*, (45), 3–33. <https://doi.org/10.2307/40340842>
- John Alexander Vargas Lozada, A. M. (2010). *Control y medida de nivel de líquido por medio de un sensor de presión diferencial*.
- José Fuentes, S. C. (s.f.). *Vista de Experimentación de controladores digitales clásicos en un sistema embebido aplicado en un proceso térmico*.
- Koulibaly, A., & Bayón González, J. J. (2015). Modelling of a solar collector for air heating. *Ingeniería Energética*, XXXVI, 282–293.
- Kurmus, H., & Mohajerani, A. (2021). Energy savings, thermal conductivity, micro and macro structural analysis of fired clay bricks incorporating cigarette butts. *Construction and Building Materials*, 283, 122755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122755>
- López, V. H. (2003). *Diseño del centro de control para aguas Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- León-Medina, J. X., Torres-Díaz, E., Lozano-Násner, A. M., & Rueda-Martín, D. C. (2018). Simulación Del Comportamiento Térmico Y Fluido -. CIMM 2017 VIII Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica y Mecatrónica y VI de Materiales Energía y Medio Ambiente., (April 2017).
- Martínez-Pinillos Cueto, E. (2016). Diseño y ensayo de un secador solar para madera. *Madera y Bosques*, 3(2), 13–28. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.321370>
- Master Innovación que se vive. (s.f.). *Microcontrolador (Arduino nano)* . Obtenido de <https://shop.master.com.mx/product/detail?id=7454>
- Morilla García, F. R. (2002). *Ingeniería de control* . Dyna.
- Montoya, J. A., & ARIAS, E. J. (2006). Determinación de la curva de secado al aire libre, mediante modelación matemática y experimental de la Guadua angustifolia Kunth. *Scientia Et Technica*, XII(30), 415–419. <https://doi.org/10.22517/23447214.6593>

- Morejón-Mesa, C. Y., Silva-Junco, D., & Reyes-Suárez, Y. (2020). Design of an Industrial Rotary Cylinder Grain Dryer. *Diseño de Un Secador Industrial Tipo Cilindro Rotatorio Para Granos.*, 29(3), 62–74. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=145759299&lang=es&site=ehost-live>
- Naylam Mechatronics. (s.f.). *Sensor Ultrasonido HC-SR04*. Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- Núñez Ruiz, K. A. (2019). PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LADRILLOS ARTESANALES FABRICADOS CON ARCILLA Y CONCRETO. Ucv. Retrieved from <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303><http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303>
- Ogata, K. (2013). *Ingeniería de Control Moderna. Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53)*. . Obtenido de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- O-Nora, C. (s.f.). *Almacenaje fluidos en plantas de procesos*.
- Peñaranda, C. Y. (2014). *Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la e3t-uis*. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/151339.pdf>
- Pineda, D. F. (2012). *Automatización de dos zonas de bombeo y monitoreo de la red principal del sistema de agua potable de la junta administradora de agua potable Sumak Yaku–Araque– Otavalo*, . Mexico DF: Universidad Técnica del Norte.
- Rabha, D. K. (2021). Performance investigation of a passive-cum-active dryer with a biomass-fired heater integrated with a plate heat exchanger. *Renewable Energy*, 169, 598–607. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.126>
- Raju, K., & Ravindhar, S. (2021). Comparative study on the compression strength of heritage bricks and conventional clay bricks. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.093>
- Rivera, J. O. (2009). *Diseño, implementación y monitoreo de un sistema didáctico basado en el control de nivel de un tanque vía RF, utilizando el SCADA INTOUCH y RSLOGIX500 con el PLC Micrologix 1200 de Allen Bradle*. Guayaquil- Ecuador.
- Rolón Nieto, F. (2012). El auge de la construcción en Colombia: un crecimiento real del sector o una burbuja que puede estallar. *Dictamen Libre*, 10(10), 7–13. Retrieved from <http://www.unilibrebaq.edu.co/unilibrebaq/revistas2/index.php/dictamenlibre/article/view/432/394>
- Shamilly, S. P. (2015). *Intelligent control and adaptive control for interacting system. Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Technological Innovations in ICT*

for Agriculture and Rural Development,. Obtenido de
<https://doi.org/10.1109/TIAR.2015.7358542>

