UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA
ARQUITECTÓNICAS.**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**CIENCIA E INGENIERÍA DE NUEVOS MATERIALES
EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS
MEJORADOS TECNOLÓGICAMENTE**

TESIS DOCTORAL

Autor:

**MSc. ALONSO ZÚÑIGA SUÁREZ.
Ingeniero Civil**

Directores:

Dr. FRANCISCO HERNÁNDEZ OLIVARES
Doctor en Ciencias Físicas. Catedrático de Universidad

Dr. FRANCISCO FERNÁNDEZ MARTÍNEZ
Doctor en Ciencias Químicas. Catedrático de Universidad

**Madrid – España
2018**

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 20....

Presidente:_____

Vocal: _____

Vocal:_____

Vocal:_____

Secretario:_____

Suplente:_____

Suplente:_____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20...
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A la memoria de
mis padres Luis
Alberto† y Carmen
Guillermina†

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a Dios; por darme la fuerza y la vitalidad para continuar en esta dura lucha y la sabiduría para entender que solo con esfuerzo y sacrificio se logran las cosas en la vida.

A la Universidad Politécnica de Madrid; por ser la artífice e impulsadora de este gran proyecto, en mi vida personal; en especial a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura; por abrirme las puertas y permitir ampliar mi formación científica, en esta etapa, en mi vida profesional.

De manera personal, a la Universidad Técnica Particular de Loja; por el apoyo incondicional y el impulso, para que como catedráticos y seres humanos alcancemos el éxito tanto personal, como profesional.

A la Universidad Complutense de Madrid, como al Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”; por permitirme realizar los diferentes ensayos para finalizar el presente trabajo de investigación.

De forma muy especial expreso mi imperecedero agradecimiento a los señores Doctores: Francisco Hernández Olivares y Francisco Fernández Martínez, Directores; por su ayuda, transferencia de sus vastos conocimientos y colaboración en el desarrollo y culminación del presente trabajo; gracias por su apoyo, amabilidad, consejos y recomendaciones constantes, sin su guía y dirección la presente investigación no hubiera sido posible.

Mi agradecimiento personal para D^a Eva María Delgado, por su ayuda oportuna, quien supo siempre mantenernos informados con las actividades del Programa de Doctorado.

También recordar y agradecer a todas las personas que me permitieron ocupar un espacio físico en la biblioteca de la Universidad Politécnica de Madrid.

Al Dr. Holger Benavides Muñoz, Director del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil y al Magister Belizario Zarate Torres, responsable de la Sección Estructuras, Transporte y Construcción de la Universidad Técnica Particular de Loja por su apoyo incondicional en el desarrollo de este anhelado proyecto.

A la Dra. Sol López Andrés, Directora del Departamento de Cristalografía y Mineralogía y al Dr. Xabier Arroyo Rey Docentes de la Universidad Complutense de Madrid.

Al Dr. Víctor García, quien en calidad de Docente Prometeo de la Universidad Técnica Particular colaboró en el estudio de las arcillas en la presente investigación.

A la Magister Berenice Cecibel Zúñiga Torres, Docente – Investigadora de la Universidad Técnica Particular de Loja, por ser un soporte fundamental a lo largo del desarrollo de este estudio.

A todas aquellas personas, amigos y familiares, que de una u otra forma supieron brindarme su apoyo en este duro trabajo.

DEDICATORIA

A mi amada esposa, Cecilia, por su dedicación y entrega, sin estas cualidades, nada en mi vida fuera posible.

A mis hijas: Berenice, Liliana y Katherine; todo el sacrificio y amor, vale la pena.

A mi nietecita adorada Giulianita Alexandra; amor de mi vida.

A mi hijo político, Giuliano, por todo ese apoyo incondicional.

RESUMEN

El sector de la construcción es uno de los pilares de la economía del Ecuador, el mismo mueve recursos económicos, humanos y materiales, en volúmenes considerables, cuya incidencia afecta directamente al desarrollo de la sociedad. La industria de la construcción requiere de materiales que permita la fabricación de productos necesarios para la edificación de diferentes estructuras ingenieriles.

El continuo desarrollo de la ciudad de Loja en el Sur de Ecuador y su demanda por vivienda y edificios para servicios, es evidente; debido a que en 1990 existían 19656 viviendas en el área urbana, para el 2010 eran 32815 viviendas, denotando un incremento del 166,95% a un ritmo del 8% de crecimiento anual; así mismo, según proyecciones para el 2018 Loja dispondría de 60738 viviendas, denotando un alto grado de crecimiento y una elevada demanda de materiales constructivos.

Uno de los principales materiales para la construcción de edificaciones es el ladrillo, material que se caracteriza por su alta resistencia, durabilidad, resistencia al cambio climático entre otras. Sin embargo, la alta demanda y la falta de criterios en la elaboración de la pasta y proceso de cocción han provocado un deterioro en la calidad y presentación, observándose reducción de tamaño, irregularidades en su forma y contaminación en los materiales empleados ocasionando el no cumplimiento de los estándares de la normativa ecuatoriana.

De esta manera, el presente estudio evalúa las características mecánico-estructurales del ladrillo convencional (tradicional), fabricado en la provincia de Loja en los sectores de Catamayo y Malacatos, cuyas resistencias promedio a la compresión son 4.60MPa y 4.97MPa

respectivamente, clasificándolos como ladrillo HUECO TIPO F, lo que indica el no cumplimiento de la normativa.

Con estos antecedentes se propone la elaboración de ladrillos mejorados a través de mezclas óptimas para los sectores de Catamayo y Malacatos y ladrillos con incorporación de materias primas alternativas como tierras diatomeas del sector de Santa Elena y lodos de relave de mina de oro del sector de Zamora Chinchipe.

El proceso inició con la localización y caracterización tecnológica (color, sensación al tacto, consistencia, impurezas y peso específico), análisis granulométrico, límites de Atterberg, ensayos físico-químicos y técnicas analíticas de las materias primas empleadas.

Con la aplicación del ensayo de tracción indirecta o método brasileño se obtuvo el factor de optimización (f_{opt}), para determinar las mezclas óptimas; este análisis se realizó para cada una de las combinaciones de las pastas cerámicas, así como también, para la selección del corrector orgánico obteniendo como óptimo el aserrín en un 2%.

Los resultados indican que la pasta del ladrillo fabricado entre las minas La Vega (MV1) e Indiucho (MI2) + 2% aserrín del sector Catamayo se da en una relación 50/50 cuyo f_{opt} fue 12,40MPa/kg. En el caso de los ladrillos elaborados con materias primas del sector de Malacatos, la combinación óptima se obtiene entre las minas Ceibopamba en un 80% y la mina Cangahua en un 20% cuyo factor de optimización (f_{opt}) es de 47MPa/kg; clasificándolos de acuerdo a la norma como: MACIZO TIPO A o B, superando el estándar de resistencia a la compresión en 185% y 255% respectivamente.

Los ladrillos elaborados con incorporación de tierras diatomeas del Sector Santa Elena (MD2) y arcilla de la Mina Ceibopamba (MCB) indica un alto factor de optimización (f_{opt}) de 21,95MPa/kg en una relación 60/40 respectivamente, clasificándose como ladrillo MACIZO TIPO C, con un incremento de la resistencia a la compresión de 117% y disminuyendo el peso en 21% con respecto de los ladrillos artesanales. Otra de las pastas cerámicas estudiadas fue la fabricación de ladrillos utilizando relave de mina de oro, por tanto se denomina ladrillo ecológico, para su elaboración se forma un geopolímero, en una concentración de solución al 26%, 12,5M (molar), y una temperatura de curado de 120°C; el f_{opt} se ubicó en 6,44MPa/kg, el ladrillo ecológico se clasifica, como: TIPO A o B, superando los límites establecidos en la normativa en un 50% y contribuyendo al cuidado del medio ambiente al reutilizar los desechos de minería.

Para validar los resultados mecánicos de tracción indirecta y resistencia a la compresión, se emplearon ensayos de caracterización físico-químico y técnicas analíticas, estos últimos permitieron evaluar el comportamiento del material y sus fases cristalinas por el cambio de temperatura en el proceso de cocción.

ABSTRACT

The construction sector is one of the main stay of the economy of Ecuador, which moves economic, humans and material resources in considerable volumes, whose incidence affects directly the development of society. The construction industry requires materials that allow the manufacture of products necessary for building different engineering structures.

The continuous development of the Loja city in the South of Ecuador and its demand for housing and edifice, is evident; its urban growth proves in 1990 there were 19,656 houses in the urban area, for 2010 there were 32,815 houses, which means an increase of 166.95%, and a rate of 8% annual growth, according to projections the Loja city in 2018, would have 60738 houses, denoting a high growth and a highest demand for building materials.

One of the main materials for the construction of buildings is the brick, material that is characterized by its high resistance, durability, resistance to climate change among others. However, the high demand and the lack of judgements in the preparation of the pasta and baking process has caused a damage in the quality and presentation such as: reduction of size, irregularities in their form, contamination in the materials used causing the non-compliance of the Ecuadorian standards.

Therefore, the present study evaluates the mechanical-structural characteristics of conventional brick (traditional), manufactured in the Loja province, in the sectors of Catamayo and Malacatos, whose average compressive strength are 4.60MPa and 4.97MPa respectively, classifying them as brick HOLLOW TYPE F this indicates non-compliance of the standards.

With this background we propose the elaboration of improved bricks through optimal mixtures for the Catamayo and Malacatos sectors and bricks incorporating alternative raw materials such as diatomaceous earth from the Santa Elena sector and gold mining tailings from the Zamora Chinchipe sector.

The process began with the location and technological characterization (color, tactile sensation, consistency, impurities and specific weight), particle size distribution, Atterberg limits, physical-chemical tests and analytical techniques of the raw materials used.

With the application of the indirect tensile strength or Brazilian Test, the optimization factor (f_{opt}) was obtained to determine the optimal mixtures; this analysis was carried out for each of the combinations of the ceramic pastes, as well as, for the selection of the organic corrector, obtaining sawdust as an optimum by 2%.

The results indicate that the pasta of brick manufactured between La Vega (MV1) and Indiucho (MI2) mines + 2% sawdust of Catamayo sector, occurs in a ratio 50/50 whose f_{opt} was 12.40MPa/kg. In the case of bricks made with raw materials from the Malacatos sector, the optimum combination is obtained between the Ceibopamba mines in 80% and the Cangahua mine in 20% whose f_{opt} is 47MPa/kg; classifying them according to the standard as: SOLID BRICK TYPE A or B, exceeding the standard of resistance to compression by 185% and 255% respectively.

Bricks made with the incorporation of diatomaceous earth from the Santa Elena sector (MD2) and clay from the Ceibopamba mine (MCB) indicate a high optimization factor (f_{opt}) of 21.95MPa/kg in a ratio of 60/40 respectively, it is classified as a SOLID BRICK TYPE C, with

an increase in resistance to compression of 117% and a 21% reduction in weight compared to artisanal bricks. Another of the ceramic pastes studied was the elaboration of bricks using gold mine tailings therefore it is called as ecological bricks, for their preparation form a geopolymer in a concentration of a 26% solution, 12.5M (molar), and a curing temperature of 120°C; the f_{opt} was located at 6.44MPa/kg, the ecological bricks is classified as: TYPE A or B, exceeding the norm by 50% and contributes to the care of the environment by reusing mining waste.

To validate the mechanical results of indirect tensile strength and compressive strength, were used a physical-chemical test characterization and analytical techniques, the latter allowed to evaluate the structural behavior of the material and crystalline phases by the temperature change in the baking.

INDICE DE CONTENIDOS

CARATULA.....	i
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	v
RESUMEN	6
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	24
1.1. Introducción	24
1.2. Objetivos	26
1.2.1. Objetivo general	26
1.2.2. Objetivos específicos	26
1.3. Realización y estructura de la tesis	27
2. SÍNTESIS TEÓRICA	29
2.1. El Ladrillo	29
2.1.1. El ladrillo en la historia	29
2.1.2. Significado del ladrillo	31
2.1.3. Geometría del ladrillo	32
2.1.4. Propiedades del ladrillo	32
2.1.4.1. Físicas – estéticas	33
2.1.4.2. Ingenieriles.....	34
2.1.4.3. Resistencia estructural	34
2.1.4.4. Durabilidad	34
2.1.5. Proceso industrial	34
2.1.5.1. Elaboración de la pasta	35
2.1.5.2. Hidratación.....	36
2.1.5.3. Mezclado.....	36
2.1.5.4. Moldeado o conformado	37
2.1.5.5. Deshidratación o secado del ladrillo	37
2.1.5.6. Cocción	38
2.1.6. Categorización del ladrillo según la norma ecuatoriana.....	39
2.1.6.1. Macizos	40
2.1.6.2. Huecos.....	40
2.2. Materias primas	41
2.2.1. Arcillas.....	41
2.2.2. Las Tierras Diatomeas	45
2.2.2.1. Aplicaciones.....	47
2.2.2.2. Estructura mineralógica y química	47
2.2.2.3. Propiedades físicas y químicas	48
2.2.3. Los Relaves Mineros	49

2.2.3.1.	Particularidades de los relaves mineros	50
2.2.3.2.	Geopolimerización	51
2.2.3.2.1.	Silicatos y aluminosilicatos	54
2.2.3.2.2.	Proceso químico para la geopolimerización	55
2.2.3.2.3.	El activador alcalino y su incidencia en el proceso de geopolimerización	58
3.	METODOLOGÍA	61
3.1.	Ubicación de la Zona de estudio	62
3.1.1.	Sector Catamayo	63
3.1.1.1.	Mina la Vega	63
3.1.1.2.	Mina Indiucho	64
3.1.1.3.	Aspectos medioambientales	65
3.1.1.4.	Tipo de suelo	65
3.1.2.	Sector Malacatos	65
3.1.2.1.	Mina Ceibopamba	65
3.1.2.2.	Mina Cangahua	66
3.1.2.3.	Mina Chinguilamaca	67
3.1.2.4.	Mina Palanda	67
3.1.2.5.	Aspectos medioambientales	68
3.1.2.6.	Tipo de suelo	68
3.1.3.	Sector Santa Elena	69
3.1.3.1.	Mina Santa Elena	69
3.1.3.2.	Aspectos medioambientales	69
3.1.3.3.	Tipo de suelos	71
3.1.4.	Sector Zamora Chinchipe	71
3.1.4.1.	Mina Pituca II	71
3.1.4.2.	Aspectos medioambientales	72
3.1.4.3.	Tipo de suelos	73
3.2.	Toma de muestras de las materias primas	74
3.3.	Caracterización del ladrillo producido en forma artesanal	75
3.3.1.	Variabilidad Dimensional (VD)	75
3.3.2.	Peso del ladrillo.	76
3.3.3.	Densidad del ladrillo.	76
3.3.4.	Determinación de los volúmenes de poros, porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente	77
3.4.	Caracterización tecnológica de las materias primas	79
3.4.1.	Ensayos control por atributos	80
3.4.1.1.	Color	80
3.4.1.2.	Sensación al tacto	80
3.4.1.3.	Consistencia	81
3.4.1.4.	Impurezas	81
3.4.1.5.	Peso específico (Pe), método del picnómetro	81
3.4.2.	Análisis granulométrico	82

3.4.3.	Límites de Atterberg	84
3.4.4.	Ensayos físico-químicos	85
3.4.4.1.	Determinación de materia orgánica	85
3.4.4.2.	Eliminación de carbonatos	86
3.4.4.3.	Superficie específica	87
3.4.4.4.	Potencial de hidrógeno (pH)	88
3.5.	Técnicas analíticas de caracterización.....	88
3.5.1.	Ensayo químico	88
3.5.1.1.	Fluorescencia de rayos X (FRX).....	88
3.5.2.	Ensayo mineralógico	89
3.5.2.1.	Difracción de rayos X (DRX)	89
3.5.3.	Análisis térmico diferencial y térmico gravimétrico (DTA y TGA)	90
3.5.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	91
3.5.5.	Espectrometría Infrarroja (FTIR)	92
3.5.6.	Resonancia magnética nuclear (RMN).....	92
3.6.	Ensayos mecánicos.....	93
3.6.1.	Ensayo de tracción indirecta (Método Brasileño, ITS)	93
3.6.2.	Ensayo de compresión simple	94
4.	RESULTADOS	96
4.1.	Caracterización del ladrillo artesanales sectores Catamayo y Malacatos	96
4.2.	Caracterización de la Materia Prima	98
4.2.1.	Sector Catamayo.....	99
4.2.1.1.	Minas: La Vega (MV1) –Indiucho (MI2).....	99
4.2.1.1.1.	Ensayos de laboratorio, control por atributos	99
4.2.1.1.2.	Análisis granulométrico	102
4.2.1.1.3.	Límites de Atterberg	104
4.2.1.1.4.	Ensayos físico-químicos	105
4.2.1.1.5.	Ensayo Químico.....	107
4.2.1.1.6.	Ensayo Mineralógico	109
4.2.2.	Sector Malacatos.....	110
4.2.2.1.	Minas: Ceibopamba (MCB), Cangahua (MCA), Palanda (MPL), Chinguilamaca (MCH), Arena Fina (MAF).	110
4.2.2.1.1.	Ensayos de laboratorio, control por atributos	110
4.2.2.1.2.	Análisis granulométrico	112
4.2.2.1.3.	Límites de Atterberg	113
4.2.2.1.4.	Ensayos físico-químicos	114
4.2.2.1.5.	Ensayos Químicos	115
4.2.2.1.6.	Ensayo mineralógico	119
4.2.3.	Sector Santa Elena.....	122
4.2.3.1.	Mina: Santa Elena, Estratos MD2 y MD3.	122
4.2.3.1.1.	Ensayos de laboratorio, control por atributos	122
4.2.3.1.2.	Análisis granulométrico	123
4.2.3.1.3.	Límites de Atterberg	124

4.2.3.1.4. Análisis microscópico.....	124
4.2.3.1.5. Ensayos físico-químicos	125
4.2.3.1.6. Ensayos Químicos	126
4.2.3.1.7. Ensayo mineralógico	128
4.2.3.1.8. Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR)	131
4.2.3.1.9. Resonancia magnética nuclear (RMN).	132
4.2.4. Sector Zamora Chinchipe	133
4.2.4.1. Mina La Pituca II	133
4.2.4.1.1. Ensayos de laboratorio, control por atributos	133
4.2.4.1.2. Análisis granulométrico	134
4.2.4.1.3. Límites de Atterberg	134
4.2.4.1.4. Ensayos físico-químico.....	134
4.2.4.1.5. Ensayos Químicos	135
4.2.4.1.6. Ensayo mineralógico	136
4.2.4.1.7. Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR)	136
4.2.4.1.8. Resonancia magnética nuclear (RMN).....	137
4.2.5. Caracterización de los correctores orgánicos empleados para la fabricación de ladrillos artesanales	138
4.2.5.1. Empleo de correctores orgánicos	138
4.2.5.2. Análisis termo-gravimétrico (TGA)	139
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	145
5.1. Elaboración de ladrillos artesanales mejorados y ladrillos con incorporación de materias primas alternativas	146
5.1.1. Selección del corrector orgánico, para la elaboración de ladrillo convencional y mejorado convencional	146
5.1.1.1. Primera dosificación	147
5.1.1.2. Segunda dosificación	150
5.1.2. Zona de Catamayo	155
5.1.2.1. Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo artesanal mejorado	155
5.1.2.1.1. Proceso de fabricación del ladrillo artesanal mejorado	156
5.1.2.1.2. Dosificación con corrector orgánico (aserrín)	156
5.1.2.1.3. Dosificación sin corrector orgánico	157
5.1.2.2. Caracterización del ladrillo artesanal mejorado con corrector y sin corrector orgánico.....	157
5.1.2.2.1. Variabilidad dimensional (VD)	157
5.1.2.2.2. Peso del ladrillo.	159
5.1.2.2.3. Densidad (ρ)	160
5.1.2.2.4. Absorción de humedad	161
5.1.2.2.5. Ensayo a compresión simple	162
5.1.2.3. Caracterización de técnicas analíticas.....	165
5.1.3. Zona Malacatos.....	173
5.1.3.1. Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo artesanal mejorado	173
5.1.3.2. Caracterización del ladrillo artesanal mejorado.....	181

5.1.3.3.	Caracterización de técnicas analíticas.....	183
5.1.4.	Zona Santa Elena	191
5.1.4.1.	Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo con incorporación de materia prima alternativa	191
5.1.4.2.	Caracterización del ladrillo mejorado con incorporación de materia prima alternativa, a base de tierras diatomeas.....	192
5.1.4.3.	Caracterización de técnicas analíticas.....	201
5.1.5.	Sector Zamora Chinchipe	207
5.1.5.1.	Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo con incorporación de materia prima alternativa	207
5.1.5.2.	Caracterización del ladrillo mejorado con incorporación de materia prima alternativa, a base de lodos de relave de mina o ladrillos ecológicos.....	211
5.1.5.3.	Caracterización de técnicas analíticas.....	215
6.1.	CONCLUSIONES	225
6.2.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE FUTURO	228
7	BIBLIOGRAFÍA.....	230
ANEXOS		243

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones del ladrillo cerámico en cm	39
Tabla 2.Resultados de caracterización de ladrillos artesanales	96
Tabla 3.Clasificación del suelo, (sensación al tacto)	100
Tabla 4. Consistencia de suelos.....	100
Tabla 5.Peso específico mina La Vega	101
Tabla 6.Peso específico mina Indiucho	102
Tabla 7.Análisis granulométrico Mina MV1	103
Tabla 8.Análisis granulométrico Mina MI2	104
Tabla 9. Resultado límites de Atterberg	105
Tabla 10.Control por atributos, nivel de efervescencia, peróxido de hidrogeno	105
Tabla 11. Control por atributos, nivel de efervescencia, ácido clorhídrico	106
Tabla 12.Resultados del ensayo de superficie específica.....	106
Tabla 13.Resultados del pH (muestras MV1 – MI2)	107
Tabla 14.FR _X , muestras La Vega e Indiucho	108
Tabla 15. Resultados de los ensayos por atributos	112
Tabla 16.Resumen de los resultados del ensayo de granulometría, límites de Atterberg y densidad de los suelos	113
Tabla 17.Clasificación de los suelos bajo SUCS y la AASHTO	114
Tabla 18. Resultados del ensayo de pH y superficie específica.....	115
Tabla 19.Resumen del ensayo de fluorescencia de rayos X, elementos destacados	116
Tabla 20.Resumen de resultados difracción de rayos X	119
Tabla 21.Resultados de los ensayos por atributos muestras mina Santa Elena.....	123
Tabla 22.Análisis granulométrico de las muestras	124
Tabla 23.Límites de Atterberg minas Santa Elena y Ceibopamba.....	124
Tabla 24.Resultados de la caracterización físico-química del suelo	126
Tabla 25.Composición química de la diatomita y arcilla por fluorescencia de rayos X.....	127
Tabla 26.Composición Mineralógica de las muestras de diatomita y arcilla.....	129
Tabla 27.Resultados de ensayos por atributos, físicos y químicos	133
Tabla 28.Resultados de Ensayos Físico - Químicos	134
Tabla 29. Resultado, FR _X Composición química de relave de mina Zamora Chinchipe.....	135
Tabla 30. Dosificaciones de mezclas	147
Tabla 31. Resistencia a la σ_{cd} , probetas cilíndricas; primera dosificación	150
Tabla 32. Segunda dosificación, añadiendo correctores	151
Tabla 33. Resistencia a la σ_{cd} , probetas cilíndricas. Dosificación dos, 2% de corrector.....	153
Tabla 34. Resistencia a la σ_{cd} , probetas cilíndricas. Dosificación dos, 4% de corrector.....	154
Tabla 35.Dosificación para 5 ladrillos con corrector	157
Tabla 36.Dosificación para 5 ladrillos sin corrector	157
Tabla 37.Codificación, ladrillos artesanales mejorados	157
Tabla 38.Variación dimensional, ladrillos artesanales mejorados, con 2% de corrector.....	158
Tabla 39.Variación dimensional, ladrillos artesanales mejorados, sin corrector	158
Tabla 40.Peso de los ladrillos artesanales mejorados	159
Tabla 41.Densidad aparente, ladrillos artesanales mejorados, 2% aserrín.....	160

Tabla 42.Densidad aparente, ladrillos artesanales mejorados, sin corrector.....	161
Tabla 43. Absorción de agua, ladrillos artesanales mejorados, 2% de aserrín	162
Tabla 44.Absorción de agua, ladrillos artesanales mejorados sin corrector	162
Tabla 45.Resistencia a la compresión, ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín	163
Tabla 46.Resistencia a la compresión, ladrillo artesanal sin corrector	163
Tabla 47.Dosificaciones de discos para el ensayo de compresión diametral	174
Tabla 48.Compresión diametral (σ_{cd}) y contracción para la mezcla: MCB y MCA.	175
Tabla 49.Compresión diametral (σ_{cd}) y contracción para la mezcla: MCB y MAF.	176
Tabla 50.Compresión diametral y contracción para la mezcla: MCB y MPL.	177
Tabla 51. Compresión diametral y contracción para la mezcla: MPL y MAF	177
Tabla 52.Compresión diametral y contracción para la mezcla: MCB y MCH.	178
Tabla 53.Compresión diametral y contracción para la mezcla: MCH y MAF	179
Tabla 54.Mezclas con los mejores f_{opt} ; resultados del análisis a la σ_{cd}	180
Tabla 55.Resultados: caracterización convencional en mezclas óptimas	182
Tabla 56.Nivel porcentual de la mezcla arcilla y diatomita	191
Tabla 57.Resistencia a la σ_{cd} , mezclas MCB/MD2 (probetas)	192
Tabla 58.Resistencia a la σ_{cd} , mezclas MCB/MD3 (probetas)	193
Tabla 59.Incidencia de la temperatura en la resistencia a tracción indirecta (Probetas), mezcla MCB/MD2	195
Tabla 60.Efecto de la temperatura en la resistencia a tracción indirecta, mezcla óptima	196
Tabla 61.Mezcla óptima en ladrillos con diatomita	198
Tabla 62.Resultados de la caracterización del ladrillo mejorado.....	201
Tabla 63.Promedio de Variación dimensional ladrillos MCB/MD2 + 2% aserrín	201
Tabla 64. Mezclas NaOH y relave de mina, en diferentes contenidos de solución y temperatura.....	208
Tabla 65. Efecto del incremento del contenido de solución sobre el f_{opt} y de la temperatura de curado en la resistencia a la tracción de discos	210
Tabla 66. Porcentaje de absorción de agua en ladrillos ecológicos	212
Tabla 67.Porosidad del ladrillo ecológico	214
Tabla 68.Especificaciones técnicas del ladrillo.....	223

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.Descripción de las partes de un ladrillo: a) Caras y b) Aristas	32
Figura 2.Propiedades de los ladrillos, (Barranzuela, 2014 y Gallegos & Casabone, 2006)	33
Figura 3.Noques de mezclado, pasta de ladrillo.....	35
Figura 4. Hidratación de la mezcla.....	36
Figura 5.Mezclado de la pasta.....	36
Figura 6. Moldeado del ladrillo.....	37
Figura 7.Secado del ladrillo tradicional	38
Figura 8.Horno de ladrillo	38
Figura 9.Proceso de arreglo y quema del ladrillo.....	39
Figura 10.Enfriado del ladrillo	39
Figura 11.Ladrillo macizo artesanal.....	40
Figura 12.Ladrillo perforado a) Fábrica Falco, b) Fábrica Arcimego S.A.....	40
Figura 13.Formas de diatomeas, Stidolph, 2013	47
Figura 14. Composición química de las tierras diatomeas, Illana y Blanco, 2008	48
Figura 15. Relave de mina.....	50
Figura 16.Proceso de Geopolimerización, Duxson, Fernández-Jiménez, 2007	56
Figura 17.Proceso de Geopolimerización (secuencia), Paladines y Zúñiga-Suárez, 2016	57
Figura 18.Micro localización de la zona de estudio	63
Figura 19.Ubicación Geográfica de la Mina la Vega, Escala 0.5km	64
Figura 20.Ubicación Geográfica de la Mina Indiucho. Escala 0.3km	64
Figura 21.Ubicación Geográfica de la Mina Ceibopamba, Escala 0.5km	66
Figura 22.Ubicación Geográfica de la Mina Cangahua, Escala 0.7km.....	66
Figura 23.Ubicación Geográfica de la Mina Chinguilamaca, Escala 0.3km	67
Figura 24.Ubicación Geográfica de la Mina Palanda, Escala 0.4km	67
Figura 25.Ubicación Geográfica de la Mina Santa Elena, Escala 0.5km.....	69
Figura 26.Ubicación Geográfica del Sector Minero “Pituca II”, Earth. Escala 0.5km	72
Figura 27. Selección de la materia prima.	75
Figura 28.Variación dimensional, ladrillos artesanales.	75
Figura 29.Determinación del peso de cada ladrillo.....	76
Figura 30.Densidad de ladrillos artesanales.	76
Figura 31.Absorción de agua, densidad aparente, porosidad aparente y aparente gravedad específica.....	78
Figura 32. Muestras MV1 y MI2, Sistema Munsell.....	80
Figura 33.Escala de límites de Atterberg.	85
Figura 34. Equipo, determinación de materia orgánica.	86
Figura 35. Equipo, liberación de carbonatos.....	86
Figura 36. Análisis de pH en materias primas: a) Calificación de los Suelos por su pH. Ávila 2009. b) Equipo para determinar el pH	88
Figura 37. Equipo de Fluorescencia BRUKER S1.	89
Figura 38. Equipo para difracción de rayos X.	90
Figura 39. Equipo SDT para análisis Térmico.	91
Figura 40.Equipo de Compresión Diametral, marca: Versa Tester, UTPL 2018.	93

Figura 41. Resistencia a la compresión simple	95
Figura 42. Resistencia a la compresión, Absorción máxima de humedad (%), INEN 297, 1978	97
Figura 43. Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillos artesanales Catamayo .	97
Figura 44. Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillos artesanales Malacatos .	98
Figura 45. Muestras MV1 y MI2, Sistema Munsell, Munsell, 1990.....	99
Figura 46. Sensación al tacto a) muestra MV1, b) muestra MI2	100
Figura 47. Consistencia: a) muestra MV1, b) muestra MI2.....	100
Figura 48. Consistencia: a) muestra MV1, b) muestra MI2.....	101
Figura 49. Muestra en laboratorio, peso específico	102
Figura 50. Análisis granulométrico de las muestras minas MV1 – MI2.....	103
Figura 51. Curva granulométrica mina MV1	103
Figura 52. Curva granulométrica mina MI2.....	104
Figura 53. Determinación del límite líquido, mina MV1	105
Figura 54. Nivel de efervescencia, muestras minas MV1 y MI2	105
Figura 55. Nivel de efervescencia, muestras minas MV1 y MI2, con HCl	106
Figura 56. Superficie específica, azul de metileno.....	107
Figura 57. Escala de valores de pH, Ávila, 2009	107
Figura 58. FRX, muestras de Catamayo	108
Figura 59. Resultados de la fluorescencia mina “MV1”	109
Figura 60. Resultados de la fluorescencia mina “MI2”	109
Figura 61. Difractograma muestra mina MV1 – MI2	110
Figura 62. Difractometría de las muestras MV1 – MI2, Laboratorio Proinstra S.A., 2015...	110
Figura 63. Ensayo de FRX. Resumen: composición química de la muestra	116
Figura 64. Resultados de fluorescencia de rayos X, MCB. Elementos más trascendentes.....	117
Figura 65. Resultados de fluorescencia de rayos X, MCA. Elementos más trascendentes ...	117
Figura 66. Resultados de fluorescencia de rayos X, MCH. Elementos más trascendentes	118
Figura 67. Resultados de fluorescencia de rayos X, MPL. Elementos más trascendentes	118
Figura 68. Resultados de fluorescencia de rayos X, MAF. Elementos más trascendentes.	119
Figura 69. Difractograma de rayos X. MCB	120
Figura 70. Difractograma de rayos X. MCA.....	120
Figura 71. Difractograma de rayos X. MCH.....	121
Figura 72. Difractograma de rayos X. MPL.....	121
Figura 73. Difractograma de rayos X. MAF	122
Figura 74. Microfotografías de diatomita mina Santa Elena: a) <i>Coscinodiscus liniatus</i> , b) espículas de esponja y diatomitas fragmentadas, c) <i>Aulacoseira lirata</i> . d) <i>coscinodiscus radiatus excentricus</i> y frústulas de <i>epithemia zebra</i> . e) <i>Coscinodiscus radiatus</i> . f) <i>Fragilaria fasciculata</i> . g) <i>uruglena</i> h) fragmentos de <i>fragilaria</i> y <i>Tabulariafasciculata</i> , cuyo tamaño esta alrededor de 10 μm x100.....	125
Figura 75. Resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra MD2.....	127
Figura 76. Resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra MD3	127
Figura 77. Resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra MCB	128
Figura 78. Difractograma de rayos X. Mina Santa Elena MD2	130
Figura 79. Difractograma de rayos X. Mina Santa Elena MD3	130

