

DECANATURA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
FORMATO DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO

Fecha de entrega: 25 de noviembre de 2019

Estudiante: Karen Lorena Corredor Méndez

Director: Álvaro Guzmán Aponte, Ph.D

Codirector: Nancy Torres Castellanos, Ph.D

El presente documento avala la entrega del trabajo de grado por parte del director y codirector.

Documentos anexos Copia digital del Trabajo de Grado (1)

ÁLVARO GUZMÁN A

Firma Director

Nancy Torres Castellanos

Firma Codirector

Karen Lorena Corredor Méndez

Firma Estudiante

**Estudio para Determinar la Factibilidad en la
Fabricación de Ladrillos de Arcilla a Partir del
Reciclaje de las Colillas de Cigarrillo**

Karen Lorena Corredor Méndez

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2020**

Estudio para Determinar la Factibilidad en la Fabricación de Ladrillos de Arcilla a Partir del Reciclaje de las Colillas de Cigarrillo

Karen Lorena Corredor Méndez

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial

Director
Álvaro Guzmán Aponte, Ph.D

Co-directora
Nancy Torres Castellanos, Ph.D

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2020**

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Cuando se use el material de la Escuela se debe incluir la siguiente nota “Derechos reservados a Escuela Colombiana de Ingeniería” en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Escuela.

Publicado en 2018 por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Avenida 13 No 205-59 Bogotá. Colombia
TEL: +57 – 1 668 36 00

Reconocimiento o Agradecimientos

A Dios, quien con su bendición me ha dado la oportunidad de salir adelante y crecer personal y profesionalmente. A mi familia, por el apoyo y acompañamiento incondicional en todo momento.

Así mismo, quiero agradecer de forma especial al director de este proyecto, el Ing. Álvaro Guzmán Aponte, Ph.D y la Co-directora, la Ing. Nancy Torres Castellanos Ph.D, por brindarme el acompañamiento y guiarme en este proceso.

Finalmente, agradezco a la Ingeniera Angie Sastoque Sierra, así como a los funcionarios de la Escuela Colombiana de Ingeniería (Ingenieros y laboratoristas), quienes con su apoyo y conocimiento facilitaron el desarrollo de este trabajo.

Resumen

Las colillas de cigarrillo se han convertido en uno de los residuos más comunes a nivel mundial. El alto volumen de cigarrillos arrojados al suelo una vez consumidos, así como sus componentes tóxicos y no biodegradables, hacen de las colillas un residuo peligroso y una de las causas de contaminación que afecta la salud del ser humano y la conservación del medio ambiente. A través de esta investigación, se presenta una alternativa para incorporar las colillas de cigarrillo en la fabricación de uno de los materiales de construcción más común, como son los ladrillos de arcilla. Para esto, se realizaron cuatro mezclas dentro de las cuales se incluye una mezcla patrón con contenido de 100% arcilla (LADRICOL 0%) y tres adicionales en las que se incorporaron las colillas de cigarrillo en diferentes porcentajes en peso, con respecto al contenido de arcilla (LADRICOL 2,5%, LADRICOL 5% y LADRICOL 7,5%). Dichas mezclas fueron cocidas a diferentes temperaturas y fueron sometidas a los ensayos respectivos para determinar las propiedades físicas y mecánicas del producto terminado, así como los impactos ambientales y el ahorro energético que se genera. Los resultados mostraron que, con la adición de colillas de cigarrillo en un 2,5% y una temperatura óptima de cocción de 850°C, se pueden fabricar ladrillos no estructurales tipo M, cumpliendo con los estándares establecidos en la NTC 4205-2, generando impactos positivos en el medio ambiente como la mejora en la calidad del suelo y el agua. Adicionalmente, con la incorporación de este residuo, se logra reducir el consumo energético durante la cocción del ladrillo, en un 19,75%.

Abstract

Cigarette butts are one of the most common waste worldwide. The high volume of cigarettes thrown on the ground once consumed, and the toxic and non-biodegradable components, make cigarette butts a hazardous waste and one of the causes of pollution that affects the health of the human and the conservation of the environment. This research presents an alternative to re-cycling cigarette butts in the manufacture of one of the most common building materials, such as clay bricks. For this, four mixtures were made, these include a control clay brick, with a clay content of 100% (LADRICOL 0%) and three additional mixtures incorporating cigarette butts in different percentages by weight (LADRICOL 2.5%, LADRICOL 5.0% and LADRICOL 7.5%). The mixtures were fired at different temperatures and these were tested to determine the physical and mechanical properties of the bricks, as well as environmental effects and energy saved during firing process. The results showed that the samples incorporating 2.5% cigarette butts content and fired at 850 °C are in compliance with the standard normative for this type of product (NTC 4205-2). Furthermore, this brick can reduce contamination caused by cigarette butts, improving soil and water quality and reducing energy consumption during firing, by 19,75%.

Tabla de contenido

Lista de Figuras	
Lista de Tablas	
1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 PROBLEMÁTICA (JUSTIFICACIÓN)	12
1.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE	14
1.3 OBJETIVOS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	25
1.3.1 Objetivo General	25
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	25
1.4.1 ETAPA I. Investigación previa – Análisis teórico y normativo.	26
1.4.2 ETAPA II. Recolección de la materia prima.	27
1.4.3 ETAPA III. Elaboración de los prototipos.	27
1.4.4 ETAPA IV. Determinación de las propiedades del producto.	28
1.4.5 ETAPA V. Identificación de aspectos e impactos ambientales.	28
1.4.6 ETAPA VI. Evaluación de costos.	28
1.4.7 ETAPA VII. Análisis de los resultados.	29
2 CAPÍTULO I. ADECUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	30
2.1 MATERIA PRIMA	30
2.1.1 Preparación	30
2.1.1.1 Adecuación de la Arcilla.	30
2.1.1.2 Adecuación de las colillas de cigarrillo.	31
2.1.2 Caracterización de la Arcilla	31
2.1.2.1 Granulometría	31
2.1.2.2 Granulometría Hidrometría	32
2.1.2.3 Límites de Atterberg	32
2.1.2.4 Densidad	34
2.1.2.5 Composición Química (FRX)	34
2.1.2.6 Composición Mineralógica (DRX)	36
2.1.2.7 Análisis Térmico	37
2.1.3 Pruebas de humedad	38
3 CAPÍTULO II. ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES	39
3.1 PROCESO DE MOLDEO Y PRENSADO	39
3.1.1 Ladrillo convencional (LADRICOL 0%)	39
3.1.2 Ladrillo con colillas de cigarrillo	40
3.1.3 Presión de compactación	40
3.2 PROCESO DE SECADO	41
3.3 PROCESO DE COCCIÓN	43
3.3.1 Ladrillo convencional	43
3.3.2 Ladrillo con colillas de cigarrillo	44

4	CAPÍTULO III. CALIDAD DEL PRODUCTO	45
4.1	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS	45
4.1.1	Propiedades físicas de los prototipos en verde	45
4.1.2	Propiedades físicas de los prototipos secos	46
4.1.3	Propiedades físicas de los ladrillos cocidos	47
4.1.3.1	Ladrillo convencional	48
4.1.3.2	Ladrillo con colillas de cigarrillo	50
4.2	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.	50
4.2.1	Ladrillo convencional (LADRICOL 0%).....	50
4.2.2	Ladrillo con colillas de cigarrillo (LADRICOL 2,5%)	52
4.2.3	Ladrillo con colillas de cigarrillo (LADRICOL 5% y 7,5%)	53
4.3	TASA INICIAL DE ABSORCIÓN (TIA)	55
4.4	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	57
4.4.1	Resistencia a la compresión	57
4.4.2	Resistencia a la flexión (módulo de rotura)	59
4.5	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	62
4.5.1	Resistencia a la compresión	62
4.5.2	Resistencia a la flexión (módulo de rotura)	63
5	CAPÍTULO IV. IMPACTOS AMBIENTALES.....	65
5.1	LADRILLO CONVENCIONAL.....	65
5.2	LADRILLO CON COLILLAS DE CIGARRILLO	66
6	CAPÍTULO V. COSTOS ENERGÉTICOS	68
6.1	LADRILLO CONVENCIONAL	68
6.2	LADRILLO CON COLILLAS DE CIGARRILLO	70
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXOS	81

Lista de figuras

Figura 1-1 Componentes del cigarrillo.....	15
Figura 1-2 Proceso productivo del ladrillo.....	20
Figura 1-3 Ciclo de cocción típico de un producto de arcilla.....	22
Figura 1-4 Metodología de investigación.....	26
Figura 2-1 Máquina de los Ángeles.....	30
Figura 2-2 Molino y colillas de cigarrillo molturadas.....	31
Figura 2-3 Curva granulométrica.....	32
Figura 2-4 Curva de gradación por hidrometría.....	32
Figura 2-5 Patrón de Difracción de Rayos X de la arcilla.....	36
Figura 2-6 Curvas de ATG (superior) y ATD (inferior) de la arcilla.....	37
Figura 2-7 Balanza para determinación de humedad.....	38
Figura 3-1 Metodología para la fabricación de los prototipos – Ladrillo Convencional fases de moldeo y prensado.....	39
Figura 3-2 Metodología para la fabricación de los prototipos – Ladrillo con colillas.....	40
Figura 3-3 Ladrillos convencionales y con colillas de cigarrillo moldeados.....	41
Figura 3-4 Ladrillos convencionales (a) y con colillas de cigarrillo (b) secos.....	42
Figura 3-5 Ladrillos en el desecador.....	42
Figura 3-6 Ladrillos convencionales después de cocción.....	44
Figura 3-7 Ladrillos con colillas de cigarrillo después de cocción.....	45
Figura 4-1 Densidad volumétrica (a) y Absorción de agua (b) en función de la temperatura de cocción.....	49
Figura 4-2 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) - LADRICOL 0%.....	51
Figura 4-3 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) - LADRICOL 2,5%.....	52
Figura 4-4 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) - LADRICOL 5%.....	53
Figura 4-5 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) – LADRICOL 7,5%.....	54
Figura 4-6 Tasa inicial de absorción (TIA).....	56
Figura 4-7 Ladrillos refrentados.....	58
Figura 4-8 Prueba de compresión máquina de prueba Shimadzu.....	58
Figura 4-9 Prueba de flexión máquina de prueba Shimadzu.....	60
Figura 4-10 Diagrama del montaje y cálculo del módulo de rotura.....	61
Figura 4-11 Ensayo de flexión LADRICOL 0% (a) y LADRICOL 2,5% (b).....	61
Figura 4-12 Resistencia a compresión (promedio).....	63
Figura 4-13 Resistencia a flexión (promedio).....	64
Figura 4-14 LADRICOL 0% (a), LADRICOL 2,5% (b), LADRICOL 5% (c) y LADRICOL 7,5%.....	65
Figura 5-1 Patrones de difracción de Rayos X de LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5%.....	68

Lista de tablas

Tabla 1-1 Mezclas realizadas para la elaboración de los ladrillos con y sin incorporación de colilla de cigarrillo.	27
Tabla 2-1 Densidad de la arcilla.	34
Tabla 2-2 Composición química de la arcilla (FRX).	35
Tabla 2-3 Humedad de la arcilla para moldeo.	39
Tabla 3-1 Mezclas realizadas para la elaboración de los ladrillos con incorporación de colilla de cigarrillo.	40
Tabla 3-2 Presión vertical de compactación promedio, utilizada en el proceso de fabricación.	41
Tabla 3-3 Temperaturas de cocción y número de muestras utilizadas (100% arcilla).	43
Tabla 3-4 Temperaturas de cocción usadas en prototipos con colillas de cigarrillo.	44
Tabla 4-1 Peso, volumen y densidad de los prototipos en verde.	46
Tabla 4-2 Peso, contracción, volumen y humedad de los prototipos después de secado.	46
Tabla 4-3 Contracción, densidad y absorción de agua de los prototipos LADRICOL 0% (después de cocción)	48
Tabla 4-4 Tasa inicial de absorción (TIA) de los ladrillos cocidos a 850 °C.	56
Tabla 4-5 Resistencia a compresión promedio, de los ladrillos cocidos a 850 °C.	59
Tabla 4-6 Resistencia a la flexión promedio de los ladrillos cocidos a 850 °C.	62
Tabla 6-1 Costo energético asociado a la cocción del ladrillo convencional.	69
Tabla 6-2 Costo energético asociado a la cocción del ladrillo con colillas de cigarrillo (LADRICOL 2,5%)	70

1 Introducción

1.1 Problemática (Justificación)

Las colillas de cigarrillo son sin duda, el tipo de residuo más común arrojado a las calles. En la actualidad se consumen aproximadamente a nivel mundial 6 trillones de cigarrillos anuales, de los cuales 4,5 trillones son arrojados al medio ambiente una vez consumidos (De Granada et al., 2016). Los altos índices de residuos arrojados al suelo y a las fuentes hídricas sin ningún tipo de control, se han convertido en una de las causas de contaminación, no solo por el alto volumen de colillas desechadas sino también por las sustancias tóxicas que se encuentran presentes en estos productos.

Dentro de los materiales que componen los filtros de cigarrillo se encuentra el acetato de celulosa, un material no biodegradable que puede llegar a tardar 18 meses a 10 años en descomponerse según las condiciones ambientales a las que se encuentre expuesto. Además del acetato de celulosa, el cigarrillo se encuentra compuesto de otras sustancias tóxicas como la nicotina y el alquitrán, las cuales quedan atrapadas en las colillas y pueden contaminar con un solo cigarrillo hasta 50 litros de agua (Guevara, 2010 y Lozano et al., 2015).

Sin embargo, y a pesar de los riesgos que representan las colillas de cigarrillo para el medio ambiente, resulta muy común ver que los fumadores las arrojan al suelo, parques, puentes, calles y muchos otros lugares públicos donde se acumulan y se convierten en una fuente de peligro para los animales domésticos, peces, pájaros, tortugas, entre otros, los cuales pueden llegar a ingerir estos residuos causándoles la muerte debido a la toxicidad de estos (Castañeda, 2011 y Rath et al., 2012).

En Colombia, el 12,9% de la población mayor de 18 años, es consumidora actual de cigarrillo, esta cifra es equivalente a más de 3 millones de fumadores en el país. Adicionalmente este porcentaje se mantuvo con respecto a 6 años atrás donde la encuesta nacional de salud, realizada en el año 2007, arrojó una prevalencia de tabaquismo de un

12,8%, esto sin tener en cuenta adolescentes y niños ubicados en las edades de 12 a 17 años los cuales también representan un porcentaje sobre el consumo de cigarrillo en Colombia (Gobierno Nacional de la Republica de Colombia, 2014).

Cabe considerar que, dentro de las investigaciones realizadas hasta el momento a nivel mundial, se ha identificado la posibilidad de reciclar las colillas de cigarrillo y utilizarlas en la fabricación de otros elementos como son: obras de arte, plásticos, insecticidas e incluso como fuente de energía. Sin embargo, Colombia no cuenta con programas para dar una adecuada disposición a estos residuos. Adicionalmente, la legislación vigente no es lo suficientemente robusta ni exige programas posconsumo para este tipo de productos (Lee et al., 2014 y Romero, 2019).

Por otra parte, dentro de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial se encuentran los ladrillos de arcilla. Este es un material que durante su fabricación genera impactos negativos al medio ambiente debido a la cantidad de energía que requiere, se fabrican con arcilla y son sometidos a altas temperaturas durante su cocción; razón por lo cual se estima que contienen aproximadamente 2,0 kWh de energía incorporada y liberan alrededor de 0,41kg de dióxido de carbono (CO₂), entre otros gases liberados a la atmósfera durante su fabricación como son: el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), cloro (Cl₂) y Flúor (F). Adicionalmente, en muchos lugares del mundo, ya existe una escasez del material (arcilla) de origen natural para la producción de los ladrillos convencionales (Zhang, 2013; Abdul et al., 2015).

Ante la situación planteada, en el desarrollo de esta investigación se busca brindar una alternativa para el reciclaje de las colillas de cigarrillo incorporándolas en la fabricación de los ladrillos de arcilla. Si bien es cierto, investigadores como Abdul et al. (2015) y Mohajerani et al. (2016) han estudiado el efecto de la incorporación de colillas de cigarrillo en la manufactura de ladrillos de arcilla sobre las propiedades físicas y mecánicas; la investigación desarrollada evalúa el efecto de la temperatura de cocción sobre las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos, así como también su efecto en la posible reducción de costos energéticos asociados a su fabricación. Adicionalmente, contempla el

uso de materias primas colombianas (arcilla) en atención al hecho que a la fecha no existen investigaciones en Colombia que incorporen colillas de cigarrillo para la fabricación de ladrillos.

Es así como a partir de este trabajo de grado de Maestría en Ingeniería industrial, con Línea de Énfasis en Sistemas Integrados de Gestión, se busca dar respuesta a la pregunta: ¿es factible el uso de las colillas de cigarrillo como materia prima para la fabricación de ladrillos de arcilla?. Lo anterior, basados en la necesidad que tienen las organizaciones de mejorar sus procesos internamente e ir más allá de la certificación en sistemas de gestión, abarcando la mejora continua y aportando beneficios a nivel ambiental (ISO 14001) sin afectar la calidad de sus productos; incluso, en algunos casos, mejorando la calidad de este y la satisfacción de sus clientes (ISO 9001). A su vez, este trabajo permite alinearse con el nuevo énfasis de ingeniería industrial “Innovación en Materiales y Manufactura”, mediante la valorización de un residuo como la colilla de cigarrillo en la manufactura de ladrillos de arcilla.

1.2 Fundamentación Teórica y Estado del Arte

“El tabaco es un producto vegetal obtenido de las hojas de varias plantas del género *Nicotiana*” (Monzonis, 2011, p. 3). Su composición se basa en tres sustancias que son: la nicotina, el alquitrán y el monóxido de carbono, siendo la primera de ellas la sustancia que lo convierte en adictivo, mientras la segunda es una sustancia que a su vez está compuesta por diferentes agentes químicos incluido el monóxido de carbono (Monzonis, 2011).

Dentro de los residuos que se pueden encontrar en un cigarrillo se incluyen cerca de 4.000 sustancias químicas tales como el amoníaco, óxido de nitrógeno, cianuro de hidrógeno, aminas aromáticas, pesticidas, formaldehído, acetaldehído, benceno y algunos metales tóxicos como el cadmio y el níquel que hacen parte de los numerosos productos químicos considerados cancerígenos (Castañeda, 2011 y Monzonis, 2011).

Adicional a esto, dentro de los principales elementos presentes en los filtros de los cigarrillos se encuentra el acetato de celulosa, material de lenta biodegradación que puede llegar a

tardar hasta 10 años o más en descomponerse según las condiciones en las que se encuentre. Si bien los rayos solares pueden romper el filtro en pequeñas piezas, este material nunca desaparece y por el contrario se filtra en el suelo y las fuentes hídricas (Novotny y Slaughter, 2014 y Mohajerani et al., 2016). En la figura 1-1, se detallan algunas de las sustancias y componentes presentes en un cigarrillo.