- Tarminzi, M. A. S. M., Razak, A. A., Azmi, M. A. A., Fazlizan, A., Majid, Z. A. A., & Sopian, K. (2021). Comparative study on thermal performance of cross-matrix absorber solar collector with series and parallel configurations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100935. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100935>
- Toader, L. P. (2010). *Practical aspects regarding the operation of the hydrocarbons storage tanks. ICIME 2010 - 2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*, 2, 284–288. Obtenido de
<https://doi.org/10.1109/ICIME.2010.5477428>
- Tonsuk, D. (2011). *SISTEMA DE ALMACENAMIENTO*. Obtenido de
<https://doi.org/10.16194/j.cnki.31-1059/g4.2011.07.016>
- Valderrama, K. B., Sanabria, D. F., & Puertas, S. G. (2017). *Sistema Didáctico para el Control de Nivel con Tanques Acoplados*. Obtenido de
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15297/1/Documento%20Tanques%20Acoplados%2012-12-2017%20Versi%C3%B3n%20Final.pdf>
- Valdez Loaiza, J., Aguilar Franco, J., Sánchez Vargas, L., Alatriza Góngora, G., & Figueroa Dianderas, A. P. (2020). Design and implementation of an alternative process for the manufacture of bricks from gold mine tailings. *Ingeniare*, 28(2), 268–276.
<https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200268>
- Ventocilla, R. G. (2012). *Control de un sistema de bombeo y cloración de agua*. Lima-Perú: Universidad Tecnológica del Perú.
- Vistronica. (s.f.). *HidroBomba Sumergible JT-800EX 12V 500L/H*. Obtenido de
<https://www.vistronica.com/domotica/hidro-bomba-sumergible-jt-800ex-12v-500lh-detail.html>
- Vistrónica. (s.f.). *Protoboard MB102 830 Puntos*. Obtenido de
<https://www.vistronica.com/conectores-cables-y-switches/placas-universales/protoboard/protoboard-mb102-830-puntos-detail.html>
- Zhang, M., Zhang, S., Wang, M., Lu, Z., & Jia, W. (2019). Effects of dehumidification drying parameters on physical and chemical properties of biomass brick. *Construction and Building Materials*, 215, 696–708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.216>

Apéndices

Apéndice A. Certificados de las pruebas realizadas en laboratorio

		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
Objeto	Trabajo de grado	Fecha	24/03/2021		
Localización	Torres del cable				
Estructura	Mampostería				
Solicitante	Nelson Quintero, Camilo Romero	Descripción	Ladrillo de arcilla macizo		
Prueba	Resistencia a la Compresión ladrillo secado en Horno de aire forzado				
Fecha Toma	9/03/2021				
Fecha Rotura	22/03/2021				
Edad (días)	12,00				
Ancho (m)	0,11				
Largo (m)	0,24				
Alto (m)	0,07				
Area (m ²)	0,0264				
Volumen (m ³)	0,001848				
RESULTADO DE MUESTRAS					
Muestra	Ruptura Kn	Ruptura N	Area m ²	N/m ²	Kgf/cm ²
1	157,6	157600	0,0528	2984848,48	30,42659
2	152,3	152300	0,0528	2884469,7	29,403361
3	160,2	160200	0,0528	3034090,91	30,928552
4	149,8	149800	0,0528	2837121,21	28,920706
5	154,5	154500	0,0528	2926136,36	29,828097
6	165,4	165400	0,0528	3132575,76	31,932475
7	170,4	170400	0,0528	3227272,73	32,897785
8	151,8	151800	0,0528	2875000	29,30683
9	186,4	186400	0,0528	3530303,03	35,986779
10	165,2	165200	0,0528	3128787,88	31,893862
11	149,5	149500	0,0528	2831439,39	28,862787
12	142,5	142500	0,0528	2698863,64	27,511352
Promedio				3007575,76	30,658265
 					
Ing. Víctor Alfonso Florez Duran MP: 54202-251799 NTS Especialista en Geotecnia Ambiental					
LABORATORIO DE MATERIALES CALLE 20C No.141-02 URB. VILLAS DEL ROSARIO - OCAÑA N.S cel: 3146684953					