Figura 80.Difractograma de rayos X. Mina Ceibopamba MCB	131
Figura 81. FTIR, muestra de tierra diatomeas.....	132
Figura 82.RMN, muestra de tierra diatomeas	132
Figura 83.Fluorescencia de rayos X. Mina Zamora Chinchipe	135
Figura 84.Difractograma de rayos X. Mina Zamora Chinchipe, antes de la geopolimerización	136
Figura 85.FTIR, muestra relave de mina.....	137
Figura 86.RMN, muestra relave de mina	137
Figura 87.Corredores orgánicos: tamo de arroz, bagazo de caña de azúcar y aserrín	139
Figura 88.TGA de aserrín, en función de la temperatura, el peso y el flujo de calor	141
Figura 89. TGA de bagazo, en función de la temperatura, el peso y el flujo de calor	142
Figura 90.TGA de tamo de arroz, en función de la temperatura, el peso y el flujo de calor .	144
Figura 91.a) Dosificaciones seleccionadas, b) hidratación y c) amasado; primera dosificación	148
Figura 92. a) Moldeo, b) secado, c) cocción de pastillas cilíndricas.....	148
Figura 93.Gráfica de la curva de calentamiento.....	149
Figura 94.a) Medidas, diámetro y espesor; b) peso de las probetas; c) compresión Directa .	149
Figura 95.Resistencia a la compresión diametral, probetas cilíndricas.....	150
Figura 96.a) Dosificaciones seleccionadas, b) mezcla y c) hidratación; segunda dosificación	152
Figura 97. a) Moldeo de la mezcla, b) secado y c) cocción	152
Figura 98.Cocción pastillas, fundente al 2% y 4%, a 950°C.....	152
Figura 99. Gráfica, curva de calentamiento segunda dosificación.....	153
Figura 100.Resistencia a la compresión diametral, probetas cilíndricas con 2% de corrector	154
Figura 101.Resistencia compresión diametral, probetas cilíndricas con 4% de corrector	155
Figura 102.Dispersión: largo del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín	158
Figura 103.Dispersión: ancho del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín.....	159
Figura 104.Dispersión: espesor del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín	159
Figura 105. Dispersión: peso del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín.....	160
Figura 106. Dispersión: densidad del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín.....	161
Figura 107.Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín.....	163
Figura 108.Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillo convencional mejorado, sin corrector.....	164
Figura 109.Modo de falla, por resistencia a la compresión, ladrillo mejorado, 2% de aserrín	164
Figura 110. Representación del modo de falla, por resistencia a la compresión, ladrillo mejorado, 2% de aserrín.....	164
Figura 111. Difractograma de rayos X. Mezcla óptima.....	165
Figura 112.Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café), M. Catamayo.....	170
Figura 113.Termogramas TGA (negro), DSC (azul) y D2 – DSC (azul), M. Indiucho	171
Figura 114.Microscopía SEM, ladrillo mejorado Catamayo (50/50) a) nivel de detalle 2000 aumentos b) nivel de detalle 5000 aumentos.	172

Figura 115.Descripción del número de mezclas a realizar.....	173
Figura 116. Procedo de determinación de mezclas óptimas	174
Figura 117. f_{opt} de la mezcla de MCB y MCA	176
Figura 118. f_{opt} de la mezcla de MCB y MAF	176
Figura 119. f_{opt} de la mezcla de MCB y MPL.....	177
Figura 120. f_{opt} de la mezcla de MPL y MAF	178
Figura 121. f_{opt} de la mezcla MCB y MCH	179
Figura 122. f_{opt} de la mezcla de MCH y MAF	179
Figura 123. Variación de la resistencia a la CD en f de la T°C. Tres mezclas porcentuales, ID =1, 2, 3.....	181
Figura 124.Variación de la resistencia a la CD en f de la T°C. Tres mezclas porcentuales, ID =4, 5, 6.....	181
Figura 125. Resultados de la prueba a la compresión simple en ladrillos (mezclas óptimas).....	183
Figura 126. Difractograma de rayos X. Mezcla óptima, sector Malacatos	184
Figura 127. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café), M. Ceibopamba..	186
Figura 128.Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café), M. Cangahua.....	187
Figura 129. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Chinguilamaca	188
Figura 130.Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Palanda.....	189
Figura 131. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Arena Fina.....	190
Figura 132.Análisis de la combinación MCB/MCA (80/20%), ladrillo mejorado, sector Malacatos, microscopía SEM.....	190
Figura 133. Descripción del número de mezclas a realizar.....	191
Figura 134. f_{opt} de la mezcla de MCB/MD2	193
Figura 135. Resistencia a la tracción Indirecta de la mezcla de MCB/MD2	194
Figura 136. Efecto de la T°C a la tracción indirecta, MCB/MD2	196
Figura 137. Ladrillos fisurados durante el proceso de cocción.....	197
Figura 138.Ladrillo elaborado con mezcla MCB/MD2 (diatomita Santa Elena)	198
Figura 139.Resistencia a la compresión del ladrillo con diatomita MD2	199
Figura 140.Difractograma de rayos X. Mezcla óptima, Santa Elena	202
Figura 141. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), MD2 (Santa Elena).....	203
Figura 142. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), MD3 (Santa Elena).....	204
Figura 143. Análisis de la combinación MCB/MD2, ladrillo mejorado, sector Santa Elena, microscopía SEM	206
Figura 144.Descripción del número de mezclas a realizar.....	208
Figura 145. Incremento del f_{opt} por efecto de la temperatura	209
Figura 146. Incremento del f_{opt} por combinaciones.....	210
Figura 147.Ladrillo ecológico	212
Figura 148. Absorción del ladrillo ecológico	213
Figura 149.Resistencia a la compresión diametral, ladrillos ecológicos.....	214
Figura 150. Difractograma de rayos X. Mezcla óptima, Relave de mina	215
Figura 151. Micrografía SEM, a) Materia prima, b) Materia prima y solución NaOH a temperatura ambiente, c) Mezcla óptima.	216

INDICE DE ABREVIATURAS

ABREVIATURAS	DESCRIPCIÓN
DTA	Análisis térmico diferencial
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
MCB	Mina Ceibopamba
MCA	Mina Cangahua
MPL	Mina Palanda
MCH	Mina Chinguilamaca
MAF	Muestra Arena Fina
TGA	Análisis termo gravimétrico
f_{opt}	Factor de optimización
SEM	Análisis de microscopía electrónica de barrido
MD2	Muestra diatomea Santa Elena estrato 2
MD3	Muestra diatomea Santa Elena estrato 3
MI2	Mina Indiucho
MV1	Mina La Vega
NP	No plástico
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos -
AASHTO	American Association of State Highway Officials
FRX	Fluorescencia de rayos X
DRX	Difracción de rayos X
FTIR	Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier
RMN	Resonancia magnética nuclear
CL	Arcilla de plasticidad media
DSC	Calorimetría de barrido diferencial
CD	Compresión diametral - ensayo
φ	Diámetro
e	Espesor
ρ	Densidad
MPa	Mega Pascal
σ_{cd}	Resistencia a la compresión diametral
VD	Variabilidad dimensional

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.Introducción

El sector de la construcción se constituye en uno de los sectores más dinámicos y de mayor crecimiento económico, que aporta en el desarrollo de los países. La industria de la construcción requiere de materiales e insumos que permita la fabricación de productos necesarios para la edificación de diferentes estructuras arquitectónicas, como es el caso, del ladrillo.

La elaboración de productos cerámicos utilizados en la construcción ha evolucionado en los últimos años principalmente en lo que se refiere a pisos y revestimiento, siendo aún incipiente para productos denominados ladrillos lo que implica un descuido en la calidad y presentación de los mismos, donde se observa que no hay criterios sólidos para seleccionar y combinar las materias primas en las proporciones adecuadas para formular las pastas, operación que se hace por instinto y error con base en la experiencia.

Los ladrillos son considerados uno de los más importantes materiales de la construcción, que se fabrican como una de las soluciones ante eventos climáticos adversos como lluvia, viento, sequía y de protección ante depredadores (Bories, et al, 2014), debido a las características de alta resistencia, durabilidad, solidez, fácil manejo y transporte, generador de aislamiento acústico, resistente al fuego, difusor de transmitancia térmica y el bajo coste en su producción (García et al., 2016).

En su elaboración, se emplea arcilla, la cual constituye la principal materia prima, se encuentra ampliamente distribuida y existe en abundancia a lo largo de la superficie terrestre,

la continua explotación de este material no cuenta con una planificación sostenible, ocasionando puntos críticos de devastación y desequilibrio del ecosistema; en el caso de los procesos de moldeado y cocción, conservan matices aún de tipo artesanal. Cada una de las etapas de producción denotan alteraciones significativas en el medio ambiente, afectando ampliamente a: tierras destinadas para el cultivo, alteración de bosques, por la demanda de madera para su proceso de cocción, así como, la actividad contaminante sobre las fuentes de agua circundantes, por el proceso de escorrentía y arrastre de materiales sobrantes.

En su elaboración, se emplean arcillas y agua, los cuales se constituyen en la principal materia prima para su elaboración, aunque estas se encuentren ampliamente distribuidas y existan en abundancia, a lo largo de la superficie terrestre, la incidencia y alteración del medio circundante, por su uso y demanda, es cada vez mayor; aunque su fabricación, moldeado y cocción, conservan matices aún de tipo artesanal, en la mayor parte de los centros de producción; su impacto ya denota alteraciones significativas, en el entorno ecológico de las regiones donde se desarrolla la actividad, afectando ampliamente a: tierras destinadas para el cultivo, alteración de bosques, por la demanda de madera para su proceso de cocción, así como, la actividad contaminante sobre las fuentes de agua circundantes, por el proceso de escorrentía y arrastre de materiales sobrantes.

El objetivo del presente estudio es la elaboración de un nuevo ladrillo a ser usado en la región sur del Ecuador, mismo que inicia con la evaluación de las características físico-mecánicas de los ladrillos artesanales que se fabrican en la zona sur del país en los sectores de Catamayo y Malacatos. En segundo lugar conocer las características geológicas, geoquímicas, composiciones mineralógicas y estructural de las materias primas (arcilla y arena) de las minas ubicadas en las localidades de Catamayo y Malacatos; así mismo el estudio de la incorporación

de nuevos materiales para la fabricación de ladrillo como tierras diatomeas del sector costero de Santa Elena y relaves de mina de oro del sector oriental de Zamora Chinchipe que mitigue la extracción de arcilla y emplee procesos que reduzcan el impacto ambiental. En tercer lugar, optimizar las relaciones entre las distintas combinaciones de materiales de los cuatro sectores analizados, para este proceso se ha cuidado cada una de las etapas como plasticidad de la pasta con el empleo de desengrasante, así como también el moldeo, curado y colocación en el horno de las pastas cuyo comportamiento mineralógico varía durante la cocción, factor que incide directamente en la calidad del producto terminado, siendo aptos para su uso en la industria de la construcción. Finalmente, la elaboración de ladrillo para su caracterización se dio usando la mezcla óptima y sometiéndolos al proceso de sinterización a 950°C, en el caso de los ladrillos a base de relave de mina o también denominados como ladrillos ecológicos su proceso de geopolimerización se da a 120°C; los resultados obtenidos fueron analizados utilizando diferentes técnicas de laboratorio y comparadas con los estándares de calidad del Ecuador.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Mejorar los procesos tecnológicos en la fabricación del ladrillo común, mediante el empleo adecuado de las materias primas y la incorporación de materiales alternativos para su fabricación, tecnología amigable al medio ambiente

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente los materiales: arcillosos, arenosos, tierras diatomeas y lodos de relaves, que se usan o pueden emplearse en la fabricación de ladrillos.

- Establecer las mezclas óptimas en la elaboración de ladrillos tecnológicamente mejorados.
- Optimizar las variables en el proceso de geopolimerización para la producción de ladrillos a bajas temperaturas.
- Fabricar ladrillos y caracterizar sus propiedades.

1.3. Realización y estructura de la tesis

La presente Tesis Doctoral se ha desarrollado en los laboratorios de Resistencia de Materiales, Mecánicas de Suelos, Mineralogía y Química de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Laboratorio de Ingeniería Química y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Centro de Apoyo a la Investigación de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense (CAI – UCM) de Madrid y en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC).

En cuanto a la estructura de la tesis esta se compone de siete capítulos:

En los dos primeros capítulos son fundamentalmente bibliográficos. El primer capítulo es “Introducción” y el segundo es “Síntesis teórica”, en el cual se relacionan la historia del ladrillo, propiedades, proceso industrial, categorización según norma ecuatoriana, y materias primas (arcillas, tierras diatomeas y relaves mineros). Los siguientes capítulos recogen el trabajo de investigación llevado a cabo. En el capítulo 3 de “Metodología”, se describe las técnicas utilizadas en el laboratorio a fin de poder valorar los resultados y reproducibilidad en posteriores estudios. Los capítulos cuatro y cinco muestran los “Resultados” y “Análisis y Discusión” respectivamente, constituyéndose en la parte fundamental de la tesis. En el capítulo 4 “Caracterización de ladrillos artesanales” elaborados por los productores de los sectores de Catamayo y Malacatos, cuyos resultados indican el no cumplimiento de los estándares de calidad del Ecuador y “Caracterización de las materias primas” se reflejan los resultados

obtenidos de todos los sectores de estudios, de las arcillas de Catamayo, Malacatos, tierras diatomeas de Santa Elena y relaves de mina de oro de Zamora Chinchipe. En el capítulo 5 "Análisis y Discusión" se relaciona todo lo referente a la elaboración de ladrillos artesanales mejorados y ladrillos con incorporación de materias primas alternativas, mediante la fabricación de discos y ladrillos, además de la interpretación de los resultados obtenidos. En el capítulo 6 "Conclusiones" se hace una recapitulación de todo el trabajo, resumiendo las discusiones y destacando los datos más relevantes del estudio realizado; este capítulo también contiene "Líneas de Investigación de Futuro", donde los investigadores pueden ampliar este estudio, empleando las metodologías y resultados para diferentes sectores ladrilleros del Ecuador, así como también estudios complementarios como un análisis socio-económico entre otros. En el capítulo 7 de "Bibliografía", se recogen todas las referencias bibliográficas incluidas en el texto.

2. SÍNTESIS TEÓRICA

2.1. El Ladrillo

2.1.1. El ladrillo en la historia

Los ladrillos es uno de los materiales de construcción más antiguos conocidos que datan de 7000aC, donde se encontraron por primera vez en el sur de Turquía y alrededor de Jericó. Los primeros ladrillos fueron ladrillos de barro secados al sol. Se descubrió que los ladrillos cocidos eran más resistentes a las condiciones climáticas más duras, lo que los hacía un ladrillo mucho más confiable para usar en edificios permanentes, donde los ladrillos de barro no hubieran sido suficientes. Los ladrillos cocidos también fueron útiles para absorber el calor generado durante el día y luego liberarlo durante la noche.

En los valles del Nilo, del Tigre y del Éufrates la abundancia de materia prima llevaron al desarrollo del ladrillo cerámico su simplicidad, resistencia y durabilidad llevaron a su uso extensivo y le dieron un lugar dominante en la historia de la construcción en paralelo con la piedra. Los primeros ladrillos fueron moldeados a mano, secos al sol y reforzados con diversos materiales, siendo tan resistentes que se usaron por un período muy largo, los primeros ladrillos cocidos aparecieron alrededor de 4.000aC. El moldeado fue inicialmente realizado a mano, aunque aproximadamente a partir de la Edad del Bronce se han empezado a usar también moldes de madera con una industria bien organizada. En las fortificaciones de Mesopotamia hay vestigios de empleo de ladrillos cocidos en la fecha referida y ladrillos coloreados a partir de 3000aC. Esta realidad se extiende a Asia Menor, Siria y Persia.

Los antiguos egipcios también utilizaron ladrillos de barro secados al sol como materiales de construcción, evidencia de lo cual todavía se puede ver hoy en ruinas como Harappa Buhen y Mohenjo-daro, 3300a.C. a 1300a.C. Pinturas en las paredes de la tumba de

Tebas representan esclavos que mezclan, templan y transportan arcilla para los ladrillos secados al sol. Estos ladrillos también consistían en una proporción 4: 2: 1 que les permitía colocarlos más fácilmente. 1400aC. a 1350aC.

Los romanos distinguieron aún más aquellos que habían sido secados por el sol y el aire y aquellos ladrillos que fueron quemados en un horno. Prefiriendo hacer sus ladrillos en la primavera, los romanos se aferraron a sus ladrillos durante 2 años antes de ser usados o vendidos. Solo usaron arcilla blanquecina o roja para sus ladrillos.

Los primeros ladrillos quemados datan de 3000a.C., cuya aplicación estaba orientada a los revestimientos externos y muros de protección, a pesar de que la técnica se desarrolló siglos antes, especialmente en la quema de utensilios domésticos. Y entre 1600 y 1100a.C. fueron encontrados, donde quedaba ubicada Babilonia, algunos ejemplares de ladrillos quemados.

En 430a.C. se encontraron azulejos en Grecia, además de indicios de su utilización en China y Japón alrededor del mismo período.

Utilizando hornos móviles, los romanos tuvieron éxito en la introducción de ladrillos cocidos en horno a todo el Imperio Romano. Los ladrillos fueron estampados con la marca de la legión que supervisó la producción de ladrillos. Estos ladrillos difieren de otros ladrillos antiguos en tamaño y forma. Los ladrillos romanos eran comúnmente redondos, cuadrados, oblongos, triangulares o rectangulares. Los ladrillos cocidos en horno tenían generalmente 1 o 2 pie romano por 1 pie romano, pero con algunos ladrillos más grandes hasta 3 pies romanos. Los romanos prefirieron este tipo de fabricación de ladrillos durante el primer siglo de su

civilización y utilizaron los ladrillos para edificios públicos y privados en todo el imperio (James y Campbell, 2003).

En América del Sur, en lo que referente a los ladrillos existe escasa e imprecisa información que data del período colonial, a partir de técnicas de producción rudimentarias introducidas por los jesuitas, que necesitaban ladrillos para la construcción de colegios y conventos.

En Perú desde el periodo 1200 – 1480 d.C, existe la ciudad de barro más grande de américa: la ciudadela de Chan Chan que se compone de monumentales construcciones que cubren una extensión de 20km² (Montero y Valle, 2012).

En Ecuador con la llegada de los españoles en 1524 se inicia con nuevas técnicas de construcción de viviendas utilizando al ladrillo para este proceso (López, 2015).

2.1.2. Significado del ladrillo

El ladrillo es un material empleado en la construcción, cuya forma presenta la característica de un paralelepípedo (INEN 293 NTE, 1977), cuya materia prima empleada en su elaboración es la arcilla, estos no tiene consistencia cuando están en estado húmedo, consolidándose con el secado al ambiente (estado crudo) y a través de la cocción lograr su endurecimiento. La fabricación del mismo es sencilla, esta consiste en mezclar las materias primas, moldearlas, secarlas al aire y finalmente cocerlos a altas temperaturas. Este material presenta propiedades de absorción, porosidad y resistencia a la compresión, lo que lo convierte en un elemento atractivo en la construcción, además de poseer bajo coste de producción, convirtiéndolo en un elemento esencial en el campo de la albañilería.

Bajo norma técnica de construcción INEN 293 NTE, 1977-05 se lo define como una pieza de arcilla moldeada y cocida, en forma de paralelepípedo o prisma regular que se utiliza en albañilería.

2.1.3. Geometría del ladrillo

Un ladrillo en lo referente a su geometría se puede notar las siguientes características, para cada una de sus caras y sus dimensiones, en el presente trabajo haremos referencia a las descripciones propuestas en la Figura 1.

Figura 1. Descripción de las partes de un ladrillo: a) Caras y b) Aristas

Las dimensiones: largo, ancho y espesor, se denominan: sogá, grueso y tizón, respectivamente; las caras son: tabla, canto y testa, de mayor a menor superficie.

2.1.4. Propiedades del ladrillo

Las propiedades principales de los ladrillos deben entenderse en su relación con el producto terminado, (Barranzuela, 2014).

Este debe garantizar calidad y características que ofrezcan buena porosidad, lo más apropiado posible para ajustarse al mortero (Figura 2); el control del proceso de sinterización es de suma importancia puesto permite formar un producto denso, reduciendo la porosidad mediante la unión entre las partículas adyacentes del material y mejorando la resistencia del producto de tal modo que un golpe de martillo produzca un sonido agudo; su forma debe ser regular, sin presentar deformaciones, los ángulos en lo posible deben ser rectos y sus caras paralelas; no se pueden cocer de manera excesiva ya que se produce cristalización de la materia y por ende se fractura fácilmente, una mala cocción lo torna blando y pierde su resistencia.

El ladrillo no debe poseer materiales extraños, tanto interna como externamente, no debe presentar defectos de ninguna naturaleza. En la figura 2 podemos esquematizar las propiedades del ladrillo.

Figura 2.Propiedades de los ladrillos, (Barranzuela, 2014 y Gallegos & Casabone, 2006)

2.1.4.1. Físicas – estéticas

- a) Dimensión. -Estas son variadas, dependerán del empleo que se le vaya a dar al ladrillo, la correspondencia entre la sogá y el tizón debe ser 2 a 1.
- b) Color. – Los colores de los ladrillos tienen que ver con el tipo de arcilla que se empleen en su fabricación, En algunos casos, también interviene en el color la temperatura de cocción y/o la adhesión de algún mineral.
- c) Textura. -Esta se da en función del empleo en su colocación que se le vaya a dar al mismo, puede presentarse lisa (ladrillos vistos) o rugosa (mayor adherencia al mortero) (Somayaji, 2001).

2.1.4.2. *Ingenieriles*

Conciernen a la resistencia estructural y durabilidad.

2.1.4.3. *Resistencia estructural*

- Resistencia a la compresión. - Se establecen mediante un ensayo técnico específico, midiendo la resistencia de estos ante un esfuerzo de compresión.
- Peso. - Debe ser liviano, reduciendo cargas muertas, para aligerar estructuras.
- Variabilidad dimensional. -Se relaciona con los cambios de las dimensiones del ladrillo.
- Alabeos. - Se presenta convexo o cóncavo en sus caras, principalmente en la tabla.

2.1.4.4. *Durabilidad*

- Absorción de humedad.-Expresa en porcentaje bajo norma (INEN 296, 2015)
- Resistencia al fuego. -No sufre daños sometido a altas temperaturas.
- Aislamiento térmico. -Produce baja conductividad térmica, evitando la transmisión de calor.

2.1.5. *Proceso industrial*

Proceso de producción del ladrillo artesanal

Las Técnicas de Producción Artesanal consisten en un conjunto ordenado de conductas, habilidades y procedimientos, combinado a los medios de producción (máquinas, herramientas, instalaciones físicas, fuentes de energía y medio de transporte) y materiales, por medio del cual es posible obtenerse, voluntariamente, un determinado producto que exprese creatividad e identidad cultural. La técnica artesanal combina creatividad, identidad cultural, forma y función, requiriendo destreza manual en el empleo de las materias primas y en el uso de herramientas, y sin uso de equipos automáticos.

El ladrillo artesanal actualmente es muy utilizado en la construcción, en Ecuador; el proceso de tecnificación de producción ha avanzado poco a lo largo del tiempo, en comparación con la producción de bloques, su elaboración presenta problemas para el sector, incidiendo directamente en la producción de los mismos y en la disminución de su calidad.

La pasta (arcilla – arena – correctores orgánicos – agua) es la base de este material, la mayoría de productores, conservan el sistema tradicional de elaboración, no existiendo control de calidad en los procesos, ni en el producto terminado, esto ha generado que las diferentes dosificaciones empleadas, así como la resistencia de este, se dé acorde a cada fabricante, lo cual ha creado incertidumbre, a nivel de los constructores, por la calidad del producto.

En el proceso cerámico tradicional existen las siguientes etapas:

2.1.5.1.Elaboración de la pasta

Una vez recibida la materia prima en los depósitos, se procede a la selección y limpieza de la misma (eliminación de residuos orgánicos, piedras, plásticos, etc.). Eliminados los residuos, el material es llevado al sitio de trabajo (noques), en este lugar se realizan las mezclas, procediendo el trabajador a destruir de forma manual los terrones de gran tamaño, esto si el material le permite; un noque que consiste en un pozo pequeño cavado en el suelo con una profundidad baja cuya capacidad es variable (Figura 3).

Figura 3.Noques de mezclado, pasta de ladrillo

2.1.5.2.Hidratación

Para el ajuste e hidratación del material se emplea agua (común). Este proceso es rutinario, sin ningún proceso técnico, si no, por experiencia o costumbre. A la materia prima hidratada, se añade un corrector orgánico o desgrasante (aserrín, bagazo o tamo de arroz) que disminuye la cantidad de agua de amasado y permite manejar mejor la pasta, se deja reposar por 24 horas, recubierto con un toldo o plástico, a fin de que la pasta logre un nivel homogéneo de hidratación (Figura4).

Figura 4. Hidratación de la mezcla

2.1.5.3.Mezclado

El proceso es rustico, por lo general pisoteo humano tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5.Mezclado de la pasta

2.1.5.4. Moldeado o conformado

En esta fase se trabaja con la materia prima en estado plástico, se realiza una nueva limpieza y se prepara el lugar donde se colocarán los ladrillos en estado crudo, para su secado, esparciendo arena fina en una capa muy delgada esto con el propósito de que el ladrillo no se adhiera al piso natural y se malogren las piezas.

La pasta es transportada en carretillas o baldes, los cuales además se utilizan como medida, la pasta se coloca en los moldes de madera y se ejerce una leve presión sobre ésta lo que permite que adquiera la forma rectangular del molde; por último, se emplea una enrasadora, quitando los excesos; concluido el proceso se retira el molde, se lo limpia, humedece y se repite el procedimiento (Figura 6).

Figura 6. Moldeado del ladrillo

2.1.5.5. Deshidratación o secado del ladrillo

Inmediatamente después del desmolde se expone el ladrillo al sol, transcurridos 2 días de permanecer en esta posición inicial, se procede a colocarlo de canto por el tiempo aproximado de 3 días, luego de esto se coloca el ladrillo en hileras de 6 sobrepuestas, este proceso de secado previo evita resquebrajaduras en las piezas, el ladrillo entrecruzado permite la aireación y ocupa menos espacio, en esta nueva posición el ladrillo permanecerá por el tiempo aproximado de 7 a 15 días, esto depende de las condiciones climáticas y/o del criterio de cada

uno de los productores. En esta fase el ladrillo se contrae entre 7% a 8% de su volumen original.

Figura 7.

Figura 7.Secado del ladrillo tradicional

2.1.5.6.Cocción

Esta parte del proceso de producción de ladrillos artesanales, consiste en colocar estos previamente secados al ambiente, en los hornos de tal forma que su distribución permita la circulación del calor y gases, las temperaturas que alcanzan son altas por tiempos prolongados, pretendiendo con esto que adquieran sus propiedades mecánicas, físicas y su apariencia final, ya que la arcilla sin cocer tiene propiedades muy bajas (Figura 8).

Figura 8.Horno de ladrillo

Al iniciar el proceso de quemado se utiliza láminas delgadas de maderas, empapadas en diésel o gasolina, cada 45 minutos se añade carga de leña al horno, con el objeto de ganar temperatura, el proceso se realiza por costumbre o experiencia del quemador, (17 a 20 horas, Figura 9).

Figura 9.Proceso de arreglo y quema del ladrillo

En este proceso el encargado supervisa la temperatura en el horno, identificado cada una de sus fases por la coloración que presenta el fuego, Figura 10.

Figura 10.Enfriado del ladrillo

El enfriamiento del ladrillo dura mínimo 7 días, procediendo luego a extraerlo del horno y ordenarlo en barricadas.

2.1.6. Categorización del ladrillo según la norma ecuatoriana

Se clasifica en macizos y huecos, INEN 293 NTE, 2014 como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Dimensiones del ladrillo cerámico en cm

Tipo de ladrillo	Largo L	Ancho A	Alto h
Común	39	19	9
*De máquina	39	19	9
	29	14	9
*Reprensado	29	19	9
	29	14	9
Hueco	29	19	19
	29	19	14
	29	19	9
*Este tipo de ladrillo no se ha considerado en la presente investigación.			

Fuente: INEN 293 NTE, 2014

2.1.6.1.Macizos

Se clasifican en: tipo A, B y C (Figura 11).

Figura 11.Ladrillo macizo artesanal

a) Tipo A

Es un ladrillo de alta calidad, resistencia a la compresión mínima de 20MPa, por unidad; sus aristas y ángulos rectos, no deben poseer eflorescencias, debe ser re-prensado.

b) Tipo B

Se diferencia del tipo A, ya que es elaborado a mano, presentando imperfecciones con una tolerancia de hasta 5mm en sus aristas, color rojizo y una RC (Resistencia a la Compresión) mínima de 14MPa.

c) Tipo C

Resistencia a la compresión simple, mínima de 6MPa, parecido al ladrillo tipo B, diferenciándose por el límite permitido en la variación de sus aristas, máximo 5mm.

2.1.6.2.Huecos

Elaborados con tecnología, sin imperfecciones en aristas y ángulos, color rojizo. Su clasificación según la norma es: tipo D, tipo E y tipo F (Figura 12).

Figura 12.Ladrillo perforado a) Fábrica Falco, b) Fábrica Arcimego S.A.

d) Tipo D

Su resistencia a la compresión simple mínima es 5MPa, son empleados en tabiques divisorios no soportantes, relleno de losas aligeradas de hormigón armado y principalmente en la construcción de muros soportantes.

e) Tipo E

Empleado solo en relleno de losas aligeradas de hormigón armado y en la construcción de tabiques divisorios no portantes, su RC simple mínima es 4MPa.

f) Tipo F

Se emplea únicamente como relleno de losas aligeradas de hormigón armado, su RC simple mínima es de 3MPa.

2.2. Materias primas

2.2.1. Arcillas

La materia prima fundamental para la elaboración de los diferentes tipos de cerámicos a altas temperaturas en su mayor parte constituye la arcilla.

Las arcillas tal como se presentan en los yacimientos como materia prima para ladrillos no está constituida por un solo tipo de mineral al contrario la conforman diversos tipos de minerales y sustancias en mayor o menor cantidad tales como cuarzo, micas, carbonatos, sulfuros y algunas sales solubles, materia orgánica, óxidos, hidróxidos y silicatos diversos.

Conocer la materia prima significa que conocemos su plasticidad, su estado de retracción de secado y de quema, su granulometría, la cantidad de agua que se requiere para la preparación de la pasta, las tendencias a las grietas de secado, su resistencia después de la

quema. Conocer una materia prima significa ensayar y medir estas características en el promedio general del yacimiento mapear zona a zona, decidir qué se debe hacer con los sitios en donde existen zonas de cultivo, evitando en lo posible utilizar zonas de plantaciones agrícolas.

La gran variedad de tipos de arcillas impide que se tenga una definición única y precisa de este material. A continuación, se presentan algunos de los conceptos, empleados en la literatura para definir arcillas:

El término arcilla no tiene significado genérico. Se utiliza para los materiales que resultan directamente de la meteorización y/o de la acción hidrotermal o que se depositaron como sedimentos fluviales, marinos, lacustre o eólico (Gomes, 1986).