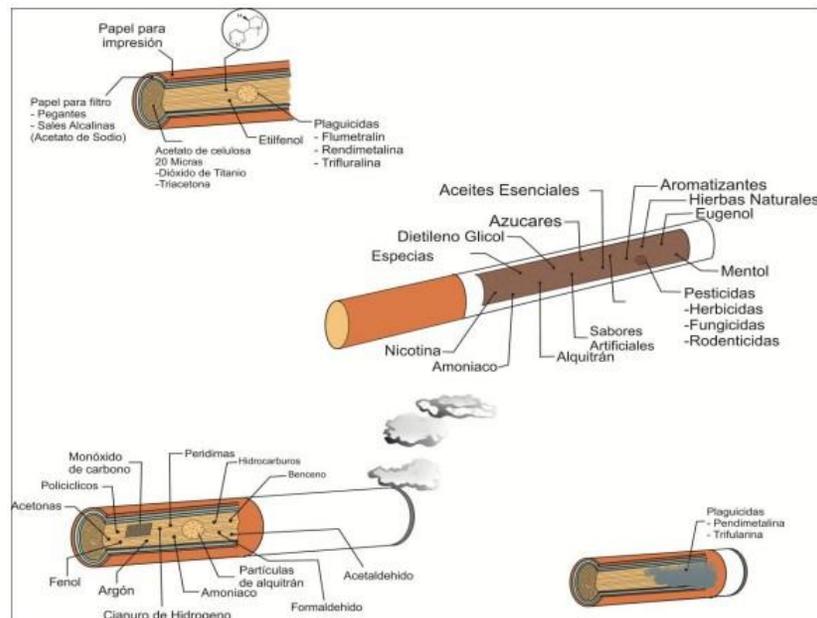


Figura 1-1 Componentes del cigarrillo. Fuente: Castañeda, S. (2011).

En cuanto a la afectación que este residuo puede generar en el medio ambiente, se le atribuye un alto nivel de contaminación ocasionada por la mezcla de las numerosas sustancias tóxicas mencionadas anteriormente. Estas sustancias se dispersan y se transportan fácilmente alrededor del mundo a través de los ríos, las lluvias y demás fuentes hídricas convirtiéndose en un peligro tóxico, pues debido a su baja velocidad de degradación se acumulan en el medio ambiente en cantidades importantes (Green et al., 2014; Bonanomi et al., 2015; Lee, 2014 y De Granada et al., 2016).

Analizando un poco más allá esta problemática y de acuerdo con Fernández (2011), la contaminación generada por las colillas de cigarrillo no sólo se ve representada en el suelo y las fuentes hídricas, pues estos residuos también ocasionan pérdida de biodiversidad e

incendios forestales; lo anterior teniendo en cuenta que los cigarrillos contienen sustancias químicas que le permiten mantenerse encendido durante su consumo, por lo cual se considera que la mayor cantidad de incendios forestales son ocasionados por colillas mal apagadas.

Sin embargo, y a pesar de los múltiples factores de riesgo, la mayor parte de fumadores, desconocen estas afectaciones. Como resultado de un estudio realizado por Rath et al. (2012), el 74,1% de los entrevistados manifestaron arrojar las colillas de cigarrillo al suelo y el 90% desconocen los riesgos que estas representan, por lo que las consideran inofensivas cuando son ingeridas por seres humanos o vida marina. Por ello, no es de extrañar que las colillas de cigarrillo resulten ser el residuo más común arrojado a las calles.

De acuerdo con Bonanomi et al. (2015), en la actualidad se consumen aproximadamente 6 trillones de cigarrillos anualmente en el mundo, de los cuales 4,5 trillones son arrojados al medio ambiente una vez consumidos. Según afirman Green et al. (2014), y según investigación realizada en Berlín, este residuo constituye aproximadamente del 22% al 46% de la basura visible en las calles. No obstante, estas no se encuentran dispersas uniformemente y es más común encontrarlas alrededor de bares, cafés, gasolineras, restaurantes, y parques lo que facilita que, a través de las lluvias, lleguen a las fuentes hídricas y sean consumidas por animales causándoles la muerte debido a su toxicidad.

Por otra parte, Novotny y Slaughter (2014) afirman que este tipo de residuos componen la mayor cantidad de basura recogida a nivel mundial durante las limpiezas costeras que se realizan cada año y a pesar de que existen leyes para prevenir el desecho desmesurado de basuras, estas van dirigidas a grandes problemas como vertidos ilegales y no resultan ser proactivas ni eficaces al aplicarse a personas individuales.

En Colombia, y según el último estudio nacional sobre el consumo de sustancias psicoactivas (Gobierno Nacional de la República de Colombia, 2014). El 42,1% de los encuestados manifestó haber fumado al menos una vez en la vida, sin embargo, solo el 12,9% de ellos se consideran fumadores actuales de cigarrillo puesto que han consumido

esta sustancia en los últimos 30 días. Esta cifra es equivalente a cerca de 3 millones de fumadores en el país donde priman los consumidores de género masculino.

Si bien es cierto que en Colombia la cifra de fumadores es menor comparada con otros países, en el año 2015 el número de fumadores de género masculino estaba en 1.971.800 hombres, mientras en el género femenino esta cifra estaba alrededor de 806.200; lo anterior, para un total de 2.778.000 consumidores de tabaco mayores de 15 años (American Cancer Society & Vital Strategies., s.f.). Por otro lado, se encuentra la población de niños y adolescentes con edades entre los 11 y 18 años; de acuerdo con el estudio realizado por el Gobierno Nacional de Colombia, en el que se incluyeron 92.929 estudiantes de dichas edades, el 24,3% manifestó haber consumido cigarrillo alguna vez en la vida, esto equivale a más de 22.000 jóvenes, consumidores de cigarrillo donde prevalece el género masculino (Gobierno Nacional de la Republica de Colombia, 2011).

Como consecuencia del alto índice de enfermedades y defunciones a causa del cigarrillo, al que se le atribuyen casi 6 millones de muertes de personas al año, de los cuales aproximadamente 5 millones son consumidores directos del producto y más de 600.000 son fumadores pasivos (Organización Mundial de la Salud, 2018), se ha decidido implementar medidas para prohibir el consumo de tabaco en recintos cerrados, esto sin embargo ha mostrado ser en una mala decisión desde el punto de vista ambiental pues el número de colillas arrojadas al suelo en espacios abiertos aumentan en la medida en que al fumar en las calles es más probable que las colillas de cigarrillo no terminen en un cenicero, sino directamente en el suelo.

Ahora bien, en cuanto a cantidades de cigarrillos fumados por persona, Lozano et al. (2015), indican que en Colombia el número de cigarrillos consumidos oscila entre 412 y 600 cigarrillos por fumador. En Bogotá se estima que hay 1,2 millones de fumadores activos, por lo cual la ciudad es generadora de 494,4 a 720 millones de colillas de cigarrillo al año.

La mayor preocupación a nivel ambiental es que tanto el suelo como el agua pueden absorber todas estas sustancias a través de las partículas de alquitrán que se encuentran

presentes en los cigarrillos quemados. Por su parte, la nicotina y el alquitrán son elementos que pueden contaminar hasta 50 litros de agua con un solo cigarrillo (Guevara, 2010).

De acuerdo con investigaciones y análisis realizados por Castañeda (2011) en donde se verificó la toxicidad acuática de las colillas de cigarrillo, se identificó que estos desechos tienen una concentración letal media (CL50) de 1,1 aproximadamente. Esta medida corresponde a la concentración de la sustancia tóxica en el aire o agua que mata al 50% de los animales de ensayo en un tiempo determinado (usualmente 4 horas), lo que significa que una colilla de cigarrillo después de su consumo y liberación de lixiviados del tabaco puede ser mortal para los animales marinos.

Es claro entonces, que el tabaquismo no solo se ha convertido en un problema de salud pública sino también en un problema medio ambiental que preocupa a la sociedad. Por consiguiente, se han realizado diversas investigaciones para determinar metodologías que permitan reducir el impacto generado por este residuo e incluso reutilizarlo como materia prima en la elaboración de otros materiales.

Healton et al. (2011), sugieren adaptar metodologías ya aplicadas a otro tipo de residuos para reducir el impacto negativo que estos generan en el medio ambiente, un ejemplo de esto es implementar multas sancionatorias a quien arroje al suelo residuos de este tipo, prohibir la utilización de materiales no biodegradables como es el acetato de celulosa y/o implementar políticas de responsabilidad posconsumo para las empresas fabricantes y distribuidoras de este producto.

Siguiendo ese planteamiento y con el fin de afrontar el problema, en París se han implementado multas de 68 euros a quien arroje colillas de cigarrillo a la calle, adicionalmente se decidió instalar 30.000 nuevos ceniceros en las calles de la ciudad y distribuir 15.000 ceniceros de bolsillo. Esta medida comenzó a regir desde el 1 de octubre de 2015, siendo esta una manera no solo de reducir el impacto ambiental, sino también de realizar la recolección de estos residuos en un contenedor apropiado para tal fin (Cañas, 2015 y Pacalet, 2015).

De igual manera, diversas investigaciones han revelado la posibilidad de reciclar estos residuos incorporándolos dentro de otros materiales. Dentro de los métodos más relevantes para lograr la reducción de estos residuos y su contaminación, Lee et al. (2014) plantean convertir las colillas desechadas en una fuente de energía mediante el uso de una técnica conocida como pirólisis. La investigación realizada por estos investigadores de Corea del Sur ha logrado demostrar cómo el calentamiento a altas temperaturas podría convertir las colillas desechadas en materiales capaces de integrarse a dispositivos tales como portátiles, automóviles eléctricos y hasta las turbinas de viento.

Por otro lado, las investigaciones realizadas por Zhang (2013), Abdul y Mohajerani (2015) y Mohajerani et al. (2016), han dejado como resultado la posibilidad de incluir las colillas de cigarrillo como materia prima en la fabricación de ladrillos de arcilla cocida. Uno de los beneficios identificados en estas investigaciones, principalmente la de Mohajerani et al. (2016), es el de poder resolver eficazmente el problema de las colillas de cigarrillo que se convierten en basura, ya que este residuo puede colocarse en los ladrillos sin temor de lixiviación o contaminación. De igual manera, se identificó la posibilidad de reducir costos de producción en términos de necesidades energéticas, lo anterior teniendo en cuenta que se ha analizado la cantidad de energía que puede llegar a consumirse con el uso de este material, identificando que la inclusión de colillas de cigarrillos tiene el potencial de reducir el consumo de energía durante la cocción, siendo esto igualmente favorable para el medio ambiente.

Otras investigaciones han demostrado la posibilidad de incorporar diferentes materiales a la fabricación de ladrillos, dentro de dichos materiales se encuentra el polietileno, vidrio triturado, residuos de la industria de papel como son las cenizas, entre otros. Estos materiales han sido incorporados en los ladrillos permitiendo en algunos casos, reducir el consumo de arcilla, mejorar las propiedades del ladrillo e incluso reducir el consumo energético que se pueda generar durante una de las etapas principales del proceso de producción, como es la cocción del ladrillo (Zhang, 2013; Ruíz, 2015; Duque, 2015 y Di Marco y León, 2017).

Los ladrillos son uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo, la producción de ladrillos de arcilla a nivel mundial se encuentra alrededor de 1.391 billones de unidades anuales y su proceso de fabricación convencional implica una serie de pasos básicos, ver figura 1-2, en los que la materia prima fundamental es la arcilla (Zhang, 2013).



Figura 1-2 Proceso productivo del ladrillo. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen las diferentes etapas de la fabricación de un ladrillo:

1. Como se mencionó anteriormente, la materia prima fundamental en la fabricación del ladrillo es la arcilla y la primera etapa consiste en la extracción de este material. Existen diferentes tipos de arcilla que, de igual manera, proporcionan al ladrillo diferentes propiedades según la mezcla y las temperaturas utilizadas durante el proceso. Dentro de las principales características de la arcilla se encuentran las siguientes: la plasticidad, la contracción, la refractariedad, la porosidad y el color; es por esto que, durante la fabricación del ladrillo, se emplea arcilla de diferentes tipos y en diferentes proporciones, obteniendo una mezcla de mejor calidad (Barranzuela, 2014). Esta calidad del ladrillo también se verá determinada no solo por el tipo de arcilla utilizada, sino también por su composición química y mineralógica natural, la cual va sufriendo cambios y transformaciones, especialmente durante las etapas o procesos térmicos que se explicarán más adelante (Betancourt et al., 2013).

Es importante aclarar que, tanto la composición química como la composición mineralógica de la arcilla, pueden ser determinadas a través de análisis como la fluorescencia de rayos X (FRX) y la Difracción de Rayos X (DRX), respectivamente. Adicionalmente, investigaciones previas han determinado mediante dichos análisis,

que los componentes químicos con mayor presencia en las arcillas son la sílice y la alúmina; mientras que en cuanto a los minerales más abundantes se encuentra el cuarzo y la caolinita (Sánchez et al., 2009; Santos et al., 2009; González et al., 2014; Ruge et al., 2016 y Fuentes et al., 2017).

2. La molienda implica la preparación de la arcilla mediante un tratamiento mecánico previo, en el que se tritura y reduce el tamaño de esta con la ayuda de molinos de diversos tipos. El tamaño final que se espera obtener oscila entre 1 y 3 mm (Sacoto, 2013 y Zea, 2005).
3. Previo a la etapa de moldeo o formado del ladrillo se debe preparar la mezcla agregando una cantidad específica de agua; dicha cantidad es determinada por el límite plástico del material, el cual se puede obtener mediante los límites de Atterberg. El límite plástico permite conocer la humedad a la cual un suelo se puede moldear y en esta etapa, la plasticidad, es uno de los parámetros más importantes a controlar (Santos et al., 2009).

Una vez se cuenta con la mezcla preparada, esta es sometida a un proceso de moldeo a través del cual se le da a la arcilla la forma del ladrillo que se espera obtener después de la cocción. Esto se puede realizar de forma manual o con el uso de maquinaria como extrusoras o prensas (Barranzuela, 2014).

4. Si bien es cierto que cada etapa de la fabricación es importante para lograr la calidad del ladrillo, son los procesos térmicos los que influyen significativamente en la fabricación de este producto. El primero de estos procesos corresponde al secado. A través de éste se busca eliminar la humedad que contiene la arcilla después del moldeo, produciendo transformaciones importantes en las dimensiones y características físicas de las piezas moldeadas. Dentro de las principales transformaciones conseguidas en esta etapa, se encuentra la contracción del material, por lo que si esta etapa no se desarrolla a velocidades controladas puede generar fisuras en el producto (Betancourt et al., 2013).

El secado se puede realizar de forma natural, o artificial; el primero de ellos consiste en dejar las piezas secar a temperatura ambiente, mientras que en el segundo se colocan las piezas dentro de un horno, acelerando el proceso mediante un acondicionamiento de aire caliente. Como se mencionó anteriormente, el secado es el proceso más delicado, pues si se someten las piezas a un cambio de temperatura muy fuerte se pueden generar grietas en el material (Barranzuela, 2014; Sacoto, 2013 y Zea, 2005).

5. La cocción corresponde a la última etapa del proceso de fabricación y es en esta fase donde el ladrillo obtiene sus propiedades mecánicas, físicas y su apariencia final. Durante el tiempo que el ladrillo permanece en el horno, este pasa por 3 fases tal como se muestra en la figura 1-3, la primera de ellas corresponde al precalentamiento donde se elimina la humedad que pueda estar unida física y químicamente a la arcilla, posteriormente llega a la fase de cocción, donde alcanza una temperatura entre 900°C y 1200°C. Finalmente se encuentra la etapa de enfriamiento hasta temperatura ambiente (Barranzuela, 2014).

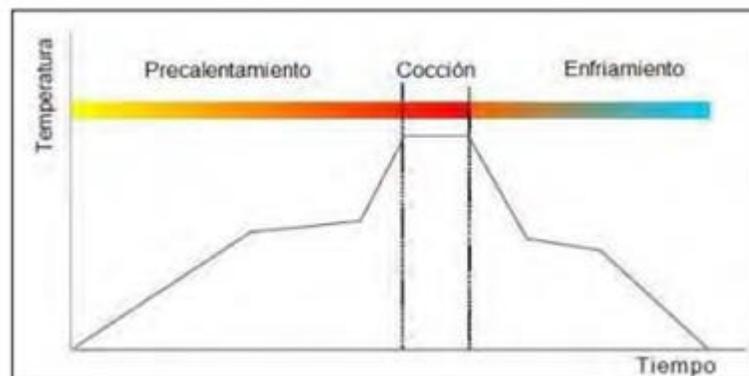


Figura 1-3 Ciclo de cocción típico de un producto de arcilla. Fuente: Barranzuela, 2014.

Este tratamiento térmico genera una serie de transformaciones en los minerales de la arcilla. Dichas transformaciones van desde la pérdida de agua en la estructura hasta la aparición de la fase vítrea, pasando por algunas fases intermedias como la deshidroxilación, destrucción de la estructura cristalina y formación de nuevas fases cristalinas (Linares et al., s.f.).

Adicionalmente, se generan algunas alteraciones en las características de la arcilla dentro de las cuales se encuentra, principalmente, la resistencia del material. Lo anterior, teniendo en cuenta que las arcillas se endurecen y desarrollan resistencia cuando se calientan a temperaturas superiores a la de deshidroxilación. Este proceso corresponde a la transformación estructural que conlleva a la pérdida de agua en el material, cuando se somete a un proceso térmico (Joshi et al., 1994, Rondón, 2011 y Palacios et al., 2012).

Por otro lado, para la fabricación del ladrillo, es importante tener en cuenta lo establecido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), en el que se establecen adicionalmente, algunas normas de obligatorio cumplimiento como son la NTC 4017 y la NTC 4205-2. Esta última establece los requisitos mínimos de calidad en cuanto a resistencia mínima a compresión para mampostería no estructural tipo M (ladrillo macizo), la cual debe ser mínimo de 10 MPa.

Como problemas característicos en la producción de los ladrillos convencionales se encuentra la gran cantidad de energía consumida, especialmente en las actividades realizadas para la extracción y cocción de la arcilla. Así mismo, y según afirman Abdul y Mohajerani (2015), el proceso de cocción de ladrillos de arcilla genera una gama de emisiones de gases a la atmósfera, estas emisiones volátiles en concentraciones altas, pueden ser una fuente seria de contaminación ambiental.