		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
Objeto	Trabajo de grado	Fecha	24/03/2021		
Localización	Torres del cable				
Estructura	Mampostería				
Solicitante	Nelson Quintero, Camilo Romero				
Descripción	Ladrillo de arcilla macizo				
Prueba	Resistencia a la Compresión ladrillo Artesanal (COMUN)				
Fecha Toma	9/03/2021				
Fecha Rotura	22/03/2021	Distancia entre soportes (m)	0,2		
Edad (días)	12,00				
Ancho (m)	0,11				
Largo (m)	0,24				
Alto (m)	0,07				
Area (m ²)	0,0264				
Volumen (m ³)	0,001848				
RESULTADO DE MUESTRAS					
Muestra	Ruptura Kn	Ruptura en N	Area m ²	N/m ²	kgf/cm ²
1	162,8	162800	0,0528	3083333,33	31,430513
2	159,4	159400	0,0528	3018939,39	30,774102
3	157,2	157200	0,0528	2977272,73	30,349365
4	154,6	154600	0,0528	2928030,3	29,847404
5	154,5	154500	0,0528	2926136,36	29,828097
6	166,2	166200	0,0528	3147727,27	32,086924
7	159,8	159800	0,0528	3026515,15	30,851327
8	161,8	161800	0,0528	3064393,94	31,237451
9	169,5	169500	0,0528	3210227,27	32,724029
10	163,3	163300	0,0528	3092803,03	31,527044
11	165,7	165700	0,0528	3138257,58	31,990393
12	165,4	165400	0,0528	3132575,76	31,932475
Promedio	3062184,34	31,214927			
 Ing. Victor Alfonso Florez Duran MP: 54202-251799 NTS Especialista en Geotecnia Ambiental					
LABORATORIO DE MATERIALES CALLE 20C No.141-02 URB. VILLAS DEL ROSARIO - OCAÑA N.S cel: 3146684953					

		RESISTENCIA A LA FLEXIÓN					
Objeto	Trabajo de grado	Fecha	5/04/2021				
Localización	Torres del cable						
Estructura	Mampostería						
Solicitante	Nelson Quintero, Camilo Romero						
Descripción	Ladrillo de arcilla macizo						
Prueba	Modulo de rotura ladrillo artesanal (COMUN)						
Fecha Toma	24/03/2021						
Fecha Rotura	9/04/2021	Distancia entre soportes (m)	0,2				
Edad (días)	12,00						
Ancho (m)	0,11						
Largo (m)	0,24						
Alto (m)	0,07						
Area (m2)	0,0264						
Volumen (m3)	0,001848						
RESULTADO DE MUESTRAS							
Muestra	Peso kg	Ruptura Kn	Ruptura N	Area m2	N/m2	Mpa	kgf/cm2
1	2984	3,5	3500	0,0264	132575,76	132,576	1,351
2	3056	3,4	3400	0,0264	128787,88	128,788	1,313
3	3012	3,7	3700	0,0264	140151,52	140,152	1,429
4	2946	3,2	3200	0,0264	121212,12	121,212	1,236
5	3015	3,1	3100	0,0264	117424,24	117,424	1,197
Promedio						128,030303	1,3051
 							
Ing. Victor Alfonso Florez Duran MP: 54202-251799 NTS Especialista en Geotecnia Ambiental							
LABORATORIO DE MATERIALES CALLE 20C No.141-02 URB. VILLAS DEL ROSARIO - OCAÑA N.S cel: 3146684953							

		RESISTENCIA A LA FLEXIÓN					
Objeto	Trabajo de grado	Fecha	5/04/2021				
Localización	Torres del cable						
Estructura	Mampostería						
Solicitante	Nelson Quintero, Camilo Romero						
Descripción	Ladrillo de arcilla macizo						
Prueba	Resistencia a la Compresión ladrillo Artesanal (COMUN)						
Fecha Toma	24/03/2021						
Fecha Rotura	9/04/2021						
Edad (días)	12/01/1900						
Ancho (m)	0,11						
Largo (m)	0,24						
Alto (m)	0,07						
Area (m2)	0,0264						
Volumen (m3)	0,001848						
RESULTADO DE MUESTRAS							
Muestra	Peso Kg	Ruptura Kn	Ruptura en N	Area m2	n/m2	Mpa	kgf/cm2
1	3026	3,3	3300	0,0264	125000	125,0000	1,27421
2	2958	3,1	3100	0,0264	117424,24	117,4242424	1,196985
3	2949	3,5	3500	0,0264	132575,76	132,5757576	1,351435
4	3050	3,2	3200	0,0264	121212,12	121,2121212	1,235598
5	2995	3,4	3400	0,0264	128787,88	128,7878788	1,312822
Promedio						125,000	1,27421
 Ing. Victor Alfonso Florez Duran MP: 54202-251799 NTS Especialista en Geotecnia Ambiental							
LABORATORIO DE MATERIALES CALLE 20C No.14I-02 URB. VILLAS DEL ROSARIO - OCAÑA N.S cel: 3146684953							