Se puede definir a los minerales arcillosos como silicatos hidratados con estructura cristalina en capas (filosilicatos) constituida por finas láminas de SiO_4 , ordenada de forma hexagonal, condensada por láminas octaédricas de hidróxidos de minerales trivalentes; los minerales arcillosos están constituidos por partículas (cristales) de pequeñas dimensiones, generalmente por debajo de $2\mu\text{m}$ (Souza Santos, 1986).

El término "material arcilloso" puede aplicarse a cualquier material natural de granulometría fina y de textura terrosa o arcillosa, independientemente de que la composición sea esencialmente de arcilla.

Los tipos de arcillas más comunes son: las caolinitas (granulometría gruesa), las montmorillonitas (gran tendencia a la rehidratación) y las illitas (intermedia entre las caolinitas y las motmorillonitas).

De acuerdo con su geología, las arcillas se clasifican en residuales las cuales no fueron transportadas por los agentes naturales y, por lo tanto, se encuentran en el lugar de su formación y las sedimentarias, las cuales fueron transportadas de su lugar de formación por los agentes naturales como lluvia, viento, ríos, mares, siendo depositadas en bajadas y llanuras producto de inundaciones.

Las arcillas tienen como características físicas mecánicas: plasticidad, contracción en el secado, resistencia a la flexión del material seco, temperatura de quema y la resistencia a la flexión del material quemado.

Para uso en el sector productor de cerámicos, las arcillas pueden ser clasificadas en refractarias, fundentes y aglomerantes, siendo las dos últimas las más utilizadas en la fabricación de ladrillos. En general se procura hacer una mezcla entre las arcillas, para componer una pasta. En este caso, se considera la calidad de las arcillas en cuanto a la plasticidad, color después de la quema, resistencia mecánica, contracción y composición mineralógica, buscando obtener un producto final dentro de las especificaciones previstas, sin dejar de lado las dificultades que pueden ocurrir durante el proceso productivo.

La distribución granulométrica es otra de las características importantes de ella depende la superficie específica del ladrillo, en cuanto mayor sea el empaquetamiento de las partículas (es menor la sección de poros y aumenta el contacto entre las partículas de arcillas), por lo tanto, mejoran las propiedades físico – mecánicas, (resistencias a la flexión y compresión, absorción de agua, tasa inicial de absorción, porosidad, etc.), (Santos, et al, 2011).

La preparación de la pasta es una etapa muy importante en el proceso de obtención de los ladrillos, donde se debe observar la formulación de la misma y los tipos de dosificación.

La formulación de las pastas debe realizarse basándose en la composición química de las materias primas, en su composición mineralógica, en sus comportamientos físicos y físico-químicos. Por lo tanto, para formular una pasta se recurre a los ensayos físicos de las materias primas, como el color de quema, la contracción lineal, la resistencia a la compresión, la dilatación térmica lineal, el análisis químico de las materias primas, así como el análisis mineralógico.

Los Tipos de Dosificación consisten en la medida por pesaje o por volumen. En la dosificación por pesaje se tiene mayor precisión en los resultados, siempre que se controle la humedad de los componentes de la masa. En el caso de la dosificación por volumen, además del control de la humedad, se debe tener en cuenta la granulación de los componentes.

En el proceso productivo de la cerámica, la cocción es la fase principal, pues es en ella donde se manifiestan grandes números de defectos provenientes de las etapas anteriores de la producción, como por ejemplo: preparación de masa, formación de las piezas, secado, arreglos para quema y etc. El objetivo de la cocción de las piezas cerámicas es que bajo la acción del calor, ocurren ciertas reacciones y transformaciones químicas y físicas, sinterización, en los componentes de la masa, a fin de obtener el cuerpo cerámico.

Los defectos en las piezas provenientes de un proceso de quema mal realizado proceden de la insuficiencia de cocción, requiera un programa de cocción mal adaptado y heterogeneidad en el tiempo y en la sección del horno.

La cerámica en general y la fabricación de ladrillos en particular es todavía en los días de hoy un proceso artesanal altamente empírico.

El factor temperatura debe ser cuidadosamente acompañado, pues el tiempo es muy importante para provocar las reacciones, como también, la atmósfera del horno influye en el resultado final, una vez que los constituyentes de la pasta también reaccionan con los gases que están en contacto. Las informaciones obtenidas en los ensayos térmicos de las pastas posibilitan el establecimiento de la curva de cocción para las mismas.

2.2.2. Las Tierras Diatomeas

La diatomita es sinónimo de tierra de diatomeas o kieselghur, la cual es una roca porosa de sílice, compuesta de esqueletos fosilizados y finos gránulos de sílice amorfo (BORGEL, 1975 citado por KADEY, 1975). Hay más de 12.000 especies diferentes, exhibiendo una superficie irregular y una estructura dilatada (Souza Santos, 1992)

La diatomita es una arcilla formada por la acumulación de esqueletos de algas marinas que contienen 87-91% de sílice (SiO_2), con cantidades significativas de alúmina, Al_2O_3 , óxido de hierro, Fe_2O_3 y metales alcalinos en forma de óxidos, y otros como impurezas en menor cantidad como el titanio, mica, feldespato, cuarzo, sodio, potasio, calcio, magnesio, materia orgánica entre otras. En su estado natural, la diatomita tiene una cantidad de agua que puede variar entre 10 y 60%.

El origen de toda diatomita es un organismo vivo denominado bajo el mismo nombre. Las diatomeas son fértiles (se reproducen en abundancia y con facilidad), estas son algas acuáticas unicelulares microscópicas, en su taxonomía pertenecen a la clase Bacillariophyceae

y al orden Bacillaria, sus características es poseer dos valvas silíceas, ubicadas dentro de la capa exterior del plasma; el tamaño de la valva varía según la especie (Rodríguez, et al, 1998).

De acuerdo con Souza (1992), la mayoría de las diatomitas tienen dimensiones en el rango de 4µm a 500µm de diámetro, teniendo un perfil circular u oval, a veces triangular o cuadrangular, las de agua dulce tienen generalmente la forma navícula.

Cuando el organismo fenece, se precipita al fondo del medio acuoso, conformando un sedimento de tipo orgánico, la descomposición de este permite la acumulación de los caparazones silíceos, los cuales a través del tiempo se compactan hasta convertirse en depósitos potenciales de tierras diatomeas.

La diatomita en estado puro se encuentra conformada por sílice opalina o hídrica, además puede contener cantidades reducidas de unidades inorgánicas como: alúmina, hierro, tierras y metales alcalinos, así como, otros componentes menores.

La tierra diatomea, son compuestos minerales no metálicos, formados en su mayoría por los esqueletos silicios de algas diatomeas. Esta es una variedad del ópalo, especie mineral de la clase del silicio, cuya unidad principal es la reunión de iones silicio – oxígeno, su fórmula química es: $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, (Colín-García et al., 2013).

Esta roca sedimentaria, porosa y bajo peso volumétrico, por la acumulación de las frústulas de los esqueletos de las algas diatomeas. Su presencia inerte, mantiene una composición de 90% de sílice y 10% de restos de óxidos de hierro y aluminio (aproximadamente). Posee capacidad de absorción y una amplia área superficial Figura 13, (Díaz, 2011).

Figura 13. Formas de diatomeas, Stidolph, 2013

2.2.2.1. *Aplicaciones*

El principal elemento de la diatomita, es la sílice amorfa, tiene alta porosidad, baja densidad, baja conductividad térmica, alto punto de fusión e inercia química (Smol y Stoermer, 2010) criterio ratificado por (Miras, et al, 2013), permitiendo un amplio uso en el sector industrial. Alyosef et al., 2014, su alta permeabilidad, reducido tamaño de partícula y alta superficie específica, Meradi et al., 2015, la convierten en un mineral con gran potencial.

De acuerdo a Illana & Blanco, 2008 “Los griegos fueron de los primeros en darles una aplicación práctica a las tierras diatomeas, con la que fabricaron ladrillos de poco peso destinados a la construcción”.

Así mismo los residuos de tierras diatomeas de procesos industriales como refinación de aceites vegetales y elaboración de cerveza han sido utilizados para la fabricación de ladrillos, de manera que se sustituya el uso de arcilla comúnmente utilizado (Galán-Arboledas, et al, 2017)

2.2.2.2. *Estructura mineralógica y química*

La estructura de la tierra diatomea, muestra que cristalográficamente, esta es micro-amorfa, no obstante, bajo microscopio se presenta amorfa. El análisis DRX, indica la predominancia de β - cristobalita y de una aproximación de la α –cristobalita, indican que es isotrópica (Saldarriaga, 2009).

Su composición se da básicamente por asimilación de frústulas de ópalo unidos a arcillas, cenizas y otras impurezas. El silicio, oxígeno, agua y algunas impurezas ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) forman el ópalo.

Los componentes químicos de las tierras diatomeas se muestran en la Figura 14:

Sílice amorfa	80,14%	Cobalto	3 ppm
Plata	0,5 ppm	Cromo	40 ppm
Aluminio	3,13%	Cobre	6 ppm
Arsénico	4,5 ppm	Hierro	0,75%
Bario	1,96 ppm	Mercurio	20 ppm
Berilio	1 ppm	Potasio	0,72%
Calcio	2%	Lantano	13 ppm
Cadmio	0,4 ppm	Magnesio	0,52%
Molibdeno	2 ppm	Manganeso	0,16%
Sodio	1,92%	Teluro	0,1 ppm
Niobio	6 ppm	Thorio	4 ppm
Níquel	4 ppm	Titanio	0,11%
Bismuto	0,1 ppm	Talio	6 ppm
Fósforo	0,02%	Uranio	10 ppm
Plomo	11 ppm	Vanadio	65 ppm
Antimonio	0,1 ppm	Wolfram	4 ppm
Scandio	3 ppm	Ytrio	7 ppm
Estaño	2 ppm	Zinc	34 ppm
Estroncio	362 ppm	Zirconio	22 ppm

Figura 14. Composición química de las tierras diatomeas, Illana y Blanco, 2008

2.2.2.3. *Propiedades físicas y químicas*

Entre sus principales propiedades se podrían citar las siguientes:

- Una gran área superficial.
- Brillo mate y terroso.
- Tenacidad desmenuzable a friable.
- Solubilidad insoluble en ácidos.
- Aspecto macroscópico: Roca purulenta, fina y porosa con aspecto margoso.
- Color por lo regular blanco brillante (en el caso de alta pureza).
- Pueden estar coloreadas.
- Blanco (calcinado con fundente).
- Rosa (calcinado).
- Gris (sin calcinar).

- Alta porosidad.
- Volumen de muy baja densidad.
- Capacidad para absorber líquidos muy alta.
- Capacidad abrasiva suave.
- Conductividad térmica muy baja.
- Alta resistencia a la temperatura.
- Punto de fusión entre 1400° a 1750°C.
- Peso específico 2,0 (la calcinación la incrementa a 2,3).
- Área superficial 10 a 30 m²/g (la calcinación la reduce a 0,5 a 5 m²/g).
- Índice de refracción 1,4 a 1,46 (la calcinación la incrementa a 1,49).
- Dureza (Mohs) 4,5 a 5 (la calcinación la incrementa a 5,5 a 6).
- Químicamente inerte.
- El porcentaje de humedad varía de acuerdo al depósito (entre 10% hasta un 60%).

2.2.3. Los Relaves Mineros

Relave minero se define al “desecho mineral con partículas de tamaño entre una arena y un limo que provienen del proceso de concentración del que son producidos, los cuales son transportados y depositados en forma de lodo”, (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2005).

De acuerdo a (Romero y Flores, 2010) el relave es el sobrante, que proviene de la explotación minera. Este material se presenta fino, con características húmedas, siendo depositado en botaderos o a los afluentes hídricos, sin tratamiento previo (Figura 15).

De acuerdo a (Lu y Wang, 2012) se estima que la extracción de metales pesados alcanza un valor de 1150 millones de toneladas desde la edad de piedra, con generación de desechos sólidos de 5 a 7 millones de toneladas por año en el mundo, produciendo impactos negativos al

medio ambiente, mediante la pérdida de la biodiversidad y emisión de contaminantes en el aire y cursos de agua superficiales y subterráneos.

La reutilización de residuos mineros es una alternativa confiable para Ecuador, que se considera un país con potencial minero. Este país posee reservas de varios yacimientos minerales, siendo explorado sólo el 10% del territorio (Herdoíza, et al, 2017) en el caso de la producción total de oro durante el año 2014, este proviene de actividades de pequeña minería en un 78% y minería artesanal en un 22% (Banco Central del Ecuador, 2017).

Figura 15. Relave de mina

2.2.3.1. *Particularidades de los relaves mineros*

Los relaves de mina, provenientes de procesos de trituración, contienen partículas de diversos tamaños, desde centímetros, hasta milímetros, en su proceso deben ser molidos para que se reduzcan a partículas de tamaño menor (mm), con el uso de tambores rotatorios o molinos de bolas.

Al material se le agrega agua, con esto permanece como lodo, para proceder a la extracción de los minerales (plata, oro, etc.), este proceso puede variar, ya sea el caso, esto con el propósito de la recuperación efectiva de los granos de mineral. Para ello se debe realizar una

trituration de las partículas, además se debe añadir cal para incrementar el pH y cianuro para la disolución de las partículas que envuelven este tipo de minerales.

Estos residuos se pueden encontrar en dos modalidades: pasivos y activos mineros. Los primeros son llamados escombreras, y por lo común son desechados generando por ello contaminación; los segundos son aquellos que se mantienen en operación hasta concluir con el proceso.

Estos desechos pueden diluir minerales solubles, presentes en los lugares donde se ubican, además pueden poseer elementos tóxicos, como mercurio, peligrosos para la salud humana, animal y el medio ambiente en general. La construcción de estructuras que brinden seguridad, en su almacenamiento, es de suma importancia para el cuidado ambiental, evitando con ello el deterioro del medio natural, (Paladines y Zúñiga-Suárez, 2016)

2.2.3.2. *Geopolimerización*

La activación alcalina de aluminosilicatos permite la producción de materiales cementosos, mismos que han sido estudiados bajo la necesidad de contar y puedan ser producidos utilizando materias primas de bajo costo, con poco gasto energético y principalmente con mínima emisión de gases tóxicos a la atmósfera.

Este tipo de investigaciones están creciendo y posicionándose a nivel mundial a fin de suplir la demanda de cemento con la producción a gran escala de nuevos materiales cementantes.

El alto consumo de materiales para la construcción, genera una elevada demanda, y por ende el incremento de la producción industrial de los insumos requeridos por el sector, lo que ha denotado un aumento en la explotación de los recursos naturales, incluso poniendo en franco

desequilibrio la existencia continua de los mismos. Su producción genera residuos, que en la mayoría de casos generan contaminación al medio ambiente. Uno de estos problemas, es el que se presenta por la acumulación de residuos en la explotación industrial minera, por lo que algunos investigadores como Ojuri, Adavi, y Oluwatuyi, 2017 han dedicado mucho tiempo al estudio sobre la reutilización de estos desechos, con fines de aplicación en otras actividades y no se conviertan en un problema a largo plazo.

Vitor Glukhovsky fue el primer investigador en resaltar la formación de rocas sedimentarias a baja presión y temperatura esto a partir de transformaciones geológicas de determinadas rocas volcánicas en zeolitas. V, Glukhovsky propuso un nuevo ligante a partir de muestras de construcciones antiguas (Komnitsas & Zaharaki, 2007). El mismo investigador determinó fases cristalinas de geles de silicatos cálcicos provenientes de cementos antiguos, los cuales fueron caracterizados aplicando técnicas como Difracción de Rayos X, Microscopía óptica entre otras.

El científico Joseph Davidovits en la década del 70 inició sus investigaciones sobre materiales inorgánicos con el fin de crear materiales resistentes al fuego, debido a la ola de incendios que ocurría en Francia (J Davidovits, 2002). El investigador Davidovits estudió muestras de cementos expuestos a ambientes físicos agresivos por un largo tiempo, aunque presentaban poco desgaste y alteraciones químicas. Entre las muestras analizadas se encontraban fragmentos de pirámides de Egipto y Jericó que datan del 7000aC. Es así, que luego de pasar por análisis químicos y mineralógicos, Davidovits verificó la existencia de material amorfo compuesto de aluminosilicatos.

La geopolimerización se ha convertido en un proceso químico de gran importancia, tomado fuerza en los últimos años, debido a su injerencia como técnica, que permite el empleo

de estos residuos, hasta convertirlos en materiales con elevada resistencia mecánica, atribuyéndoles con ello excelentes propiedades físicas, debido a su composición estructural. Con la finalidad de elaborar materiales alternativos para la construcción, se han empleado últimamente residuos industriales, como: humo de sílice, cenizas volantes, escorias de alto horno, residuos de explotación minera, etc. El reemplazo de los recursos naturales como la arcilla, con este tipo de materiales sustitutos para la elaboración de insumos para la construcción, genera un alivio medioambiental.

Los geopolímeros son un tipo de material compuesto de minerales aluminosilicatos, que cuando se activan mediante soluciones básicas y se encuentran bajo condiciones de temperatura y presión constantes, dan como resultado un material con características mecánicas satisfactorias. Estos polímeros sintéticos orgánicos forman redes amorfas de tetraedros, alternados de AlO_4^- y SiO_4 , debido a los componentes mineralógicos utilizados como fuentes para la elaboración de geopolímeros, los que se encuentran constituidos por lo general de alúmina y sílice (J. Davidovits, 1991). En el proceso se involucran varios factores, los cuales por lo general afectan a las propiedades finales del geopolímero elaborado. Uno de estos factores es el activador alcalino, sus concentraciones (proporciones), así como los aditivos utilizados; afectan de manera directa a sus propiedades mecánicas (Muñiz-Villarreal et al., 2011).

En un comienzo, los geopolímeros fueron preparados mediante la utilización de materiales de arcilla, en conjunto con soluciones alcalinas de NaOH y KOH, y llevadas a temperaturas que se encontraban en rangos de 25°C y 120°C, para conocer la influencia de la calcinación de la materia prima en la reactividad con las soluciones utilizada se convirtió el compuesto mineralógico caolinita a meta caolinita sometiénola a 650°C, (J Davidovits, 2015). El resultado fue un geopolímero con propiedades mecánicas elevadas en comparación con otros

ligantes. De lo expuesto anteriormente los investigadores determinaron que estos productos obtenidos eran de utilidad para la fabricación de cerámica, así como para cualquier otro tipo de material empleado en la construcción, debemos anotar que las propiedades del producto final, varían no solo en base al activador alcalino empleado, sino también influye la naturaleza y pureza de las materias prima utilizadas, (Duxson, et al, 2007)

Cualquier fuente que presente características mineralógicas como los aluminosilicatos pueden ser útiles para la preparación de un geopolímero, (Xu y Van Deventer, 2000), siempre y cuando este no contenga componentes químicos que podrían ser peligrosos para la salud humana, como es el caso de los residuos de minería. Estos pasan por procesos que por lo general involucran la utilización de reactivos químicos para la extracción del mineral, generando desechos no aptos para su utilización debido a su composición peligrosa.

Para Davidovits y Davidovics, 1991 los geopolímeros no tienen composición estequiométrica, la geopolymerización puede ser considerada análoga de las zeolitas; cuando se somete al análisis micro estructural, la química entre los dos materiales es bastante similar, sin embargo, las estructuras y las composiciones son diferentes. Los geopolímeros comprenden estructuras de amorfo a semicristalino.

2.2.3.2.1. Silicatos y aluminosilicatos

Para la creación de un geopolímero es preciso que la fuente o materia prima a utilizar se encuentre compuesta por silicatos¹ y aluminosilicatos.

En el proceso de polimerización se coloca el material en contacto con la solución (activador alcalino), causando la formación de cadenas poliméricas, tras haberse reorientado

¹ Son silicatos todos los minerales en los cuales el silicio y el oxígeno se coordinan en estructura tetraédrica, formando los denominados tetraedros (SiO₄). (Rubio y López, 2012)

los iones en solución; Estas cadenas poliméricas se consideran hipotéticamente, como el resultado de la poli condensación de iones de ortosialato; asumiendo que la síntesis es llevada a cabo por medio de oligómeros, los cuales suministran las estructuras unitarias de la red macromolecular tridimensional (Davidovits, 1991 y Dimas, et al, 2009).

Los geopolímeros que están basados en aluminosilicatos son llamados polisialatos (J Davidovits, 1982). La red sialato, está compuesta de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos a átomos de oxígeno. En su interior se encuentran presentes iones positivos de Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+ , para contrarrestar las cargas negativas del Al^{3+} , permitiendo que el aluminio pueda estar unido a tres oxígenos, (Shi y Fernández-Jiménez, 2006).

Los "polisialatos" son anillos de polímeros formados entre Si^{4+} y Al^{3+} en coordenadas tetraédricas con cuatro oxígenos (J Davidovits, 2002). Cuando se hace la mezcla del aluminosilicato y la solución alcalina, se desencadena una reacción, y después de una variación de tiempo resultará en una red de aluminosilicato (Weil, et al, 2005).

2.2.3.2.2. Proceso químico para la geopolimerización

Un polímero sintético orgánico resulta de una reacción química, conocida como geopolimerización, por medio de la cual el silicio y el aluminio se unen tetraédricamente por efecto del intercambio de átomos de oxígeno, constituyendo una unidad básica, denominada monómero sialato (O-Si-O-Al-O), el cual mantiene un exceso de carga negativa, por la sustitución del Si^{+4} con Al^{+3} . El balance de cargas del polisialato a nivel estructural, se da por la presencia de los cationes de los metales alcalinos K^+ , Na^+ , (Sindhunata, 2006).

Según Davidovits, 1991, la fórmula empírica del sialato es: $Mn(-SiO_2)_2 - (AlO_2)_n * wH_2O$, donde M = catión monovalente, (sea K o Na), n = grado de poli condensación, z = puede ser 1,2,3, determinando este el tipo de geopolímero resultante, 1 si la red es polisialato (PS), 2

si la red viene a ser polisialato - siloxo (PSS), 3 si la red es polisialato - disiloxo (PSDS) y W = número de moléculas de agua asociada (Figura 16).

Figura 16.Proceso de Geopolimerización, Duxson, Fernández-Jiménez, 2007

Duxson, Fernández-Jiménez, et al., 2007, determina que al entrar en contacto el medio alcalino, con las partículas sólidas, los componentes vítreos se disuelven. Liberando los aluminatos y los silicatos, en forma de monómeros, posiblemente, estos reaccionan (junto a otros), formando trímeros, tetrámeros.

Cuando la solución alcanza la saturación, causa la precipitación del gel (aluminosilicato), este se considera un intermediario en la reacción de geopolimerización, conocido como gel I. Su formación puede explicarse por su mayor contenido del ión Al^{3+} , en el medio alcalino en las fases tempranas de la reacción; factor que se le atribuye a los enlaces de $Al - O$, en los aluminosilicatos, empleados como materia prima, siendo más débiles que los enlaces $Si - O$. Gradualmente los enlaces $Si - O$, son disueltos, haciendo que la concentración de silicio en el medio alcalino aumente generando otro gel, denominado gel II, con lo cual gradualmente logra una proporción de silicio en la materia prima; finalizado el proceso se reorganizan las estructuras, determinando la composición y la estructura final del geopolímero.

La disolución/hidrólisis, reestructuración y poli condensación, son las reacciones que se producen en la geopolimerización, todas ellas se producen en un mismo tiempo (Figura 17).

Figura 17.Proceso de Geopolimerización (secuencia), Paladines y Zúñiga-Suárez, 2016

Con la disolución/hidrólisis empieza el proceso de geopolimerización (disolución continua del precursor de aluminosilicatos), produciendo especies reactivas de $Si(OH)_4$ y $Al(OH)_4^-$, las cuales contribuyen en este proceso. Los geopolímeros se definen, por su composición, estructura y comportamiento térmico en termoplásticos o termoestables (Lee y Van Deventer, 2002).

En la reestructuración de los precursores de Al , estos se orientan hacia la obtención de una fase termoestable y termodinámicamente estable, luego se produce la poli condensación². Ya en la última etapa se forman macromoléculas junto a las especies reactivas (formadas en la primera etapa); obteniéndose como producto secundario H_2O .

² Las reacciones de poli condensación son aquellas reacciones químicas en las cuales el polímero final se origina mediante sucesivas uniones entre monómeros, que emiten moléculas condensadas durante el proceso de unión.

Cada etapa se modifica, en base a las circunstancias, como se presente el proceso, (tipo de relación sólido/solución, contenido de solución, condiciones de reacción, concentraciones alcalinas, etc.), (Lee y Van Deventer, 2002).

Otra peculiaridad de los polímeros es su disposición geopolimérica a bajas temperaturas, asegurando con ello la integración del material. Es este proceso no existe incremento de ligantes, pero si catalizadores que generan reacciones mineralógicas entre componentes, formando redes. El proceso es semejante a que se presenta en la elaboración de cerámicos cocidos a temperaturas altas (900°C y 1100°C), siendo la arcilla el adherente, lo que sucede en contraposición con la polimerización, que ha muy bajas temperaturas, incluso ambientales, podría iniciar el proceso, (Boutterin y Davidovits, 2003).

2.2.3.2.3. El activador alcalino y su incidencia en el proceso de geopolimerización

El activador alcalino acelera la disolución de la fuente de aluminosilicatos, formando hidratos estables y consiguientemente la estructura compacta del geopolímero (acabado). Los activadores alcalinos más empleados son: hidróxidos, sales de ácido débil, sales de ácido fuerte y sales silícicas; siendo los hidróxidos más empleados: el de sodio, potasio, litio y silicato de sodio, (Chen, et al 2012), con lo cual(J Davidovits, 2008) descubrió que al añadir álcali a la fuente se provoca un endurecimiento rápido.

Así mismo, Palomo, et al, 1999establece que la potasa al atacar el componente vítreo del aluminosilicato, producto de la reacción permanente y fijado a las partículas originales de la materia prima, no produce dispersión del producto en torno al sistema, consiguientemente muchos huecos y poros no se llenan; pero cuando el activador alcalino es una disolución de hidróxido de sodio, se puede observar de igual forma gran número de poros y esferas huecas.

Para, Xu y Van Deventer, 2000, con la incorporación de *NaOH*, hay una superior disolución de los minerales, similar a lo que sucede incorporando *KOH*. Cabe anotar que el empleo de soluciones alcalinas formadas por silicatos solubles provoca reacciones más eficaces, que las soluciones de hidróxidos alcalinos.

El potasio K^+ , se presume puede ser el responsable de una mayor resistencia mecánica, así mismo genera un mejor proceso de condensación, en el producto final, frente al Na^+ , según Van Jaarsveld et al, 1999 y Steveson et al, 2005; cuando estos son incorporados en iguales condiciones el K^+ (como ion metálico) trabaja excelentemente como base y posee mayor dimensión, generando mayor velocidad en la disolución, formando, por lo tanto, estructuras más densas y más compactas.

La variable esencial para que se produzca químicamente un geopolímero de forma exitosa, según: Gasteiger, et al, 1992 depende de buenas características del activador alcalino, ellos describen que la disolución de la materia prima se incrementa considerablemente, cuando el ion hidróxido aumenta.

Los hidróxidos, se consideran los mejores activadores alcalinos, para desarrollar geopolímeros, puesto que funcionan como base, su excesiva alcalinidad destruye la estructura de los aluminosilicatos, formando estructuras sólidas; lo negativo son las eflorescencias, estos cristales si no son controlados oportunamente pueden convertirse en un grave problema. Exceso de alcalinidad en presencia de CO_2 atmosférico produce carbonatos de Na o cristales de bicarbonato, elementos que no alteran la estructura final del producto terminado. El empleo de

soluciones carbonatadas produce una reacción pobre, frente a los aluminosilicatos y estructuras endebles, sin cohesión entre sus partículas, (Provis y Van Deventer, 2009)

La consistencia y durabilidad, son propiedades que se afectan por la composición química del material, ya que las estructuras formadas son enlaces, que mientras más sólidos sea su estructura tendrá un mejor comportamiento físico y mecánico, no olvidar que las reacciones químicas afectan también las propiedades, por lo que tiene que considerarse en la producción de un geopolímero. Las relaciones más estudiadas son: M_2O/SiO_2 , SiO_2/Al_2O_3 , H_2O/M_2O y M_2O/Al_2O_3 donde $M = K, Na, Ca, Ba$ y Li , (metales alcalinos) (Xu y Van Deventer, 2002).

La producción de geopolímeros posee algunas ventajas, entre las que se destacan: variada cantidad de materias primas para elaboración; escaso impacto ambiental (por consumo del recurso energético, reducción de la emisión de gases contaminantes a la atmosfera); no existe necesidad de equipos sofisticados (con elevados precios), ya que las mezclas puede ser preparadas fácilmente con materiales simples; expuestos a medios agresivos muestran excelente estabilidad (frente a otros elementos, como por ejemplo el hormigón simple), además pueden lograr elevadas resistencias mecánicas en un corto tiempo, considerando condicionantes como; temperatura de curado, concentración alcalina, etc.

3. METODOLOGÍA

Este capítulo contiene una descripción de los materiales con los que se desarrolla la investigación, arcillas y arenas de los sectores de Catamayo y Malacatos, tierras diatomeas de Santa Elena y lodos de relave de Zamora Chinchipe, se indica el proceso de toma de muestras y se vinculan las técnicas y metodologías utilizadas para su caracterización. Así mismo, se evalúa las propiedades de los materiales cerámicos fabricados artesanalmente tanto de la zona de Catamayo como de Malacatos, cuyos resultados se muestran en el capítulo 4 y se menciona el proceso de elaboración de discos y ladrillos realizados en laboratorio a fin de determinar las diferentes combinaciones o mezclas óptimas.

El estudio inicia con la optimización de las pastas para la elaboración de los cerámicos tanto del cantón Catamayo de la cual se estudian dos minas La Vega e Indiucho; como del cantón Malacatos en este sector se analiza combinaciones de arcilla de cuatro minas Ceibopamba, Cangahua, Palanda, Chinguilamaca y arena fina. Del mismo modo se busca nuevas alternativas de fabricación de ladrillos para lo cual se trabaja con tierras diatomeas del cantón Santa Elena y arcilla de la mina Ceibopamba del cantón Malacatos. Finalmente se indaga la posibilidad de reutilizar los materiales de relave provenientes del proceso de gravimetría para la fabricación de ladrillos ecológicos, para lo cual se utiliza lodos de relaves provenientes de zona minera Pituca II del cantón Zamora Chinchipe. Con estas mezclas se elabora discos cerámicos sobre las que se realiza diferentes ensayos de caracterización; los resultados, se reflejan en el capítulo 5 y se compara el comportamiento cerámico entre los ladrillos artesanales, elaborados en laboratorio y estándares de calidad del Ecuador.

De esta manera de destacan las siguientes fases de desarrollo de este proyecto:

- Toma de muestras de materias primas de arcilla, arena, tierras diatomeas y relaves.

- Identificación y caracterización de las materias primas
- Caracterización de ladrillos artesanales de Catamayo y Malacatos.
- Determinación de mezcla óptima para la fabricación de ladrillos artesanales mejorados, y ladrillos fabricados con nuevas tecnologías.
- Elaboración y caracterización de ladrillos artesanales mejorados, y ladrillos fabricados con nuevas tecnologías.
- Comparación del comportamiento cerámico entre ladrillos artesanales, ladrillos artesanales mejorados, ladrillos a base de nuevas tecnologías y estándares de calidad del Ecuador.

Los ensayos de caracterización física, ensayos químicos entre los que se destaca Fluorescencia de rayos X (FRX) y mineralógicos Difracción de rayos X (DRX) fueron desarrollados a todas las materias y mezclas óptimas en la Universidad Técnica Particular de Loja. El análisis de Termo-gravimétrico fue llevado a cabo en la Universidad Politécnica de Madrid, así mismo el análisis de Microscopía electrónica de barrido se realizó en la Universidad Complutense de Madrid y finalmente los ensayos de Espectroscopía infrarroja y Resonancia magnética nuclear se aplicaron a las materias primas de tierra diatomeas y relaves de mina, los mismos que se desarrollaron en el Laboratorio de Materiales vítreo y vitrocerámicos del Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja" del CSIC en Madrid.