Zhang (2013) afirma que durante la fabricación de un ladrillo se liberan alrededor de 0,41 kg de dióxido de carbono (CO₂), adicionalmente estos ladrillos tienen en promedio una energía incorporada de 2,0 kWh. Por lo tanto y teniendo en cuenta la escasez de arcilla en muchas partes del mundo, algunos países como China han comenzado a limitar el uso de este material en la fabricación de los ladrillos.

En Colombia se producen mensualmente 376.947 toneladas de ladrillos de arcilla, lo que equivale a 4.523.367 ladrillos al año. De igual manera, las exportaciones de materiales de construcción se encuentran alrededor de US\$214,7 millones, de los cuales el 30,4% corresponden directamente a la venta de los productos elaborados con arcilla (US\$65.260

millones). La fabricación de ladrillos en Colombia representa en ventas un aproximado de \$31.643 millones mensuales, donde Bogotá participa con el 49% del mercado, es decir \$15.500 millones mensuales. De igual manera, se estima que el país cuenta con 1.694 unidades productivas en operación (Alvarado y Montaña, 2012; Pacheco y Severiche, 2015).

Existen dos tipos de ladrillos de mampostería fabricados en Colombia, el primero de ellos es el ladrillo hueco y el segundo se conoce como ladrillo macizo. En los dos casos la fabricación se puede realizar a base de arcilla, caolín, silicatos de aluminio y otros minerales cocidos (para los ladrillos de arcilla) o a base de cemento Portland, agua y agregados (para el caso de los ladrillos de concreto). De igual manera, los dos tipos de ladrillo representan daños al medio ambiente como deforestación y contaminación por la cocción del material (Alvarado y Montaña, 2012; Martínez y Corte, 2014).

Por otro lado, se encuentran las colillas de cigarrillo, las cuales se consideran un residuo difícil de reciclar debido a que no existen mecanismos ni procedimientos fáciles para asegurar un tratamiento apropiado de los productos químicos presentes en ellas; la incineración es también una solución aparentemente insostenible, ya que las emisiones que se pueden generar en la quema de este residuo contienen sustancias peligrosas. Es a causa de esto y de las afectaciones que genera al medio ambiente el uso de arcilla en la fabricación de los ladrillos, que se plantea la posibilidad de incorporar colillas de cigarrillo en la fabricación de estos (Zhang, 2013; Abdul y Mohajerani, 2015 y Mohajerani et al., 2016).

1.3 Objetivos y Pregunta de Investigación

1.3.1 Objetivo General

Determinar la factibilidad del uso de las colillas de cigarrillo como materia prima en la fabricación de ladrillos de arcilla.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos fabricados incorporando colillas de cigarrillo y los ladrillos convencionales.
- Evaluar el cumplimiento normativo de construcción colombiano para los ladrillos de mampostería no estructural tipo M, fabricados a partir de arcilla con colillas de cigarrillo incorporadas.
- Identificar los impactos ambientales que se generan al utilizar dichos residuos en la fabricación de ladrillos.
- Evaluar los costos energéticos asociados a la producción de ladrillos que incorporen colillas de cigarrillo, con aquellos elaborados a partir de sus componentes tradicionales.

1.4 Metodología de Investigación y Estructura de la Tesis

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó la metodología experimental que se muestra en la figura 1-4.

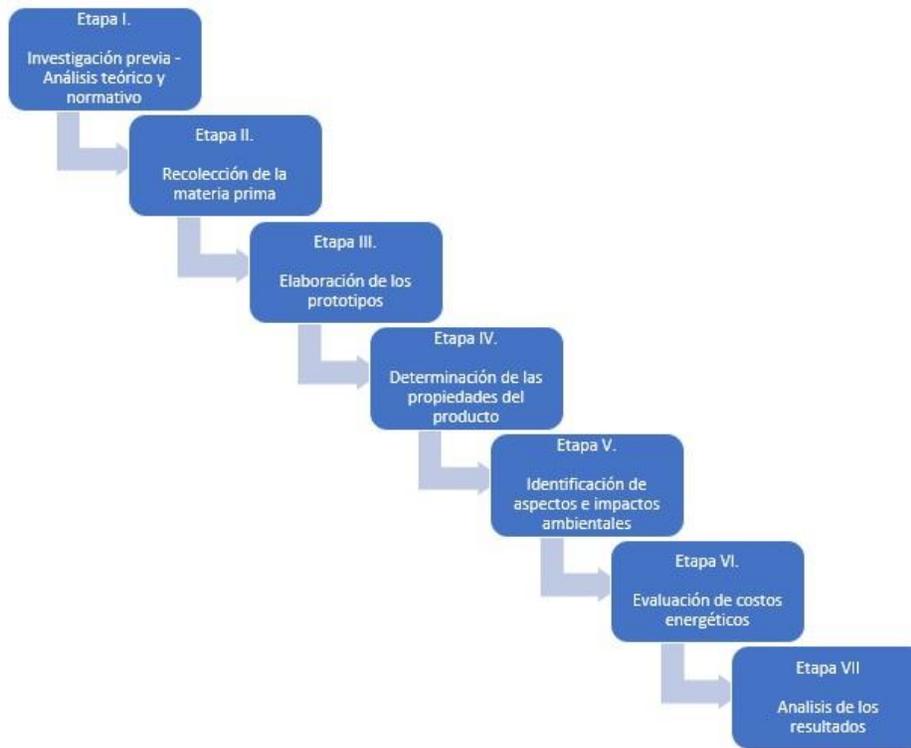


Figura 1-4 Metodología de investigación. Fuente: Elaboración propia.

1.4.1 ETAPA I. Investigación previa – Análisis teórico y normativo.

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica realizando una recolección y análisis de información existente y relacionada, tanto con la fabricación de ladrillos de arcilla como con los componentes e impactos negativos que generan las colillas de cigarrillo al medio ambiente. De igual manera se realizó un análisis de la Normatividad Técnica Colombiana existente y aplicable a la fabricación de ladrillos de arcilla, en la que se establecen los requisitos que debe cumplir este producto para mampostería no estructural tipo M. Esta información fue clave para la fundamentación teórica y la ejecución de cada una de las etapas siguientes.

1.4.2 ETAPA II. Recolección de la materia prima.

El trabajo de campo para la recolección de las colillas de cigarrillo se realizó con el apoyo de bares y tiendas ubicadas en una zona específica de la localidad de suba, adicionalmente se tuvieron en cuenta algunas zonas comunes como universidades y edificios empresariales donde cuentan con recipientes para la disposición de este residuo. Para la consecución de la arcilla, está fue solicitada a la Ladrillera Santafé mediante carta justificando el uso de esta.

1.4.3 ETAPA III. Elaboración de los prototipos.

Para la elaboración de los prototipos se utilizaron las materias primas convencionales adicionando colillas de cigarrillo en algunas de las mezclas. En la Tabla 1-1, se muestran los diferentes porcentajes de colillas de cigarrillo adicionadas en cada prototipo, así como el número de muestras elaboradas:

Tabla 1-1 Mezclas realizadas para la elaboración de los ladrillos con y sin incorporación de colilla de cigarrillo.

Prototipo número	Porcentaje en peso de colillas de cigarrillo respecto al contenido de arcilla (%)	Número de muestras
1	0	15
2	2,5	9
3	5,0	9
4	7,5	9

Nota. Las colillas de cigarrillo fueron incorporadas como adición a la materia prima convencional y por ende no correspondieron a un sustituto de la arcilla. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los prototipos elaborados se fabricaron ladrillos con materias primas convencionales (arcilla), los cuales fueron empleados como prototipos estándar para efectuar las mediciones y comparaciones respectivas. Todos los prototipos fueron elaborados en especímenes prismáticos macizos de 150 x 50 x 25 mm.

En el anexo 1 se describe la metodología desarrollada para la elaboración de los prototipos, incluyendo materias primas, proceso de fabricación del ladrillo y sus etapas principales como son: el mezclado y homogenización de los materiales, prensado, secado y cocción. De igual manera, se mencionan las técnicas de caracterización y los ensayos realizados al producto terminado.

1.4.4 ETAPA IV. Determinación de las propiedades del producto.

Una vez elaborados los prototipos, se realizó la medición de las propiedades físicas (densidad, absorción, contracción lineal) y mecánicas (resistencia a flexión (Módulo de Ruptura (MOR)) y a compresión) de cada prototipo de ladrillo, incluyendo la del ladrillo convencional (estándar); acorde con la normativa estándar respectiva (ASTM y/o NTC). Lo anterior, con el fin de determinar la factibilidad de su elaboración a nivel de criterios de calidad del producto. Cabe mencionar que se decide medir estas propiedades, puesto que son las requeridas en las normas técnicas para que el producto pueda ser empleado como mampostería no estructural tipo M.

1.4.5 ETAPA V. Identificación de aspectos e impactos ambientales.

Se recolectó la información mediante caracterización del proceso, identificando los aspectos ambientales asociados a cada fase del proceso de producción tanto para el ladrillo convencional como el elaborado a partir del material reciclado.

1.4.6 ETAPA VI. Evaluación de costos.

Se realizó una evaluación de los costos energéticos asociados a la producción de cada ladrillo. Posteriormente, con esta información se realizaron las respectivas comparaciones para determinar si existe una reducción en el consumo energético.

1.4.7 ETAPA VII. Análisis de los resultados.

Se realizó un análisis de la información recolectada con el fin de determinar desde los tres aspectos (calidad, ambiental y económico) la factibilidad en la fabricación de los ladrillos a partir de las colillas de cigarrillo.

Acorde con la metodología mencionada, la estructura de la tesis contempla:

Capítulo I. Adecuación y caracterización de las materias primas

Capítulo II. Elaboración de los especímenes

Capítulo III. Determinación de las propiedades del producto

Capítulo IV. Impactos ambientales

Capítulo V. Costos energéticos

2 Capítulo I. Adecuación y Caracterización de las Materias Primas

2.1 Materia Prima

Las materias primas utilizadas para el desarrollo de esta investigación fueron fundamentalmente arcilla y colillas de cigarrillo. La primera de ellas fue suministrada por la Ladrillera Santafé, mientras que las colillas de cigarrillo, de diferentes marcas, fueron recolectadas en calles y zonas comunes como bares, universidades y edificios empresariales.

2.1.1 Preparación

2.1.1.1 Adecuación de la Arcilla.

Teniendo en cuenta que para la fabricación del ladrillo el tamaño de la arcilla debe oscilar entre 1 y 3 mm (Sacoto, 2013 y Zea, 2005), se realizó la respectiva molienda y adecuación de esta en la máquina de los Ángeles (ver figura 2-1). En el tambor cilíndrico que compone esta máquina, se introdujeron 10 kg de arcilla y 14 cuerpos molidores esféricos, durante un tiempo de 30 minutos, con el fin de reducir el tamaño inicial de los terrones de arcilla.



Figura 2-1 Máquina de los Ángeles. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se pasó la arcilla triturada por un tamiz número 4 (apertura de 4,75 mm), consiguiendo así el tamaño esperado para realizar el moldeo de los prototipos de ladrillo.

2.1.1.2 Adecuación de las colillas de cigarrillo.

Como parte de la investigación realizada por Mohajerani et al. (2016) se identificó que, al aumentar la cantidad de colillas de cigarrillo estas ocasionaron la formación de grietas y poros al interior del ladrillo cocido. Por lo anterior, en esta investigación y con el objetivo de disminuir la oquedad que generan las colillas, se realizó una adecuación previa de dicho material, molturándolas con el uso de un molino doméstico (ver figura 2-2).



Figura 2-2 Molino y colillas de cigarrillo molturadas. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Caracterización de la Arcilla

La arcilla previamente adecuada, fue sometida a pruebas de granulometría, límites de Atterberg, densidad, composición química (fluorescencia de rayos X (FRX)), composición mineralógica (difracción de rayos X (DRX)) y análisis térmico; tal como se detalla en los siguientes numerales:

2.1.2.1 Granulometría

Las pruebas de granulometría fueron llevadas a cabo de acuerdo con la norma INV-E 213-13, en la figura 2-3 se muestra la curva de distribución granulométrica:

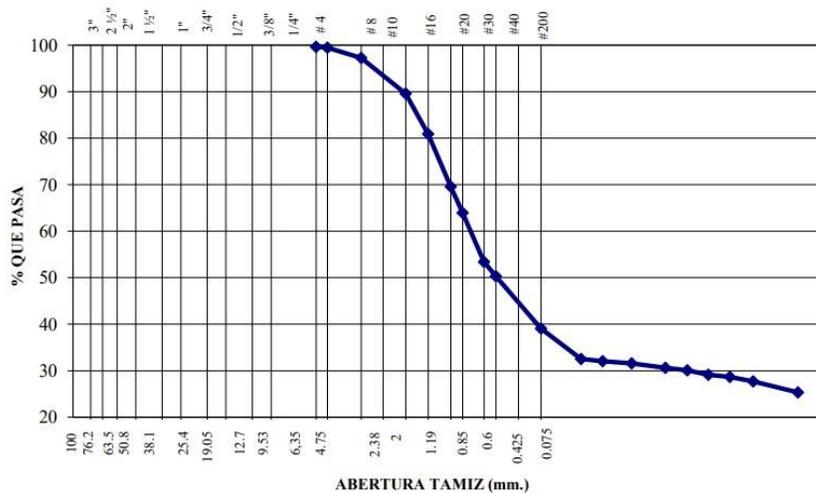


Figura 2-3 Curva granulométrica. Fuente: Elaboración propia

2.1.2.2 Granulometría Hidrométrica

Este análisis se realizó conforme a la norma INV-E 123-13, la curva de gradación por hidrometría se detalla a continuación (ver figura 2-4):

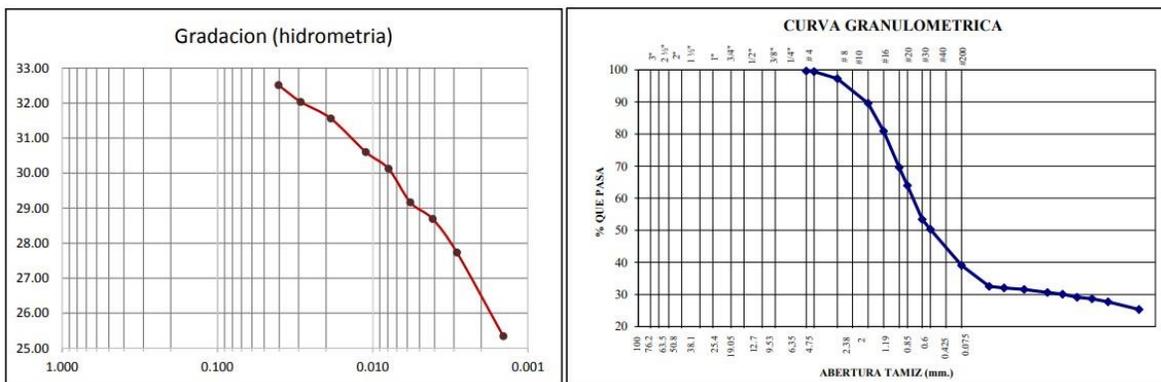


Figura 2-4 Curva de gradación por hidrometría. Fuente: Elaboración propia

2.1.2.3 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg, es uno de los métodos más sencillos y comúnmente utilizado para determinar, entre otras, algunas propiedades de los suelos finos como son su límite líquido, plástico e índice de plasticidad (Santos et al., 2009).

El primero de ellos corresponde al contenido de humedad que tiene un suelo y que lo convierte en suelo líquido. Este límite es expresado en porcentaje y se determina con ayuda de un aparato en forma de copa denominado “Casagrande”, en el cual se coloca una capa del suelo a estudiar, previamente humedecido, y con ayuda de un instrumento en V se traza una línea dividiendo la muestra en dos. El límite líquido se define como la humedad que tiene el suelo justo cuando este se une tras haber sometido la copa a una serie de 25 golpes (Sanz, 1975).

Por otro lado, se encuentra el límite plástico, el cual corresponde a la humedad que tiene el suelo, con respecto a su peso en seco, pero que está vez lo convierte en suelo plástico. Para determinar este porcentaje, se debe igualmente humedecer la muestra sobre la cual se realizarán los ensayos y el resultado se definirá como la humedad que tiene la arcilla cuando es posible moldearla sin que está presente fisuras. Experimentalmente, la muestra debe ser moldeada hasta conseguir un cilindro de 3mm de diámetro, justo cuando este cilindro presente fisuras se debe calcular el % de humedad, siendo este el límite plástico del suelo analizado (Sanz, 1975).

Por último, se encuentra el índice de plasticidad el cual corresponde a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Con el índice de plasticidad, se puede clasificar un suelo como muy arcilloso (si su IP es > 20), arcilloso ($IP > 10$), poco arcilloso ($IP < 4$) y exento de arcilla ($IP = 0$) (Sanz, 1975)

Para efectos de esta investigación, los ensayos relacionados con los límites de Atterberg fueron realizados acorde con las normas INV-E 125-13 e INV-E 126-13 y los resultados se detallan a continuación:

- Límite líquido = 34%
- Límite plástico = 18%
- Índice de plasticidad = 16%

2.1.2.4 Densidad

Las pruebas de densidad se realizaron acorde con la norma INV-E 128-13 y los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2-1:

Tabla 2-1 *Densidad de la arcilla.*

Densidad relativa Gs	Densidad Aparente
2,84 g/cm ³	2,83 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

La compactidad o compactibilidad de una pieza moldeada es una de las propiedades más importantes para tener en cuenta durante el proceso cerámico, lo anterior tomando a consideración que, es esta propiedad la que determina el comportamiento de la pieza durante el proceso y adicionalmente genera afectación sobre sus propiedades tanto físicas como mecánicas como son la resistencia, la permeabilidad, el tamaño de la pieza cocida, la absorción de agua, entre otras (Delgado, 2015).

Existe una relación entre la compactidad y la densidad aparente en seco, siendo esta directamente proporcional por lo que entre mayor sea dicha densidad, mayor será la compactidad de la pieza moldeada (Delgado, 2015).

Por lo anterior y tomando como referencia el valor de la densidad aparente en seco obtenido para la arcilla (2,83 g/cm³) se puede concluir que esta elevada densidad, favorece el aumento de la compactibilidad del material al poseer mayor contenido en minerales arcillosos de granulometría fina.

2.1.2.5 Composición Química (FRX)

Para la determinación de la composición química de la arcilla, se realizó un análisis semicuantitativo destructivo haciendo uso del software SemiQ 5 y un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, el cual tiene una sensibilidad de 100 ppm en la detección de elementos pesados metálicos. Para realizar dicho análisis la arcilla fue previamente

preparada, secándola a 105°C por un periodo de 12 horas; posteriormente, se mezcló dicha muestra con cera espectrométrica y se prensó a 120 kN por un minuto generando una pastilla de 37 mm de diámetro. Los resultados obtenidos, se muestran en la Tabla 2-2:

Tabla 2-2 Composición química de la arcilla (FRX).

Componente	Contenido (%)
SiO ₂	62,65
Al ₂ O ₃	20,28
Fe ₂ O ₃	4,26
TiO ₂	0,97
CaO	0,38
K ₂ O	1,29
SO ₃	0,54
MgO	0,95
Ba	0,06
Na ₂ O	0,27
P ₂ O ₅	0,07
Zr	0,02
Sr	0,02
V	0,03
Cr	0,02
MnO	0,01
Rb	0,01
Pérdida al fuego	8,17

Fuente: Elaboración propia

Dentro de los resultados obtenidos, se observa que los componentes con mayor presencia son la sílice (SiO₂) y la alúmina (Al₂O₃). Tal como lo han mencionado autores como Barranzuela (2014) y Santos et al. (2009), estos dos componentes son los más importantes en la composición de arcillas y por ende suelen ser los más abundantes en este material, mientras que otros como el hierro, suelen encontrarse en porcentajes mas bajos.

Adicionalmente, y de acuerdo a lo mencionado por Santos et al. (2009), para que una arcilla sea considerada apta para la fabricación de cerámicos de construcción, debe tener un contenido de Al_2O_3 entre el 20% y el 30%, evidenciando en los resultados obtenidos en esta investigación, que dicho componente se encuentra dentro de los límites.

Por otro lado, se puede observar que el contenido de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO y Na_2O , es muy similar al de aquellas arcillas utilizadas por Sánchez et al. (2009), Mohajerani et al. (2016) y Fuentes et al. (2017), en la fabricación de ladrillos que incorporaban colillas de cigarillo, biosólidos y cenizas volátiles.

2.1.2.6 Composición Mineralógica (DRX)

A la arcilla le fueron identificadas las fases mineralógicas mediante Difracción de Rayos X (DRX). Las muestras fueron escaneadas en el rango de $2\theta = 5 - 80^\circ$ a una velocidad de escaneo de 0,02 seg/paso, usando radiación $\text{Cu K}\alpha$ a 45 kV y 40 mA. En la figura 2-5, se observa el difractograma de la arcilla, evidenciando fases mineralógicas características de arcillas como el cuarzo (SiO_2) en ángulos $21,1794^\circ$; $26,9496^\circ$; $36,8383^\circ$; $39,7578^\circ$; $42,7379^\circ$; $50,4242^\circ$; $60,2280^\circ$ y $68,4041^\circ$ (código de referencia 01-083-2469 y 00-003-0427), y la caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) en ángulos $12,6776^\circ$ y $25,1782^\circ$ (código de referencia 00-003-0058) (Joshi et al., 1994; Gonzalez et al., 2014; Ruge et al., 2016).

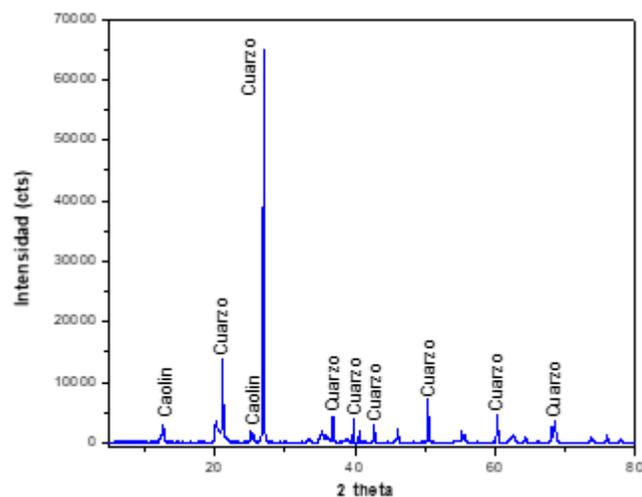


Figura 2-5 Patrón de Difracción de Rayos X de la arcilla. Fuente: Elaboración propia

2.1.2.7 Análisis Térmico

Con el fin de conocer las transformaciones que se presentan en la arcilla cuando esta es sometida al proceso de calentamiento, se realizaron ensayos de análisis termogravimétrico (ATG) y termo-diferencial (ATD),

Estos ensayos fueron realizados a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, iniciando en la temperatura ambiente hasta llegar a una temperatura de 1000 °C. Lo anterior, bajo una rata de flujo de aire de 100 ml/min.

A continuación, en la figura 2-6, se muestran los resultados de los análisis anteriormente mencionados, donde se observa una pérdida de peso (ATG) y un pico endotérmico que se encuentra en un rango de 25 °C a 110 °C, el cual se atribuye posiblemente a la pérdida de agua de humedad.

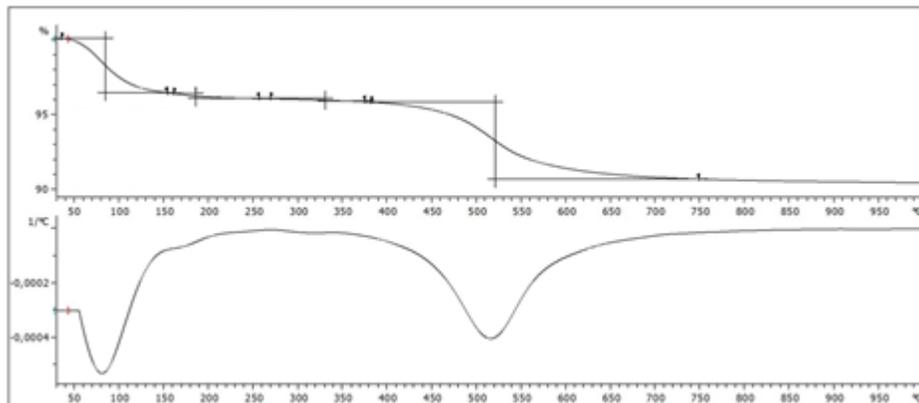


Figura 2-6 Curvas de ATG (superior) y ATD (inferior) de la arcilla. Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados presentados en la figura 2-6, se puede concluir que aproximadamente a los 520 °C ocurre la mayor pérdida de agua estructural de la caolinita (deshidroxilación del caolín), proceso endotérmico acompañado por la reorganización del aluminio coordinado octaédricamente en la caolinita, a un aluminio coordinado tetraédricamente en el metacaolín. Lo anterior, acorde con lo mencionado por autores como Linares et al. (1983) y García (1997) quienes dentro de sus investigaciones han determinado que la deshidroxilación de este mineral, generalmente ocurre entre los 400 °C y 500 °C; incluso, algunos autores como Joshi et al. (1994) e Isel et al. (2017) indican que

este proceso puede llegar a ocurrir a temperaturas tan bajas como los 400 °C y tan altas como los 600 °C.

2.1.3 Pruebas de humedad

Previo a la elaboración de los especímenes, se realizaron pruebas de humedad a la arcilla previamente tamizada en la balanza diseñada para tal fin (Ver figura 2-7). Dicha prueba arrojó una humedad natural de 3,65%.



Figura 2-7 Balanza para determinación de humedad. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados arrojados fueron los siguientes:

- Masa Inicial: 12,00 g
- Masa Final: 11,56 g
- % de humedad natural: 3,65%

Es importante aclarar que la arcilla debe tener una humedad específica para poderse moldear; dicha humedad se obtiene de los límites de Atterberg (límite plástico) el cual, según los análisis mostrados previamente corresponde al 18%. Tomando como base este porcentaje y la humedad natural de la arcilla, a continuación, se describe la humedad faltante que esta materia prima debía tener para el proceso de moldeo y prensado (ver Tabla 2-3):

Tabla 2-3 Humedad de la arcilla para moldeo.

Tipo de humedad	Valor (%)
Humedad requerida (Límite plástico)	18,00
Humedad natural	3,65
Humedad faltante	14,35

Nota. El porcentaje de humedad que debe ser agregado a la arcilla para poderse moldear, es del 14,35%. Fuente: Elaboración propia.

3 Capítulo II. Elaboración de los especímenes

3.1 Proceso de moldeo y prensado

De acuerdo con los resultados de humedad y teniendo en cuenta el tamaño de los moldes a utilizar (150 x 50 x 25 mm) se llevó a cabo el proceso de elaboración de los especímenes tal como se describe a continuación:

3.1.1 Ladrillo convencional (LADRICOL 0%)

Se elaboraron 15 especímenes prismáticos de 150 x 50 x 25 mm utilizando la materia prima convencional. Para ello se llevaron a cabo las fases de la metodología descrita en la figura 3-1:

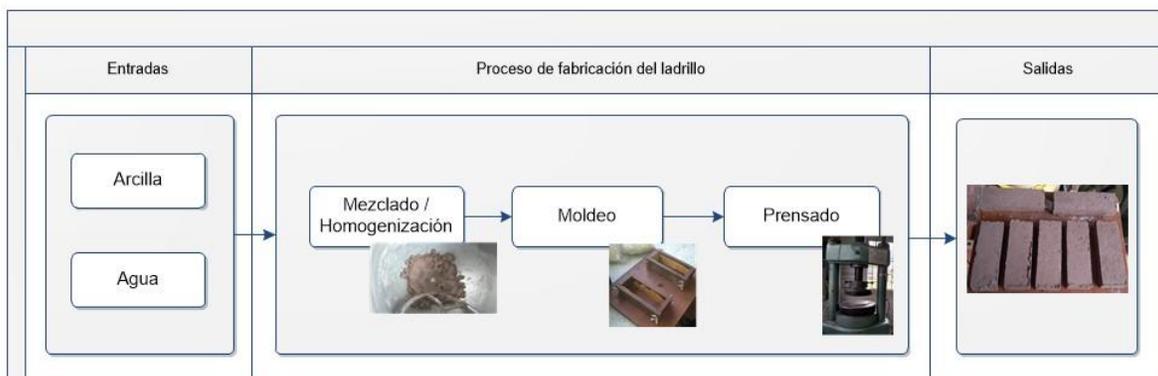


Figura 3-1 Metodología para la fabricación de los prototipos – Ladrillo Convencional fases de moldeo y prensado. Fuente: Elaboración Propia.

3.1.2 Ladrillo con colillas de cigarrillo

Para los especímenes con colillas de cigarrillo, el proceso de fabricación empleado fue el mismo, adicionando las colillas (previamente molidas) en la fase de mezclado / homogenización (ver figura 3-2).

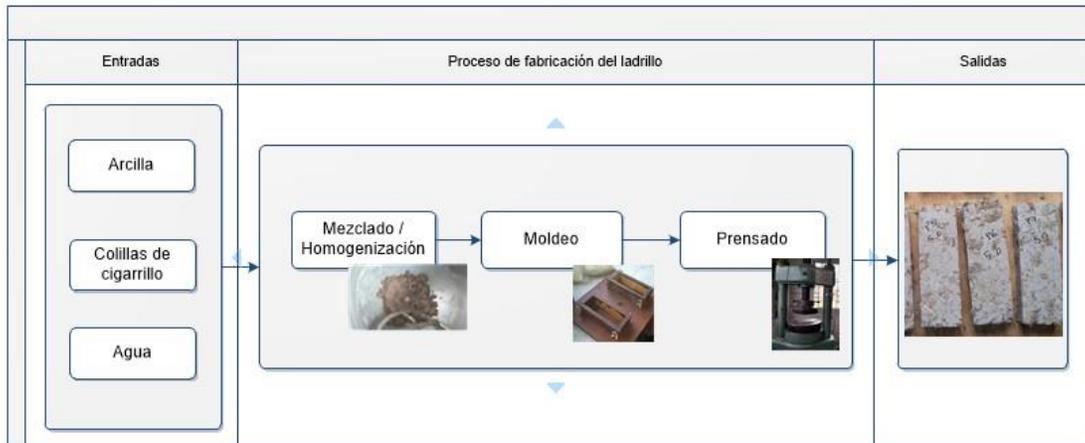


Figura 3-2 Metodología para la fabricación de los prototipos – Ladrillo con colillas de cigarrillo.
Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso, se elaboraron tres mezclas en las que la adición de este residuo varió de la siguiente manera (ver Tabla 3-1):

Tabla 3-1 Mezclas realizadas para la elaboración de los ladrillos con incorporación de colilla de cigarrillo.

Porcentaje en peso de colillas de cigarrillo respecto al contenido de arcilla (%)	Número de muestras
LADRICOL 2,5	9
LADRICOL 5,0	9
LADRICOL 7,5	9

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Presión de compactación

En ambos procesos de fabricación (ladrillos convencionales y ladrillos con colillas de cigarrillo), la fase de prensado se realizó con apoyo de una máquina que permitió registrar

la fuerza ejercida para la compactación de la mezcla, obteniendo una presión vertical de compactación promedio de 0,92 MPa. Los resultados promedio se detallan en la Tabla 3-2:

Tabla 3-2 *Presión vertical de compactación promedio, utilizada en el proceso de fabricación.*

Fuerza (N)	Área (mm ²)	Presión de compactación (MPa)
6.868,29	7.500	0,92

Fuente: Elaboración propia

Una vez prensado el material y obtenido el prototipo, tanto convencional como con colilla de cigarrillo (ver figura 3-3), se registraron sus pesos y dimensiones iniciales. En el capítulo III se muestran los resultados promedio, obtenidos en el proceso de moldeo:

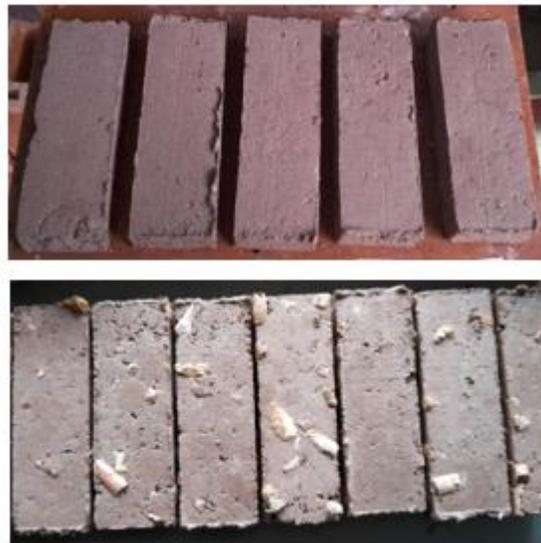


Figura 3-3 *Ladrillos convencionales y con colillas de cigarrillo moldeados. Fuente: Elaboración propia.*

3.2 Proceso de Secado

Este proceso se realizó de forma artificial, sometiendo la totalidad de las piezas a secado bajo una temperatura entre 105 - 110 °C durante un tiempo de 48 horas. En la figura 3-4 se

evidencian las fotos de los ladrillos convencionales y con colillas de cigarrillo después de este proceso.

(a)



(b)



Figura 3-4 Ladrillos convencionales (a) y con colillas de cigarrillo (b) secos. Fuente: Elaboración propia

Una vez extraídos del horno de secado, los ladrillos fueron ingresados en el desecador durante 15 minutos (ver figura 3-5), para posteriormente tomar pesos y dimensiones. Los resultados promedio obtenidos en este proceso se muestran en el capítulo III:



Figura 3-5 Ladrillos en el desecador. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Proceso de Cocción

El proceso de cocción se realizó a diferentes temperaturas, con el fin de identificar la temperatura óptima a la que el ladrillo obtenía la mejor densidad y la mejor absorción de agua.

Con base en lo anterior, en las siguientes secciones del documento, se detallan las temperaturas de cocción a las que fueron sometidos, tanto los ladrillos convencionales, como aquellos que contenían colillas de cigarrillo.

3.3.1 Ladrillo convencional

Los prototipos secos de 100% arcilla (LADRICOL 0%), fueron sometidos a diferentes temperaturas de cocción, dentro de las cuales se encontraban: 800 °C, 850 °C, 900 °C, 950 °C y 1000 °C. El número de muestras cocidas a cada temperatura se detalla en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 *Temperaturas de cocción y número de muestras utilizadas (100% arcilla).*

Mezcla	Temperatura de cocción	Número de muestras cocidas a dicha temperatura
LADRICOL 0%	800°C	3 muestras
	850°C	3 muestras
	900°C	3 muestras
	950°C	3 muestras
	1000°C	3 muestras

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la figura 3-6, se muestran algunos ejemplos de los ladrillos terminados.



Figura 3-6 Ladrillos convencionales después de cocción. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Ladrillo con colillas de cigarrillo

Para el caso de los ladrillos en los que se incorporaron las colillas de cigarrillo, el proceso de cocción se realizó a las temperaturas de 800 °C, 850 °C y 900 °C. El número de muestras cocidas a cada temperatura se detalla a continuación (ver Tabla 3-4).

Tabla 3-4 Temperaturas de cocción usadas en prototipos con colillas de cigarrillo.

Mezcla	Temperatura de cocción	Número de muestras cocidas a dicha temperatura
LADRICOL 2,5%	800°C	3 muestras
	850°C	3 muestras
	900°C	3 muestras
LADRICOL 5,0%	800°C	3 muestras
	850°C	3 muestras
	900°C	3 muestras
LADRICOL 7,5%	800°C	3 muestras
	850°C	3 muestras
	900°C	3 muestras

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 3-7, se muestran algunos ejemplos de estos ladrillos terminados.



Figura 3-7 Ladrillos con colillas de cigarrillo después de cocción. Fuente: Elaboración propia.

4 Capítulo III. Determinación de las propiedades del producto

4.1 Determinación de las Propiedades Físicas

Al finalizar cada una de las fases mencionadas en el capítulo anterior (moldeo, secado y cocción), se registraron los pesos y dimensiones de cada prototipo para determinar algunas propiedades físicas del ladrillo como peso, volumen, contracción, densidad volumétrica, absorción de agua y tasa inicial de absorción.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada una de las etapas. Estos resultados corresponden a un promedio de las muestras utilizadas en cada una de las fases.

4.1.1 Propiedades físicas de los prototipos en verde

Una vez prensado el material y obtenido el prototipo, tanto convencional como con colilla de cigarrillo, se registraron sus pesos y dimensiones iniciales. En esta primera fase se determinaron propiedades como el peso, volumen y la densidad volumétrica, para lo cual se tomó un promedio de 15 muestras (para la mezcla de LADRICOL 0%) y de 9 muestras (para cada una de las mezclas restantes).

En la Tabla 4-1 se muestran los resultados promedio, obtenidos en el proceso de moldeo.

Tabla 4-1 *Peso, volumen y densidad de los prototipos en verde.*

Mezcla	Peso del prototipo húmedo (g)	Volumen (cm³)	Densidad volumetrica (g/cm³)
LADRICOL 0%	420,64	199,82	2,11
LADRICOL 2,5%	433,98	229,28	1,90
LADRICOL 5,0%	431,85	245,65	1,79
LADRICOL 7,5%	440,76	244,66	1,77

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 4-1, la densidad volumétrica disminuye en la medida en que aumenta el porcentaje de colillas de cigarrillo incorporadas; esto se debe fundamentalmente a la porosidad que generan las colillas al interior del ladrillo.