3.1. Ubicación de la Zona de estudio

El cantón Loja, pertenece a la provincia de Loja, se ubica en el extremo sur la República del Ecuador. Por su desarrollo y ubicación geográfica fue nombrada sede administrativa de la Región Sur o Zona 7, conformada por las provincias de: El Oro, Loja y Zamora Chinchipe; sus coordenadas geográficas son: 3°59'00''S y 79°12'00''O (Figura 18). Su orografía es variada,

con un relieve que se presenta muy irregular, con altitudes que van desde los 700 metros, hasta sobrepasar los 3700 metros. Los accidentes geográficos más representativos son las Cordilleras: del Bunque, San José, Tambo Blanco, De la Paz, Del Salal, De los Altos, Los Guabos, entre otras, su temperatura se ubica entre los 10°C a los 30°C. La red hidrográfica es abundante, constituida por un sinnúmero de cursos sencillos de agua, como el: Zamora, San Francisco, Trapichillo, Tambo Blanco, de los Corazones, La Merced, Peñas Encantadas, Sordomoras, el Ingenio, Malacatos, Jipiro.

Figura 18.Micro localización de la zona de estudio

3.1.1. Sector Catamayo

3.1.1.1. *Mina la Vega*

La cantera la Vega, se ubica en el Cantón Catamayo, en la Provincia de Loja, en la ruta 69, Catamayo – Gonzanamá, (salida de la ciudad de Catamayo), sus coordenadas UTM son: 17 S X = 0679957 – Y = 955673 (Figura 19).

Figura 19.Ubicación Geográfica de la Mina la Vega, Escala 0.5km

3.1.1.2.Mina Indiucho

Se ubica en la vía Catamayo – Gonzanamá - El Tambo, a 8 km de la ciudad de Catamayo, sus coordenadas UTM son: 17 S X = 0681477 – Y = 9554392 (Figura 20).

Figura 20.Ubicación Geográfica de la Mina Indiucho. Escala 0.3km

3.1.1.3.Aspectos medioambientales

Catamayo tiene una altitud media de 1270 m s.n.m; su temperatura oscila entre 20° a 25°C; su clima es cálido seco; la orografía es bastante irregular, sus principales ríos son: el Catamayo y el Guayabal; la producción, se basa fundamentalmente de caña de azúcar, yuca, camote, maíz, maní, limones, naranja.

3.1.3.4.Tipo de suelo

Las rocas que constituyen la cuenca Catamayo corresponden a depósitos volcánicos y volcano-sedimentarios, molásicas de edad micénica, destacándose las areniscas, lutitas blandas y arcillas. Además, rocas volcánicas como aglomerados, potentes paquetes de tobas abigarradas de diferentes tonalidades, lavas andesíticas, materiales piroclásticos de la formación Sacapalca y formación Loma Blanca. Así como flujos volcánicos depositados en capas estratificadas de diferente potencia. Evidentemente dentro de la cuenca predominan los aglomerados volcánicos, característico de los graven de ambiente lacustre, (Sánchez, 2012)

3.1.2. Sector Malacatos

3.1.2.1.Mina Ceibopamba

Se ubica cerca de la vía Malacatos – El Tambo – Ceibopamba, a 4,5 km de la Parroquia de Malacatos, esta mina se sitúa en la zona 17 Sur, sus coordenadas UTM son: 17 S X = 690961 – Y = 9535511 (Figura 21).

Figura 21.Ubicación Geográfica de la Mina Ceibopamba, Escala 0.5km

3.1.2.2.Mina Cangahua

Se ubica a 1,5km de la Parroquia Malacatos, en la vía Malacatos – El Tambo – Ceibopamba, se situada en la zona 17 Sur, sus coordenadas UTM son: 17 S X = 692957 – Y = 9534552 (Figura 22).

Figura 22.Ubicación Geográfica de la Mina Cangahua, Escala 0.7km

3.1.2.3. Mina Chinguilamaca

Se encuentra a 8,74km de la Parroquia Malacatos, en la zona 17, sus coordenadas UTM son:
17 S X = 692957 – Y = 9534552 (Figura 23).

Figura 23.Ubicación Geográfica de la Mina Chinguilamaca, Escala 0.3km

3.1.2.4. Mina Palanda

Se ubicada cerca de la Parroquia Malacatos, su ingreso es por el barrio Santa Gertrudis, ubicado en la vía: Loja – Malacatos, su ubicación es en la zona 17, sus coordenadas UTM son:
17 S X = 6695788 – Y = 9539482 (Figura 24).

Figura 24.Ubicación Geográfica de la Mina Palanda, Escala 0.4km

3.1.2.5.Aspectos medioambientales

La Parroquia Malacatos se ubica a una altura de 1470msnm, su clima es subtropical – seco, su temperatura promedio es de 20,6°C, se encuentra encerrada por las Cordilleras de Cajanuma y la de Cararango, Cerro la Era, Uritusinga; también se distinguen Yamba, Granadillo, San Isidro, Potopamba y los laberintos de lomas y picos desnudos, donde parece que se une la cordillera la Horta, en esta parroquia se produce café, caña de azúcar, tabaco, yuca, tomate y frutas, también es conocida por sus fábricas de panelas y aguardiente, (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Malacatos, 2015)

3.1.2.6.Tipo de suelo

La información geológicamente está representada por rocas metamórficas y volcánicas formadas por cuerpos graníticos, y sedimentarios terciarios en la cuenca de Loja, Malacatos y Vilcabamba respectivamente. El basamento de la cordillera Real del cantón Loja se encuentra constituido por rocas metamórficas de la Serie Zamora. El grado de metamorfismo varía desde filitas hasta granito meta somática. El grado más alto se encuentra en el este. Las rocas de grado bajo consisten de filitas, esquistos sericíticos, esquistos cuarcíticos y cuarcitas. Los esquistos grafíticos son conspicuos en el lado oeste entre Loja y Malacatos y al oeste de Malacatos. Al este, como el grado de metamorfismo aumenta, se ven esquistos biotítico – moscovíticos, gneis y gneises graníticos de grano grueso. Los depósitos sedimentarios terciarios del cantón Loja consisten de: tobas andesíticas, aglomerados, aglomerado basal cubierto por toba aglomerática, toba y flujos de lava, arcillas con capas delgadas de areniscas, arcillas con vetas de yeso, areniscas limosas, lutitas silíceas, lutitas calcáreas, capas de carbón con conglomerados gruesos y diatomitas, conglomerados con arenas de grano grueso, arenisca y limolita micácea, formando capas prominentes. Estos corresponden a las Formaciones de Sacapalca, Loma Blanca, Trigal,

San Cayetano y Quillollaco, respectivamente (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Malacatos, 2015).

3.1.3. Sector Santa Elena

3.1.3.1. Mina Santa Elena

El acceso a la mina Santa Elena, se lo realiza a través de la vía terrestre, siguiendo el trayecto de la vía a la costa, esta se ubica a 477km de distancia aproximadamente de la ciudad de Loja, esta se conecta a una vía lateral, que recorre 200m.

Sus coordenadas UTM, son: $X = 560705$ – $Y = 9736116$ (Figura 25).

Figura 25. Ubicación Geográfica de la Mina Santa Elena, Escala 0.5km

3.1.3.2. Aspectos medioambientales

La Provincia de Santa Elena posee un clima árido o desértico debido a un tramo de la corriente de Humboldt pasando por la península. Su promedio anual de precipitación es entre 125 a 150mm, es así una de las ciudades ecuatorianas más secas.

En la provincia de Santa Elena se consideran tres diferentes zonas climáticas: Clima Tropical Húmedo (Af), en la cordillera Chongón Colonche, Clima Tropical Seco (B) localizado en la faja costera, y, Clima Tropical Sabana (Aw), que cubre la mayor parte de la provincia en la parte baja y valles, (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Santa Elena, 2014)

Se ubica a una altura de 72msnm en la Zona 17M (Hemisferio Sur); la temperatura promedio se encuentra entre los 27,8°C y 27,9°C siendo menor en los meses de junio y julio con temperaturas de 22,8°C y 24,3°C, que es cuando la corriente fría de Humboldt baña las costas del Ecuador; y los meses que registra la mayor temperatura son los meses de enero a mayo, con 31,9°C y 32°C relativamente, fechas en las que la península se encuentra influenciada por la corriente cálida del Niño.

Los niveles de precipitación en la parroquia Chanduy, son muy variables desde 26 y 28mm en los meses de verano (pocas lluvias), que son niveles pluviométricos bajos, subiendo a 281 y 288mm en los meses de invierno; (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Chanduy, 2014).

La Parroquia de Chanduy, está integrada por un ecosistema de bosque seco occidental; entre sus características se destaca la presencia de bosque con vegetación seca y espinosa, de igual forma se puede apreciar cactus y leguminosa, encontrándose las mismas desde los 50 metros de altura, hasta los 300 metros de altitud.

Su relieve es muy variado, va desde terrenos planos, terrenos ondulados con poca pendiente hasta relieves de cordillera con unas pendientes de 100%, con cimas agudas.

3.1.3.3. Tipo de suelos

El territorio está formado por cuencas de ante arco emergidas, cuyos rasgos tectónicos más sobresalientes son la falla transversal Chongón – Colonche. El relleno de las cuencas, señala un depósito profundo turbidítico (Flysch) desde el cenomaniano superior hasta el Eoceno Superior en la Cordillera Chongón – Colonche. Esta sedimentación comprende la Formación Cayo y el grupo Azúcar. El ambiente geológico de la zona, permite inducir qué tipos de mineralizaciones y clases de yacimientos se podrían encontrar importantes acumulaciones de titanio-magnetita. En la formación Cayo algunos tipos de rocas durante su formación se enriquecieron del mineral zeolita y el afloramiento de estos yacimientos representa un rubro minero importante a desarrollarse en el futuro debido a la variedad de aplicaciones y usos que tiene este mineral ya sea como fertilizantes, filtros de agua, alimento balanceado para animales, para cargas como pintura y como material descontaminante de las aguas residuales (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Santa Elena, 2014).

3.1.4. Sector Zamora Chinchipe

3.1.4.1. Mina Pituca II

El sector minero “PITUCA II”, COD 500648, se encuentra ubicado en la región amazónica al suroeste de Ecuador, en el barrio Marcos Alto, en la parroquia Timbara, en el cantón Zamora, provincia Zamora Chinchipe con coordenadas UTM 17 S X = 734000 – Y = 9545000. Su superficie es de 50 hectáreas (Figura 26).

Estos sectores se han concesionado para la explotación de minerales, la actividad minera no solo se limita a la extracción de minerales metálicos y no metálicos, sino también materiales pétreos para la construcción.

Figura 26.Ubicación Geográfica del Sector Minero “Pituca II”, Earth. Escala 0.5km

3.1.4.2.Aspectos medioambientales

El territorio parroquial en cuanto a su altitud varía desde los 880msnm en su parte baja, subiendo a los 1800msnm en su parte media y por último ascendiendo a los 2900msnm; la mayor parte de las actividades económicas – productivas y sociales se desenvuelven en la parte baja y media, esto porque son áreas de fácil acceso, con drenaje y servicios básicos, por lo contrario las partes altas se caracterizan por ser crestas empinadas abruptas, de muy difíciles acceso para el desarrollo de algún tipo de actividad agro – productiva, por lo tanto son destinadas exclusivamente a la conservación, debido a que se las considera áreas de recarga y nacientes, de las principales fuentes hídricas que tiene el territorio, cabe anotar que en algunos de estos sectores se ha desarrollado la minería, tratándose en lo posible de realizar controles que prevengan cualquier impacto negativo para el medio ambiente.

La mayoría de las poblaciones se encuentran dispersas en la parte baja y media, concentrando la mayoría de los servicios básicos, infraestructura, movilidad y telecomunicaciones en esa zona.

De acuerdo a los mapas de isotermas e isoyetas de la zona goza de una temperatura promedio entre los 16°C y 18°C, los meses más lluviosos son febrero y julio, en donde la precipitación esta alrededor de los 2500mm a 3500mm. El sector consta de dos tipos de vegetación: bosque de neblina montano y matorral húmedo montano bajo, (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Timbara, 2014)

3.1.4.3. Tipo de suelos

La zona subandina representa el lado occidental plegado de la cuenca marginal pre andina; el basamento cristalino en la base de esta zona se ha desplazado a una profundidad mayor a los 8 km, sobre el cual descansa rocas sedimentarias marinas.

De acuerdo al mapa geológico de Zamora, los materiales volcánicos depositados en el sector pertenecen a la formación Chapiza de edad Jurásica y sobre yacen a meta sedimentos y meta volcánicos de la Formación Santiago. Según las estructuras y afloramientos existentes en zonas aledañas, se aprecia que este sector ha sufrido fuertes movimientos tectónicos a causa de la intrusión del granito meta somático, el cual originó que los esquistos, gneises y cuarcitas del grupo Zamora, del Paleozoico, se erosionen de tal manera que en la actualidad solamente aparezcas en depósitos aislados al Este de los volcánicos Piuntza separados por afloramientos del intrusivo. Los contactos entre las formaciones volcánicas del Jurásico con los granitos y metamórficos del Grupo Zamora son fallados (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial Zamora Chinchipe, 2015).

3.2. Toma de muestras de las materias primas

Una vez identificados los sectores de estudio se procede a la toma de muestras y respectiva identificación o codificación de las minas: arcilla de La Vega (MV1) y arena de Indiucho (MI2) pertenecientes al sector de Catamayo, en el sector de Malacatos se hayan las minas de Ceibopamba (MCB), Cangahua (MCA), Palanda (MPL), Chinguilamaca (MCH) y arena fina (MAF). Del sector de Santa Elena se ha tomado muestras de tierras diatomeas de dos estratos, el primero MD2, con una potencia de 1m aproximadamente, mismo que se conforma por arcillas blanquecinas poco laminadas, el segundo estrato MD3 localizado en la parte baja conformado de lutitas grises – blanco – amarillentas y material de lodos relaves resultados del proceso de gravimetría de la zona minera Pituca II en el sector de Zamora Chinchipe.

La selección de la materia prima en las canteras, se la realizó por medio de muestreo; para la toma de muestras, se empleó un “diseño experimental por segmentación”, es decir, se cuadriculó el área total de la mina y se la subdivido en niveles, en la toma de muestras, se procuró cubrir cada nivel, tomando las mismas de forma aleatoria, a fin de cubrir el mayor espacio y que las muestras sean lo más homogéneamente posibles; una vez tomadas las mismas se procedió a su recepción, se las codificó, estableciendo la potencia del material, a través de la caracterización geomorfológica y su descripción edafológica (Figura 27).

Los materiales muestreados fueron transportados hacia el laboratorio, donde se practicó los ensayos de caracterización físicos, químicos, mineralógicos, comportamiento térmico, entre otros.

Figura 27. Selección de la materia prima.

3.3. Caracterización del ladrillo producido en forma artesanal

3.3.1. Variabilidad Dimensional (VD)

El ensayo de variación dimensional se efectúa para determinar el espesor de las juntas de la albañilería, este ensayo influye en el comportamiento resistente de la pared, por lo que, a mayor variación dimensional, mayor espesor de la junta y mientras mayor sea el espesor de la junta, menor será la resistencia a compresión y la fuerza cortante de la pared.

Para realizar el ensayo se seleccionaron 5 unidades de ladrillos por cada productor artesanal, se miden las aristas y se evalúan las diferencias (Figura 28).

Figura 28. Variación dimensional, ladrillos artesanales.

3.3.2. Peso del ladrillo.

El peso del ladrillo es de suma importancia dentro de esta investigación, ya que sirve como base para otros análisis como absorción.

Para este análisis se seleccionó 5 unidades cocida por productor, las muestras fueron sometidas a temperatura $\pm 110^{\circ}\text{C}$ (horno termostáticamente controlado), las piezas cerámicas fueron pesada en una balanza de precisión de $\pm 0,01\text{ g}$ (Figura 29).

Figura 29.Determinación del peso de cada ladrillo.

3.3.3. Densidad del ladrillo.

La estimación de la densidad establece una relación estrecha con otras propiedades del ladrillo, es decir, a mayor densidad mejores propiedades de resistencia y de perfección geométrica (Figura 30).

Figura 30.Densidad de ladrillos artesanales.

Para desarrollar este ensayo se divide la masa entre el volumen calculado a partir de la sección del ladrillo, ecuación 3.

Cálculo

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{\text{MASA (g)}}{\text{VOLUMEN (cm}^3\text{)}} \quad \text{Ec. 3}$$

3.3.4. Determinación de los volúmenes de poros, porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente

La absorción, algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación, ya que puede absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar como en el caso de las esmectitas o en los canales estructurales.

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La porosidad se relaciona con otras propiedades, tanto físicas como mecánicas y químicas.

Para realizar el ensayo se seca los especímenes en el horno a una temperatura de 105°C, se determina la masa seca con una aproximación de 0.01g.

La masa seca es obtenida antes de la inmersión, sin embargo, si los especímenes son friables o la evidencia indica que las partículas se han desprendido durante la saturación, las muestras se secarán y pesarán después de determinar la masa suspendida y la masa saturada. A continuación, se hierve las muestras durante 5 horas en agua destilada, evitando el contacto con el fondo, determine la masa (S) con una precisión de 0.01g de cada muestra mientras se suspende en agua (Figura 31); realizar el pesaje de la muestra en una canastilla suspendida. Luego determinar la masa suspendida o de saturación si no se determina la masa suspendida, secar cada muestra ligeramente con un trapo de algodón o lino humedecido y sin pelusa para eliminar todo el exceso de agua de la superficie y determinar la masa saturada (M). Finalmente Realizar el pesaje inmediatamente después del secado, completando la operación lo más rápido posible para minimizar los errores causados por la evaporación del agua de la muestra (ASTM C373, 1999).

Figura 31. Absorción de agua, densidad aparente, porosidad aparente y aparente gravedad específica

Cálculo:

- Para los cálculos asumimos que $1\text{cm}^3 = 1\text{g}$.
- Volumen exterior, V, en centímetros cúbicos, ecuación 4:

$$V = M - S \quad \text{Ec. 4}$$

- Volúmenes de poros abiertos V_{op} (ecuación 5) y porciones impermeables V_{ip} (ecuación 6) en centímetros cúbicos:

$$V_{op} = M - D \quad \text{Ec. 5}$$

$$V_{ip} = D - S \quad \text{Ec. 6}$$

- Porosidad aparente (P), se expresa, en %, la relación del volumen de los poros abiertos de la muestra a su volumen exterior, ecuación 7:

$$P = \left[\left(\frac{M-D}{V} \right) \right] \times 100 \quad \text{Ec. 7}$$

Absorción de agua (A), se expresa en %, la relación de la masa de agua absorbida a la masa de la muestra seca, ecuación 8:

$$A = \left[\left(\frac{M-D}{D} \right) \right] \times 100 \quad \text{Ec. 8}$$

Peso específico aparente (T), de la parte de la muestra de ensayo que es impermeable al agua, ecuación:

$$T = \left(\frac{D}{D-S} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

- DP (B), en gr/cm^3 , es el cociente de su masa seca, dividido por el volumen exterior, incluyendo los poros, ecuación 10:

$$B = \frac{D}{V} \quad \text{Ec. 10}$$

Porosidad de los ladrillos, ecuación 11.

$$Porosidad = \frac{\text{Peso específico promedio de las materias primas} - \text{Densidad aparente}}{\text{Peso específico}} \times 100\% \quad \text{Ec.11}$$

3.4. Caracterización tecnológica de las materias primas

Las técnicas empleadas muestran la caracterización físico-química y tecnológica de las materias primas con el fin de conocer el comportamiento cerámico.

3.4.1. Ensayos control por atributos

3.4.1.1. *Color*

El color del suelo es una de las características morfológicas más importantes y fácil de determinar, permitiendo identificar distintas clases del suelo. Las tablas de color de Munsell abarcan todos los matices del rango visible del espectro electromagnético, para el caso de suelos solo utiliza alrededor de la quinta parte del rango total de matices (Figura 32).

Figura 32. Muestras MV1 y MI2, Sistema Munsell.

3.4.1.2. *Sensación al tacto*

Este análisis permite determinar la cantidad de retención y acumulación de agua de la muestra, en concordancia con la dimensión de las partículas, logrando una caracterización rápida del suelo.

En este análisis se coloca una muestra representativa en un recipiente, se hidrata completamente ésta agregándole agua, en caso de excederse en humedad se añade muestra hasta lograr su amasado; una vez amasado y sin la presencia de grumos, se toma una cantidad de masa en la mano, se aprisiona y se observa cómo se comporta la masa ya sea de forma árida, plástica o untuosa. Finalmente, se forma rollos circulares con la palma de la mano y se procede a clasificarlo.

3.4.1.3. Consistencia

A través de este análisis se logra establecer el grado de resistencia del material, frente a cargas, determinando con ello su consistencia. Para su desarrollo se toma una muestra mayor a 2cm, misma que es presionada con la mano y permite evaluar las fuerzas de cohesión-adhesión de las partículas internas que componen la muestra.

3.4.1.4. Impurezas

Este análisis evalúa la homogeneidad de las muestras, identificando presencia de materiales inertes como residuos de materia orgánica, vegetación entre otros.

Para su desarrollo se prepara la muestra, triturándola con el martillo de goma, se tamiza la muestra por la malla N°4 (4.75mm) a fin de homogenizar el material y finalmente se realiza la inspección visual de la muestra.

3.4.1.5. Peso específico (Pe), método del picnómetro

Este análisis establece PE de partículas sólidas de un material que pasa el tamiz N° 10 utilizando el picnómetro. El ensayo establece la relación entre el peso en el aire de cierto volumen de sólidos a temperatura dada y el peso en el aire del mismo volumen de agua destilada (ASTM D854-02, 2014), ecuación 12.

Cálculo:

$$Pe = \frac{P2 - P1}{P3 - P1 - P4 - P2}$$

Ec. 12

Dónde:

P1 = peso del picnómetro vacío.

P2 = peso del picnómetro + muestra.

P3 = peso del picnómetro + agua destilada.

P4 = peso del picnómetro + agua destilada + muestra.

3.4.2. Análisis granulométrico

La importancia del análisis granulométrico o distribución de las partículas en el proceso de fabricación de ladrillos influye las siguientes etapas:

- Etapa de moldeo: determina el grado de compactación y manejabilidad de la materia primas, así como el grado de compactación o empaquetamiento de los especímenes elaborados.
- Etapa de secado: influye directamente en la velocidad y dificultad del secado de la probeta.
- Etapa de cocción: favorece el proceso de sinterización y formación de nuevas fases minerales debido al presado realizado y empaquetamiento de las partículas.

Estos factores influyen en las propiedades del producto final como: porosidad, resistencia mecánica, variabilidad dimensional que se traduce en el comportamiento cerámico.

Existen varias técnicas para determinar la distribución del tamaño de partículas de las materias primas. Los métodos utilizados fueron granulometría por tamizado e hidrometría siguiendo la norma (ASTM D422, 2007). Para realizar el análisis granulométrico por tamizaje se prepara 500g la muestra cuarteando, se pesa en una balanza analítica de precisión de $\pm 0,01$ g y se utiliza tamices N°6, 40, 100, 140, 200 y 325. Se pesan las fracciones retenidas en cada tamiz y se elabora una curva acumulada que expresa los porcentajes en peso del material que pasa por cada uno de los tamices, ecuación 13.

Cálculo:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso acumulado en cada tamiz}}{\text{Peso total}} \times 100$$

Ec. 13

✓ Porcentaje que pasa, cuya fórmula es, ecuación 14:

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Retenido acumulado}$$

Ec. 14

La muestra pasante del tamiz N° 40 es cuarteada en una cantidad de 100g y utilizada para aplicar el análisis de granulometría por hidrometría, para lo cual se prepara una solución de 40g de hexametafosfato de sodio en agua destilada (125 cm³), misma que es colocada en 1000cm³ de suspensión de agua-suelo. La muestra suelo es colocada en 125ml de agente dispersante, agitada con una varilla de vidrio y se deja en remojo por un tiempo mínimo de 12 horas. La muestra es transferida a un vaso de dispersión para ser agitada por un tiempo de 1 min; terminado este proceso se coloca la muestra en 1000ml y se agita durante un tiempo de 60segundos se inicia con las lecturas del hidrómetro 151H, en tiempos de 5, 15, 30, 60, 250 y 1440min.

El diámetro de las partículas del suelo en suspensión es determinado mediante la ecuación 15.

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Ec. 15

Donde:

D (mm)= Diámetro de partículas de suelo en suspensión.

L= Profundidad efectiva en cm, en función de (R'+Cm)

R' = Lectura real del hidrómetro (en la probeta con muestra)

C_m = Corrección por menisco

t = Tiempo transcurrido en minutos

K = Valores tabulados en tablas en función del peso específico

3.4.3. Límites de Atterberg

Una de las características más importantes de las arcillas es la plasticidad, lo que le permite ser moldeables cuando se encuentran en estado húmedo y conservar la forma de manera indefinida, esta propiedad diferencia a las arcillas del resto de materiales.

La plasticidad de las arcillas se debe a la capacidad de cohesión entre las partículas y el líquido, los cuales forman una masa uniforme.

Así mismo la plasticidad en la fabricación de materiales cerámicos es fundamental, debido al comportamiento de la arcilla durante todo el proceso (contracción por secado y resistencia mecánica) y el volumen de agua que se requiere para un molde adecuado de la masa.

Los límites de Atterberg permiten medir la plasticidad de la muestra, pasando del estado líquido a sólido en forma progresiva, pasando por un estado plástico (Das Braja, 1999). En el paso de un estado a otro existen puntos de transición denominándose límites que se expresan en función del porcentaje de agua que tenga la arcilla y se detallan a continuación:

- Límite líquido: estado en que la arcilla deja de ser moldeable y se comporta como un fluido, es el punto de transición entre el estado líquido y el plástico. Para este proceso

se emplea la copa de Casagrande, conceptualizándose como el contenido de agua que permite cerrar una ranura de 12,7mm (1/2 pulgada), al aplicar 25 golpes.

- Límite plástico: estado en que la arcilla pierde plasticidad y deja de ser moldeable, es el punto de transición entre el estado plástico y el semisólido. Para este ensayo se realiza un rollo de 3,18mm (1/8 pulgadas) de diámetro.
- Índice de plasticidad: diferencia entre el valor de límite líquido y límite plástico.

El ensayo se realiza siguiendo la norma (ASTM D4318, 2017), los resultados se muestran en el diagrama propuesto por Casagrande, donde se distingue el grado de plasticidad de la arcilla (Terzaghi, Peck, y Mesri, 1996) Figura 33.

Figura 33. Escala de límites de Atterberg.

3.4.4. Ensayos físico-químicos

3.4.4.1. Determinación de materia orgánica

La materia orgánica existe en la mayoría de suelos, sin embargo, su presencia no ayuda para la elaboración de ladrillos artesanales. Varias metodologías se han desarrollado para verificar la existencia de materia orgánica en los suelos tales como: calcinación, con dicromato de potasio o con agua oxigenada (peróxido de hidrógeno), para efectos de nuestra investigación se utilizó este último por ser de fácil acceso.

Los materiales a utilizar para el análisis son peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30%, una pipeta, la muestra de suelo y un recipiente para colocar la muestra que no sea sensible a la solución. El método se basa en el control de atributos químicos, con lo cual la fuerza de reacción entre la muestra y el peróxido de hidrogeno H_2O_2 , otorgará un rango de efervescencia a la misma Figura 34.

Figura 34. Equipo, determinación de materia orgánica.

3.4.4.2. Eliminación de carbonatos

A través de este análisis se logra la liberación de carbonatos, en las muestras. Para este procedimiento se necesita de ácido clorhídrico HCl, solución al 10%, un recipiente de cristal y pipeta, se coloca una o varias gotas sobre la muestra y se observa el grado de efervescencia que se produce por el reactivo y se categoriza la misma Figura 35.

Figura 35. Equipo, liberación de carbonatos.

3.4.4.3. Superficie específica

Esta técnica, conocida también como de absorción de cloruro de metiltionina ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) radica en establecer el valor del azul de metileno, absorbido por la muestra.

El ensayo de azul de metileno mide la superficie de la fracción arcillosa activa que depende de la naturaleza de los minerales de arcilla presentes en los suelos y materiales granulares (Jiménez y Crespo, 2013).

Para este ensayo se elabora la solución de azul de metileno, combinando 1,0 g. de polvo, con 200 ml de agua destilada, se prepara una mezcla de suelo de 10g, secándola al horno, con 30 ml de agua destilada se añade el azul de metileno a la suspensión, con incrementos de 0,5 ml y se remueve la suspensión por 1 min, dando tiempo al catión azul de metileno de ser absorbido por la superficie mineral, reemplazando los cationes en la capa difusa, hasta lograr los resultados. Se coloca una gota de la suspensión, sobre el papel filtro (tipo P5). Esta es absorbida por capilaridad formando un círculo; el ensayo culmina cuando se presenta un azul claro de forma concéntrica alrededor de la gota sobre el papel, mostrando el nivel de saturación de la superficie mineral.

Cálculo:

$$Se = \frac{1\text{gr}}{319,87 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \times \frac{1}{200 \text{ ml}} \times N \times 0,5\text{ml} \times N_{AV} \times A_{AM} \times \frac{1}{10\text{g}}$$

Ec. 16

Dónde:

N_{AV} = Número de Avogadro, $6,02 \times 10^{23}$ moléculas/mol.

A_{AM} = Se asume un valor de $130 \text{ \AA}^2$, (Área cubierta, catión de azul de metileno).

N = Número de incrementos (azul de metileno).

3.4.4.4. Potencial de hidrógeno (pH)

Este método consiste en determinar el valor del pH de los suelos de las muestras, utilizando como equipo pH-metro y siguiendo la norma (ASTM D4972, 2005) Figura 36.

Figura 36. Análisis de pH en materias primas: a) Calificación de los Suelos por su pH. Ávila 2009. b) Equipo para determinar el pH

3.5. Técnicas analíticas de caracterización

Las técnicas que se describen a continuación han sido aplicadas para la caracterización de todas las materias primas empleadas en la formulación de pastas cerámicas y para la caracterización de ladrillos artesanales, como también para ladrillos artesanales mejorados y ladrillos elaborados con nuevas tecnologías.

3.5.1. Ensayo químico

3.5.1.1. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Para la caracterización de las arcillas el ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX) es de gran importancia, dado que permite la determinación de la composición química de los materiales.

Para realizar este análisis es necesario preparar la muestra hasta conseguir una granulometría inferior a 0.074mm, se utiliza un equipo Bruker S1 Tracer (Figura 37), con el cual se irradia el material con rayos X generando una segunda radiación denominada

fluorescencia. Cada elemento de la tabla periódica emite un espectro característico, con lo que se conoce los elementos químicos que componen la muestra.

Los resultados del análisis expresan en porcentaje de óxidos los elementos químicos.

Figura 37. Equipo de Fluorescencia BRUKER S1.

3.5.2. Ensayo mineralógico

3.5.2.1. *Difracción de rayos X (DRX)*

Uno de los métodos más completos para determinar la mineralogía de las muestras analizadas en la presente investigación es el análisis de difracción de rayos X, debido a que permite identificar especies minerales y características cristalográficas de los minerales. Este ensayo permite estudiar las transformaciones mineralógicas durante el proceso cerámico a diferentes temperaturas.

En esta investigación se ha utilizado un equipo Bruker D8 Advance y se ha molido y preparado la muestra a ser analizada en polvo con tamaño de partícula inferior a 50mm; la evaluación se ha realizado mediante el software EVA (Figura 38).

Figura 38. Equipo para difracción de rayos X.

3.5.3. Análisis térmico diferencial y térmico gravimétrico (DTA y TGA)

Para la complementación de las características de las materias primas se aplica el análisis térmico, utilizando técnicas termo analíticas como análisis térmico diferencial (DTA) y análisis termo gravimétrico (TGA).

El análisis térmico diferencial mide las diferentes variaciones de temperatura que ocurren cuando la muestra es sometida a calentamiento, como consecuencia de reacciones y procesos que ocurren en su interior.

En la muestra se identifican reacciones representadas como efectos endotérmicos (mínimos) y endotérmicas (máximos).

Por otro lado, el análisis termo gravimétrico mide las variaciones de peso de la muestra cuando es calentada de forma progresiva. Estas variaciones dependen de la composición mineralógica y de la temperatura que modifican las propiedades físicas de la muestra, permitiendo deducir la mineralogía de la misma (Figura 39).

Figura 39. Equipo SDT para análisis Térmico.