4.1.2 Propiedades físicas de los prototipos secos

Posterior al proceso de secado, se tomaron pesos y dimensiones de cada muestra con el fin de determinar algunas propiedades como: peso, contracción por secado, volumen y humedad. Los resultados promedio se muestran en la Tabla 4-2:

Tabla 4-2 *Peso, contracción, volumen y humedad de los prototipos después de secado.*

Mezcla	Peso del prototipo en seco (g)	Contracción por secado (%)	Volumen (cm³)	Humedad (%)
LADRICOL 0%	351,88	5,46	175,97	18,02
LADRICOL 2,5%	363,43	3,79	199,01	18,49
LADRICOL 5,0%	365,23	3,59	218,05	18,25
LADRICOL 7,5%	370,51	3,36	222,89	18,96

Nota. El proceso de secado se realizó a una temperatura entre 105 - 110 °C durante un tiempo de 48 horas. Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Propiedades físicas de los ladrillos cocidos

Una vez finalizado el proceso de cocción, se determinaron algunas propiedades físicas como la contracción por cocción, la densidad volumétrica y el porcentaje de absorción de agua.

Para determinar el porcentaje de contracción de las muestras, se tomaron las dimensiones de cada una de ellas, tanto antes como después del proceso de cocción. Posteriormente, se realizó el cálculo con base en la siguiente fórmula (Motoche, 2014):

$$CC = \left(\frac{L_i - L_f}{L_i} \right) \times 100$$

Donde:

CC = Contracción por cocción del material

L_i = Longitud inicial de la muestra (antes del proceso de cocción)

L_f = Longitud final de la muestra (después del proceso de cocción)

Para la determinación de la densidad volumétrica y absorción de agua, los ladrillos cocidos fueron sometidos al siguiente proceso conforme a lo establecido en la NTC 4017:

1. Se introdujeron en la desecadora para posteriormente tomar pesos y dimensiones del producto terminado.
2. Una vez se obtuvieron dichos datos, cada prototipo fue sumergido en agua durante 24 horas.
3. Transcurridas las 24 horas, se retiraron del agua, se secaron superficialmente con un paño húmedo y se pesaron nuevamente para determinar el porcentaje de absorción con base en la siguiente fórmula (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2005 y Guerrero et al., 2017):

$$\% \text{ absorción} = \left(\frac{W_{ss} - W_s}{W_s} \right) \times 100$$

Donde:

W_s = masa del prototipo seco (antes de la inmersión en agua)

W_{ss} = masa del prototipo superficialmente seca (después de la inmersión)

4.1.3.1 Ladrillo convencional

En este caso y para el cálculo de las propiedades mencionadas anteriormente, se tomó un promedio de 3 muestras. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Contracción, densidad y absorción de agua de los prototipos LADRICOL 0% (después de cocción)

Mezcla	Temperatura (°C)	Contracción por cocción (%)	Densidad volumétrica (g/cm ³)	Absorción de agua (%)
LADRICOL 0%	800	0,03	1,95	11,34
	850	0,32	1,95	11,24
	900	0,48	1,96	11,23
	950	0,64	1,98	11,02
	1000	0,89	1,99	10,54

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos, y con el fin de determinar la temperatura óptima a la que el ladrillo (LADRICOL 0%) obtenía mejores propiedades, se realizaron gráficos de densidad y absorción de agua en función de la temperatura de cocción. Los resultados se muestran en la figura 4-1:

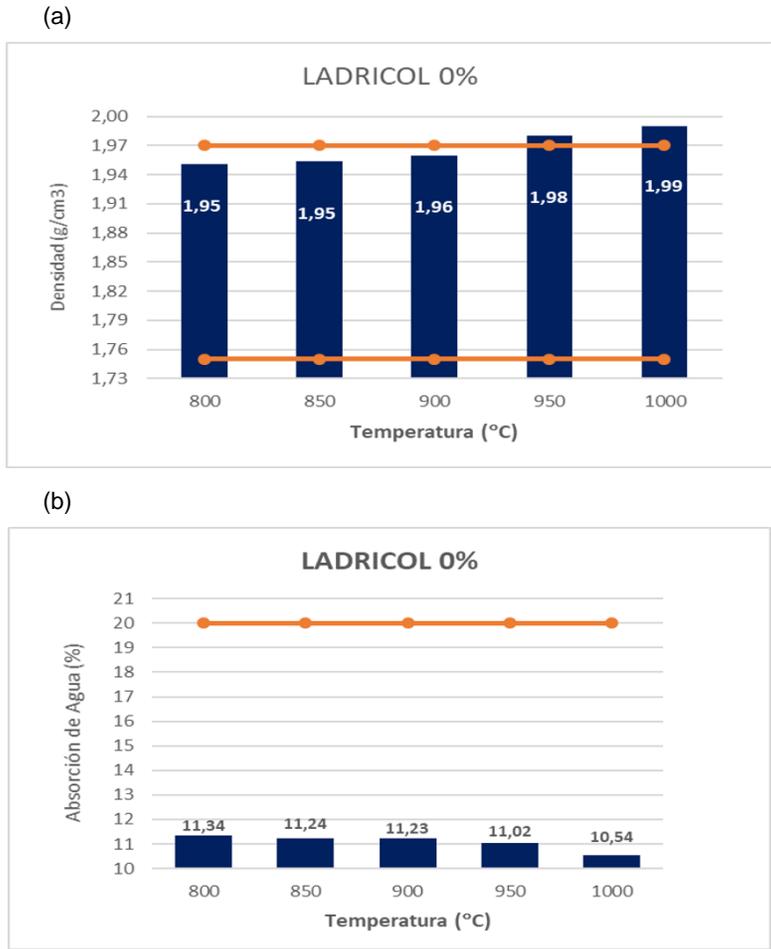


Figura 4-1 Densidad volumétrica (a) y Absorción de agua (b) en función de la temperatura de cocción. Fuente: Elaboración propia.

En ensayos y análisis comparativos realizados a los ladrillos fabricados por diferentes ladrilleras, se ha evidenciado que el valor de la densidad aparente en cocido está comprendido habitualmente entre 1,75 g/cm³ y 1,97 g/cm³ (Delgado, 2015; Lozano y González, 2016). Adicionalmente, y respecto a la absorción de agua, para mampostería no estructural tipo M, la norma NTC 4205-2 indica un resultado máximo de 20% por cada unidad de ladrillo y de 17% cada 5 unidades de ladrillos. Cabe mencionar que se consideran como mampostería no estructural tipo M, aquellas unidades sin perforaciones; así como aquellas en las que las perforaciones representan menos del 25% del volumen total de la unidad (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019).

Con base en estos rangos y referencias, y tomando en consideración los resultados obtenidos en la figura 4-1, se escogieron las temperaturas de 800 °C, 850 °C y 900 °C ya que estas permitieron alcanzar densidades entre 1,95 g/cm³ y 1,96 g/cm³; así como una absorción de agua entre 11,23% y 11,34%. Adicionalmente, se escogieron estas tres temperaturas con el fin de realizar un análisis comparativo, no solo en porcentaje de colillas incorporadas, sino también en variación de temperaturas de cocción y costos energéticos.

4.1.3.2 Ladrillo con colillas de cigarrillo

Una vez finalizado el proceso de cocción, cada prototipo en el que se incorporaron colillas de cigarrillo fue sometido al mismo proceso mencionado en el numeral 4.1.3, donde se tomaron pesos y dimensiones del producto terminado en seco (para determinar el porcentaje de contracción) y posteriormente, cada uno fue sumergido en agua para determinar el porcentaje de absorción. Los resultados obtenidos se pueden observar en el Anexo 2.

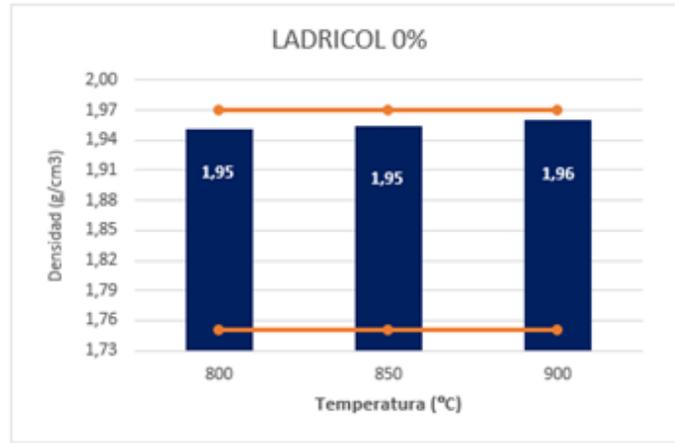
4.2 Análisis de las propiedades físicas.

A continuación se muestran los gráficos de densidad y absorción de agua en función de la temperatura de cocción, para cada una de las mezclas (0 %, 2,5%, 5% y 7,5%).

4.2.1 Ladrillo convencional (LADRICOL 0%)

En la figura 4-2, se muestran los gráficos de densidad y absorción de agua en función de la temperatura de cocción para los ladrillos de 100% arcilla (LADRICOL 0%).

(a)



(b)

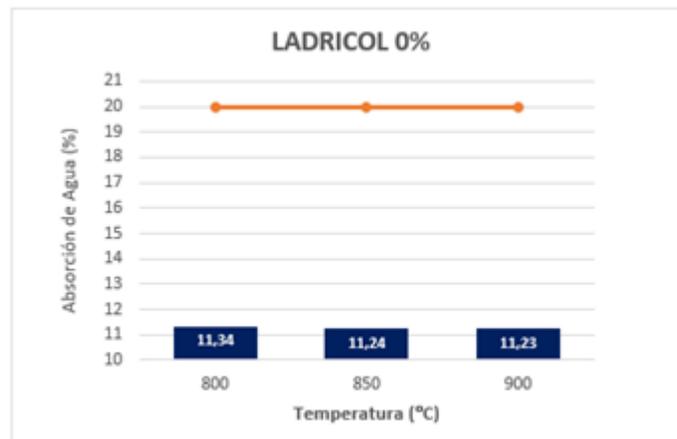


Figura 4-2 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) - LADRICOL 0%. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los valores de referencia mencionados anteriormente (densidad aparente: entre 1,75 g/cm³ y 1,97 g/cm³ y absorción de agua sugerida: máximo 20%), se seleccionó la temperatura de 850 °C ya que esta permitió alcanzar propiedades adecuadas y dentro de los estándares y límites establecidos (densidad de 1,95 g/cm³ y absorción de agua de 11,24%).

Se descartan temperaturas como la de 900 °C, ya que a pesar de tener propiedades muy similares a la de 850 °C, esta temperatura representaría un mayor costo energético para la

fabricación del ladrillo. Por otro lado, y tomando en consideración la relación inversamente proporcional entre absorción de agua y calidad del ladrillo, se descarta la temperatura de 800 °C ya que en este caso el valor de absorción de agua (a pesar de que se encuentra dentro de los límites) es mucho más alta comparada con las demás temperaturas.

4.2.2 Ladrillo con colillas de cigarrillo (LADRICOL 2,5%)

En la figura 4-3, se muestran los gráficos de densidad y absorción de agua para los ladrillos en los que se incorporó un 2,5% de colillas de cigarrillo.

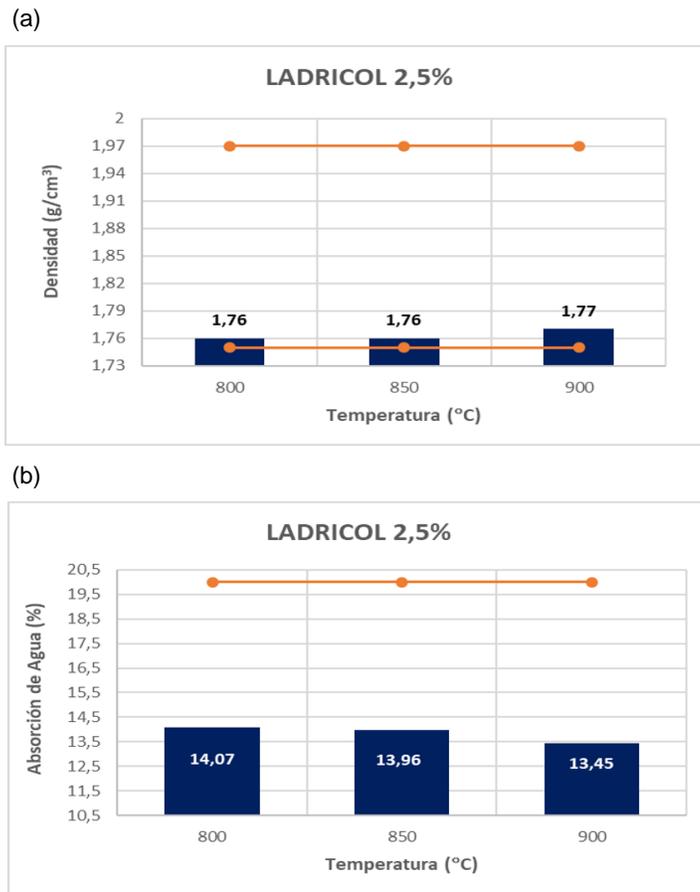


Figura 4-3 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) - LADRICOL 2,5%. Fuente: Elaboración propia.

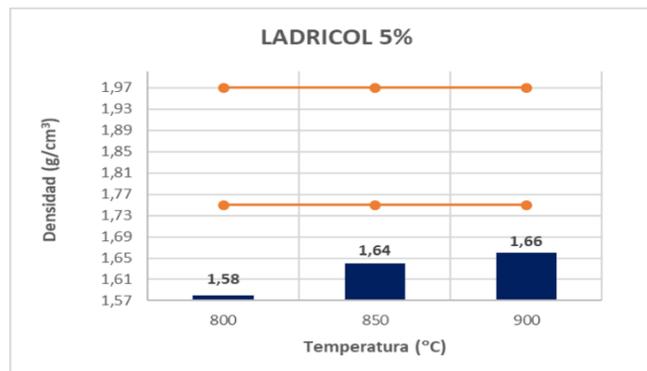
En este caso, se seleccionó de igual manera la temperatura de 850 °C porque permitió alcanzar una densidad de 1,76 g/cm³ y una absorción de agua de 13,96%. Lo anterior, en

concordancia con la absorción de agua para mampostería no estructural tipo M, según norma NTC 4205-2. Como se mencionó en el punto anterior, se busca reducir el costo energético que implica la cocción a 900 °C y en el caso de 800 °C la absorción de agua es más alta.

4.2.3 Ladrillo con colillas de cigarrillo (LADRICOL 5% y 7,5%)

En las figuras 4-4 y 4-5, se muestran los gráficos de densidad y absorción de agua para los ladrillos en los que se incorporó un 5% y un 7,5% de colillas de cigarrillo respectivamente.

(a)



(b)

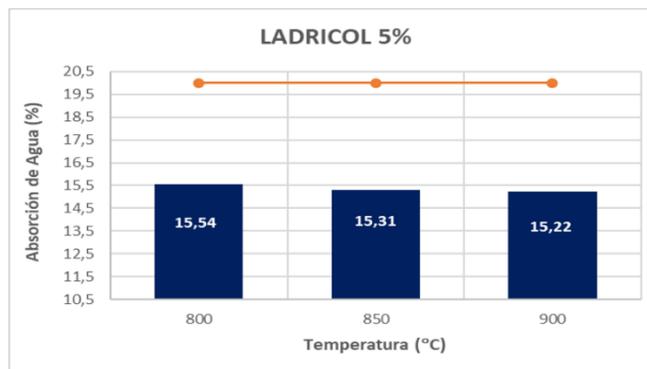
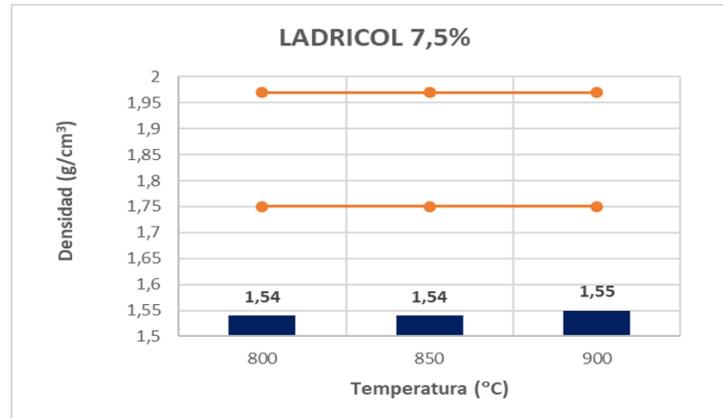


Figura 4-4 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) - LADRICOL 5%. Fuente: Elaboración propia.

(a)



(b)

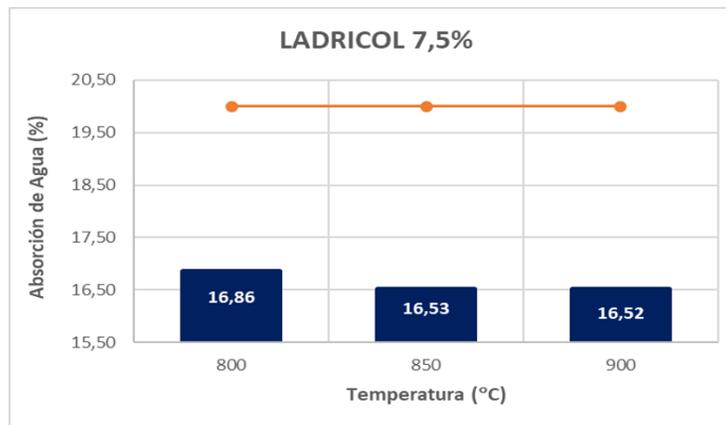


Figura 4-5 Densidad volumétrica vs temperatura de cocción (a) y Absorción de agua vs temperatura de cocción (b) – LADRICOL 7,5%. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de los ladrillos con mayor incorporación de colillas de cigarrillo (LADRICOL 5,0% y LADRICOL 7,5%), se obtuvieron densidades muy bajas que no alcanzan a cumplir con la densidad mínima habitual. En ambos casos las densidades no superan el valor mínimo de 1,75 g/cm³.

De acuerdo con lo mencionado en numerales anteriores, es importante aclarar que la densidad del ladrillo se encuentra relacionada a la resistencia de este (directamente proporcional); razón por la cual, adiciones de colilla de cigarrillo en porcentajes del 5% y 7,5% fueron descartadas.

A partir de los resultados evidenciados anteriormente, las mezclas LADRICOL 0% y 2,5%, cocidas a una temperatura de 850 °C, fueron escogidas como aptas en cumplimiento de los requisitos exigidos para las unidades de mampostería no estructural tipo M; de acuerdo con la norma NTC 4205-2. Sin embargo, es necesario evaluar la resistencia mecánica a compresión de estos elementos para conocer si cumplen con el valor mínimo exigido por esta misma norma (10 MPa por unidad). Además, se evaluó su resistencia en flexión; así como la tasa inicial de absorción.