Para realizar el ensayo se utiliza 20mg de arcilla, misma que debe poseer una granulometría inferior a $100\mu\text{m}$. La muestra es ingresada en el equipo y puesta en marcha a una atmósfera de aire y argón a una velocidad de calentamiento de $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

3.5.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Este análisis permite conocer la microestructura y propiedades de los materiales. Las muestras de esta investigación fueron ensayadas en un equipo SEM (JEOL JSM-820), las imágenes fueron obtenidas mediante un detector de electrones secundario (SE) y los micro análisis realizados en regiones específicas utilizaron espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDS).

El ensayo consiste en iluminar la muestra con un haz de electrones, cuya interacción emite electrones secundarios y retro dispersados, los cuales muestran información sobre la topografía y composición química respectivamente.

La muestra debe ser conductora para que se genere la señal, para esto es necesario colocar una fina película de oro y así obtener una imagen tridimensional.

3.5.5. Espectrometría Infrarroja (FTIR)

El ensayo FTIR es conocido como infrarrojos por transformada de Fourier, en el cual la radiación de infrarrojos alcanza una muestra, parte de la radiación es absorbida por la muestra y otra parte la atraviesa (se transmite). El resultado es una señal de espectro que permite identificar distintas unidades químicas estructurales que generan varias huellas espectrales.

Para realizar el análisis se toma 30 mg de muestra y se mezcla adecuadamente con KBr (grado analítico, Fisher Scientific), la mezcla se prensó para obtener una pastilla que se colocó en el porta muestras del equipo para obtener su espectro de transmitancia.

Este ensayo en asociación con el análisis de difracción de rayos X y técnicas similares permite realizar un estudio más detallado de la mineralogía de la muestra. El análisis FTIR utiliza un equipo Ati Matsson Genesis que identifica bandas de absorción bien definidas indicando si las muestras poseen una composición tetraédrica u octaédrica.

El análisis fue realizado únicamente a las muestras de tierras diatomeas del sector de Santa Elena y material de relave de la Mina Pituca II de Zamora Chinchipe.

3.5.6. Resonancia magnética nuclear (RMN)

El análisis de resonancia magnética nuclear constituye en una de las técnicas de mayor utilidad empleadas en química para la determinación de estructuras moleculares, es decir, proporciona información estructural y estereoquímica³ en un tiempo determinado.

³ Estereoquímica se denomina a la distribución de las moléculas y su injerencia en las propiedades del material (Corzo, 2014)

Este ensayo se basa en la absorción de energía por un núcleo magnético activo que está orientado en el seno de un campo magnético, y que por efecto de esa energía cambia su orientación.

El análisis RMN indica en el espectro del elemento químico analizado tres parámetros: posición, anchura e intensidad, el desplazamiento químico viene determinado por la posición de la señal en el espectro de dominio de frecuencia. Este parámetro proporciona mayor información estructural de aluminosilicatos, debido a que refleja el entorno inmediato de los núcleos de silicio y aluminio.

El análisis de resonancia magnética nuclear fue realizado únicamente a las materias primas de tierras diatomeas y relaves de mina (muestras para geopolimerización).

3.6. Ensayos mecánicos

3.6.1. Ensayo de tracción indirecta (Método Brasileño, ITS)

La resistencia mecánica se ha medido mediante el Ensayo Brasileño, el cual consiste en aplicar una fuerza en dos puntos diametralmente opuestos, proporcionando la resistencia a la tracción del material (Figura 40).

Figura 40.Equipo de Compresión Diametral, marca: Versa Tester, UTPL 2018.

Cálculo:

$$\sigma_{cd} = \frac{2*P}{\pi*d*e} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

σ_{cd} = Resistencia a la tracción (kgf/cm²)

P = Fuerza aplicada (kgf)

e = espesor de la probeta (cm)

d = Diámetro de la probeta (cm)

Las probetas a ensayar son cilíndricas de 7cm de diámetro y 2cm de espesor, mismas que son analizadas utilizando una celda de carga de 22.5KN a una velocidad de ensayo de 0.2mm/s, en el equipo Versa Tester, Soiltest. Así mismo la simulación numérica del ensayo brasileño indica el modelo de fractura cohesiva, lo que permite verificar las tensiones de tracción a las que se encuentra sometida la sección diametral de las probetas cerámicas de esta manera se determina el esfuerzo a la compresión diametral (σ_{cd}) y factor de optimización (f_{opt}), (Iglesias et al., 2011).

3.6.2. Ensayo de compresión simple

Este ensayo mecánico permite conocer la característica de resistencia a la compresión del material, ejerciendo esfuerzo axial de compresión en dirección perpendicular a la cara del mayor del ladrillo.

El ensayo de compresión simple se ha aplicado a los ladrillos, para lo cual sus caras o bases son paralelas entre sí, y con superficie lisa. El ensayo fue realizado utilizando un equipo de compresión simple (AccuTeck) aplicando una carga de velocidad continua (Figura 41), se

registra el valor de la carga y se divide para el área del espécimen obteniendo el esfuerzo (INEN 294, 1978), ecuación 18.

Figura 41. Resistencia a la compresión simple

Cálculo:

$$C = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

C = Resistencia a la compresión (MPa)

P = Carga (Newton)

A = Área (m²)

4. RESULTADOS

Este apartado presenta los resultados del proceso de investigación de tres momentos; el primero se basa en la caracterización de los ladrillos artesanales validando sus resultados de acuerdo a los estándares INEN 297, 1978, el segundo la caracterización de las materias primas utilizadas para determinar las mezclas óptimas y finalmente la caracterización de los ladrillos artesanales mejorados y ladrillos con incorporación de materias primas alternativas.

4.1. Caracterización del ladrillo artesanales sectores Catamayo y Malacatos

Para la caracterización de los ladrillos artesanales de los sectores Catamayo y Malacatos, es necesario realizar un muestreo de los ladrillos fabricados por los productores de esta zona, mismos que fueron evaluados de acuerdo a la normativa, concluyendo que ninguno de los productores cumple con las especificaciones (Tabla 2); lo cual motiva a esta investigación a generar nuevos procesos, dosificaciones y el uso de materiales alternativas para la fabricación de ladrillos que permitan obtener un ladrillo mejorado y de esta manera conocer el comportamiento de las materias primas en los diferentes análisis y procesos de producción.

CARACTERIZACIÓN DE LOS LADRILLOS ARTESANALES				
ÍTEM	SECTOR		CATAMAYO (CT.)	MALACATOS (ML.)
	Ensayos	unidad	Artesanal	Artesanal
1	Variabilidad Dimensional	mm	10,15	10
2	Peso Ladrillo	gr	4200	4540
3	Densidad Aparente	gr/cm3	1,48	1,53
4	Absorción de Humedad	%	20,96	27,51
5	Porosidad Aparente	%	30,93	27,51
6	Compresión Simple	MPa	4,6	4,97
7	Temperatura de Cocción	°C	800 aprox.	800 aprox.

Tabla 2. Resultados de caracterización de ladrillos artesanales

Los ladrillos artesanales son clasificados de acuerdo a Figura 41 como **LADRILLO HUECO TIPO E**, sirviendo solo para construcción de tabiques divisorios no soportes y rellenos de losas aligeradas de hormigón armado

TIPO DE LADRILLO	RESISTENCIA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN MPa*		RESISTENCIA MÍNIMA A LA FLEXIÓN MPa*	ABSORCIÓN MÁXIMA DE HUMEDAD %
	Promedio de 5 unidades	Individual	Promedio de 5 unidades	Promedio de 5 unidades
Macizo tipo A	25	20	4	16
Macizo tipo B	16	14	3	18
Macizo tipo C	8	6	2	25
Macizo tipo D	6	5	4	16
Macizo tipo E	4	4	3	18
Macizo tipo F	3	3	2	25
Método de ensayo	INEN 294		INEN 295	INEN 296

Figura 42. Resistencia a la compresión, Absorción máxima de humedad (%), INEN 297, 1978

Las Figuras 43 y 44 muestran los resultados de resistencia a la compresión de los ladrillos artesanales y una comparación de los límites mínimos permitidos en la normativa.

Figura 43. Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillos artesanales Catamayo

Figura 44. Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillos artesanales Malacatos

4.2. Caracterización de la Materia Prima

Los ladrillos en el sector de Catamayo son fabricados con arcillas o tierras arcillosas, con adición de otros materiales (arena, correctores, etc.), garantizando con ello su plasticidad y consistencia, logrando además secarlos al sol, sin que estos presenten grietas, nódulos o deformaciones.

Las arcillas presentan una plasticidad variable, esta puede ser cualitativa o cuantitativa, con el contenido óptimo de agua puede adoptar cualquier forma. Esta propiedad se debe a que el agua forma una “envoltura” sobre las partículas laminares, produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La cocción de los ladrillos es otro factor fundamental, no podemos deducir cómo reaccionarán estos a las altas temperaturas, ya que no existen estudios en la zona que brinden información pertinente, por tal motivo se hace de vital importancia conocer los elementos de los que están compuestos sus materias primas.

4.2.1. Sector Catamayo

4.2.1.1. Minas: La Vega (MV1) –Indiucho (MI2)

4.2.1.1.1. Ensayos de laboratorio, control por atributos

a) Color

El análisis se realizó bajo la escala MUNSSELL, la Figura 45 muestra la escala de colores de clasificación, la mina MV1 posee un color olivo oscuro grisáceo 5Y3/2 en condición húmeda, en condición seca se muestra de color olivo grisáceo 5Y4/2. Por otro lado, la mina MI2 indica un color pardo amarillo claro 10YR6/4 en estado húmedo y en estado seco este resulta color pardo amarillo 10YR5/8.

MINA INDIUCHO				
Atributos	Suelo 13		Suelo 14	
	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco
Munsell	Pardo amarillo claro 10YR6/4	Pardo amarillo 10YR5/8	Rojo pálido 2.5YR7/2	Rojo débil 2.5YR5/2
L*	53.52	59.24	53.06	71.38
a*	13.32	10.85	8.75	5.51
b*	38.15	32.53	10.84	4.46
Color

MINA LA VEGA				
Atributos	Suelo 7		Suelo 8	
	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco
Munsell	Olivo oscuro grisáceo 5Y3/2	Olivo grisáceo 5Y4/2	Pardo fuerte 7.5YR3.5/2	Pardo oscuro 7.5YR1/1
L*	28.51	38.57	28.63	35.60
a*	3.59	3.13	9.76	7.95
b*	10.67	10.07	12.27	10.35
Color

Figura 45. Muestras MV1 y MI2, Sistema Munsell, Munsell, 1990

b) Sensación al tacto

El material de la mina MV1, se clasificó (Tabla 3) como arcilloso (untuosa), el molde del anillo soportó considerablemente la manipulación, su textura es muy suave y pegajosa (Figura 46, a); en tanto que el material de la mina MI2, se clasificó como franco-arenoso, áspero, sus granos se sienten, al ejercer presión sobre la masa esta se disgrega y no forma rollo (árida) tal como se muestra en la Figura 46 (b).

Tabla 3.Clasificación del suelo, (sensación al tacto)

Tipo de masa de suelo	Rollo
Árida	No se forma ningún rollo
Plástica	Se puede formar un rollo fácilmente
Untuosa	La masa se pega contra la mano

Fuente: Uribe, 2014

Figura 46. Sensación al tacto a) muestra MV1, b) muestra MI2

c) *Consistencia*

La tabla 4 caracteriza la Mina MV1, con una consistencia FIRME, es decir se rompen con una moderada presión (Figura 47, a), también presenta plasticidad; en tanto la muestra de la mina MI2 es SUELTA, es decir, se desintegra con facilidad (Figura 47, b).

Tabla 4. Consistencia de suelos

CONSISTENCIA	CARACTERÍSTICAS
Suelta	Manipulación trabajosa, la estructura es frágil, quebradiza
Frágil	Se disgrega con una leve presión de los dedos
Firme	Se rompe con una moderada presión, presenta plasticidad moderada, con una humedad
Extremadamente firme	Es muy resistente, difícil de romper, requiere de objetos mecánicos para su rotura.

Fuente: Uribe, 2014

Figura 47. Consistencia: a) muestra MV1, b) muestra MI2

d) *Impurezas*

En la mina MV1, la presencia de impurezas in situ es casi nula (Figura 48, a), así mismo, del estudio en laboratorio, se establece presencia de partículas de consistencia dura, desechos orgánicos e impurezas, que no son apreciables; la mina MI2, el análisis in situ es casi nulo, en laboratorio se establece un porcentaje muy bajo de impurezas (Figura 48, b).

Figura 48. Consistencia: a) muestra MV1, b) muestra MI2

e) *Peso específico (Pe), método del picnómetro*

Esta práctica solo se puede llevar a cabo en suelos o agregados finos de acuerdo la norma ASTM D854-02, 2014, tal como se muestra en la Figura 49.

La mina MV1, presenta un peso específico de $2,53\text{g/cm}^3$, con una composición de arcillas – suelos orgánicos; en tanto, la mina MI2, el peso específico es $2,65\text{g/cm}^3$, su composición del suelo es arena – grava (Tablas 5 y 6).

Mina MV1

Tabla 5. Peso específico mina La Vega

W. Pic.	W.Pic.+S.s	W.Pic.+H2O+S.H	W.Pic.+H2O	Pe g/cm ³
(P1)	(P2)	(P4)	(P3)	
17,46	18,56	28,08	27,42	2,50
17,46	18,46	28,02	27,42	2,50
17,46	18,11	27,82	27,42	2,60
RESULTADO				2,53

Mina MI2

Tabla 6. Peso específico mina Indiucho

W. Pic.	W.Pic.+S.s	W.Pic.+H2O+S.H	W.Pic.+H2O	Pe g/cm ³
(P1)	(P2)	(P4)	(P3)	
17,46	18,06	27,79	27,42	2,61
17,46	18,63	28,15	27,42	2,66
17,46	18,16	27,86	27,42	2,69
RESULTADO				2,65

Figura 49. Muestra en laboratorio, peso específico

4.2.1.1.2. Análisis granulométrico

Mina MV1

El análisis cuantitativo del tamaño de partículas se realiza siguiendo la norma ASTM D422, 2007 (Figura 50), la clasificación del grupo de suelo se efectúa de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM D2487-00, 2006 y AASHTO M145-91, 2004, indicando que la mina MV1 posee un suelo arcilloso o pertenece al grupo A – 7 – 6 (Tabla 7 y Figura 51).

Figura 50.Análisis granulométrico de las muestras minas MV1 – MI2

Tabla 7.Análisis granulométrico Mina MV1

MUESTRA INICIAL		252 g			
TAMIZ	TAMIZ	PESO	W TAMIZ +	W MUESTRA	% RETENIDO
(mm)	#	TAMIZ (g)	W MUESTRA SECA	(g)	
335	6	0	0		
425	40	0	0		
150	100	305,70	358,60	52,90	21,00
106	140	310,90	326,00	15,10	6,00
75	200	305,00	310,30	5,30	2,10
45	325	305,00	314,40	9,40	3,70
SUMA					32,80

Figura 51.Curva granulométrica mina MV1

Mina MI2

El material de la mina MI2, contiene 6,39% de grava, 93,57% de arena y 0,04% de finos; clasificándolo como un material arenoso bien gradado SW bajo la norma ASTM D2487-00,

2006, y la norma AASHTO M145-91, 2004 lo clasifica en el grupo A – 3, arena fina (Tabla 8 y Figura 52).

Tabla 8. Análisis granulométrico Mina MI2

MUESTRA INICIAL		792 g	
TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
1"	0	0	100
3/4"	0	0	100
1/2"	5,48	0,69	99,31
3/8"	16,67	2,10	97,20
No. 4	28,48	3,60	93,61
No. 10	53,15	6,71	86,90
No. 40	197,65	24,96	61,94
No. 200	490,23	61,90	0,04
FONDO	0,33	0,04	100,00

Figura 52. Curva granulométrica mina MI2

4.2.1.1.3. Límites de Atterberg

De acuerdo a la norma ASTM D4318, 2017 los materiales de la mina MV1 poseen un límite líquido de 50, límite plástico de 21 e índice de plasticidad de 29, datos que permiten la clasificación del suelo como arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH), en el caso de la Mina MI2 los límites de Atterberg indican que los suelos son no plásticos, es decir, se trata de una arena bien gradada, no plástica (Tabla 9 y Figura 53).

Tabla 9. Resultado límites de Atterberg

ENSAYOS	Mina MV1	Mina MI2
Límite Líquido	50	No plástico
Límite plástico	21	-
Índice de plasticidad	29	-

Figura 53. Determinación del límite líquido, mina MV1

4.2.1.1.4. Ensayos físico-químicos

a) Determinación de materia orgánica

La mina MV1, indica un nivel de efervescencia fuerte, reflejando presencia de materia orgánica significativa; en tanto que la MI2 presenta un nivel de efervescencia muy fuerte, es decir, la materia orgánica es considerable; por lo que estas requirieron un tratamiento previo para la eliminación de materia orgánica para el estudio (Tabla 10 y Figura 54).

Tabla 10. Control por atributos, nivel de efervescencia, peróxido de hidrogeno

EFERVESCENCIA	DESCRIPCIÓN
Ninguna	No existe ninguna reacción.
Ligera	Se observa una reacción ligeramente efervescente.
Fuerte	Existe una fuerte reacción.
Muy Fuerte	Existe una reacción que demande la utilización de equipos de control.

Figura 54. Nivel de efervescencia, muestras minas MV1 y MI2

b) Eliminación de carbonatos

La mina MV1, presentó efervescencia, MODERADA, reflejando presencia de materia orgánica mínima; la mina MI2, no presentó efervescencia ubicándose en el nivel NINGUNA, por lo tanto, no existe presencia de materia orgánica; por lo que la muestra de la mina MV1 requiere un tratamiento previo de carbonatos, para su respectivo estudio (Tabla 11, Figura 55).

Tabla 11. Control por atributos, nivel de efervescencia, ácido clorhídrico

EFERVESCENCIA	DESCRIPCIÓN
Ninguna	No existe reacción.
Ligera	Existe una reacción ligeramente efervescente.
Fuerte	Existe reacción fuerte.
Muy Fuerte	Hay una reacción que demande la utilización de equipos de control.

Figura 55. Nivel de efervescencia, muestras minas MV1 y MI2, con HCl

c) Superficie específica

Los resultados de este análisis indica que la muestra MV1 presenta 104,30m²/g, mientras que la muestra MI2 indica 91,20m²/g, tal como se muestra en la Tabla 12 y Figura 56.

Tabla 12. Resultados del ensayo de superficie específica

CANTERA	SUPERFICIE ESPECÍFICA m ² /g	MINERAL DE ARCILLA
MV1	104,30	Montmorillonita/ Illita / sepiolita
MI2	91,20	Illita/paligorskita

Figura 56. Superficie específica, azul de metileno

d) Potencial de hidrógeno (pH)

El pH de las muestras analizadas se realiza norma ASTM D4972, 2005, determinando que los suelos de la mina MV1 presenta alcalinidad mientras que los suelos de la Mina MI2 indica poca alcalinidad, los resultados se muestran en la Tabla 13 y Figura 57.

Tabla 13. Resultados del pH (muestras MV1 – MI2)

SUELO	pH DEL SUELO	TIPO DE pH
Mina MV1	7,693	Alcalina
Mina MI2	7,327	Poco alcalina

Figura 57. Escala de valores de pH, Ávila, 2009

4.2.1.1.5. Ensayo Químico

a) Fluorescencia de rayos X (FRX)

La Tabla 14 contiene los resultados de la composición química expresada en forma óxidos, de los principales constituyentes de las materias primas estudiadas, minas MV1 y MI2.

Tabla 14.FRX, muestras La Vega e Indiucho

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	MnO	TiO ₂	Sb ₂ O ₃
MV1 (%)	56.52	23.08	3.51	8.07	4.59	2.42	0.17	0.75	0.24
MI2 %	60.02	19.28	7.64	7.33	3.24	0.82	0.20	0.77	0.25

Con los resultados de esta tabla se observa que el alto contenido de óxido de silicio (SiO₂) de las materias primas de MV1 y MI2 se debe a la presencia de cuarzo (SiO₂), y otros minerales arcillosos y no arcillosos que poseen el silicio en su composición química. Los óxidos de aluminio y calcio (Al₂O₃), (CaO) que generalmente se asocian a la presencia de anortita también estuvieron presentes. El contenido de óxido de hierro (Fe₂O₃) se considera elevado y responsable de la coloración rojiza del material después de la quema. Los óxidos de calcio y de magnesio (CaO) que tienen un efecto moderado en las temperaturas de quema por debajo de los 1100°C suman el 8.10 en la mina MV1 y 10.88 en la mina MI2 forman las micas (Figura 58).

Figura 58. FRX, muestras de Catamayo

Así mismo en las Figuras 59 y 60 se indica a detalle la composición química de las muestras de La Vega e Indiucho.

Mina MV1

Figura 59.Resultados de la fluorescencia mina "MV1"

Mina MI2

Figura 60.Resultados de la fluorescencia mina "MI2"

4.2.1.1.6. Ensayo Mineralógico

a) Difracción de rayos X (DRX)

Las figuras 61 y 62 presentan los difractogramas las materias primas MV1 y MI2. Las materias primas de las arcillas presentaron en común las especies mineralógicas: Cuarzo, moscovita, albita, anortita, andesita, illita y caolinita, siendo estos dos últimos los minerales arcillosos que confieren propiedades plásticas a las pastas.

Figura 61. Difractograma muestra mina MV1 – MI2

Mineral	Fórmula	Muestra Mina La vega(%)	Muestra Mina Induchu(%)	Muestra Mina Arcimego(%)
Montmorillonita	$Al_2Ca_{0.5}O_{12}Si_4$	-	-	-
Cuarzo	SiO_2	41.76	15.78	41.05
Kaolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	18.36	-	10.96
Illita	$Al_4KO_{12}Si_2$	8.02	-	29.35
Moscovita	$Al_3H_2KO_{12}Si_3$	4.32	-	-
Diópsido	$MgCaSi_2O_6$	2.55	9.97	0.14
Grupo Plagioclasa (Albита, Andesita, Anorthita)	$(Na,Ca)(Si,Al)_3O_8$	16.27	71.73	17.50
Phengita	$Al_3H_2KO_{12}Si_3$	8.72	-	-
Barito-Calcita	$BaCa(CO_3)_2$	-	1.62	-
Braunita	$Mn^{2+}(Mn^{3+})_6SiO_{12}$	-	0.90	-

Figura 62. Difractometría de las muestras MV1 – MI2, Laboratorio Proinstra S.A., 2015

4.2.2. Sector Malacatos

4.2.2.1. Minas: Ceibopamba (MCB), Cangahua (MCA), Palanda (MPL), Chinguilamaca (MCH), Arena Fina (MAF).

4.2.2.1.1. Ensayos de laboratorio, control por atributos

Como se muestra en la Tabla 15, la caracterización por atributos físicos, describe el color, el cual se encuentra expuesto en la columna uno, en base a la tabla MUNSSELL, se observa que todas las muestras poseen matiz (Y), indicando la presencia de óxidos hidratados de hierro (Fe), este tipo de matiz se presenta en climas templados (Torrent y Barrón, 1999). Los valores

de claridad varían desde 2 a 8, por lo que se establece que los valores más claros se observan en las muestras MCH y MPL.

La fluctuación en la pureza es baja, con valores de entre 2 y 4; la muestra analizada MPL tiene un agregado de color rojo, lo cual indica alta presencia de hierro, niveles bajos de pH, es indicativo de presencia de hematita. Las muestras de MCB, MCA y MAF, poseen además del color amarillento, un ligero color gris, lo cual señala presencia de caolinita.

Del análisis de sensación al tacto se estableció que la muestra MCB forma rollo con alto grado de plasticidad, de acuerdo a Uribe, 2014 se clasifica como untuosa; en el caso de MCA, esta forma rollo clasificándose como plástica, para las muestras MCH y MPL presentan diferente grado de plasticidad, finalmente la muestra MAF no forma rollo y facilita su clasificación como árida.

Del análisis de consistencia la muestra MCB se clasifica como extremadamente firme, es decir, se requiere una presión muy fuerte para disgregarse entre los dedos pulgar e índice. La muestra MCA se clasifica como firme disgregándose bajo una presión moderada, sin embargo, posee cierta resistencia; las muestras MCH y MPL se disgregan bajo una ligera presión por lo que se las clasifica como frágil; y, la muestra MAF no presenta coherencia entre sus partículas se la clasifica como suelta

La textura es una propiedad de los suelos que está relacionada con los límites de Atterberg puesto que es el punto donde la materia prima se torna moldeable y manejable para darle la forma deseada (similar a la definición de los límites de Atterberg).

La prueba de textura es una propiedad que se relaciona con los límites de Atterberg puesto que es el punto donde la materia prima se vuelve moldeable y manejable para darle la forma deseada. Por lo que las muestras se clasifican en: MCB arcillosa; MCA arcillo limosa; MCH y MPL franco arcillosas; y MAF arenosa.

El ensayo de impureza practicado a las materias primas establece que: MCB, MPL y MAF, no presentan presencia de impurezas; en el caso de MCA se observa cobertura superficial vegetal; MCH muestra esporádicas raíces.

El análisis de peso específico, nos permitió establecer la relación entre peso/volumen, la muestra que posee mayor densidad es MCB, con $2,62\text{g/cm}^3$ y el valor más bajo lo obtiene la muestra MCH, con $2,45\text{g/cm}^3$ lo cual incide en un mayor peso para los ladrillos.

Tabla 15. Resultados de los ensayos por atributos

MUESTRA	CÓDIGO MUNSELL	SENSACIÓN AL TACTO	CONSISTENCIA	TEXTURA	TIPO DE IMPUREZAS	Pe
						g/cm^3
Ceibopamba (MCB)	7,5 Y [6/2]	Forma rollo, se siente el grado de plasticidad (Untuosa)	Extremadamente firme	Arcillosa	No apreciables	2,62
Cangahua (MCA)	10 Y [5/2]	Forma rollo (Plástica)	Firme	Arcillo Limosa	Cobertura superficial vegetal	2,54
Chinguilamaca (MCH)	5 Y [7/3]	Forma rollo, no es muy plástica (Plástica)	frágil	Franco Arcillosa	Esporádicas raíces	2,45
Palanda (MPL)	7,5 YR [7/4]	Ligeramente forma rollo (Plástica)	frágil	Franco o Franco Arcillosa	No apreciables	2,61
Arena fina (MAF)	10 Y [6/2]	No forma rollo (Árida)	Suelta	Arenoso	No apreciables	-

4.2.2.1.2. Análisis granulométrico

La distribución granulométrica da una idea de la composición mineralógica y de las características físico-mecánicas de las arcillas; en la Tabla 16, se observa los resultados obtenidos, para cada una de las muestras de las minas analizadas provenientes del sector

Malacatos, indicándonos presencia elevada de limo y arcilla para las muestras MCB y MCA, lo que permite la trabajabilidad de la pasta y su fácil moldeo. Al contrario, los porcentajes altos de arena observados en las muestras MPL y MCH, indican una baja trabajabilidad, para estas materias primas.

4.2.2.1.3. Límites de Atterberg

La plasticidad es una propiedad fundamental de las arcillas y aparece por la adición de cantidades de agua adecuadamente, formándose una masa pastosa, que pueda mantener la forma después de la retirada del esfuerzo deformante.

De acuerdo a la Tabla 16, los suelos arcillosos de la muestra MCB se clasifica por su índice de plasticidad como un suelo altamente plástico, mientras que las muestras MCA, MCH y MPL se clasifican como como suelos medianamente plásticos, para MAF no se realizó el análisis, debido a que se considera como suelo NP (No plástico).

Tabla 16. Resumen de los resultados del ensayo de granulometría, límites de Atterberg y densidad de los suelos

	GRANULOMETRÍA			LÍMITES DE ATTERBERG		
	% Limo	% Arcilla	% Arena	L.L	L.P	I.P
Ceibopamba	37	26	37	39	23	16
Cangahua	41	24	36	36	22	14
Chinguilamaca	24	19	58	31	20	11
Palanda	30	7	63	36	27	9

La clasificación para este tipo de suelos, se la realizó mediante la aplicación SUCS y AASHTO, como nos indica en Tabla17; con SUCS, se establece que la muestra MCB, tiene características de arcilla inorgánica de mediana plasticidad, igual para MCA; las muestras MCH y MPL, tienen baja plasticidad, clasificándolas como limos inorgánicos.

AASHTO es un poco menos exigente y clasifica a todas las muestras en los niveles A – 5 y A – 6, es decir suelos tipo arcillosos en su mayoría.

Tabla 17. Clasificación de los suelos bajo SUCS y la AASHTO

	SUCS	DESCRIPCIÓN	AASHTO	DESCRIPCIÓN
Ceibopamba	CL	Arcilla inorgánica de media plasticidad	A-6	Suelo Arcilloso
Cangahua	CL	Arcilla inorgánica de media plasticidad	A-6	Suelo Arcilloso
Chinguilamaca	ML	Limo inorgánicos arcilloso ligeramente plástico	A-6	Suelo Arcilloso
Palanda	ML	Limo inorgánico arenoso ligeramente plástico	A-5	Suelo Limoso

4.2.2.1.4. Ensayos físico-químicos

La determinación de la materia orgánica en todas las muestras del sector Malacatos, no presentan ninguna reacción de efervescencia al someterlas a la prueba con el peróxido de hidrógeno.

El análisis de eliminación de carbonatos, aplicado a las muestras MCB y MPL no indica grado de efervescencia, mientras que en las muestras MCA, MAF y MCH existe una ligera reacción de esta.

El análisis de superficie específica determinado en la muestra MCB, no señala como resultado un valor de $6,10\text{m}^2/\text{g}$, lo cual indica la presencia del mineral caolinita de elevada cristalinidad, illita y haloisita; las muestras MCA y MAF, poseen similitud entre sus valores de superficie específica, que oscilan entre 39 y $48\text{m}^2/\text{g}$, por lo que según Uribe, 2014 posee minerales, como: caolinita de baja cristalinidad, illita y tentativamente haloisita; la muestra MPL con su valor de $20,20\text{m}^2/\text{g}$, contiene minerales como caolinita e illita y la muestra MCH posee un valor muy elevado, $90,50\text{m}^2/\text{g}$, por lo que el contenido mineral es montmorillonita e illita, predominando en su estructura (Tabla 18).

El pH obtenido para cada una de las muestras del sector Malacatos se aprecia en la Tabla 22, con valores que varían entre 5.90 y 8.60, indicando el grado de acidez y alcalinidad de las mismas.

Tabla 18. Resultados del ensayo de pH y superficie específica

Sector	Materia Orgánica	Eliminación de carbonatos	SUPERFICIE ESPECÍFICA m ² /g	pH
	Efervescencia	Efervescencia		
Ceibopamba (MCB)	Ninguna	Ninguna	6,10	7,70
Cangahua (MCA)	Ninguna	Ligera	48,90	7,20
Arena Fina (MAF)	-	-	39,80	7,20
Palanda (MPL)	Ninguna	Ninguna	20,20	8,60
Chinguilamaca (MCH)	Ninguna	Ligera	90,50	5,90

4.2.2.1.5. Ensayos Químicos

a) Fluorescencia de rayos X (FRX)

La determinación de la composición química de los materiales es de gran importancia para su caracterización. Mediante este ensayo se puede determinar la presencia de altos porcentajes de óxido de silicio SiO₂ en todas las muestras, cuyos valores fluctúan entre 47,90 a 64,80%, los cuales son indicativos de presencia cuarzo (Figura 63).

La sílice brinda al ladrillo cocido tres propiedades fundamentales: durabilidad, capacidad de conservar su forma y prevenir los cambios excesivos volumétricos; el óxido de aluminio Al₂O₃ es otro de los elementos con mayor presencia en las muestras, porcentajes altos entre 18.10 a 22.10%, denota presencia de caolinita; el óxido de hierro Fe₂O₃, es un indicador de existencia de minerales como la hematita, magnetita o goethita, los suelos con niveles menores a 7%, brindan al ladrillo resistencia, reducen el punto de fusión y sobre todo contribuye en la durabilidad del producto terminado (Quillupangui, 2011).