4.3 Tasa Inicial de Absorción (TIA)

Como parte de las propiedades físicas que se estudiaron, se encuentra la tasa inicial de absorción, la cual mide la cantidad de agua que puede absorber el prototipo durante un minuto y está dada en $g / cm^2 / min$ (Afanador et al., 2012 y Guerrero et al., 2017). Este ensayo se realizó únicamente sobre las mezclas LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5% que fueron cocidas a la temperatura óptima de 850 °C.

Para la determinación de esta propiedad los ladrillos cocidos fueron sometidos al proceso mencionado a continuación, el cual se ejecutó conforme a lo establecido en la NTC 4017:

1. Se determinó el área de la superficie del prototipo que entraría en contacto con el agua, así como la masa de este, previo a la realización del ensayo.
2. En una superficie nivelada, se colocó un recipiente con dos soportes cilíndricos en el fondo, esto con el fin de que el prototipo a ensayar no tocara las paredes del recipiente.
3. Se agregó agua al recipiente, formando una lámina de 3 mm por encima de la parte superior de los soportes.
4. Se dispuso el prototipo de ensayo sobre los soportes cilíndricos, contabilizando 60 segundos desde el momento en el que el prototipo entró en contacto con el agua.
5. Una vez transcurrido el tiempo, se retiró el espécimen del agua, se secó la superficie con un paño húmedo y se pesó nuevamente para determinar la tasa inicial de absorción con base en la siguiente fórmula (ICONTEC, 2005)

$$T.I.A = G/A/min$$

Donde:

T.I.A = tasa inicial de absorción

G = diferencia en gramos entre los pesajes inicial y final por cada minuto, en g/min.

A = área neta en contacto con el agua, en cm².

En la Tabla 4-4 y figura 4-6 se muestran los resultados promedio del ensayo:

Tabla 4-4 Tasa inicial de absorción (TIA) de los ladrillos cocidos a 850 °C

Prototipo	G (g/min)	A (cm ²)	T.I.A (g/cm ² /min)
LADRICOL 0%	6,44	68,73	0,09
LADRICOL 2,5%	13,38	69,63	0,19

Fuente: Elaboración propia.

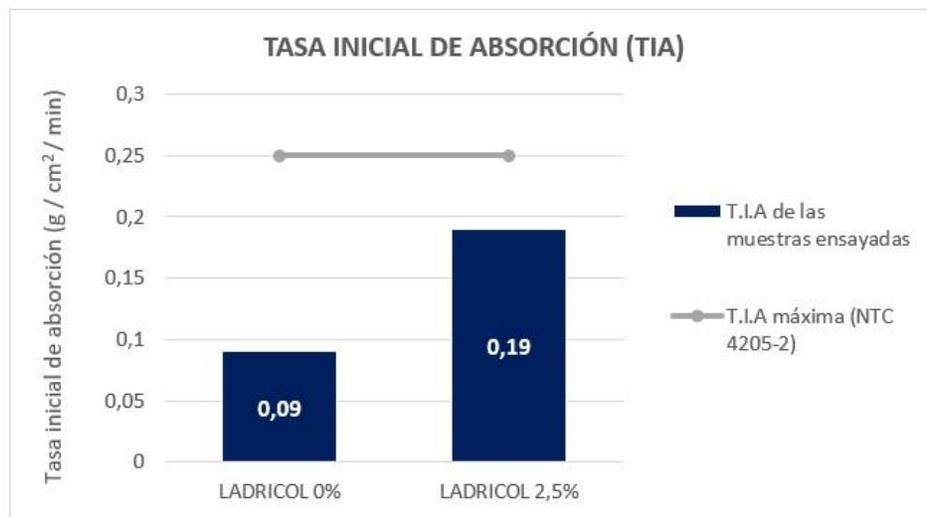


Figura 4-6 Tasa inicial de absorción (TIA). Fuente: Elaboración propia.

Conforme a los resultados, se puede observar que el valor de la T.I.A es mayor para la mezcla en la que se incorporaron colillas de cigarrillo. Sin embargo, este valor no supera los $0,25 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ establecidos en la NTC 4205-2.

Adicionalmente, en el caso de la mezcla LADRICOL 0%, esta se encuentra por debajo de los $0,10 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ lo cual indica que la pieza no requiere ser humedecida previo a su colocación. Para el caso de la mezcla LADRICOL 2,5% su tasa inicial de absorción es de $0,19 \text{ g/cm}^2/\text{min}$, por lo que se recomienda un humedecimiento previo de la pieza durante 3 a 5 min (ICONTEC, 2009).

4.4 Determinación de las Propiedades Mecánicas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el numeral anterior, se fabricaron 10 probetas de cada una de las siguientes mezclas: LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5% a una temperatura de $850 \text{ }^\circ\text{C}$. Lo anterior, con el fin de evaluar las propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión) del producto terminado, y determinar la factibilidad de su elaboración a nivel de calidad y cumplimiento con lo establecido en la NTC 4205-2.

4.4.1 Resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión del producto terminado, este fue previamente refrentado (ver figura 4-7). Lo anterior, con el fin de garantizar que la superficie de las probetas se encontrara lisa, hacer paralelas las caras de carga y lograr que esta última se distribuya uniformemente en el prototipo a ensayar (Sanchez y Mejía, 2009). Adicionalmente, el refrentado permite que las probetas puedan deformarse lateralmente (relación de Poisson) y no se generen estados triaxiales de esfuerzo.

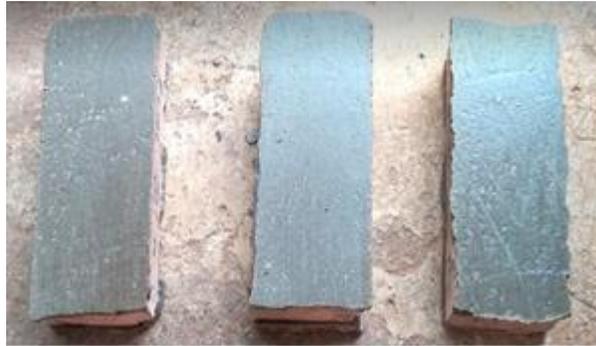


Figura 4-7 Ladrillos refrentados. Fuente: Elaboración propia.

Una vez refrentados, los especímenes fueron sometidos al ensayo de compresión utilizando una máquina de prueba universal Shimadzu, mediante la cual se determinó la carga de ruptura ejercida (ver figura 4-8). El ensayo se realizó a una velocidad de carga de 35 kN/min.



Figura 4-8 Prueba de compresión máquina de prueba Shimadzu. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la determinación de la resistencia a la compresión de cada espécimen, se realizó el cálculo de ésta a partir de la carga de ruptura y el área del prototipo, tal como se indica en la NTC 4017 y como se muestra a continuación:

$$C = \frac{W}{A}$$

En donde

C= Resistencia a la compresión, en MPa

W= Carga máxima de ruptura, en N

A= Área del prototipo, en mm²

En la Tabla 4-5, se muestran los resultados obtenidos como promedio de tres probetas ensayadas en cada mezcla.

Tabla 4-5 Resistencia a compresión promedio, de los ladrillos cocidos a 850 °C

Mezcla	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistencia a compresión (MPa)
LADRICOL 0%	7.029,42	133.910,50	19,03 ± 4,33
LADRICOL 2,5%	7.092,93	133.690,50	18,85 ± 1,10

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4-5 se puede observar que el promedio de la resistencia a la compresión, para las mezclas LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5%, supera los 18 MPa. Lo anterior en cumplimiento a lo establecido en la NTC 4205-2, la cual establece una resistencia mínima a compresión para mampostería no estructural tipo M, de 10 MPa. Adicionalmente, este resultado permite dar cumplimiento a lo establecido en el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10 título D, Tabla D.10.3-1) donde se establece una resistencia mínima a compresión de 15 MPa en toletes de arcilla para uso en muros de mampostería confinada, los cuales tienen un uso muy extendido en el país.

4.4.2 Resistencia a la flexión (módulo de rotura)

Para calcular la resistencia a la flexión de las mezclas, estas fueron sometidas al ensayo respectivo utilizando una máquina de prueba universal Shimadzu, mediante la cual se determinó la carga máxima ejercida (ver figura 4-9).



Figura 4-9 Prueba de flexión máquina de prueba Shimadzu. Fuente: Elaboración propia.

El ensayo se realizó a una velocidad de 1,3 mm/min y el módulo de rotura de cada espécimen fue calculado conforme a lo establecido en la norma técnica colombiana NTC 4017, tal como se describe a continuación:

$$MR = \frac{3W \left(\frac{L}{2} - x \right)}{bd^2}$$

En donde

MOR= Módulo de rotura o resistencia a flexión, en MPa

W= Carga máxima, en N

L= Distancia entre los soportes de apoyo (medida centro a centro), en mm.

X= Distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, en mm.

b= Ancho neto (distancia de cara a cara) de la muestra en el plano de falla, en mm.

d= Profundidad, distancia desde la cara superior de la muestra hasta el plano de apoyo, en mm.

La figura 4-10 contiene los diagramas para la deducción de la fórmula anteriormente descrita, y en la figura 4-11 se muestran las fotos de los prototipos una vez realizado el respectivo ensayo de flexión.

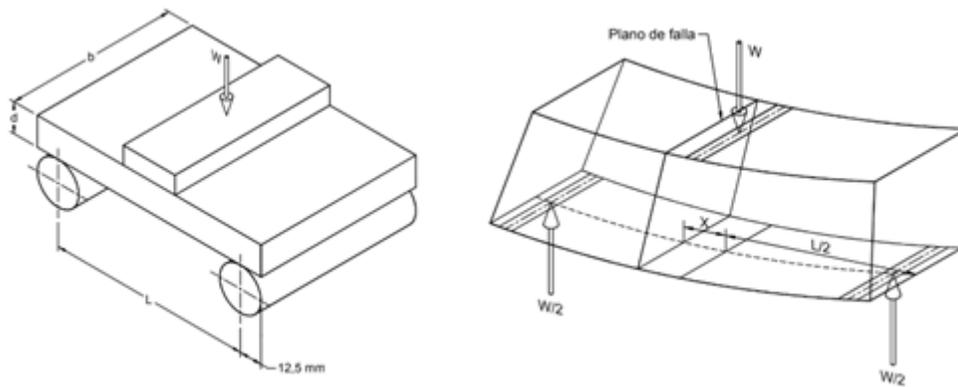


Figura 4-10 Diagrama del montaje y cálculo del módulo de rotura. Fuente: ICONTEC, 2005

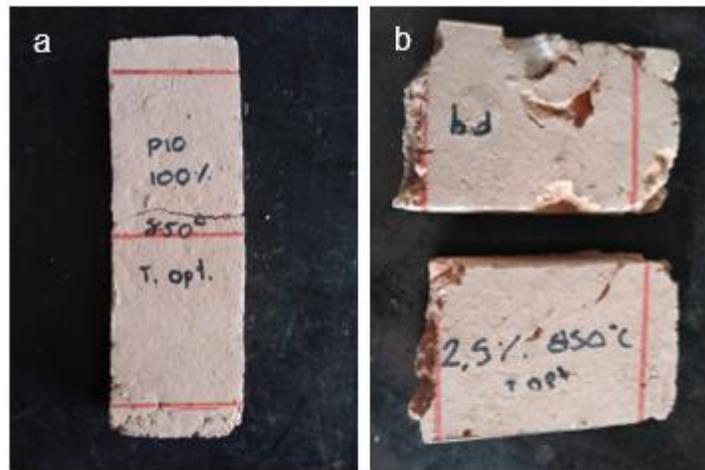


Figura 4-11 Ensayo de flexión LADRICOL 0% (a) y LADRICOL 2,5% (b).

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-6 se muestra el resultado de la resistencia a la flexión, el cual corresponde al promedio de tres probetas ensayadas para cada una de las mezclas.

Tabla 4-6 Resistencia a la flexión promedio de los ladrillos cocidos a 850 °C

Prototipo	Carga (N)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo de rotura con respecto a la resistencia a compresión
LADRICOL 0%	584,34	3,39 ± 0,24	18%
LADRICOL 2,5%	271,14	1,28 ± 0,24	7%

Fuente: Elaboración propia

Conforme a los resultados anteriores, se puede observar que la resistencia a la flexión promedio de los prototipos es superior a 3 MPa, para la mezcla LADRICOL 0%, y superior a 1 MPa, para la mezcla LADRICOL 2,5%. Adicionalmente, estos resultados corresponden al 18 y 7%, respectivamente, de la resistencia a compresión; lo anterior, en conformidad a lo que se ha venido adoptando y establecido por autores como Augusto y Legarda (2011) y Afanador et al. (2012), quienes mencionan que el módulo de rotura, generalmente, se encuentra cerca del 10 al 20% de la resistencia a compresión.

4.5 Análisis de las Propiedades Mecánicas

A continuación, se muestran los gráficos de resistencia a compresión y flexión de los prototipos ensayados para cada una de las mezclas (LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5%).

4.5.1 Resistencia a la compresión

En la figura 4-12 se graficó la resistencia a compresión promedio, de las mezclas LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5%.

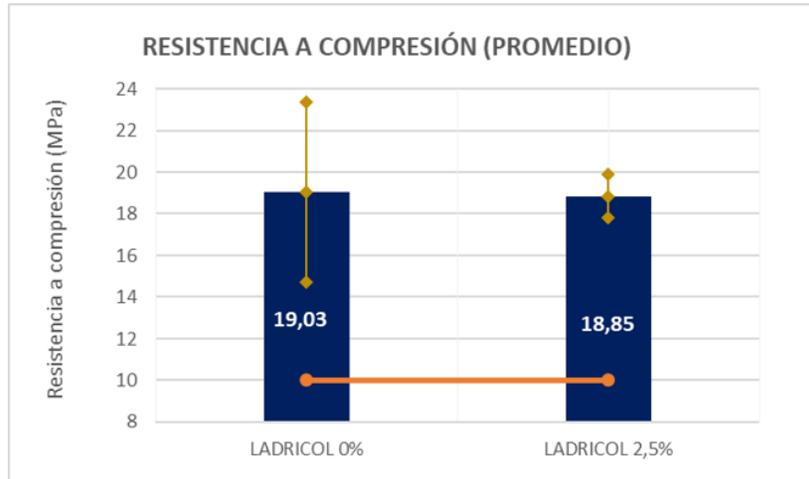


Figura 4-12 Resistencia a compresión (promedio). Fuente: Elaboración propia

Se evidenció una leve reducción en la resistencia a compresión de los ladrillos que incorporaron colillas de cigarrillo (LADRICOL 2,5%), la cual, como se mencionó durante el análisis de las propiedades físicas, se debe al incremento en la porosidad al interior del ladrillo cocido. Sin embargo, en la figura 4-12 se puede observar que, para ambos casos, la resistencia es superior a los 10 MPa exigidos en la norma NTC 4205-2.

Por lo anterior, dichas mezclas podrían considerarse como aptas para la realización de ladrillos de arcilla para mampostería no estructural tipo M.

4.5.2 Resistencia a la flexión (módulo de rotura)

En la figura 4-13 se detalla la resistencia a la flexión promedio de los prototipos ensayados.

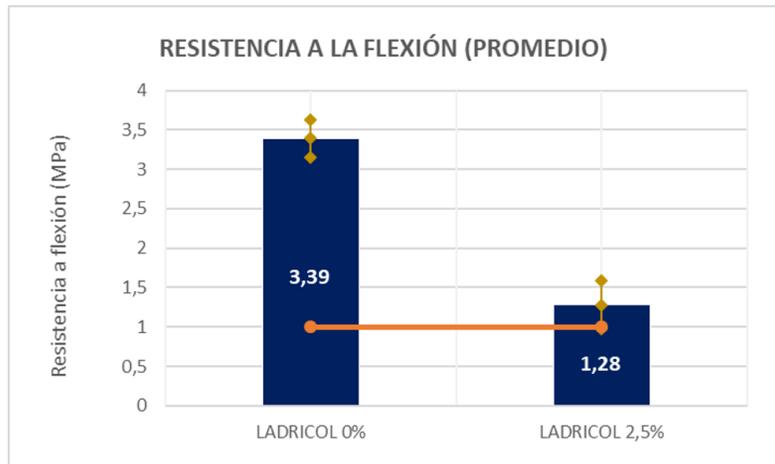


Figura 4-13 Resistencia a flexión (promedio). Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el módulo de rotura generalmente se encuentra cerca del 10% al 20% de la resistencia a la compresión, y tomando a consideración que la resistencia a la compresión mínima exigida por la NTC 4205-2 es de 10 MPa, se puede así establecer una resistencia mínima a la flexión de 1 MPa (Augusto y Legarda, 2011 y Afanador et al., 2012). Por lo anterior, y conforme a los resultados de la Tabla 4-6 y figura 4-13, se concluye que los prototipos LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5% cumplen con el objetivo de resistencia mínima a la flexión, pues en ambos casos estas superan 1,0 MPa.

Adicionalmente, al comparar los resultados de los ensayos de flexión con los de compresión, se puede observar que la relación entre estas dos medidas en los prototipos ensayados es del 7% y 18% para LADRICOL 2,5 y LADRICOL 0% respectivamente, lo que se encuentra acorde a lo mencionado por estos autores.

Vale la pena mencionar que, se evidencia una leve reducción en las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos que incorporaron colillas de cigarrillo, como causa del incremento en la porosidad al interior de este; dicha porosidad, aumenta en proporción al porcentaje de colillas adicionadas (ver figura 4-14).