Todas las muestras presentan índices inferiores al 7% de óxido de potasio K_2O , cuyos valores se encuentran entre 1,89 y 3,76% determinando presencia de illita; los óxidos de calcio, estaño y magnesio al igual que otros óxidos se encuentran en menores porcentajes de peso por lo que no serán influyentes en la composición del material, como se observa en la Tabla 19 y Figuras 64, 65, 66, 67 y 68.

Tabla 19. Resumen del ensayo de fluorescencia de rayos X, elementos destacados

ÓXIDOS	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)				
	Ceibopamba (MCB)	Cangahua (MCA)	Palanda (MPL)	Chinguilamaca (MCH)	Arena Fina (MAF)
Al_2O_3	22,10	21,40	31,20	18,10	21,40
SiO_2	64,80	62,50	47,90	51,80	62,50
Fe_2O_3	6,40	6,99	5,45	6,12	6,99
K_2O	3,50	3,76	2,87	1,89	3,76
CaO	1,30	0,95	-	1,94	0,95
TiO_2	0,77	-	0,72	0,41	-
MgO	-	2,94	-	-	2,94
SnO_2	-	-	0,25	-	-

Figura 63. Ensayo de FRX. Resumen: composición química de la muestra

Mina Ceibopamba (MCB)

Figura 64. Resultados de fluorescencia de rayos X, MCB. Elementos más trascendentes

Mina Cangahua (MCA)

Figura 65. Resultados de fluorescencia de rayos X, MCA. Elementos más trascendentes

Mina Chinguilamaca (MCH)

Figura 66.Resultados de fluorescencia de rayos X, MCH. Elementos más trascendentes

Mina Palanda (MPL)

Figura 67.Resultados de fluorescencia de rayos X, MPL. Elementos más trascendentes

Mina de Arena Fina (MAF)

Figura 68. Resultados de fluorescencia de rayos X, MAF. Elementos más trascendentes.

4.2.2.1.6. Ensayo mineralógico

a) Difracción de rayos X (DRX)

Los difractogramas de rayos X de las cinco muestras indican una mineralogía constituida predominantemente por cuarzo seguida de caolinita, hematitas, motmorillonita, moscovita e illita, para una mejor descripción obsérvese la Tabla 20 y Figuras 69 70, 71, 72 y 73.

Tabla 20. Resumen de resultados difracción de rayos X

MINAS	MINERAL				
	Cuarzo	Caolinita	Hematita	Montmorillonita	Illita
Ceibopamba	Cuarzo	Caolinita	Hematita	Montmorillonita	Illita
Cangahua	Cuarzo	Caolinita	Moscovita	Hematita	
Palanda	Cuarzo	Caolinita	Hematita	Illita	
Chinguilamaca	Cuarzo	Hematita	Montmorillonita	Illita	
Arena Fina	Cuarzo	Caolinita	Moscovita	Illita

Figura 69. Difractograma de rayos X. MCB

Figura 70. Difractograma de rayos X. MCA

Figura 71. Difractograma de rayos X. MCH

Figura 72. Difractograma de rayos X. MPL

Figura 73. Difractograma de rayos X. MAF

4.2.3. Sector Santa Elena

4.2.3.1. Mina: Santa Elena, Estratos MD2 y MD3.

4.2.3.1.1. Ensayos de laboratorio, control por atributos

La caracterización por atributos físicos, está descrita en Tabla 20: el color, mediante la tabla de Munsell; la muestra MD2 posee un matiz 2,5YR8/3 amarillo pálido, habitualmente este tipo de suelos son de climas tropicales; para la muestra MD3, el matiz es 5Y 8/3 con características iguales a la muestra anterior.

El ensayo de sensación al tacto aplicado a las dos muestras del sector de Santa Elena indica la clasificación plástica.

Referente a su consistencia, las muestras se rompen con una moderada presión, por lo que se las clasifica como firme.

De acuerdo al análisis de textura, la muestra MD2 se clasifica como limo arcilloso, y la muestra MD3 como suelo arcilloso.

En las muestras MD2 y MD3 no se aprecia presencia de impurezas.

Los valores de peso específico de la tierra diatomea presentados en la Tabla 21, para las muestras MD2 y MD3, se encuentran con una variación mínima respecto a los rangos de 1,85 a 2,30g/cm³ establecidos por Hernández, et al 2015, esto depende del grado de impurezas y contaminantes que tenga la muestra, como arcillas y limos; las diatomitas por lo general tienen bajo peso específico.

Tabla 21. Resultados de los ensayos por atributos muestras mina Santa Elena

MUESTRA	CÓDIGO MUNSSELL	SENSACIÓN AL TACTO	CONSISTENCIA	TEXTURA	TIPO DE IMPUREZAS	Pe
						g/cm ³
MD2	2,5YR 8/3	Plástica	Firme	Limo – arcilloso	No apreciables	2,37
MD3	5Y 8/3	Plástica	Firme	arcilloso	No apreciables	2,34

4.2.3.1.2. Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico que se describen en la Tabla 22 indican que la muestra MD2, mantiene elevado porcentaje de limos y un bajo porcentaje de arcilla y arena, en tanto que la muestra MD3, presenta elevado contenido de arcilla y baja cantidad de limo y arena, por otro lado, la muestra MCB tiene valores uniformes de limo, arcilla y arena; con estos resultados la clasificación unificada de suelos (SUCS) indica que las muestras MD2 y MD3 son limos de elevada plasticidad y MCB son arcillas de baja compresibilidad. De acuerdo a la clasificación AASHTO la muestra MD2 es un suelo que pertenece a grupo A-5; MD3 pertenece al grupo A-7-6 y MCB al grupo A-6.

Tabla 22. Análisis granulométrico de las muestras

MUESTRA	GRANULOMETRÍA ASTM D422-63			CLASIFICACIÓN DEL SUELO	
	% Limo	% Arcilla	% Arena	SUCS	AASHTO
MD2	66,2	15,8	18	MH	A-5
MD3	17,8	54,2	28	MH	A-7-6
MCB	37	26	37	CL	A-6

4.2.3.1.3. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg, se presentan en la Tabla 23, estos parámetros nos permiten definir si la plasticidad es baja, media o alta.

De acuerdo a los valores obtenidos el índice de plasticidad y límite líquido, establece que la muestra MD2 tiene un índice de plasticidad 6, lo que la clasifica como un suelo de baja plasticidad, entre tanto la muestra MD3 se la clasifica como un suelo altamente plástico, ya que presenta un índice de plasticidad 22 y la muestra de arcilla MCB se la clasifica como suelo de plasticidad media.

Tabla 23. Límites de Atterberg minas Santa Elena y Ceibopamba

MUESTRA	LÍMITES DE ATTERBERG (ASTM D 423-424)			TIPO
	L.L	L.P	I.P	
MD2 (Mina A)	53	47	6	Diatomita
MD3 (Mina A)	65	43	22	
MCB (Mina B)	39	23	16	Arcilla

4.2.3.1.4. Análisis microscópico

El análisis microscópico practicado a las muestras de diatomita, de la mina Santa Elena, está representado por un predominio de algas con morfología del orden central, tipo cilíndrica y radial (Figura 74); también se puede apreciar diatomeas del orden penal, con frústulas de forma alargadas y simetría bilateral; la presencia de esponjas y espículas silíceas es también representativa; el grado de conservación de las frústulas no es elevado, la mayoría de las diatomeas están fragmentadas y no conservan su forma normal.

Figura 74. Microfotografías de diatomita mina Santa Elena: a) *Coscinodiscus liniatus*, b) espículas de esponja y diatomitas fragmentadas, c) *Aulacoseira lirata*. d) *coscinodiscus radiatus excentricus* y frústulas de *epithemia zebra*. e) *Coscinodiscus radiatus*. f) *Fragilaria fasciculata*. g) *uruglena* h) fragmentos de *fragilaria* y *Tabulariafasciculata*, cuyo tamaño esta alrededor de 10 μm x100

Entre las diatomeas identificadas podemos citar los géneros como a) *Coscinodiscus liniatus*, b) *coscinodiscus excentricus*, c) espículas de esponja acompañada de *fragilaria*, d) *Aulacoseira lirata*, frústulas de *epithemia zebra*, e) *coscinodiscus radiatus* y *synedra Tabulata*, f) además también se ha encontrado *actinophychus undulatus*, g) fragmento de *coscinodiscus perforatus*, h) *fragilaria fasciculata*, *uruglena* y *tabularia fasciculata*, como podemos apreciar en la Figura 74.

4.2.3.1.5. Ensayos físico-químicos

Los resultados de los ensayos físicos-químicos se muestran en la Tabla 24, el análisis de materia orgánica aplicado a todas las dos muestras del sector Santa Elena dieron negativo, ya que no presentaron reacción a la efervescencia, durante el contacto con el peróxido de hidrógeno.

El ensayo de eliminación de carbonatos en las muestras de tierras diatomeas, MD2 y MD3 indica una ligera reacción de efervescencia, mientras que en la muestra de arcilla MCB no se presenta ninguna reacción.

El análisis de superficie específica indica que la tierra diatomea se encuentra entre 73 y 80.7m²/g mientras que MCB se encuentra en 6.10m²/g.

El pH, tanto para la diatomita, como para la arcilla, es uniforme y bastante cercano, los suelos de las muestras MD2 y MD3, son alcalinos; en tanto que el suelo de la muestra MCB es ligeramente ácido.

Tabla 24.Resultados de la caracterización físico-química del suelo

MUESTRA	MATERIA ORGÁNICA	ELIMINACIÓN DE CARBONATOS	SUPERFICIE ESPECIFICA	VALOR DE pH
Diatomita	Efervescencia	Efervescencia	m²/g	ASTM D4972
MD2	Ninguna	Ligera	73,40	8,10
MD3	Ninguna	Ligera	80,70	8,55
Arcilla MCB	Ninguna	Ninguna	6,10	7,7

4.2.3.1.6. Ensayos Químicos

La diatomita presenta valores similares de SiO₂, en las muestras MD2 y MD3, que constituyen el 50,30% y 55,40% respectivamente (Figuras 75 y 76), debido a la presencia de esqueletos de diatomeas y cuarzo, también se observa en la composición química aluminio, calcio y hierro y bajos contenidos de potasio, titanio azufre y magnesio, en algunos casos inferior al 1%; en la muestra de arcilla MCB (Figura 77) se identifica un valor más alto de SiO₂ 64,80%, y composición química similar a la muestra de tierras diatomita.

De acuerdo a la clasificación de la diatomita como material industrial, según Zhang, Guo, Yao, Qu, & Zhou, 2013; las tierras diatomeas se divide en cinco tipos: a) diatomita pura, con el contenido de diatomeas no menos del 90%; b) diatomita arcillosa, con el contenido de diatomeas en un intervalo de 90% -75%; c) diatomeas arcillosas, rango de 75% -50%; d) arcilla de diatomeas, rango del 50% -25%; e) arcilla de diatomeas, con un contenido superior al 25%. De acuerdo a esta clasificación las muestras MD2 y MD3 se las clasifica como diatomeas arcillosas.

Del análisis químico de las muestras, se observa su composición de acuerdo al porcentaje obtenido, Tabla 25.

Tabla 25. Composición química de la diatomita y arcilla por fluorescencia de rayos X

COMPONENTE	CONTENIDO %		
	Santa Elena(MD2)	Santa Elena (MD3)	Ceibopamba(MCB)
SiO ₂	50,3	55,40	64,80
Al ₂ O ₃	13,40	15,90	22,10
CaO	21,00	10,50	1,30
Fe ₂ O ₃	6,00	7,60	6,40
MgO	4,10	1,30	0,20
K ₂ O	0,60	0,70	3,50
S	0,20	0,10	0,30
TiO ₂	0,60	0,70	0,80
Total %	96,18	92,16	99,28

Figura 75. Resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra MD2

Figura 76. Resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra MD3

Figura 77. Resultados de fluorescencia de rayos X de la muestra MCB

4.2.3.1.7. *Ensayo mineralógico*

La técnica de difracción de rayos X es una de las herramientas básicas para la caracterización mineralógica, pues permite identificar la cristalinidad de los minerales.

Las tierras que contienen diatomeas y no han sido alteradas, en su mayoría se componen principalmente de tres tipos de minerales arcillosos: la illita, montmorillonita y caolinita (Zhang et al., 2013). Los componentes que no son diatomeas, están identificados como minerales arcillosos y no arcillosos. La arcilla incluye la montmorillonita e illita (Tabla 26). Los no arcillosos son el cuarzo y ortoclasa, (Al-Wakeel, 2009).

En los difractogramas por DRX, representados en las Figuras 78 y 79, se aprecian picos de alta intensidad debido a la alta orientación preferencial que presentan las arcillas para las reflexiones (001), con una estructura amorfa extensa superpuesta. Este tipo de banda amplia, presente entre 20°C a 50°C, es indicativo de la presencia de la sílice amorfa en la diatomita.

En la muestra MD2, Figura 78, se presenta un pico de mayor intensidad característico de la calcita, las fases menores fueron cuarzo, caolinita y montmorillonita y zeolita representados por picos de menos intensidad.

Los altos contenidos de sílice explican la abundancia de esqueletos de diatomeas y cuarzo, la presencia de alúmina se atribuye a los feldespatos y minerales de la arcilla, el calcio y hierro se encuentra en la montmorillonita (Al-Wakeel, 2009); de acuerdo a Espinoza, 2007 los altos contenidos de hierro producen la coloración rosada en la cocción de la muestra debido a la oxidación de este.

La caolinita de las muestras otorga propiedades refractarias y contribuye en la resistencia mecánica de los ladrillos cocidos a altas temperaturas.

La Figura 79, muestra MD3 presenta el pico principal relacionado con el cuarzo, seguido de montmorillonita, caolinita y calcita.

La muestra de arcilla MCB se encuentra representando el pico de intensidad por hematita.

Tabla 26. Composición Mineralógica de las muestras de diatomita y arcilla

MUESTRA	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA DIATOMITA Y ARCILLA				
MD2(Diatomita)	Cuarzo	Calcita	Montmorillonita	Caolinita	Zeolita
MD3(Diatomita)	Cuarzo	Calcita	Montmorillonita	Caolinita	Zeolita
MCB(Arcilla)	Cuarzo	Caolinita	Montmorillonita	Hematita	Illita

Figura 78.Difractograma de rayos X. Mina Santa Elena MD2

Figura 79.Difractograma de rayos X. Mina Santa Elena MD3

Figura 80. Difractograma de rayos X. Mina Ceibopamba MCB

4.2.3.1.8. Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR)

El espectro IR de la diatomita muestra bandas características de los carbonatos a 1429 cm^{-1} , 873 cm^{-1} y 712 cm^{-1} ; las bandas de vibración de los enlaces T-O (T = Si o Al), banda principal con dos máximos a 1097 cm^{-1} y 1052 cm^{-1} (posiblemente del solapamiento de la banda de vibración de tensión del cuarzo y de las fases arcillosas), la de 797 cm^{-1} se corresponde con el doblete del cuarzo. Las bandas que aparecen a menor frecuencia 530 cm^{-1} y 469 cm^{-1} posiblemente son las asociadas a las vibraciones de deformación de los enlaces Si-O-Si entre los tetraedros.

Las bandas a 3697.38 cm^{-1} , 3619.61 cm^{-1} , 3441 cm^{-1} se corresponden con la vibración de tensión de los OH, junto a la de 1630 cm^{-1} de deformación se asocian a los dos posibles tipos de agua (agua libre y ligada) en la superficie de las diatomitas (Figura 81).

Figura 81. FTIR, muestra de tierra diatomeas

4.2.3.1.9. *Resonancia magnética nuclear (RMN).*

La muestra de diatomita presenta dos señales de Aluminio claramente diferenciadas, una más intensa una hacia +3 ppm asociada a Aluminio octaédrico (Al_O), y otra de menor intensidad hacia +56ppm, asociada a aluminio tetraédrico (Al_T). Encontrándose una similitud con el caolín, donde es necesario tratar térmicamente para que cambie el estado de coordinación del aluminio, y hacer el material más reactivo, el metacaolín.

El espectro de la diatomita en el análisis de sílice presenta dos máximos claramente diferenciados, estas señales también son el resultado del solapamiento de las diferentes fases mineralógicas que forman el material.

Las componentes que aparecen entre -100 y -120ppm se asocian a diferentes formas cristalinas del SiO_2 y son fases en general inertes.

La zona comprendida entre -80 y -100 ppm es la más susceptible de reaccionar (Figura 82).

Figura 82. RMN, muestra de tierra diatomeas

4.2.4. Sector Zamora Chinchipe

4.2.4.1. Mina La Pituca II

4.2.4.1.1. Ensayos de laboratorio, control por atributos

En la Tabla 27, la caracterización por atributos físicos, describe el color, mediante la tabla de Munsell; la muestra la Pituca II posee un matiz 7,5Y 5/3 amarillo claro, habitualmente este tipo de suelos son de climas cálido húmedos.

El ensayo de sensación al tacto aplicado a la muestra del sector La Pituca la clasifica como una muestra árida.

Referente a su consistencia, esta muestra es frágil ya que se rompe con mucha facilidad por lo que se la clasifica como firme.

Su granulometría es 83,1% arena; 15% limo y 1,9%; los resultados del ensayo de límites de Atterberg indican que el límite líquido es 19,50%, el límite plástico es 18,07% y el índice de plasticidad es de 1,43%, de acuerdo a estos parámetros y dentro de la clasificación SUCS este suelo se clasifica como Limo – arenoso; y. dentro de la clasificación AASHTO es un suelo que pertenece al grupo A- 5. Regular a malo.

En la muestra La Pituca II no se aprecia presencia de impurezas, el peso específico real de este suelo es 2,76 g/cm³; y su peso específico aparente es de 1,28 gr/cm³.

Tabla 27. Resultados de ensayos por atributos, físicos y químicos

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA
Sensación al tacto	Árida
Consistencia	Frágil
Color	7,50Y 5/3
Impurezas	Ninguna
Granulometría	% A(83,20) - %L(15) - %Ar(1,90)
Densidad Real	2,76g/cm ³
Densidad Aparente	1,28g/cm ³
Límite Líquido	19,50%
Límite Plástico	18,07%
Índice de Plasticidad	1,43%

4.2.4.1.2. Análisis granulométrico

Luego de realizar el análisis granulométrico a la muestra La Pituca se puede decir que esta muestra está conformada por una elevada cantidad de arena y un bajo contenido de limos y arcillas.

4.2.4.1.3. Límites de Atterberg

Los resultados del ensayo de límites de Atterberg indican que el límite líquido es 19,50%, el límite plástico es 18,07%, por tanto, el índice de plasticidad es de 1,43%, de acuerdo a estos parámetros y dentro de la clasificación SUCS este suelo se clasifica como Limo – arenoso; y. dentro de la clasificación AASHTO es un suelo que pertenece al grupo A- 5, su categoría es regular a malo.

4.2.4.1.4. Ensayos físico-químico

La tabla 28 muestra los resultados de los ensayos físico-químicos; el análisis de materia orgánica practicada a la muestra da como resultado la no presencia de estos puesto que no se observa efervescencia al practicarles el peróxido de hidrogeno.

Tabla 28.Resultados de Ensayos Físico - Químicos

ENSAYO	RESULTADO
Determinación de Carbonatos	Ninguna
Determinación de Materia Orgánica	Ninguna
pH	8,06
Superficie Especifica	10,4 m ² /g

No existe reacción a las soluciones empleadas para determinar carbonatos y materia orgánica, por lo tanto, la muestra no contiene este tipo de impurezas; el pH es de 8,06 de naturaleza alcalina y la superficie específica en el ensayo se ubica en 10,40m²/g, lo que indica la presencia del mineral caolinita de elevada cristalinidad, illita tal como se muestra en la Tabla 27.

4.2.4.1.5. Ensayos Químicos

Del análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), se observa el alto contenido de óxido de silicio (SiO_2), tal como se observa en la Tabla 28 y Figura 83, la presencia de cuarzo (SiO_2) como mineral predominante con 66,67%, presencia de óxido de aluminio (alúmina) con 17,29%, y otros minerales en menor porcentaje, lo que indica que el material es apto para activar un proceso de geopolimerización, siendo necesario la incorporación de una fuente alcalina como el hidróxido de sodio que es el activador utilizado en nuestro caso.

El análisis químico FRX indica la relación química $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,86 (Tabla 29), siendo un parámetro importante para el proceso de geopolimerización, de acuerdo a (J Davidovits, 1982).

Tabla 29. Resultado, FRX Composición química de relave de mina Zamora Chinchipe

ELEMENTOS	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	S	TOTALES
%	17,29	66,77	5,3	3,89	5,68	1,07	100

Figura 83. Fluorescencia de rayos X. Mina Zamora Chinchipe

4.2.4.1.6. Ensayo mineralógico

En el difractograma de rayos X podemos observar la composición mineralógica de las muestras, Figura 84.

Figura 84. Difractograma de rayos X. Mina Zamora Chinchipe, antes de la geopolimerización

Para la formación de geopolímeros, la fase amorfa presente en la materia prima es de suma importancia, pues es la fase amorfa la que es químicamente más reactiva y lista para reaccionar. Una muestra de material de relave fue analizada mediante Difracción de rayos X, y su difractograma se presenta en la Figura 83. El pico más sobresaliente está entre $2\theta = 20^\circ$ y $2\theta = 30^\circ$, aproximadamente. Lo que caracteriza el material no cristalino; los picos más bajos presentan presencia moscovita, illita y oligoclasa.

4.2.4.1.7. Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR)

El análisis de FTIR de la muestra de relave (Figura 85) indica en la banda 1008cm^{-1} vibraciones de estiramiento de los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al de illita o en la banda 915cm^{-1} típico de las vibraciones de los enlaces Al(IV)-OH. Las bandas en 1166cm^{-1} y 1084cm^{-1} , la banda doble en $798\text{-}780\text{cm}^{-1}$, y las bandas en 697cm^{-1} , 512cm^{-1} y 462cm^{-1} , están todas asignadas al cuarzo, fase cristalina en los precursores / agregados.

Las bandas a 1030cm^{-1} , 531cm^{-1} y 467cm^{-1} están asociadas a la vibración de los enlaces T-O (T = Si o Al), originados por la presencia de Ortoclasa. Algunas bandas se superponen con la vibración de los enlaces Si-O y Al-O (1023cm^{-1} , 531cm^{-1} y 477cm^{-1}) presentes en la fase moscovita (aluminosilicato) criterio ratificado por Fernández-Jiménez y Palomo, 2005. El espectro de FTIR del material se presenta en la Figura 85.

Figura 85. FTIR, muestra relave de mina

4.2.4.1.8. *Resonancia magnética nuclear (RMN)*

El espectro de aluminio en el material de relave presenta una señal intensa del aluminio tetraédrico (Al_T) en relación al aluminio octaédrico (Al_O), ello hace suponer que este material desde el punto de vista del aluminio es más reactivo.

El espectro del silicio presenta una señal ancha centrada en $-89/-90$ ppm. La anchura de la señal recuerda a los espectros de las cenizas, y teniendo en cuenta su composición mineralógica es de prever que dichas señales anchas se correspondan con el solapamiento de diferentes señales tipo Q3(mAl) y Q4(mAl) , Figura 86.

Figura 86. RMN, muestra relave de mina

4.2.5. Caracterización de los correctores orgánicos empleados para la fabricación de ladrillos artesanales

Los correctores orgánicos de aserrín, bagazo de caña de azúcar y tamo de arroz son utilizados dentro de la industria cerámica, siendo utilizados para aumentar la porosidad de un producto cerámico, mejorando la capacidad de aislamiento térmico del ladrillo.

Sin embargo, la emisión de CO₂ es el principal problema de los formadores de poros orgánicos. Los formadores de poros inorgánicos tienen menos problemas ambientales, pero pueden cambiar la plasticidad de la arcilla negativamente y aumentar la cantidad de agua necesaria para mantener la plasticidad aceptable (Junge, 2000, 2001).

4.2.5.1. Empleo de correctores orgánicos

El empleo de correctores, permite mantener una constante volumétrica, al momento de la quema; generando mayor capacidad calorífica interna a nivel estructural, permitiendo una cocción homogénea y por ende un ladrillo más liviano (Figura 87).

La idea de la inserción de residuos vegetales en matrices frágiles, parte de la observación de la cantidad de residuo disponible, de la asignación dada al mismo y de la necesidad de desarrollo de materiales más saludables. Se debe considerar el hecho de que la madera es una materia prima renovable y presenta muchas propiedades ventajosas tales como la disponibilidad y resistencia mecánica (Beraldo & Carvalho, 2001).

Figura 87. Corredores orgánicos: tamo de arroz, bagazo de caña de azúcar y aserrín

Las muestras de estos materiales se obtuvieron de los lugares de almacenamiento en las ladrilleras, tomando para el ensayo un aproximado de 5kg de cada corrector.

4.2.5.2. Análisis termo-gravimétrico (TGA)

Con este análisis se establece los cambios físicos y químicos que soportan los correctores orgánicos (muestra analizada), los que se expresan por la pérdida o aumento de peso y volumen, medida que se la obtiene por la diferencia entre el peso final y el peso inicial.

Según Gao et al 2004, la celulosa inicia la pérdida de masa a temperaturas principalmente por encima de 300°C y más rápidamente completa su ciclo de pérdida hasta la carbonización, teniendo la mayor cantidad de volátiles de todos los componentes de la madera. Sin embargo, la lignina y hemicelulosa se descomponen con tasas más bajas y con mayor pérdida de masa en la carbonización. Es sabido que, en la carbonización de la madera, la hemicelulosa es el primer compuesto a degradarse y la lignina, el último.

Bartkowiak y Zakrzewski, 2004, señalan que la lignina es térmicamente más resistente que los carbohidratos componentes de la madera. En temperaturas de hasta 600°C, la pérdida

de masa de la hemicelulosa alcanza cerca del 95%; en la celulosa, ese porcentaje queda en torno al 80%, mientras que en la lignina no excede el 60%.

Con este ensayo logramos establecer la relación entre diversos factores en función del tiempo – temperatura y las reacciones que se presentan durante el proceso de calentamiento sobre la muestra.

a) Aserrín (TGA)

Se considera aserrín a los residuos forestales, producidos por las diferentes actividades que se ejercen o aplican sobre la madera.

Para determinar las temperaturas de inicio, fin y máximas de descomposición de las muestras y permitir caracterizar cada etapa de degradación térmica, se obtuvo la curva de TGA en función de la temperatura, presentadas en la Figura 88.

Entre los componentes químicos del aserrín, se encuentra las fibras de celulosa, unidas con lignina, de acuerdo al análisis su composición media es de: un 50% de carbono (C), un 42% de oxígeno (O), un 6% de hidrógeno (H) y un 2% de nitrógeno (N) asociado a otros elementos, Figura 88.

Figura 88.TGA de aserrín, en función de la temperatura, el peso y el flujo de calor

En el análisis de la Figura 88, la pérdida de masa inicia con la deshidratación a 196,91°C, generando una pérdida de masa 7,72%; pero la mayor pérdida de peso se da entre 196,91°C y 469,78°C, logrando una pérdida del 59,59%, después de esto, el proceso de deshidratación se estabiliza.

La transmisión de calor es concluyente en el comportamiento del material, en su fase uno se observa pérdida de la humedad de alrededor de -2,00w/g, para la fase dos se libera monóxido de carbono, logrando una combustión de -3,40w/g y en la tercera fase, se produce la quema total, liberando Dióxido de Carbono, completando la combustión del material.

Para fines de cocción del ladrillo, la temperatura ideal para que el aserrín alcance el grado de combustión esta entre 400°C a 600°C.

El material volátil del aserrín de madera está alrededor de 83,5% (Nhuchhen & Salam, 2012), con un poder calorífico de 17,42 MJ.kg⁻¹ (Demirbaş, 1997).

b) Bagazo (TGA)

Una vez extraído el jugo de la caña de azúcar, el sobrante se denomina bagazo, este material está compuesto por: humedad 50%; sólidos solubles 5% y sólidos insolubles o fibra cruda 45% (Figura 89).

Se compone químicamente de: Carbono: 47 %; Hidrógeno: 6,5 %; Oxígeno: 44 % y Cenizas: 2,5 %, (EcuRed, 2011).

El material volátil del bagazo de caña está alrededor de 85,97%, con un poder calorífico de 17,7 MJ.kg⁻¹.

Figura 89. TGA de bagazo, en función de la temperatura, el peso y el flujo de calor

La deshidratación es más lenta que en el aserrín, su mayor pérdida de peso se presenta entre los 221,40°C a 390,19°C, perdiendo un 53,94% de su peso inicial.

La fase uno de combustión, genera pérdida de humedad y se da entre los 0°C hasta los 200°C; en la fase dos libera monóxido de carbón, entrando al proceso de ignición, esto sucede entre 201°C a 400°C y en la fase tres, el material se quema completamente, liberando Dióxido de carbono.

La temperatura para que el bagazo combustione totalmente se da entre los 300°C a 400°C, para fines de cocción de ladrillos.

c) Cáscara de arroz (TGA)

La Figura 90, señala las curvas termo gravimétricas TG y sus derivadas DTG, para muestra de cáscara de arroz en atmósferas de aire y nitrógeno. Las curvas presentan dos zonas de descomposición claramente distinguibles por los picos DTG (línea celeste). Estas corresponden a la pérdida de agua y descomposición de los materiales lignocelulósicos evidenciada en la curva de TG.

Este tejido vegetal formado por celulosa y sílice, es un combustible extraordinario, es considerado bueno y viable, en la fabricación de ladrillos.

Las características físico - químicas del tamo de arroz son: Humedad 6,59%, Cenizas 18,52%, Extractivos Totales 0,50%, Celulosa 36,03%, Lignina 18,49% y Hemicelulosa 45,48%, Figura 90,(Arias & Meneses, 2016).

Figura 90.TGA de tamo de arroz, en función de la temperatura, el peso y el flujo de calor

En esta curva en atmosfera de nitrógeno, la pérdida de masa para temperaturas menores a 100°C es producida por la liberación aproximada de un 8,1% de agua enlazada superficialmente en la muestra tomada. La primera zona es atribuida a la descomposición de la hemicelulosa desde 125°C hasta 355°C., y celulosa en el rango de 275°C a 390°C, y al inicio de la descomposición de la lignina en 275°C. La segunda zona de descomposición se debe a las etapas finales de descomposición de la lignina en 650°C.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Uno de los mayores problemas con los que se encuentra el sector de la construcción, sin lugar a dudas, es el que presenta el ladrillo, como instrumento primordial en la edificación de las estructuras, donde se demanda el empleo de este material. Cuyo uso cubre porcentajes que van desde el 70 al 80%, en todo el conjunto estructural de una edificación (en los sectores donde se lo emplea); la calidad del mismo es de suma importancia, ya que de esta dependen muchos de los factores que determinan la consolidación estructural de las edificaciones.

Previo al análisis de la calidad de los ladrillos producidas artesanalmente en la localidad y a la presentación de propuestas para mejorar el proceso productivo, sea con ladrillos producidos con mezclas en proporciones óptimas o incorporando materias primas alternativas, se hizo necesario realizar un estudio minucioso de algunas minas y canteras, para seleccionarlas como idóneas (para su uso como materia prima), base del presente estudio; considerando primeramente aquellas que ya son empleadas como fuente de abastecimiento de los productores de la localidad; así también, se procedió a seleccionar materias primas alternativas, previo análisis, con el objetivo de verificar si reúnen o no las características necesarias que demandan este tipo de material constructivo, además de su disponibilidad, características ecológicas, e impactos que favorezcan al medio ambiente, esta evaluación se muestra en el capítulo 4.

Aunque el presente estudio no recoge información económica, es de suma importancia indicar que los estudios que se realicen en base a este, deben enfocarse en el aspecto económico, ya que el mismo ofrecería un mayor sustento a su aplicación, y a los resultados obtenidos en el presente estudio: desde cualquier óptica que se aprecie esta investigación, su aporte es muy significativo, ya que el mismo nos ha permitido evaluar las características mecánicas y baja

calidad del ladrillo producido artesanalmente en la localidad; el mismo no ofrece las características de un ladrillo TIPO C, categorización con la cual se lo clasifica en la actualidad, además de no garantizar los requerimientos del sector constructivo en cuanto a propiedades de resistencia y alta demanda del mismo.

5.1.Elaboración de ladrillos artesanales mejorados y ladrillos con incorporación de materias primas alternativas

De acuerdo a la normativa estipulada en el presente estudio: INEN (Ecuador), para cerámicos (ladrillos), los ladrillos artesanales producidos en la localidad no cumplen con la normativa, que lo clasifica como ladrillo macizo Tipo C, si no como un ladrillo Hueco Tipo F, que sin lugar a dudas denota su poca resistencia, y el peligro que el mismo representa en el sector de la construcción, en cuanto al uso y destino que se le da a este material de construcción.

De lo expuesto anteriormente, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo encontrar una solución que favorezca el mejoramiento de las características mecánicas del ladrillo (Fabricación tradicional) y el uso de materias primas alternativas; mediante el estudio detallado de los materiales arcillosos y obtención de las combinaciones óptimas de las arcillas; hay que recalcar que los ladrillos elaborados con lodos de relaves le añaden un plus a la investigación, ya que los mismos contribuyen a dar una solución sobre el uso y destino de estos residuos mineros, garantizando con ello, un manejo adecuado de los mismos y menor impacto ambiental, sobre el medio natural.

5.1.1. Selección del corrector orgánico, para la elaboración de ladrillo convencional y mejorado convencional

En este estudio se elaboraron probetas cilíndricas, de varias dosificaciones, mismas que fueron ensayadas mediante compresión diametral o método brasileño, cada muestra mantendrá

un diámetro y volumen similar. Para la aplicación del método se elaboraron 3 probetas por cada dosificación, las dimensiones de la probeta son: diámetro $d = 70\text{mm}$ y mantendrán un espesor $e = 25\text{mm}$. El control dimensional será riguroso.

Para la selección del corrector orgánico idóneo en la elaboración de pastas cerámicas se utilizaron las materias primas del sector Catamayo.

5.1.1.1. Primera dosificación

En la primera dosificación se utilizaron únicamente las materias primas de las minas La Vega (MV1) e Indiucho (MI2) del sector Catamayo a fin de evaluar su comportamiento de resistencia a la compresión diametral. La dosificación se da en base a la cantidad de masa destinada a la fabricación del ladrillo artesanal, considerando las dimensiones estándar del mismo⁴.

a) Diseño estadístico

Se propuso un arreglo factorial de un solo factor con cinco niveles porcentuales, de tal forma que la suma de cada uno de 100% (Tabla 30).

Tabla 30. Dosificaciones de mezclas

DOSIFICACIONES	MINA MV1 (arcilla plástica)	MINA MI2 (arcilla arenosa)	AGUA DESTILADA (ml)
1	30%	70%	1500
2	40%	60%	1250
3	50%	50%	1000
4	60%	40%	750
5	70%	30%	500

ANEXO I. (Resistencia a la Compresión Diametral, Primera dosificación)

⁴ Ladrillos de: $l = 28,5\text{ cm}$, $a = 14\text{ cm}$ y $h = 9\text{ cm}$, peso promedio de 5 kg por unidad, (zona de Catamayo y Malacatos).

b) Preparación de la pasta

Para la preparación de la pasta se utilizó una balanza de precisión y probeta graduada; se hidrató las muestras, se procedió con el amasado y se almacenaron herméticamente por 24 horas, impidiendo la pérdida de humedad, logrando así el punto de saturación, Figura 91.

Figura 91. a) Dosificaciones seleccionadas, b) hidratación y c) amasado; primera dosificación

c) Moldeo, secado y cocción

Homogenizada e hidratada la pasta se colocó en el molde para su posterior compactación utilizando un apisonador de 7kg, logrando densidad promedio entre: 1,50gr/cm² a 1,75gr/cm², estimadas en la norma ecuatoriana, Figura 92 (a, b).

Durante el proceso de secado la masa moldeada se sometió a temperatura ambiente durante 72 horas, similar al tiempo de secado del ladrillo convencional, Figura 92 (c). En este tiempo la masa se contrajo en 1mm aproximadamente, luego se desmoldó y se introdujo en una estufa termostática, a temperatura $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas.

Figura 92. a) Moldeo, b) secado, c) cocción de pastillas cilíndricas

Así mismo, en la cocción se usó un horno termostáticamente controlado, hasta alcanzar los 950°C, diseñándose un programa de cocción, donde la temperatura sube gradualmente, en tiempos de estabilización de 1 hora, a una velocidad promedio de ascenso de 60°C/h, permitiendo la cocción uniforme de las muestras (Figura 93).

Figura 93. Gráfica de la curva de calentamiento

d) Resistencia a la compresión diametral (σ_{cd}), primera dosificación

En este ensayo se determinó dimensiones y propiedades físicas de las probetas cilíndricas; diámetro, espesor y masa, después de la cocción (Tabla 31 y Figura 94).

Figura 94. a) Medidas, diámetro y espesor; b) peso de las probetas; c) compresión Directa

A través del estudio de la primera dosificación, se logró determinar la mezcla óptima de 50/50 (C3, Figura 95), presentando un mayor factor de optimización, considerando a esta, como la mezcla más idónea, para la continuación del diseño.

Tabla 31. Resistencia a la σ_{cd} , probetas cilíndricas; primera dosificación

COMPRESIÓN	C1		C2		C3		C4		C5	
Dosificaciones (%)	30/70		40/60		50/50		60/40		70/30	
Velocidad (KN/s)	0,1		0,1		0,1		0,1		0,1	
Dimensiones	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)
3 PROBETAS POR PUNTO	69,44	12,07	68,63	22,75	68,07	11,83	66,95	21,41	66,83	24,59
	69,43	11,75	68,58	23,33	68,00	11,86	67,44	23,07	66,83	24,99
	69,44	11,64	68,56	22,64	67,89	11,90	67,16	23,72	66,70	21,33
Promedio	69,44	11,82	68,59	22,91	67,99	11,86	67,19	22,73	66,78	23,63
ÁREAPROMEDIO (mm ²)	3786,76		3694,74		3630,38		3545,21		3502,89	
σ_{cd} MPa	0,38		0,54		0,72		0,65		0,68	
Peso (g)	124,88		147,95		117,29		137,66		139,64	
f_{opt} (MPa/kg) Promedio	3,01		3,65		6,11		4,72		4,84

Figura 95. Resistencia a la compresión diametral, probetas cilíndricas

5.1.1.2. Segunda dosificación

En base a la mezcla C3 (50/50), considerada apta, se procede a añadir los correctores orgánicos (aserrín, tamo de arroz y bagazo de caña de azúcar), seleccionando cuál de ellos presenta las mejores propiedades físicas y características que permitan optimizar las condiciones mecánicas del ladrillo; estos se añadieron en porcentaje del 2% y 4%, de acuerdo con análisis previos.

a) Arreglo factorial incluyendo correctores orgánicos

Se propuso un arreglo factorial, con tres tratamientos, dos niveles y tres repeticiones por nivel, para cada tratamiento, Tabla 32.

Tabla 32. Segunda dosificación, añadiendo correctores

TIPO DE CORRECTORES	# PROBETAS POR MUESTRA	PRIMERA DOSIFICACIÓN C3	CORRECTOR %	PESO CORRECTORES (g)
ASERRÍN	1 A	50/50	2%	100
	2 A	50/50	2%	100
	3 A	50/50	2%	100
	4 A	50/50	4%	200
	5 A	50/50	4%	200
	6 A	50/50	4%	200
TAMO DE ARROZ	7 T	50/50	2%	100
	8 T	50/50	2%	100
	9 T	50/50	2%	100
	10 T	50/50	4%	200
	11 T	50/50	4%	200
	12 T	50/50	4%	200
BAGAZO	13 B	50/50	2%	100
	14 B	50/50	2%	100
	15 B	50/50	2%	100
	16 B	50/50	4%	200
	17 B	50/50	4%	200
	18 B	50/50	4%	200

ANEXO II. (Resistencia a la Compresión Diametral, Segunda Dosificación, Adición de

Correctores al 2% y 4%.

b) Preparación de las mezclas

En la mezcla C3 (50/50), se adiciona 2% y 4%, de cada corrector (previo tamizado), se mezcló los componentes en seco logrando homogeneidad; se añadió agua destilada para su hidratación, en proporciones de 1500ml al 2% y 1600ml al 4%, para compensar el promedio de absorción por corrector añadido; luego se amasó la muestra logrando similares condiciones que para los ladrillos convencionales, eliminando con ello los espacios generados por el aire en las muestras (Figura 96).

Las mismas se almacenaron herméticamente, por 24 horas, logrando saturación completa.

Figura 96. a) Dosificaciones seleccionadas, b) mezcla y c) hidratación; segunda dosificación

c) *Moldeo, secado y cocción*

El procedimiento para la homogenización, hidratación, compactado, secado y cocción es el mismo, que, para la primera dosificación, descrito anteriormente Figura 97 (ítem c, numeral: 5.1.1.).

Figura 97. a) Moldeo de la mezcla, b) secado y c) cocción

d) *Cocción de pastillas (950° C)*

El programa de cocción, se programa para que el horno ascienda gradualmente, con tiempos de estabilización de 1 hora; el promedio de velocidad de la temperatura fue de 60°C/h, permitiendo una cocción homogénea (Figura 98).

Figura 98. Cocción pastillas, fundente al 2% y 4%, a 950°C

La curva de temperatura de cocción de las probetas cilíndricas se presenta en la Figura 99.

Figura 99. Gráfica, curva de calentamiento segunda dosificación

e) *Resistencia a la compresión diametral (σ_{cd}), segunda dosificación*

Se determinó las dimensiones (diámetro, espesor y peso) y propiedades físicas, de los discos obtenidos con 2% y 4% de corrector orgánico (Tabla 33 y 34).

Tabla 33. Resistencia a la σ_{cd} , probetas cilíndricas. Dosificación dos, 2% de corrector

COMPRESIÓN	ASERRÍN		TAMO DE ARROZ		BAGAZO	
CORRECTOR (%)	2%		2%		2%	
Velocidad (KN/s)	0,1		0,1		0,1	
Dimensiones	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)
3 PROBETAS POR PUNTO	68,38	12,31	68,66	16,24	68,69	15,08
	68,16	13,66	69,10	14,19	68,73	12,87
	68,16	15,63	68,84	14,70	68,63	13,19
Promedio	68,24	13,87	68,87	15,04	68,69	13,71
Área promedio (mm ²)	3656,89		3724,84		3705,28	
σ_{cd} MPa	0,99		0,57		0,59	
Peso (g)	81,22		87,87		77,57	
f_{opt} (MPa/kg) promedio	12,40		6,43		7,60	

Tabla 34. Resistencia a la σ_{cd} , probetas cilíndricas. Dosificación dos, 4% de corrector

COMPRESIÓN	ASERRÍN		TAMO DE ARROZ		BAGAZO	
CORRECTOR (%)	4%		4%		4%	
Velocidad (KN/s)	0,1		0,1		0,1	
Dimensiones	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)	ϕ (mm)	e (mm)
3 PROBETAS POR PUNTO	69,29	12,10	69,27	13,52	69,14	12,19
	68,84	12,15	69,20	14,80	69,12	13,18
	68,89	12,19	69,32	12,36	69,45	14,04
Promedio	69,01	12,15	69,26	13,56	69,24	13,14
Área promedio (mm ²)	3740,12		3767,88		3765,22	
σ_{cd} MPa	0,40		0,29		0,24	
Peso (g)	66,88		75,71		66,43	
f_{opt} (MPa/kg) promedio	6,01		3,78		3,68	

Los resultados obtenidos del ensayo a la σ_{cd} de las muestras, establecen que el corrector de aserrín adicionado al 2% (Tabla 33), logra mayor resistencia, que el corrector adicionado al 4% (Tabla 34; Figuras 100 y 101), por lo tanto, se utiliza este corrector en la elaboración de ladrillos artesanales mejorados.

Figura 100. Resistencia a la compresión diametral, probetas cilíndricas con 2% de corrector

Figura 101. Resistencia compresión diametral, probetas cilíndricas con 4% de corrector

Este tipo de corrector orgánico o desgrasante, fue empleado en la elaboración de los ladrillos artesanales en la zona de Catamayo y Malacatos; así como, para los ladrillos mejorados elaborados con materia prima proveniente de los sectores Catamayo, Malacatos y Santa Elena, para el caso de los ladrillos elaborados con lodos de relaves mineros, no se utilizó corrector.

5.1.2. Zona de Catamayo

5.1.2.1. Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo artesanal mejorado

Los materiales seleccionados, homogenizados y secados (ambiente), se mezclaron manualmente; luego se tamizó el aserrín, se agregó este a la mezcla y se procedió a secar en estufa.

En el proceso de elaboración se priorizó la hidratación, así como, un correcto amasado, obteniendo con ello mezclas consistentes, uniformes y fluidas, estas fueron almacenadas herméticamente, por 24 horas, hasta saturación óptima. El moldeo fue manual en la gradilla, para lograr un buen desmolde, se preparó la base con un plástico, garantizando que la mezcla no se fije en el piso, las paredes de la gradilla se humedecieron, permitiendo un retiro fácil; desmoldados los ladrillos con adición y sin adición de corrector, se las sometió a secado

ambiente por 96 horas, eliminado con ello el exceso de agua, luego pasaron a la estufa por 24 horas, eliminando en su totalidad en agua. La cocción se la realizó en un horno termostático, con un máximo de temperatura de 1200°C; el ladrillo fue colocado en el horno, donde se mantuvo temperatura gradual, logrando una quema adecuada, llegando a requerir una temperatura máxima de 950°C, el tiempo de enfriamiento, para el retiro de los ladrillos, se lo estableció entre 8 a 12 horas, evitando cambios bruscos de temperatura sobre el ladrillo, que fracturen la estructura del mismo.

5.1.2.1.1. Proceso de fabricación del ladrillo artesanal mejorado

Una vez logrados los resultados de resistencia a la compresión diametral (σ_{cd}), se estableció que la combinación, C3 (50/50) y la mezcla con aserrín al 2%, presentan la resistencia a la compresión diametral más alta, esto nos permitió tomar la decisión para presentar esta propuesta técnica, para elaborar ladrillos artesanales mejorados, para el sector de Catamayo.

- Las dimensiones serán estándar.
- Se homogenizará y seleccionará la materia prima.
- El corrector empleado es aserrín, (solo para el caso del ladrillo elaborado con lodos de relave de mina no se emplea este material ni ningún agregado orgánico).
- Se fabricaron 5 ladrillos con la mezcla C3 y 5 con las mezclas C3 + aserrín, bajo norma,(INEN 294, 1978).

5.1.2.1.2. Dosificación con corrector orgánico (aserrín)

La cantidad de materia utilizada en la elaboración de los ladrillos mejorados incluido el corrector, se describirá en la Tabla 35.

Tabla 35.Dosificación para 5 ladrillos con corrector

DOSIFICACIONES	MINA MV1 (kg)	MINA MI2 (kg)	ASERRÍN (g)	AGUA (ml)
5 unidades	15	15	500	7500

5.1.2.1.3. Dosificación sin corrector orgánico

La cantidad de materia prima a utilizar en la elaboración de los ladrillos artesanales mejorados sin corrector se describirá en la Tabla 36.

Tabla 36.Dosificación para 5 ladrillos sin corrector

DOSIFICACIONES	MINA MV1 (kg)	MINA MI2 (kg)	AGUA (ml)
5 unidades	15	15	7000

Es importante establecer que, al no adicionar corrector, la cantidad de agua a suplir en la mezcla disminuye en proporción: 1gr de corrector =1ml de agua.

5.1.2.2.Caracterización del ladrillo artesanal mejorado con corrector y sin corrector orgánico

Las características físico-mecánicas de los ladrillos artesanales mejorados se realizaron bajo la norma INEN (ladrillos macizos), determinando la aprobación o no aprobación para el ladrillo mejorado, Tabla 37.

Tabla 37.Codificación, ladrillos artesanales mejorados

LADRILLOS CON 2% ASERRÍN	LADRILLOS MEZCLA MINA MV1 / MINA MI2
I A	I
II A	II
III A	III
IV A	IV
VA	V

5.1.2.2.1. Variabilidad dimensional (VD)

Se elaboraron 5 unidades, con la mezcla C3 + 2% de aserrín, la medida de sus aristas refleja una variabilidad dimensional de $\pm 2,0$ mm respecto de su promedio, estableciéndose una mayor uniformidad, sobre el ladrillo convencional. El ladrillo sin corrector tubo una variabilidad dimensional de $\pm 2,1$ mm, alcanzando una gran uniformidad.

Los resultados se observan en las Tablas 38 y 39:

Tabla 38. Variación dimensional, ladrillos artesanales mejorados, con 2% de corrector

LADRILLOS MEJORADOS CON 2% DE ASERRÍN	SOGA (cm)	TIZÓN (cm)	GRUESO (cm)	VARIACIÓN DIMENSIONAL PROMEDIO(mm)
I A	27,11	14,07	8,14	$\pm 2,0$
II A	27,17	13,94	8,09	
III A	27,29	13,82	8,01	
IV A	27,33	13,87	7,49	
V A	27,21	14,08	7,69	

Tabla 39. Variación dimensional, ladrillos artesanales mejorados, sin corrector

LADRILLOS MEJORADOS SIN ASERRÍN	SOGA (cm)	TIZÓN (cm)	GRUESO (cm)	VARIACIÓN DIMENSIONAL PROMEDIO(mm)
I	27,36	14,05	8,56	$\pm 2,1$
II	27,33	14,15	8,42	
III	27,72	14,02	7,96	
IV	27,60	14,21	8,09	
V	27,60	14,01	8,74	

Como se puede apreciar en las Figuras 102, 103 y 104, la dispersión dimensional se muestra aceptable, en lo referente al largo, ancho y espesor, siendo los valores de: $\Delta L = \pm 2,64\text{mm}$, $\Delta a = \pm 2,78\text{mm}$ y $\Delta e = \pm 4,25\text{mm}$, los rangos se encuentran establecido dentro de la norma ecuatoriana (INEC 293 NTE, 2014), la cual indica que los valores no deben superar el rango $\pm 8\text{mm}$, en todas las aristas del ladrillo.

Figura 102. Dispersión: largo del ladrillo convencional mejorada, 2% de aserrín

Figura 103.Dispersión: ancho del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín

Figura 104.Dispersión: espesor del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín

5.1.2.2.2. *Peso del ladrillo.*

Los ladrillos artesanales mejorados con aserrín, registran un peso promedio 4,8 kg, entre tanto el ladrillo artesanal mejorado, sin adición de corrector, registró un peso promedio de 5,7 kg, 1 kg aproximadamente más liviano que el ladrillo sin corrector (Tabla 40).

Resultados:

Tabla 40.Peso de los ladrillos artesanales mejorados

LADRILLOS MEJORADOS CON 2% DE ASERRÍN (g)	LADRILLOS MEJORADOS SIN ASERRÍN(g)
4960	5820
4930	5765
4891	5440
4553	5575
4710	5959
PROMEDIOS	
4808,80	5711,80

En la Figura 105, se aprecia una dispersión mínima, esto refleja que no existe una gran variación; la dispersión estándar respecto a la media es de 154,60g.

Figura 105. Dispersión: peso del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín

5.1.2.2.3. Densidad (ρ)

La densidad promedio obtenida de los ladrillos artesanales mejorados con 2% de aserrín, es de 1,61g/cm³, clasificándolo como ladrillo **Tipo III**; en tanto la densidad promedio obtenida de los ladrillos artesanales mejorados, sin corrector, es de 1,76g/cm³, clasificándolo como ladrillo **Tipo V** (Tablas 41 y 42).

Resultados:

Tabla 41. Densidad aparente, ladrillos artesanales mejorados, 2% aserrín

LADRILLOS MEJORADOS CON 2% DE ASERRÍN	PESO (g)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)
I A	4960	3103,74	1,60
II A	4930	3063,45	1,61
III A	4891	3020,83	1,62
IV A	4553	2841,26	1,60
V A	4710	2946,13	1,60
PROMEDIO	4808,80	2995,08	1,61

Tabla 42. Densidad aparente, ladrillos artesanales mejorados, sin corrector

LADRILLOS MEJORADOS SIN ASERRÍN	PESO (g)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)
I	5820	3292,29	1,77
II	5765	3257,26	1,77
III	5440	3094,59	1,76
IV	5575	3173,03	1,76
V	5959	3379,52	1,76
PROMEDIO	5711,80	3239,34	1,76

En la Figura 106, se muestra una dispersión estándar de 0,01g/cm³, respecto a la media de 1,61g/cm³, reflejando que no existe gran variación.

Figura 106. Dispersión: densidad del ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín

5.1.2.2.4. Absorción de humedad

Los ladrillos artesanales mejorados con 2% de aserrín, tienen un valor promedio de 15,60% de absorción de agua como se observa en la Tabla 43, de acuerdo a la Figura 59, se los clasifica como ladrillo **Tipo A**; entre tanto para el ladrillo artesanal sin corrector, el valor promedio es de 11,80% (Tabla 44), de absorción de agua, clasificándolo como **Tipo A**⁵.

Procedimiento:

Se lo realizó bajo norma (ASTM C373, 1999).

⁵ La absorción de agua para ladrillos macizos, se establece según la norma (INEN 296, 2015)

Resultados:

Tabla 43. Absorción de agua, ladrillos artesanales mejorados, 2% de aserrín

IA		II A		III A		IV A		V A	
M=	5747	M=	5740	M=	5649	M=	5249	M=	5420
S=	2735	S=	2755	S=	2667	S=	2464	S=	2560
D=	4960	D=	4930	D=	4891	D=	4553	D=	4710

LADRILLOS	V. EXTERIOR (cm³)	V. POROS ABIERTOS (cm³)	V. POROS IMPERMEABLES (cm³)	POROSIDAD APARENTE (%)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	PESO ESPECÍFICO APARENTE	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)
I A	3.012	787	2.225	26,13	15,87	2,23	1,65
II A	2.985	810	2.175	27,14	16,43	2,27	1,65
LADRILLOS	V. EXTERIOR (cm³)	V. POROS ABIERTOS (cm³)	V. POROS IMPERMEABLES (cm³)	POROSIDAD APARENTE (%)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	PESO ESPECÍFICO APARENTE	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)
III A	2.982	758	2.224	25,42	15,50	2,20	1,64
IVA	2.785	696	2.089	24,99	15,29	2,18	1,63
V A	2.860	710	2.150	24,83	15,07	2,19	1,65
PP	2.924,80	752,20	2.172,60	25,70	15,60	2,20	1,64

Tabla 44. Absorción de agua, ladrillos artesanales mejorados sin corrector

I		II		III		IV		V	
M=	6480	M=	6445	M=	6100	M=	6246	M=	6668
S=	3360	S=	3355	S=	3170	S=	3180	S=	3459
D=	5820	D=	5765	D=	5440	D=	5575	D=	5959

LADRILLOS	V. EXTERIOR (cm³)	V. POROS ABIERTOS (cm³)	V. POROS IMPERMEABLES (cm³)	POROSIDAD APARENTE (%)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)	PESO ESPECÍFICO APARENTE	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)
I	3.120	660	2.460	21,15	11,34	2,37	1,87
II	3.090	680	2.410	22,01	11,80	2,39	1,87
III	2.930	660	2.270	22,53	12,13	2,40	1,86
IV	3.066	671	2.395	21,89	12,04	2,33	1,82
V	3.209	709	2.500	22,09	11,90	2,38	1,86
PP	3.083,00	676,00	2.407,00	21,90	11,80	2,40	1,85

5.1.2.2.5. Ensayo a compresión simple

El ladrillo artesanal mejorado, con 2% de aserrín, en base a la norma Ecuatoriana, se clasifica como macizo **Tipo B** (Tabla 45); es decir, será un ladrillo elaborado a máquina, color rojizo, con ángulos rectos y aristas rectas, diferenciándose del **Tipo A**, ya que puede presentar ligeras imperfecciones en sus caras exteriores, así como, leves variaciones de rectitud en sus

aristas de unos 5 mm; en tanto que el ladrillo artesanal mejorado sin corrector (Tabla 46), se clasifica como macizo **Tipo B**, (Figuras 107 y 108).

Resultados:

Tabla 45. Resistencia a la compresión, ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín

LADRILLOS MEJORADOS CON 2% DE ASERRÍN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN(MPa)
I A	15,52
II A	13,73
III A	14,13
IV A	15,22
V A	15,65
RESISTENCIA PROMEDIO	14,85

Tabla 46. Resistencia a la compresión, ladrillo artesanal sin corrector

LADRILLOS MEJORADOS SIN CORRECTOR	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN(MPa)
I	16,52
II	16,45
III	14,69
IV	13,91
V	15,80
RESISTENCIA PROMEDIO	15,47

Figura 107. Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillo convencional mejorado, 2% de aserrín

Figura 108. Valores máximos de resistencia a la compresión, ladrillo convencional mejorado, sin corrector

Modo falla

A través del ensayo de resistencia a la compresión simple, se ha identificado el modo de falla de los especímenes de ladrillos realizados (Figuras 109 y 110).

Figura 109. Modo de falla, por resistencia a la compresión, ladrillo mejorado, 2% de aserrín

Figura 110. Representación del modo de falla, por resistencia a la compresión, ladrillo mejorado, 2% de aserrín

La falla⁶ que presentan los ladrillos, se da por aplastamiento, presentando:

- ✓ Fisuras paralelas al contorno del ladrillo.
- ✓ Fisura en “V” en el núcleo.

5.1.2.3. Caracterización de técnicas analíticas

DRX de mezcla óptima de ladrillos artesanales mejorados

En la Figura 111, se observa el difractograma de la muestra preparada usando la mezcla óptima C3, 50/50 a una temperatura de sinterización de 950°C, hay un predominio de cuarzo, hematitas, albíta y moscovita.

Figura 111. Difractograma de rayos X. Mezcla óptima

⁶ La falla de los paneles de ladrillos puede ser atribuida a tres modos simples, deslizamiento de las juntas de mortero, tracción en los ladrillos y compresión en la mampostería. Hasta el momento, las teorías de falla existentes para evaluar la resistencia a corte de la mampostería se desarrollan a partir de diversas simplificaciones, como, por ejemplo, la no consideración de las juntas de mortero vertical y las tensiones normales laterales en los ladrillos. Se presenta en este trabajo una nueva teoría de falla que considera el efecto de todas las juntas de mortero y las tensiones que se presentan en los ladrillos. Además, la teoría propuesta se puede expresar en el espacio de tensiones principales con el objeto de implementar un macro modelo para ladrillos encadenada y poder considerar la anisotropía propia de los paneles de mampostería. (Torrissi & Crisafulli, 2011)

Análisis termo gravimétrico

Las temperaturas a las que se producen los diferentes fenómenos térmicos se pueden estudiar utilizando métodos de análisis térmico como el análisis térmico diferencial, el análisis termo gravimétrico (TGA) y la calorimetría de barrido diferencial (DSC). Sin embargo, para muestras que son una mezcla de diversos materiales, como los materiales utilizados para preparar ladrillos de arcilla, la interpretación de los datos se complica por la ocurrencia simultánea de fenómenos térmicos de diferentes orígenes. Para facilitar la interpretación de los termogramas, podemos usar para la primera derivada del Termograma D1 y para la segunda derivada D2, visualizando de forma más clara o explícitamente la ocurrencia de eventos térmicos. La curva D2-DSC representa los cambios en la ratio de flujo de calor de la muestra en los diversos rangos del proceso térmico, como la descomposición endotérmica y exotérmica. La curva D2-DSC proporciona información complementaria para facilitar una mejor evaluación de los procesos térmicos que se producen simultáneamente registrados en los termogramas TGA y DSC.

Los termogramas de la muestra Catamayo se presentan en la Figura 112, en la curva DSC, se puede observar que, durante el período de calentamiento inicial, la muestra libera agua en una reacción endotérmica, hasta una temperatura de aproximadamente 120°C. En este proceso, la muestra pierde 4,58% de su masa, probablemente como resultado de la eliminación de agua higroscópica del material arcilloso. La masa húmeda exhibió un cambio dimensional durante el secado a temperaturas en un rango de 0 a 150°C, debido a la pérdida de agua de sus poros. Por encima de 120°C y hasta aproximadamente 200°C, aparece un punto de inflexión en el termograma DSC, probablemente relacionado con la eliminación de agua higroscópica de la illita y otros minerales, lo que ocasionó que la muestra perdiera aproximadamente 0,75% de su peso. En la literatura, se ha informado que el efecto asociado con el caolín en este rango de

temperatura es muy pequeño en comparación con el asociado con la illita. A 200°C, un pico endotérmico agudo es evidente, probablemente debido a la desorción térmica de agua absorbida lentamente, adherida a las superficies de las partículas a través de una atracción de tipo Van Der Waals. Dicha agua se adsorbe en sitios activos asociados con defectos en la estructura y típicamente se observa que está presente en cantidades directamente proporcionales al número de partículas. En el rango de 200°C a 500°C, comúnmente ocurre la oxidación de la materia orgánica, y la pérdida de energía debido a la pérdida de masa orgánica, asociada con las partículas de arcilla siendo relativamente baja. De hecho, la combustión de la materia orgánica depende del tamaño de sus partículas constituyentes y de su distribución en la muestra, lo que da lugar a picos pequeños pero amplios durante el calentamiento. En el rango de 300°C a 350°C, se puede observar un máximo en la curva de DSC, probablemente relacionado con la pérdida de agua del óxido de hierro hidratado; Observándose un máximo en la curva D2-DSC en el rango de 304°C - 315°C, donde el flujo de energía térmica permanece constante en un rango de temperatura pequeño, antes de que comience a disminuir nuevamente. En la curva D2-DSC, entre 380°C y 480°C, se pueden observar varios eventos que no son visibles en la curva de DSC, porque se superponen con la descomposición de la materia orgánica; estos eventos corresponden a la deshidroxilación de la arcilla. La deshidroxilación es una reacción activada térmicamente y depende de muchos factores, de los cuales el tiempo y la temperatura son las variables más importantes, ésta es un proceso en el que las moléculas de agua se forman y se eliminan de la estructura de los minerales arcillosos, siguiendo la reacción: $\text{OH}^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}^{2-}$. Las energías de activación de la deshidroxilación de los minerales disminuyen en el siguiente orden: illita, moscovita, montmorillonita y caolinita; este proceso no se observa claramente en otros minerales, por lo que no es discernible en la curva. La caolinita se caracteriza por un efecto endotérmico prominente en el rango de 450°C a 570°C, seguido de la destrucción de la red mineral cristalina y la formación de metacaolín, acompañado por la

liberación de agua, siguiendo la reacción descrita en la ecuación $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O})$. La formación de las moléculas de agua genera vacíos en la red cristalina, y cuando se han formado suficientes vacíos, la estructura se deforma, produciendo metacaolín.

El máximo de este evento endotérmico depende de la velocidad de calentamiento, que ocurre a 443°C, cuando la velocidad de calentamiento es de 1°C/min y a 527°C, cuando la velocidad de calentamiento es de 40°C/min. La recristalización de la caolinita se produce entre 950°C y 1000°C, acompañada de una liberación considerable de energía, que se debe observar en el termograma como un pico exotérmico agudo. La pérdida de agua de la illita resulta en un pico endotérmico inicial entre 100°C y 150°C debido a la deshidratación, seguido por un segundo pico endotérmico cerca de 460°C - 470°C debido a la deshidroxilación y un tercer pico cerca de 900°C que está asociado con la etapa final de deshidroxilación. Sin embargo, algunos autores, informan la existencia de al menos dos picos endotérmicos en el rango de 600°C a 700°C en el proceso de deshidroxilación de illita. En su estado final, el inicio del proceso de deshidroxilación ocurre antes de la descomposición de la estructura de silicato original. La descomposición térmica de la illita comienza a 800°C, y cuando la temperatura aumenta, la hematita se forma a expensas del silicato. A 910°C, la illita se recristaliza en un proceso exotérmico. Moscovita-2M1 exhibe un cambio de fase significativo a aproximadamente 800°C, que se atribuye en la literatura a un proceso de deshidroxilación. La deshidroxilación de moscovita-2M1 se produce en el rango de temperatura entre 700°C y 1000°C y se acompaña de la nucleación y el crecimiento de la fase deshidroxilada a altas temperaturas. Dos procesos térmicos se han asociado con la deshidroxilación de moscovita-2M1: uno a 475°C y otro a 750°C. El proceso implica la condensación de dos grupos de hidroxilo para formar una molécula de agua a través de la siguiente reacción $(\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{11})$.