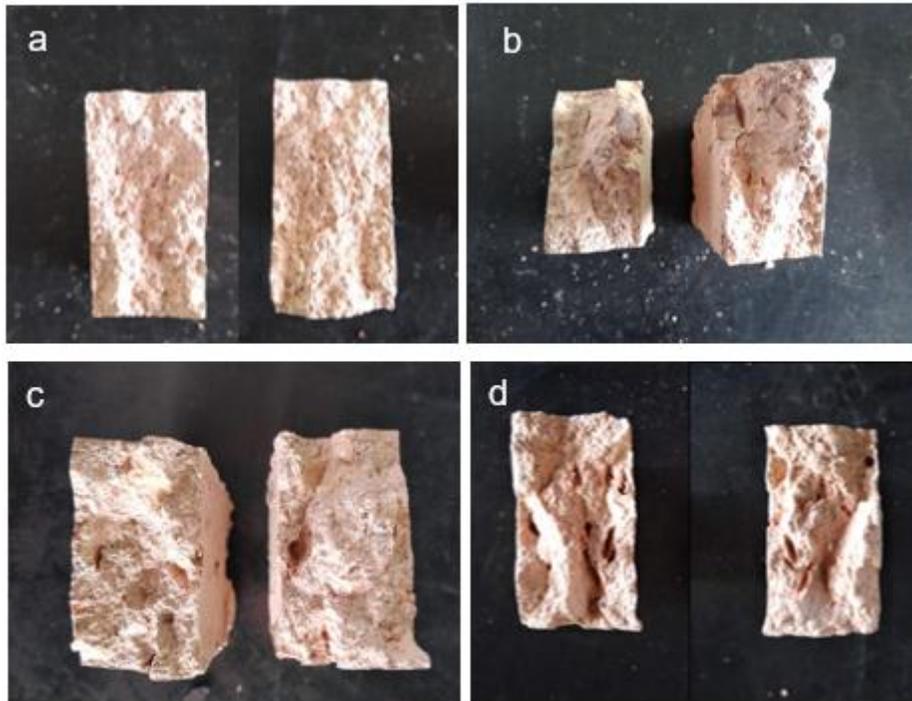


Figura 4-14 LADRICOL 0% (a), LADRICOL 2,5% (b), LADRICOL 5% (c) y LADRICOL 7,5% (d).
Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior, acorde con la investigación realizada por Mohajerani et al. (2016) quienes evidenciaron que el incremento en la cantidad de colillas de cigarrillo incorporadas en la fabricación del ladrillo ocasiona la formación de grietas y poros al interior del ladrillo cocido.

5 Capítulo IV. Impactos Ambientales

5.1 Ladrillo Convencional

La fabricación del ladrillo convencional genera una serie de impactos asociados a su proceso productivo. Algunos autores como Moreno y Soler (2003) y Candori (2013), han identificado impactos socioambientales que pueden ser positivos o negativos. Dentro de los impactos positivos más importantes y reconocidos a nivel social, se encuentra la generación de empleo; sin embargo, a nivel ambiental se considera que esta industria genera impactos y afectación negativa sobre los recursos naturales como el agua, el aire y el suelo (Moreno y Soler, 2003; Candori, 2013; Alarcón y Burgos, 2015 y Lizcano, 2017).

Teniendo en cuenta las actividades básicas que conforman el proceso de fabricación del ladrillo convencional, se identificaron algunos aspectos e impactos ambientales asociados a dichas actividades, los cuales se encuentran relacionados en el Anexo 3.

Considerando las evaluaciones de impacto realizadas por Echabautez (2016) y Lizcano (2017), en las que se utilizaron métodos cualitativos como la matriz de Leopold y el método EMP o Arboleda, se ha identificado que la contaminación atmosférica es el impacto negativo más relevante debido a la emisión de gases contaminantes, especialmente, durante la cocción del ladrillo.

Para la determinación del impacto total, Echabautez (2016) utilizó los parámetros de valoración cualitativa de la matriz de Leopold, donde se tienen en cuenta criterios como la extensión, intensidad, desarrollo, reversibilidad, importancia y probabilidad de ocurrencia de cada uno de los impactos. Con estos parámetros realizó el respectivo cálculo encontrando la contaminación atmosférica como el impacto más significativo de todos; seguido a este se encontró la afectación a la flora y fauna o afectación del paisaje, que se da durante la extracción de la materia prima (Echabautez, 2016).

Esto mismo fue identificado por Lizcano (2017) quien, mediante el método Arboleda, clasificó la emisión de gases contaminantes y la contaminación atmosférica con una importancia ambiental “muy significativa”.

5.2 Ladrillo con Colillas de Cigarrillo

Conforme a lo mencionado, la incorporación de colillas de cigarrillo en la fabricación de ladrillos, permite enfrentar dos problemas fundamentales: el primero de ellos relacionado con la emisión de gases tóxicos durante la cocción del ladrillo y el segundo, relacionado con la contaminación que generan las colillas de cigarrillo arrojadas al suelo, las cuales, como ya se mencionó, generan afectaciones importantes al medio ambiente debido a sus componentes y al tiempo que tardan en degradarse (Mohajerani et al., 2016).

Al utilizar las colillas de cigarrillo como materia prima en la fabricación del ladrillo, se generan aspectos e impactos ambientales adicionales los cuales fueron identificados y se encuentran descritos en el Anexo 4.

Una vez identificados los aspectos en el Anexo 4, se puede observar que, con el uso de colillas de cigarrillo, se generan una serie de impactos ambientales positivos que anteriormente no existían, dichos impactos incluyen la mejora en la calidad del suelo y el agua ya que se estaría evitando la absorción de sustancias tóxicas. Adicionalmente, se mejora la calidad visual del paisaje y se reduce el consumo involuntario de estos residuos por los animales, evitando así, afectaciones en la flora y fauna a causa de estas sustancias (Ahrendt, 2018 y Mohajerani et al., 2016).

Adicionalmente, pruebas de lixiviación realizadas por Mohajerani et al. (2016), evidenciaron que el uso de colillas de cigarrillo en la fabricación del ladrillo no representa riesgo de contaminación por liberación de metales pesados puesto que las concentraciones de estos componentes, identificadas durante las pruebas, no exceden en ningún caso los umbrales regulatorios establecidos e incluso en la mayoría de los casos. Dichas concentraciones fueron menores en los ladrillos que incorporaron 2,5% de colillas de cigarrillo que, en los ladrillos convencionales, tal es el caso de metales como el arsénico, cromo, plomo, zinc y níquel.

Los patrones de difracción de los ladrillos convencionales (LADRICOL 0%) y aquellos con incorporación de 2,5% de colilla de cigarrillo (LADRICOL 2,5%) permitieron evidenciar que no existen fases distintas entre ellos (ver figura 5-1).

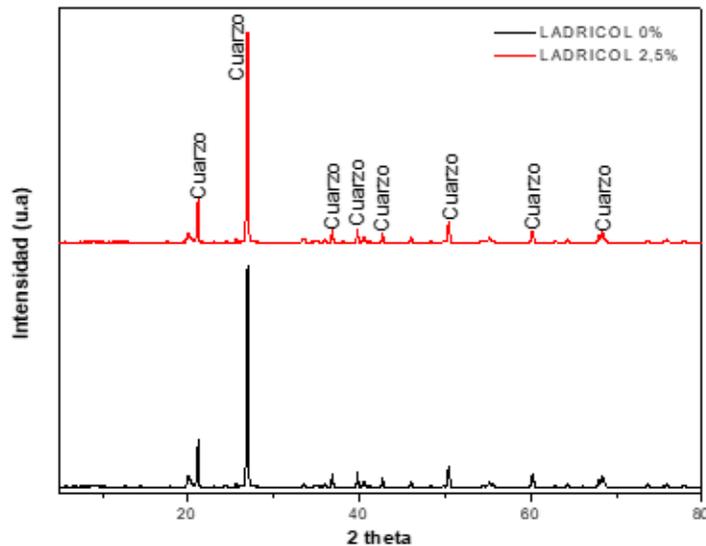


Figura 5-1 Patrones de difracción de Rayos X de LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5%

Se observa como fase mineralógica presente el cuarzo (SiO_2) en ángulos $21,1794^\circ$; $26,9496^\circ$; $36,8383^\circ$; $39,7578^\circ$; $42,7379^\circ$; $50,4242^\circ$; $60,2280^\circ$ y $68,4041^\circ$ (código de referencia 01-083-2469 y 00-003-0427), el cual proviene de la materia prima arcilla como se evidenció en la figura 2-5.

6 Capítulo V. Costos Energéticos

6.1 Ladrillo convencional

Como se mencionó en el capítulo anterior, el consumo energético y la quema de combustible que se da durante el proceso de cocción es uno de los aspectos ambientales más importantes generados durante la fabricación del ladrillo; estos aspectos, generan afectaciones importantes al medio ambiente contaminando la atmósfera (Zhang, 2013; Abdul y Mohajerani, 2015).

Como parte del propósito de aumentar la eficiencia en el uso de energía, la Unidad de Planeación Minero-Energética (2001), realizó un estudio para determinar el consumo energético de las industrias ladrilleras, tanto en el área eléctrica como térmica. Para esto,

seleccionó una muestra estratificada de 27 fábricas colombianas dentro de las cuales se encontró una de las empresas más tecnificadas, como la Ladrillera Santa Fe.

En cuanto a la energía térmica utilizada durante el proceso de cocción, dicho estudio arrojó un consumo nacional promedio de 2.405 MJ por cada tonelada de ladrillo producida (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2001). Con esta información y con el valor promedio del kWh para el sector no residencial, se determinó el costo energético asociado a la cocción del ladrillo; los resultados se relacionan en la tabla 6-1.

Tabla 6-1 Costo energético asociado a la cocción del ladrillo convencional.

Consumo energético MJ		Consumo energético kWh		Valor promedio del kWh ^c	Costo energético \$	
ton	kg	ton	kg		ton	kg
2.405 ^a	7,22 ^b	668,0560	2,00 ^b	560,20	\$374.245	\$1.123 ^b

Nota.

a Consumo promedio nacional de energía térmica en la industria ladrillera (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2001).

b Para determinar el consumo energético (tanto en MJ/kg como en kWh/kg), así como el costo energético (en \$/kg), por cada unidad de ladrillo, se tomó como referencia el peso del ladrillo Prensado Macizo Terracota (3 kg/und) (Ladrillera Santafé, 2018). Cabe resaltar para esta investigación se usaron ladrillos macizos; sin embargo, la mayor parte de productos tienen perforaciones verticales y por tanto los pesos de las unidades cerámicas son menores a 3 kg.

c El valor promedio del kWh se estableció tomando en cuenta las tarifas de energía reguladas por la comisión de regulación de energía y gas para el sector no residencial.

6.2 Ladrillo con Colillas de Cigarrillo

Conforme a la investigación realizada por Mohajerani et al. (2016), el uso de este residuo da lugar a un ahorro del 31% al 58% de la energía consumida durante el proceso de cocción; porcentaje que depende de la cantidad de colillas de cigarrillo incorporadas, pues entre mayor sea este, mayor será el ahorro energético. Lo anterior, se debe fundamentalmente al acetato de celulosa que se encuentra presente en las colillas de cigarrillo, el cual, al ser materia orgánica y mezclarse con la arcilla, contribuye positivamente en el proceso de cocción, permitiendo la concentración de calor y reduciendo así la cantidad de energía necesaria para la cocción del ladrillo (Jackson y Dhir, 1996 y Mohajerani et al., 2016). Para la determinación del ahorro de energía cuando se incorporan colillas de cigarrillo, se hizo uso de la ecuación mencionada por Mohajerani et al. (2016), tal como se muestra a continuación:

$$Q_1 = q \cdot m_1$$
$$Q_2 = q \cdot m_2 - CV \cdot m_3$$
$$\Delta E(\%) = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

Donde:

q = consumo energético en LADRICOL 0% (2,405 MJ/kg)

m_1 = masa de arcilla en LADRICOL 0% (kg)

m_2 = masa de arcilla en LADRICOL 2,5% (kg)

m_3 = masa de colillas de cigarrillo en LADRICOL 2,5% (kg)

CV = valor calorífico del acetato de celulosa (19 MJ kg⁻¹)

$\Delta E(\%)$ = ahorro energético

Los resultados se muestran en la tabla 6-2:

Tabla 6-2 Costo energético asociado a la cocción del ladrillo con colillas de cigarrillo (LADRICOL 2,5%)

Consumo energético	Masa de arcilla LADRICOL 0% y 2,5%	Masa de colillas de cigarrillo	Energía usada en LADRICOL 0%	Energía usada en LADRICOL 2,5%	% de ahorro energético
q (MJ)	m_1 y m_2 (kg)	m_3 (kg)	Q_1 (MJ)	Q_2 (MJ)	ΔE (%)
2,405	0,38091	0,0095	0,9160	0,7351	19,75

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que, además de los costos energéticos, se deben evaluar las repercusiones económicas que conlleva implementar un sistema para almacenar, seleccionar, triturar y dosificar las colillas de cigarrillo en el sistema productivo. Estas repercusiones podrán ser parte u objeto de otra investigación, en donde se puedan evaluar la totalidad de los costos y beneficios económicos asociados a la incorporación de colillas de cigarrillo en la fabricación de ladrillos.

7 Conclusiones y Recomendaciones

Para determinar la factibilidad del uso de las colillas de cigarrillo como materia prima en la fabricación de ladrillos, se evaluaron algunos aspectos como la calidad del ladrillo (propiedades físicas y mecánicas), los impactos ambientales que se generan en su fabricación y los costos energéticos asociados a la cocción del ladrillo. Con base en lo anterior se pudo concluir lo siguiente:

- La caracterización de las propiedades físicas y mecánicas (tanto de los ladrillos convencionales como de aquellos en los que se incorporaron colillas de cigarrillo), generó como resultado una temperatura óptima de cocción de 850 °C, permitiendo alcanzar una densidad y absorción de agua adecuada, y dentro de los estándares establecidos, tal es el caso de las mezclas LADRICOL 0% y LADRICOL 2,5%, en las cuales se obtuvo una densidad de 1,95 g/cm³ y 1,76 g/cm³, y una absorción de agua de 11,24% y 13,96%; respectivamente. Cumpliendo, dicha absorción, con lo establecido en la NTC 4205-2.

- Durante las pruebas de resistencia, se pudo observar que estas dos mezclas tienen una resistencia a compresión superior a los 10 MPa exigidos en la NTC 4205-2 y una resistencia a la flexión superior a 1 MPa. En cuanto al valor de la tasa inicial de absorción, se pudo observar que esta es mayor para la mezcla en la que se incorporaron colillas de cigarrillo, sin embargo, el resultado (0,19 g/cm²/min) no supera los 0,25 g/cm²/min establecidos como límite superior en la NTC 4205-2. Por lo anterior, dichas mezclas pueden ser consideradas como aptas para la realización de mampostería no estructural tipo M.
- Respecto a la incorporación de colillas de cigarrillo en porcentajes del 5% y 7,5%, los resultados no fueron satisfactorios, ya que la incorporación de estas cantidades no permitió obtener ladrillos con el valor mínimo de densidad sugerido (1,75 g/cm³).
- La identificación de impactos ambientales permitió evidenciar que el uso de colillas de cigarrillo en la fabricación del ladrillo no solo es viable al cumplir con las propiedades físicas y mecánicas que se requieren, sino que además genera una serie de impactos positivos como son la mejora en la calidad del suelo y el agua, la reducción del riesgo de afectación en la flora y fauna a causa de estas sustancias y, la reducción de energía consumida durante el proceso de cocción debido al acetato de celulosa que permite la concentración de calor, dando lugar a un ahorro del 19,75% de la energía consumida con la incorporación de 2,5% de colillas de cigarrillo.

Por otro lado, se recomienda para futuras investigaciones:

- Evaluar las repercusiones económicas que conlleva implementar un sistema para almacenar, seleccionar, triturar y dosificar las colillas de cigarrillo en el sistema productivo. Lo anterior, como parte de una evaluación total de costos y beneficios, asociados a la incorporación de colillas de cigarrillo en la fabricación del ladrillo.

- Realizar pruebas de lixiviación a los ladrillos que incorporan colillas de cigarrillo, en aras a investigar niveles de posibles lixiviados de metales pesados como As, Cr, Cd y Ni, atrapados en los filtros de las colillas de cigarrillo.
- Evaluar otras propiedades que no necesariamente se encuentran relacionadas en las normas obligatorias, pero que resultan ser necesarias en el ladrillo. Por ejemplo, la adherencia de éste al mortero de pega utilizado, propiedades acústicas y térmicas, entre otras.
- Evaluar si las propiedades físicas y mecánicas obtenidas en el ladrillo con 2,5% de colillas de cigarrillo, permite cumplir con lo requerido en la normatividad para otro tipo de mampostería más utilizado a nivel nacional.

Bibliografía

- Abdul Kadir, A., Mohajerani, A., Roddick, F., & Buckeridge, J. (2015). Effect of heating rate on gas emissions and properties of fired clay bricks and fired clay bricks incorporated with cigarette butts. *Applied Clay Science*, 104, 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.12.005>.
- Afanador García, N., Guerrero Gómez, G., & Monroy Sepúlveda, R. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 22-1, 43 - 58.
- Ahrendt, C. (06 de 11 de 2018). *La amenaza de las colillas de cigarrillo*. Recuperado el 19 de 09 de 2019, de <https://www.endemico.org/actualidad/la-amenaza-las-colillas-cigarro/>
- Alarcón, S., & Burgos, F. P. (2015). *Plan de manejo ambiental para la ladrillera El Santuario*. Tesis de grado en Tecnólogo en Gestión Ambiental y Servicios Públicos. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá D.C.
- Alvarado, G., & Montaña, N. (2012). *Desarrollo del arquetipo del bio ladrillo "Biobock" a partir de cáscara de arroz mezclada con plástico y una mezcla de aglutinante*. Tesis de pregrado en Ingeniería Industrial. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial. Bogotá D.C.
- American Cancer Society & Vital Strategies. (s.f.). *Colombia Tobacco Atlas*. Obtenido de <https://tobaccoatlas.org/country/colombia/>
- Augusto, J., & Legarda, P. (2011). *Correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión del concreto fabricado con materiales pétreos de la mina "Las terrazas" y cantera "La victoria" del municipio de pasto*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. San Juan de Pasto.
- Barranzuela, J. (2014). *Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región Piura*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura. Perú.
- Betancourt, D., Díaz, Y., & Martirena, F. (2013). Influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: etapas de secado y cocción. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*. Vol 28 N° 2.
- Bonanomi, G., Incerti, G., Cesarano, G., Gaglione, S. A., & Lanzotti, V. (2015). Cigarette Butt Decomposition and Associated Chemical Changes Assessed by ¹³C CPMAS NMR. *PLoS ONE* 10(1): e0117393. doi:10.1371/journal.pone.0117393

- Candori, M. (2013). Impactos socioambientales por la fabricación de ladrillos en Huancayo. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 3(2). <https://doi.org/10.18259/acs.2013015>
- Cañas, G. (01 de Octubre de 2015). *Tirar una colilla en la calle en París se multa desde hoy con 68 euros*. Recuperado el 20 de octubre de 2016, de https://elpais.com/internacional/2015/10/01/actualidad/1443695791_672329.html
- Castañeda Espitia, S. (2011). Transformación de las colillas de cigarrillo a medios creadores de vida, para mitigar el impacto ambiental. Tesis de pregrado en Diseñador Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Arquitectura y Diseño. Programa Académico de Diseño Industrial. Bogotá D.C.
- De Granada-Orive, J. I., Girón-Matute, W., & López Yepes, L. (2016). Cigarette butts: The collateral effects of cigarettes on humans, animals and the environment. *Arch Bronconeumol*. 2016;52:285.
- Delgado, M. C. (2015). Recursos naturales: Arcillas de uso cerámico, la sepiolita. Trabajo fin de grado en Química. Universidad de Jaén. Facultad de Ciencias Experimentales. Programa Académico de Química.
- Di Marco, R. O. (2017). Ladrillos con adición de PET. Una solución amigable para núcleos rurales del municipio del Socorro. Universidad Libre de Colombia. Bogotá.
- Duque, G. (2015). Crean ladrillo a partir de ceniza. Portafolio. Recuperado el 22 de marzo de 2020, de <https://www.portafolio.co/tendencias/crean-ladrillo-partir-ceniza-52026>
- Echabautez, P. (2016). Las industrias ladrilleras y su impacto socioambiental en la localidad de Nieveria - Huachipa del año 2016. Trabajo de investigación. Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú.
- Ecoportal. (s.f.). Impacto de las colillas de cigarrillo en el ambiente. Recuperado el 19 de 09 de 2019, de <https://www.ecoportal.net/temas-especiales/impacto-de-las-colillas-de-cigarrillos-en-el-ambiente/>
- Fernández Muerza, A. (07 de Febrero de 2011). Tabaco: así daña al medio ambiente. Recuperado el 06 de octubre de 2016, de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2011/02/07/198755.php
- Fuentes Molina, N., Isenia León, S., & Ascencio Mendoza, J. (2017). Biosólidos de tratamiento de aguas residuales domésticas, como adiciones en la elaboración de ladrillos cerámicos. *Producción + Limpia*. 92-102. DOI: 10.22507/pml.v12n1a8

- García, C. P. (1997). Algunos análisis físico - químicos para la identificación de los minerales componentes de una arcilla. Trabajo de promoción. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia.
- Gobierno Nacional de la Republica de Colombia. (2011). Estudio Nacional de Consumo de Sustancias Psicoactivas en Población Escolar. Colombia.
- Gobierno Nacional de la Republica de Colombia. (2014). Estudio Nacional de Consumo de Sustancias Psicoactivas en Colombia 2013. Bogotá D.C.
- Gonzalez Clemente, O. J., Bezada Díaz, M., Millán Boadas, Z. D., & Carrera, J. M. (21 de 01 de 2014). Caracterización de las arenas y arcillas minerales de los depósitos de canal y planicie de inundación del río portuguesa, Venezuela. *Investigaciones geográficas*, 18-32. doi:dx.doi.org/10.14350/rig.35291
- Green, A. R., Putschew, A., & Nehls, T. (2014). Littered cigarette butts as a source of nicotine in urban waters. *Journal of Hydrology*, 519, 3466-3474. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.046>.
- Guerrero G, G., Espinel B, E., & Sánchez A, H. (2017). Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Revista Tecnura*, 118-131. doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a091
- Guevara Lizano, A. (Noviembre de 2010). Sistema para el adecuado desecho de colillas de cigarrillo. Tesis de pregrado en Ingeniería en Diseño Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial. Cartago.
- Healton, C. G., Cummings, M. K., O'Connor, R. J., & Novotny, T. E. (2011). Butt really? The environmental impact of cigarettes. Recuperado el 03 de marzo de 2019, de <https://tobaccocontrol.nmj.com>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (30 de 11 de 2005). NTC 4017 Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (18 de 11 de 2009). NTC 4205-1 unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 1: Mampostería estructural. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (18 de 11 de 2019). NTC 4205-2 unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 2: Mampostería no estructural.

- Isel, V., Sánchez, J., & Chaparro, A. (19 de Julio de 2017). Evaluación de arcillas caoliniticas-illíticas provenientes de la formación guayabo del Área Metropolitana de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017009>
- Jackson, N., & Dhir, R. (1996). *Civil engineering materials* (Fifth edition ed.). Palgrave.
- Joshi, R., Achari, G., Horfield, D., & Nagaraj, T. (1994). Effect of heat treatment on strenght of clays, 120(6); 1080-1088
- Ladrillera Santafé. (16 de 05 de 2018). Ladrillera Santafé. Obtenido de Ficha Técnica Ladrillo Prensado Macizo: <https://www.santafe.com.co/wp-content/uploads/2018/08/FT-LPR.pdf>
- Lee, M., Kim, G.-P., Song, H., Park, S., & Jongheop, Y. (2014). Preparation of energy storage material derived from a used cigarette filter for a supercapacitor electrode. IOP Publishing. doi:10.1088/0957-4484/25/34/345601
- Lee, W., & Lee, C. C. (2014). Developmental toxicity of cigarette butts – An underdeveloped issue. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 362-368. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.018>
- Linares, J., Huertas, F., & Capel, J. (1983). La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 8, 479-490.
- Lizcano, A. (2017). Diagnóstico sobre la incidencia de la actividad ladrillera en el territorio, a partir de sus impactos ambientales, en Sogamoso - Colombia. Bogotá D.C.
- Lozano Ortiz, M. M., & González Peláez, S. (2016). Uso de residuos cerámicos en la producción de ladrillos de arcilla cocidos del sector alfarero de candelaria. Tesis de pregrado en Ingeniería Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial. Santiago de Cali. Colombia.
- Lozano Rivas, W. A., Bonilla C., R. A., Salinas C., A., Flórez R., L., Campos V., M. P., Manrique R., A., & Jaimes R., Á. (Noviembre de 2015). Quantification of Cigarette Butts Littered to the Streets and Sidewalks in Dance Clubs and Pub Areas in Bogota D.C., Colombia. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, 69-78.
- Martínez Amariz, A. D., & Corte Jiménez, M. L. (2014). Diseño y Fabricación de Ladrillo Reutilizando Materiales a Base de PET. *INGE CUC*, 10, 76 - 80.

- Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). Socialización del informe final de evaluación de necesidades para la ampliación del Convenio Marco de Control del Tabaco cifras oficiales para Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2009). Encuesta Nacional de Salud 2007. Bogotá D.C.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2012). Generación más: somos más sin tabaco. Recuperado el 24 de Febrero de 2017, de <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Generaci%C3%B3n%20m%C3%A1s%20somos%20m%C3%A1s%20sin%20tabaco.aspx>
- Mohajerani, A., Abdul Kadir, A., & Larobina, L. (2016). A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste Management*, 52, 228-244. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.012>
- Monzonis Marco, J., & González Romero, J. (2011). Estudio para la minimización del residuo de colillas de tabaco y su posible reutilización. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Valencia. Gandia.
- Moreno, P., & Soler, F. I. (2003). Estimación de riesgos ambientales causados por la industria ladrillera. Recuperado el 14 de 09 de 2019, de BVSDE desarrollo sostenible : <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/moreno.pdf>
- Motoche, J. (2014). Contracción lineal. Universidad Técnica de Machala. Facultad de Ingeniería Civil.
- Novotny, T. E., & Slaughter, E. (2014). Tobacco Product Waste: An Environmental Approach to Reduce Tobacco Consumption. 1:208-2016. DOI 10.1007/s40572-014-0016-x
- Organización Mundial de la Salud. (09 de marzo de 2018). Tabaco. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/tobacco>
- Organización Mundial de la Salud. (s.f.). OMS Las 10 principales causas de defunción. Recuperado el 18 de septiembre de 2016, de <https://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/es/index2.html>
- Pacalet, C. (2017 de octubre de 2015). Mégot de cigarette jeté à terre, 68 € d'amende, la Ville d'Auxerre pourrait-elle imiter Paris? Recuperado el 20 de octubre de 2016, de https://www.lyonne.fr/auxerre/vie-pratique-consommation/environnement/2015/10/17/megot-de-cigarette-jete-a-terre-68-d-amende-la-ville-d-auxerre-pourrait-elle-imiter-paris_11627717.html

- Pacheco, C., & Severiche, J. (2015). Plan de negocios para la producción comercialización de ladrillos ecológicos - Ecoladrillo. Trabajo de grado en Tecnólogo Industrial. Universidad de Santander - UDES. Facultad de Tecnología Industrial. Bucaramanga Santander.
- Palacios, P. R., De Los Santos Valladares, L., Bustamante, A., & González, J.C.. (2012). Estudio de la deshidroxilación en el óxido férrico hidratado denominado limonita. Revista de la Sociedad Química del Perú, 78(3), 198-207.
- Rath, J. M., Rubenstein, R. A., Curry, L. E., Shank, S. E., & Cartwright, J. C. (2012). Cigarette Litter: Smokers' Attitudes and Behaviors. Environmental Research and Public Health. 9, 2189-2203. doi:10.3390/ijerph9062189
- Romero, N. (10 de 08 de 2019). Reciclan colillas de cigarrillo para crear nuevos productos. Obtenido de rcnradio: <https://www.rcnradio.com/estilo-de-vida/medio-ambiente/reciclan-colillas-de-cigarro-para-crear-nuevos-productos>
- Rondón, H. (2011). Evaluación del comportamiento de arcillas sometidas a diferentes tiempos de exposición a altas temperaturas. Revista EIA. 1794-1237.
- Ruge, O. O., Martínez, S. A., & Diaz, M. (10 de 04 de 2016). Evolución de fases magnéticas presentes en arcillas de Boyacá sometidas a altas temperaturas. 2422-4324. Sogamoso - Boyaca, Colombia.
- Ruíz Fernández, D. M. (2015). Influencia de la adición de vidrio triturado en la resistencia a la compresión axial de un ladrillo de arcilla artesanal de Cajamarca, 2015. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad Privada del Norte. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Cajamarca, Perú.
- Sacoto, J. F. (2013). Diseño del proyecto para la implementación de una fábrica productora de ladrillo en la ciudad de Azogues. Tesis de pregrado en Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica Salesiana. Programa Académico de Ingeniería Industrial. Cuenca, Ecuador.
- Sánchez Molina, J., Corpas Iglesias, F., & Rojas Suarez, J. (Febrero de 2019). Cenizas Volantes de Termoeléctrica como Materia Prima para la Fabricación de Materiales Cerámicos de Construcción: Efecto de la Temperatura de Cocción sobre el Material.
- Sanchez, A. Y., & Mejia, F. Y. (2009). Análisis de los esfuerzos de compresión en unidades de mampostería estructural y muretes E-9, E-11 y E-14 de una empresa ladrillera de Santander. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Programa Académico de Ingeniería Civil. Bucaramanga.
- Santos, J. D., Malagón, P. Y., & Córdoba, E. M. (2009). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. 0012-7353.

Sanz, J. (1975). *Mecánica de suelos*. Barcelona, España: editores técnicos asociados, s.a.

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2001). *Determinación de la eficiencia energética del subsector industrial del ladrillo, vidrio y cerámica*. Republica de Colombia Ministerio de Minas y Energía. Colombia.

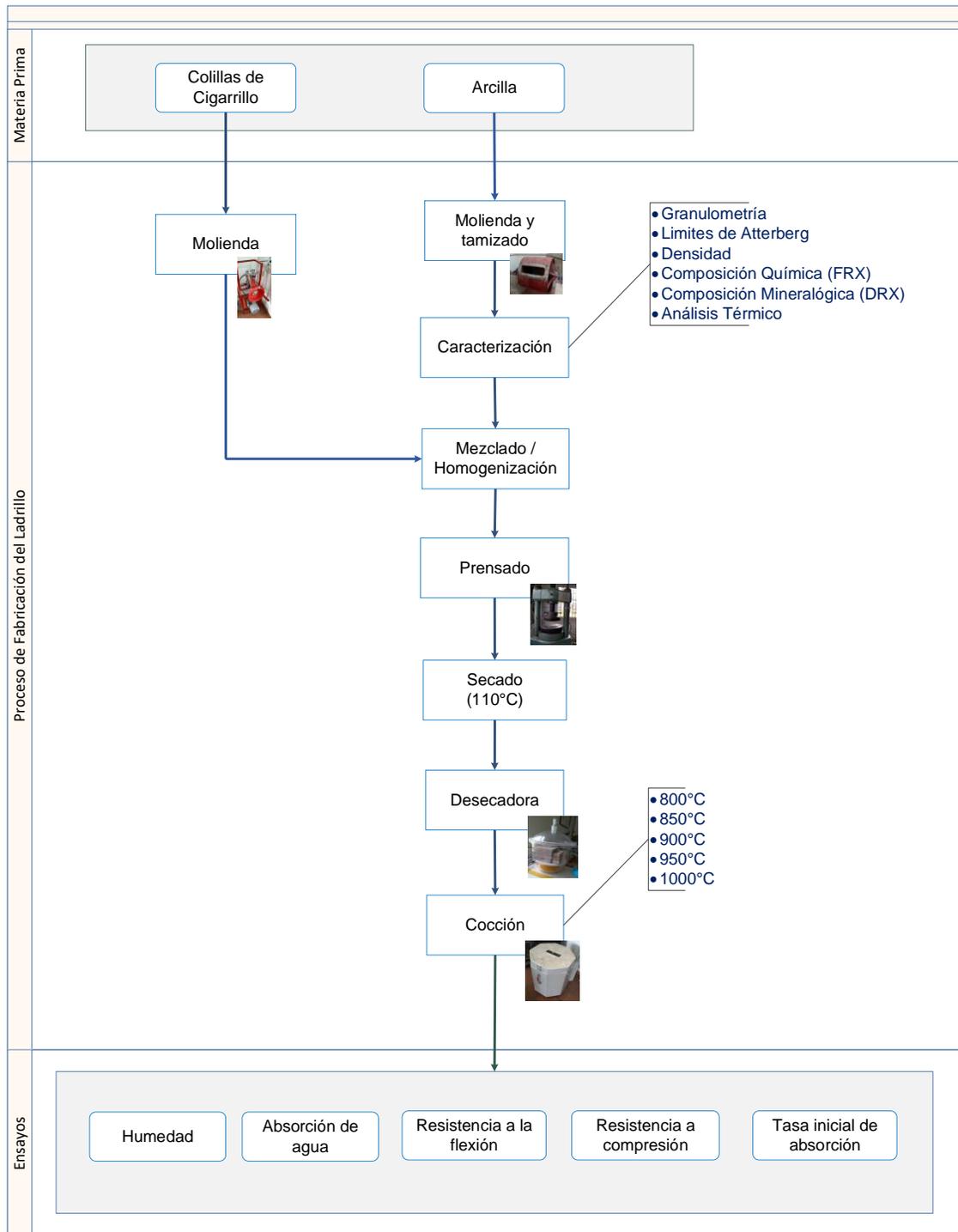
Zea, N. L. (2005). *Caracterización de las arcillas para la fabricación de ladrillos artesanales*. Guatemala.

Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials - A review. *Construction and Building Materials*, 47, 643-655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>.

Anexos

Anexo 1.

Metodología para la Elaboración de los Prototipos



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2.

Contracción, densidad y absorción de agua de los prototipos con colillas de cigarrillo (después de cocción)

Temperatura (°C)	LADRICOL 2,5%			LADRICOL 5,0%			LADRICOL 7,5%		
	Contracción por cocción (%)	Densidad volumétrica (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Contracción por cocción (%)	Densidad volumétrica (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Contracción por cocción (%)	Densidad volumétrica (g/cm ³)	Absorción de agua (%)
800	0,15	1,76	14,07	0,29	1,58	15,54	0,55	1,54	16,86
850	0,33	1,76	13,96	0,85	1,64	15,31	0,94	1,54	16,53
900	0,68	1,77	13,45	0,89	1,66	15,22	0,70	1,55	16,52

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3.

Aspectos e impactos ambientales generados durante la fabricación del ladrillo convencional

Actividad	Aspecto	Ambiente ecológico	Impacto	Naturaleza del impacto
Extracción de la materia prima (arcilla)	Uso del suelo	Suelo	Derrumbes y deslizamientos	-
			Compactación del suelo	
			Afectación a flora y fauna.	
	Generación de ruido	Atmósfera	Contaminación atmosférica	-
Emisión de material particulado				
Molienda y tamizado	Consumo de energía	Atmósfera	Agotamiento de recursos naturales	-
	Emisión de material particulado		Contaminación atmosférica	
	Generación de ruido			
Mezclado / homogenización	Consumo de agua	Agua / suelo	Agotamiento del recurso hídrico	-
	Generación de residuos sólidos		Contaminación del suelo y del agua	
	Generación de ruido	Atmósfera	Contaminación atmosférica	-
	Emisión de material particulado			
Prensado	Consumo de energía	Atmósfera	Agotamiento de recursos naturales	-

Secado (110°C) y Cocción	Emisión de gases contaminantes (CO, CO ₂ , O ₂), H ₂ O, SO ₂ , NH ₃ , Cl ₂ y F).	Atmósfera	Contaminación atmosférica	-
	Consumo / quema de combustible.			
	Consumo de energía.			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4.

Aspectos e impactos ambientales generados durante la fabricación del ladrillo con incorporación de colillas de cigarrillo

Actividad	Aspecto	Ambiente ecológico	Impacto	Naturaleza del impacto
Recolección de la materia prima (Colillas de cigarrillo)	Consumo / uso de las colillas de cigarrillo	Suelo	Mejora en la calidad del suelo (Reducción de contaminación por sustancias tóxicas presentes en las colillas)	+ (Nuevo)
		Agua	Mejora en la calidad del agua (Reducción de contaminación por sustancias tóxicas presentes en las colillas)	+ (Nuevo)
		Paisaje	Mejora en la calidad visual del paisaje	+ (Nuevo)
		Flora y fauna	Reducción de sustancias y elementos tóxicos que pueden ser consumidos por animales	+ (Nuevo)
Extracción de la materia prima (arcilla)	Uso del suelo	Suelo	Derrumbes y deslizamientos Compactación del suelo Afectación a flora y fauna.	-
		Atmósfera	Emisión de material particulado	-

Molienda y tamizado	Consumo de energía			
	Emisión de material particulado	Atmósfera	Agotamiento de recursos naturales	-
	Generación de ruido		Contaminación atmosférica	
	Emisión de olores (Nuevo)			
Mezclado / homogenización	Consumo de agua	Agua / suelo	Agotamiento del recurso hídrico	-
	Generación de residuos sólidos		Contaminación del suelo y del agua	
	Generación de ruido			
	Emisión de material particulado	Atmósfera	Contaminación atmosférica	-
Prensado	Emisión de olores (Nuevo)			
	Consumo de energía	Atmósfera	Agotamiento de recursos naturales	-
Secado (110°C) y Cocción	Emisión de gases contaminantes (CO, CO ₂ , O ₂), H ₂ O, SO ₂ , NH ₃ , Cl ₂ y F).	Atmósfera	Contaminación atmosférica	-
	Consumo / quema de combustible.			
	Consumo de energía ^a			

Nota.

a De acuerdo con Mohajerani et al. (2016), la incorporación de colillas de cigarrillo en el proceso de producción de un ladrillo, en porcentajes del 2,5% y 5%, podría generar un ahorro en el consumo energético del 31% al 58%, respectivamente.