La anortita (Anr), con la fórmula $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, y albita (Alb), con la fórmula $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, se encuentran en los extremos de una serie continua de reacciones en una solución sólida de plagioclasas. Los miembros intermedios de la serie son mezclas homogéneas de los productos en los extremos e incluyen albita, que consiste en 100% a 90% Alb y 0% a 10% Anr; andesina, que consiste en 70% a 50% Alb y 30% a 50% Anr; labradorita, que consiste en 50% a 30% Alb y 50% a 70% Anr; y anortita, que consiste en 10% a 0% Alb y 90% a 100% Anr. Esta serie de plagioclasas forma una solución sólida y homogénea a altas y bajas temperaturas, y surge a través de la sustitución completa de sodio y silicio por calcio y aluminio. La anortita pura (Anr 100) exhibe una transición de fase estructural reversible (una estructura primitiva del grupo espacial P1 a una estructura centrada en el cuerpo del grupo espacial I1) a aproximadamente 237°C. La albita existe en dos formas cristalinas: una forma completamente ordenada que es estable a bajas temperaturas, llamada "albita baja" o simplemente albita, y una forma desordenada que es estable a altas temperaturas, llamada "albita alta". La transformación de albita a "albita alta" ocurre en el rango de temperatura de 490°C a 670°C. La andesita puede descomponerse en anortita y albita, como ocurre en el modelo regional de metamorfismo térmico. Su superestructura homogénea con límites periódicos y límites antifásicos (APB) no periódicos se distorsiona localmente debido a la energía acumulada a lo largo de los defectos bidimensionales estrechamente espaciados. Por lo tanto, el APB se recombina en una región del cristal para formar anortita (Anr 95), y en otra región del mismo cristal, la estructura se transforma en albita (Anr <5), sin generar una superestructura. A 573°C, el cuarzo trigonal alfa se transforma en cuarzo beta hexagonal. Esta transformación se puede observar explícitamente en la curva D2-DSC en la Figura 111 (a). El contenido de cuarzo se puede determinar a partir del cambio en la entalpía, que, para el cuarzo puro, es del orden de 7,5 J/s. Se puede esperar que a 870°C, el cuarzo beta se transforme irreversiblemente en beta tridimita, experimentando un cambio significativo en el volumen (aproximadamente 14,4%), pero la cinética de esta reacción es muy lenta, y nunca ocurre por debajo de 1250°C. También se puede esperar una descomposición gradual del cuarzo en el rango de 800°C - 1100°C, con una disminución

significativa en su contenido a 1100°C. Sin embargo, cuando las impurezas están presentes, el cuarzo beta puede transformarse irreversiblemente en alfa cristobalita a 1050°C o 1250°C.

Todos los picos relacionados con la liberación de carbonato en la curva D2-DSC de la Figura deben aparecer como picos estrechos en el rango de temperatura de 640°C a 740°C. Varios procesos ocurren en el rango de 700°C a 900°C que son visibles en la curva D2-DSC en la Figura 111 (a) y están asociados con la descomposición de las arcillas y de la calcita. La calcita puede descomponerse en un amplio rango de temperatura, desde 650°C (des carbonatación de calcita poli cristalina) hasta aproximadamente 850°C, en la que se produce la descomposición de la calcita mono cristalina. A 810°C, ocurre la des carbonatación de carbonatos con tamaños de partículas similares a los de las arcillas.

Figura 112. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café), M. Catamayo.

El termograma de la muestra de Indiucho Figura 113, indica eventos térmicos similares a los resultados obtenidos en la muestra La Vega, especialmente en las temperaturas 120°C y 200°C. A diferencia de la muestra MI1 en la que se produce un pico endotérmico a 573°C donde ocurre la transformación de cuarzo alfa en cuarzo beta en la muestra MI este evento ocurre a aproximadamente 835°C debido a la anortita sódica o feldespatos potásico.

Este análisis permite determinar que la temperatura de cocción idónea para este tipo de arcilla es de 950°C, debido a que 976°C ocurre la vitrificación de la muestra⁷.

Figura 113. Termogramas TGA (negro), DSC (azul) y D2 – DSC (azul), M. Indiucho

⁷ Publicado y Ratificado: (García et al., 2016)

Análisis de microscopía SEM

La muestra C3 (50/50 óptima), para fabricar ladrillos mejorados, obtenida como resultado del análisis de la diferentes dosificación, a las muestras de las minas “La Vega” e “Indiuchó”, (muestra cocida) del sector de Catamayo, y realizado su estudio a través de microscopía SEM, se puede observar que entre las arcillas (Figura 114,a), a un nivel de detalle de 2000 aumentos, se aprecia la presencia de feldespato potásico (V1), así mismo, se encuentra moscovita (V2) y en la (Figura 114, b) a 5000 aumentos se muestra la presencia de mica debido a existencia de titanio (V3), como se muestra en la Figura 114.

Figura 114.Microscopía SEM, ladrillo mejorado Catamayo (50/50) a) nivel de detalle 2000 aumentos b) nivel de detalle 5000 aumentos.

5.1.3. Zona Malacatos

5.1.3.1. Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo artesanal mejorado

La preparación de la pasta y elaboración de ladrillo artesanal mejorado con las materias primas de la zona de Malacatos se realiza de forma similar al proceso descrito en el apartado 5.1.2.1.

a) Diseño estadístico

En la Figura 115, se describe las diferentes combinaciones a realizar con las materias primas del sector de Malacatos.

Figura 115. Descripción del número de mezclas a realizar

Para la primera combinación se dispuso un arreglo factorial de un solo factor, con 6 niveles porcentuales.

Para la segunda, tercera, cuarta, quinta y sexta combinaciones, se dispuso un arreglo factorial de un solo factor, con 3 niveles porcentuales (Tabla 47).

Tabla 47. Dosificaciones de discos para el ensayo de compresión diametral

MATERIAL 1	MATERIAL 2	DOSIS 1 (%)	DOSIS 2 (%)
Mina Ceibopamba	Mina Cangahua	50	50
		60	40
		70	30
		80	20
		100	0
		30	70
Mina Ceibopamba	Mina de Arena Fina	90	10
		80	20
		70	30
Mina Ceibopamba	Mina potencial Palanda	50	50
		60	40
		70	30
Mina potencial Palanda	Mina de Arena Fina	90	10
		80	20
		70	30
Mina Ceibopamba	Mina potencial Chinguilamaca	50	50
		60	40
		70	30
Mina potencial Chinguilamaca	Mina de Arena Fina	90	10
		80	20
		70	30

Una vez establecidos los diseños factoriales, se inicia el desarrollo del proceso de determinación de mezclas óptimas (Figuras 116).

Figura 116. Procedo de determinación de mezclas óptimas

ANEXO III. (Ensayo de compresión diametral, sector Malacatos).

b) Resistencia a la compresión diametral (σ_{cd})

El ensayo de compresión diametral (σ_{cd}), se lo realizó con la finalidad de optimizar tiempo y material, teniendo en cuenta las 21 mezclas (ver Tabla 47).

En la primera combinación MCB/MCA, se puede observar la menor contracción después del secado (C_{ss}) y la contracción total (CT), la Tabla 48, nos muestra que las dosificaciones 60/40 y 80/20, son óptimas; de igual forma presentan la mejor resistencia a la σ_{cd} y el factor de optimización (f_{opt}).

Tabla 48. Compresión diametral (σ_{cd}) y contracción para la mezcla: MCB y MCA.

Mezcla	Porcentaje (%)	Wsia (g)	Dsi (cm)	Esi (cm)	Ws (g)	Ds (cm)	Es (cm)	Wh (g)	Dh (cm)	Eh (cm)	σ_{cd} (Mpa)	f_{opt} (MPa/kg)	C _{ss} (%)	CT (%)
MCB/MCA	50/50	123,42	6,75	1,78	112,69	6,63	1,83	106,75	6,47	1,75	3,91	36,61	8,88	9,67
	60/40	123,71	6,66	1,73	103,91	6,56	1,71	100,18	6,50	1,69	4,49	44,79	3,31	6,75
	70/30	123,95	6,70	1,77	102,58	6,53	1,72	97,28	6,48	1,69	2,60	26,77	3,51	11,28
	80/20	119,33	6,72	1,79	106,16	6,69	1,76	100,39	6,63	1,73	4,72	47,00	3,25	5,51
	100/0	127,69	6,73	1,77	106,36	6,65	1,75	100,77	6,52	1,70	3,50	34,72	6,66	10,30
	30/70	125,75	6,71	1,76	107,61	6,60	1,73	101,99	6,56	1,71	3,52	34,53	2,18	7,01

La Figura 117, nos permite observar los valores más altos para f_{opt} de la combinación MCB y MCA, calculados en función de la resistencia máxima a la compresión diametral y dividida para el peso (Del Coz Díaz, García Nieto, Álvarez Rabanal, & Lozano Martínez-Luengas, 2011). La composición 80/20(%), con un valor de 47,0MPa/kg, es la que mejores resultados presenta, seguida de la composición 60/40, con un valor de 44,8MPa/kg.

Figura 117. f_{opt} de la mezcla de MCB y MCA

La Tabla 49, nos permite observar que la menor contracción luego del secado (C_{ss}), y, contracción total (CT), de la composición de MCB y MAF resulta para el porcentaje 90/10, considerándose como mezcla óptima de esta combinación; de la misma forma se obtiene el mayor valor a la compresión diametral 2.27MPa.

Tabla 49. Compresión diametral (σ_{cd}) y contracción para la mezcla: MCB y MAF.

Mezcla	Porcentaje (%)	Wsia (g)	Dsi (cm)	Esi (cm)	Ws (g)	Ds (cm)	Es (cm)	Wh (g)	Dh (cm)	Eh (cm)	σ_{cd} (Mpa)	f_{opt} (Mpa/kg)	Css (%)	CT (%)
MCB/MAF	90/10	140,10	6,96	1,88	115,12	6,67	1,80	109,52	6,61	1,80	2,27	20,70	1,90	13,53
	80/20	147,90	7,02	1,86	126,96	6,72	1,82	121,19	6,67	1,72	1,78	14,73	6,90	17,05
	70/30	170,33	7,04	1,89	142,95	6,70	1,80	136,80	6,49	1,75	1,65	12,08	8,89	22,33

La Figura 118 nos permite observar, que el mayor valor del f_{opt} de la combinación de MCB y MAF, lo obtiene la composición 90/10(%), con un valor de 20,7MPa/kg.

Figura 118. f_{opt} , mezcla de MCB y MAF

La Tabla 50, nos permite observar, que la menor contracción después C_{ss} y CT, de la composición de la MCB y MPL, es 70/30(%) y por lo que se la eligió como muestra óptima. Obteniendo el mayor valor a la compresión diametral de 1,95MPa.

Tabla 50.Compresión diametral y contracción para la mezcla: MCB y MPL.

Mezcla	Porcentaje (%)	Wsia (g)	Dsi (cm)	Esi (cm)	Ws (g)	Ds (cm)	Es (cm)	Wh (g)	Dh (cm)	Eh (cm)	σ_{cd} (Mpa)	f_{opt} (Mpa/kg)	C _{ss} (%)	CT (%)
MCB/MPL	50/50	154,89	7,06	1,78	123,91	6,60	1,85	116,24	6,48	1,78	1,69	14,52	7,60	16,47
	60/40	148,74	7,01	1,94	118,40	6,75	1,92	111,17	6,62	1,83	1,50	13,51	8,18	16,45
	70/30	155,23	7,09	1,87	125,90	6,81	1,94	118,36	6,63	1,85	1,95	16,45	9,87	13,97

La Figura 119, nos permite observar el mayor valor para f_{opt} , de la combinación de MCB y MPL, lo obtiene la mezcla 70/30(%), con un valor de 16,45MPa/kg.

Figura 119. f_{opt} de la mezcla de MCB y MPL

La Tabla 51, nos permite observar, que la menor contracción después C_{ss} y CT, de la composición de la MPL y MAF, en porcentajes, no presenta ninguna mezcla óptima, ya que su valor de resistencia a la compresión diametral es bajo en comparación a las otras composiciones 0,09MPa.

Tabla 51. Compresión diametral y contracción para la mezcla: MPL y MAF

Mezcla	Porcentaje (%)	Wsia (g)	Dsi (cm)	Esi (cm)	Ws (g)	Ds (cm)	Es (cm)	Wh (g)	Dh (cm)	Eh (cm)	σ_{cd} (Mpa)	f_{opt} (Mpa/kg)	C _{ss} (%)	CT (%)
MPL/MAF	90/10	150,85	7,08	2,08	119,46	6,99	2,02	111,64	6,84	1,98	0,09	0,79	5,82	11,21
	80/20	153,92	7,01	2,04	122,31	6,93	2,06	115,02	6,89	2,03	0,03	0,27	2,56	3,93
	70/30	149,08	6,97	1,99	119,37	6,91	1,98	112,69	6,85	1,96	0,04	0,34	2,61	5,15

La Figura 120, nos muestra que el mejor f_{opt} , para la combinación de MPL y MAF, se da en proporción de 90/10 (%), debiendo notar que los valores son menores, en comparación con los resultados de los factores de optimización de las otras combinaciones, 0,79MPa/kg.

Figura 120. f_{opt} de la mezcla de MPL y MAF

La tabla 52, nos permite observar que la menor contracción después C_{ss} y CT de la combinación MCB y MCH, resulta del porcentaje de 70/30 (%), aceptándola como mezcla óptima, obtenido un valor mayor a la CD de 2,47MPa.

Tabla 52. Compresión diametral y contracción para la mezcla: MCB y MCH.

Mezcla	Porcentaje (%)	W _{sia} (g)	D _{si} (cm)	E _{si} (cm)	W _s (g)	D _s (cm)	E _s (cm)	W _h (g)	D _h (cm)	E _h (cm)	σ_{cd} (MPa)	f_{opt} (MPa/kg)	C _{ss} (%)	CT (%)
MCB/MCH	70/30	149,58	7,05	1,91	118,93	6,97	1,90	110,48	6,75	1,91	2,47	22,37	5,74	8,19
	60/40	152,56	7,14	2,11	124,61	6,96	2,00	116,05	6,78	1,93	2,40	20,65	8,45	18,24
	50/50	151,97	7,02	2,35	119,72	6,91	2,19	110,75	6,82	2,12	1,80	16,24	5,68	15,56

La Figura 121, nos permite observar el mayor valor para el f_{opt} , de la combinación de MCB y MCH, con un valor de 22,37MPa/kg, siendo el mejor resultado de los análisis.

Figura 121. f_{opt} de la mezcla MCB y MCH

La Tabla 53, nos permite observar que la menor contracción después de C_{ss} y CT, de la combinación de MCH y MAF, se da en el porcentaje de 90/10 (%), determinándose la como mezcla óptima; obtenido un valor a la CD de 1,88MPa.

Tabla 53. Compresión diametral y contracción para la mezcla: MCH y MAF

Mezcla	Porcentaje (%)	Wsia (g)	Dsi (cm)	Esi (cm)	Ws (g)	Ds (cm)	Es (cm)	Wh (g)	Dh (cm)	Eh (cm)	σ_{cd} (MPa)	f_{opt} (MPa/kg)	C_{ss} (%)	CT (%)
MCH/MAF	70/30	131,60	7,06	1,80	99,85	6,64	1,92	91,82	6,55	1,86	0,56	6,05	5,71	11,36
	80/20	152,70	7,04	1,94	116,13	6,64	2,02	107,62	6,56	1,97	0,94	8,77	4,80	12,36
	90/10	150,19	7,02	1,91	117,33	6,68	1,96	109,75	6,64	1,97	1,88	17,17	0,61	7,84

La Figura 122, nos permite observar que el mayor valor para f_{opt} , de la combinación MCH y MAF, lo obtiene la mezcla, en porcentaje de 90/10, con un valor de 17,17MPa/kg.

Figura 122. f_{opt} de la mezcla de MCH y MAF

De los resultados logrados, se seleccionaron 6 combinaciones, Tabla 54, con el objetivo de fabricar ladrillos, procediendo luego a caracterizarlas convencionalmente (compresión simple, absorción, etc.), y determinar sus características en cuanto a calidad y durabilidad y de esta forma establecer su idoneidad.

Tabla 54. Mezclas con los mejores f_{opt} ; resultados del análisis a la σ_{cd}

ID =	M 1	M 2	%	f_{opt} MPa/kg
1	Mina Ceibopamba	Mina Cangahua	80/20	47,00
2	Mina Ceibopamba	Mina Cangahua	60/40	44,79
3	Mina Ceibopamba	Mina de Arena Fina	90/10	20,70
4	Mina Ceibopamba	Mina potencial Palanda	70/30	16,45
5	Mina Ceibopamba	Mina potencial Chinguilamaca	70/30	22,37
6	Mina potencial Chinguilamaca	Mina de Arena Fina	90/10	17,17

c) Análisis de resistencia a la compresión diametral (σ_{cd}) y temperatura

A los diferentes estudios realizados, se debe agregar otro análisis como soporte en la búsqueda de la mezcla óptima, el factor temperatura, es de suma importancia, en la fabricación de ladrillo de calidad; este nos permitirá garantizar la durabilidad, una alta resistencia a la compresión y flexión y un bajo nivel de absorción de agua, etc. estableciendo a través de este estudio el grado de cocción óptimo en la quema del ladrillo.

El estudio se realizó, elaborando discos de ensayo (muestras), los cuales fueron sometidos a diferentes temperaturas: 500°C, 700°C y 950°C.

La variación de la resistencia a la σ_{cd} en función del incremento de la temperatura, el valor más alto se registró a 950°C para la combinación MCB/MCA, porcentaje 80/20, con un valor de 4,72MPa y el valor más bajo a 500°C, para la mezcla de MCB/MPL, proporción 70/30, con un valor de 0,3MPa. Observándose un aumento sustancial de la resistencia a medida que se temperatura sube, llegando a valores máximos de resistencia, con una temperatura de cocción de 950°C, como podemos apreciar en las Figuras 123 y 124.

Figura 123. Variación de la resistencia a la CD en f de la T°C. Tres mezclas porcentuales, ID =1, 2, 3.

Figura 124. Variación de la resistencia a la CD en f de la T°C. Tres mezclas porcentuales, ID =4, 5, 6.

5.1.3.2. Caracterización del ladrillo artesanal mejorado.

a) Análisis de caracterización de mezclas óptimas

En este estudio se observaron los siguientes análisis: absorción, densidad aparente, porosidad, capilaridad, variación dimensional y compresión simple, para las mezclas óptimas.

La norma INEN 297, 1978, establece como mínimo un 25%, de absorción, para ladrillos elaborados a mano tipo C. Las mezclas óptimas, ID: 1, 2, 3; cumplen con la norma, en tanto que las mezclas con ID: 4, 5, 6; poseen valores que superan ésta, el máximo valor lo registra la combinación MCB/MAF, (90/10%) con 27,9%, cuyo valor supera el límite, Tabla 54.

Los resultados para la ρ (densidad) oscilan entre 1,50 a 1,70gr/cm³, la norma establece un mínimo de 1,5gr/cm³. La única combinación que cumple esta condición es la relación MCB/MCH (ID: 2), el resto sobrepasa el límite.

La menor porosidad la registra la combinación MCB/MCA, con 21,27%, manteniendo el mejor valor de resistencia a la compresión simple de 20,39MPa. Lo contrario, el mayor valor de porosidad se da en la combinación MCB/MAF con 28,34%, produciendo ladrillos con resistencia a la compresión simple de 8,15MPa; debemos anotar que la porosidad es una propiedad inversamente proporcional a la resistencia.

La variación dimensional más baja la registra la combinación MCA/MAF, sin embargo, las combinaciones ID: 1, 2, 4, 5 y 6 (Tabla 55), se ubican por debajo de los requisitos en ladrillos artesanales, por lo tanto, no presentan novedad alguna; la combinación ID: 3 (MCB/MCA), cuyo valor es 8,6mm, supera ligeramente el rango aceptable, que es de 8mm.

Tabla 55. Resultados: caracterización convencional en mezclas óptimas

ID	Mezcla	Porcentaje de mezcla %	Absorción %	Densidad $\rho = \text{gr/cm}^3$	Porosidad Abierta (%)	Capilaridad $\text{g/cm}^2 \times \text{min } \frac{1}{2}$	Variación dimensional mm	Compresión simple MPa	Peso kg
1	MCB/MCA	80/20	21,27	1,50	21,27	0,39	7,61	20,39	4,66
2	MCB/MCH	70/30	23,83	1,41	23,83	0,03	7,70	12,18	4,49
3	MCB/MCA	60/40	22,56	1,62	22,56	0,22	8,60	16,52	4,61
4	MCB/MPL	70/30	25,43	1,80	25,43	0,28	7,31	11,83	4,69
5	MCA/MAF	90/10	25,66	1,59	25,66	0,30	5,90	9,79	4,72
6	MCH/MAF	90/10	27,89	1,51	28,34	0,33	6,20	8,15	4,32

La clasificación del ladrillo bajo la norma ecuatoriana, se da en base a la resistencia que esté presenta a la compresión simple, la Figura 125, muestra los resultados del análisis, observándose que las seis combinaciones cumplen los requisitos.

Figura 125. Resultados de la prueba a la compresión simple en ladrillos (mezclas óptimas)

5.1.3.3. Caracterización de técnicas analíticas

DRX de mezcla óptima de ladrillos artesanales mejorados

En la Figura 126, podemos apreciar los minerales presentes en la mezcla elegida como óptima, combinación MCB/MCA, de Malacatos, el mineral con mayor presencia es el cuarzo, seguido de la albita y en menor presencia las hematitas.

Figura 126. Difractograma de rayos X. Mezcla óptima, sector Malacatos

Análisis termo gravimétrico

Este análisis nos permitió observar las curvas de variación del peso, en función de la temperatura (TGA, color verde); la primera derivada (DSC, azul) representa la velocidad en ganancia o pérdida de peso, la segunda derivada es el flujo de calor (2D – DSC, café).

La Figura 127, nos permite observar el análisis térmico a la muestra MCB. La curva TGA muestra el primer proceso endotérmico, por el calentamiento inicial, hasta los 120°C, en esta fase la muestra pierde un 2,202% de su masa. En el caso de la curva DSC, observamos un pico a los 75°C, lo cual revela una rápida pérdida de masa.

El cuarzo al ser un polimorfo, se presenta en diferentes estructuras cristalinas, como alfa cuarzo o beta cuarzo, sin embargo es un mineral que no afecta térmicamente a la matriz arcillosa, al igual que la hematita y en ninguno de los casos se manifiesta un progreso con el aumento de temperatura (Linares González, Huertas, & Capel Martínez, 1983); en la curva TGA, entre 120°C a 170°C, estos disminuyen 0,297 %, debido a la pérdida de agua higroscópica

de la illita, el efecto de esta, en este rango es mayor en comparación con el del caolín, criterio ratificado por Arsenović, et al, 2014; entre los 160°C a 310°C, existe una pérdida de masa del 0,435% (TGA), la cual se puede producir a una mayor velocidad a una temperatura de 265°C (curva DSC).

Usualmente la oxidación de la materia orgánica se consigue a temperaturas que fluctúan entre los 200°C a 500°C y por lo tanto se produce un desgaste de energía debido al deterioro de materia orgánica, relacionada con las partículas de arcilla (Arsenović et al., 2014). Entre 310°C y 610°C se presenta la mayor pérdida de masa, 2,245% y se presenta un pico en la curva DSC a 490°C, mostrando la rapidez en la disminución de la masa.

La curva D2 – DSC a 500°C presenta la deshidroxilación de la caolinita, en este punto el mineral pierde el agua estructural para transformarse en meta caolinita (Linares González et al., 1983). La deshidroxilación de la illita se presenta a 573,43°C (curva D2 – DSC), lo cual no afecta su estructura cristalina y se manifiestan en illitas alumínico – férricas. También se puede apreciar una pérdida de 0,647% en ATG entre 610°C a 725°C; por último se produce una pérdida de 1,083% de masa, entre los 725°C y 980°C, esto debido a la metacaolinita, es su evolución a la caolinita; al ser elevada a los 950°C la sílice se transforma en cristobalita y se forma una estructura de espinela. La MT (masa total) perdida es 6,91% (entre los 0°C hasta 1000°C).

Figura 127. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café), M. Ceibopamba

La Figura 128, nos permite observar el análisis térmico de la muestra Cangahua, observando sucesos térmicos análogos a los expuestos en la muestra Ceibopamba. Sin embargo, en oposición de los termogramas de la M. Ceibopamba, la M. Cangahua, no presenta en sus procesos el mineral illita, razón por la cual el pico endotérmico que se produce a 572,12°C, está relacionado con el cambio del alfa cuarzo a beta cuarzo.

Asimismo, podemos establecer que existe una pérdida de masa total, de 6,88%, valor inferior al de la M. Ceibopamba.

Figura 128. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café), M. Cangahua

La Figura 129, M. Chinguilamaca, análisis térmico, podemos observar sucesos análogos a de la M. Ceibopamba. Sin embargo, al inicio del proceso de calentamiento se produce una pérdida de 5,509%, debido a la disminución de agua higroscópica y los efectos del cuarzo sobre la contracción por secado, este valor se muestra más alto que en los termogramas anteriores.

En el rango entre 310°C hasta 600 °C, se produce la segunda pérdida de masa importante 3,172 %. En correspondencia con la M. Ceibopamba y M. Cangahua, el cambio de la meta caolinita se da en el pico de 500°C, y, el pico en la curva DSC a 625°C, mostrando la deshidroxilación del mineral illita.

La pérdida de masa total es de 12,44 %, desde 0°C hasta 1000°C, valor que se encuentra por encima de la M. Ceibopamba y la M. Cangahua.

Figura 129. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Chinguilamaca

La Figura 130, nos permite observar el análisis térmico de la M. Palanda; denotando eventos térmicos parecidos a los mostrados por la M. Ceibopamba, mostrando únicamente la curva para ATG y D2 – DSC. Inicialmente en el proceso de calentamiento de la muestra existe una pérdida de 1,611%, posiblemente por pérdida de agua higroscópica, este valor es mucho más bajo al mostrado por los termogramas anteriores, lo cual nos indica estabilidad en el proceso de secado; entre el rango de 400°C hasta 700°C, se produce otra pérdida importante de masa de 5,328%. Al igual que con las M. Ceibopamba y M. Cangahua la transformación en meta caolinita se produce en el pico a 500°C; y, el pico en la curva D2 – DSC, se da a 573,39°C, mostrando la deshidroxilación del mineral illita en alumínica – férrica.

La pérdida de masa total es de 8,81%, desde 0°C hasta 1000°C, valor que se encuentra por arriba de la M. Ceibopamba y la M. Cangahua.

Figura 130. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Palanda

Los eventos térmicos de M. Palanda son parecidos a los de la M. Ceibopamba; inicialmente en el proceso de calentamiento de la muestra, hasta los 100°C, se produce una pérdida de 1,611 %, este valor es mucho más bajo que los mostrados por los termogramas anteriores; indicando una estabilidad en el secado.

Durante todo el proceso se establece que TGA mantiene valores completamente pequeños en balance con las otras muestras; entre 375°C a 760°C se produce la mayor pérdida de masa 0,6487%; los procesos de deshidroxilación de la illita se dan a 577,23°C y del cuarzo a 500°C, manteniéndose en comparación con el resto de muestras.

La pérdida total de masa es de 1,7 %, desde 0°C hasta 1000°C, valor que se encuentra muy por debajo de todas las muestras (Figura 131).

Figura 131. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Arena Fina

Análisis de microscopía SEM

El análisis de microscopía SEM, realizado a la mezcla óptima relación 80/20, producto de la combinación de las arcillas provenientes MCB/MCA, se inicia con un nivel de detalle de 500 aumentos, Figura 132 (a), a nivel de 2000 aumentos se aprecia en el análisis G1 y G2 illita; en el análisis G3, Figura 132 (b), se muestra feldespatos potásico (G3) y finalmente en la Figura 132 (c), a 2000 aumentos se observa hematitas con la predominancia de óxidos férricos (G4).

Figura 132. Análisis de la combinación MCB/MCA (80/20%), ladrillo mejorado, sector Malacatos, microscopía SEM

5.1.4. Zona Santa Elena

5.1.4.1. Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo con incorporación de materia prima alternativa

El procedimiento para la preparación y elaboración de ladrillo con incorporación de tierras diatomeas del sector de Santa Elena y arcilla del sector Ceibopamba, se realiza de forma similar al indicado en el apartado 5.1.2.1.

a) Diseño estadístico

En la presente investigación se dispuso un arreglo factorial de un solo factor, con 5 niveles porcentuales, de manera que la suma de los niveles de 100% Figura 133 y Tabla 56.

Figura 133. Descripción del número de mezclas a realizar

Tabla 56. Nivel porcentual de la mezcla arcilla y diatomita

MEZCLA	MCB / MD2
	ARCILLA / DIATOMITA
	(%)
1	70 / 30
2	60 / 40
3	50 / 50
4	60 / 40
5	70 / 30

ANEXO IV. (Arreglos de combinaciones y cálculos, Santa Elena).

5.1.4.2. Caracterización del ladrillo mejorado con incorporación de materia prima alternativa, a base de tierras diatomeas

a) Análisis de caracterización de mezclas óptimas

Para el análisis de caracterización de las mezclas óptimas se consideró el porcentaje de mezcla (arcilla/diatomita) y temperatura de cocción. La compresión diametral (probetas cilíndricas), diseñadas para las 5 mezclas: MCB (Arcilla) y MD2, MD3 (Diatomita), después de la cocción a 950°C, se indican en las Tablas 57 y 58, el resultado presentado en dichas tablas corresponde al promedio de las tres probetas elaboradas por mezcla.

La Tabla 56, nos permite observar, que al reducir la proporción de arcilla con respecto a la diatomea (10%), el ladrillo pierde resistencia, demostrándonos que la arcilla es el componente que agrega esta característica a la mezcla 2,83MPa, ya que al aumentar el porcentaje de diatomita, disminuye la resistencia del material, este factor incide también en el peso de la probeta, a mayor cantidad de diatomita menor peso de la probeta, 81,50gr; de igual forma la densidad se afecta con un resultado de 1,27g/cm³, a mayor porcentaje de diatomita,(Saldarriaga, 2009).

Tabla 57. Resistencia a la σ_{cd} , mezclas MCB/MD2 (probetas)

3 PROBETAS (MEZCLA)		PROBETAS CON ARCILLA/DIATOMEA, LUEGO DE COCCIÓN (950 °C)							
MEZCLA	[MCB/MD2]	ϕ	e	Peso	ρ	Carga	σ_{cd}	f_{opt}	Contracción
N°	%	(cm)	(cm)	(g)	(g/cm ³)	(kgf)	(MPa)	(MPa/kg)	%
1	70/30	6,72	1,99	106,85	1,51	610,60	2,83	26,54	4,62
2	60/40	6,72	1,90	93,93	1,40	437,04	2,10	21,95	4,65
3	50/50	6,71	1,97	93,45	1,34	305,84	1,44	15,47	4,77
4	40/60	6,71	1,93	87,65	1,28	201,34	0,96	10,83	4,82
5	30/70	6,68	1,83	81,50	1,27	124,47	0,66	8,31	5,19

Fuente: Análisis de laboratorio

La Tabla 58, nos permite observar los resultados para la mezcla MCB/MD3, el mayor valor para f_{opt} , de la combinación MCB y MD3, lo obtiene la mezcla en porcentaje de 70/30, con un valor de 37,30MPa/kg.

Tabla 58. Resistencia a la σ_{cd} , mezclas MCB/MD3 (probetas)

3 PROBETAS POR MEZCLA		PROBETAS CON ARCILLA/DIATOMEA DESPUÉS DE LA COCCIÓN A 950 °C							
MEZCLA	[MCB/MD3]	ϕ	e	Peso	ρ	Carga	σ_{cd}	f_{opt}	Contracción
N°	%	(cm)	(cm)	(g)	(g/cm ³)	(kgf)	(MPa)	(MPa/kg)	%
1	70/30	6,49	1,86	99,33	1,62	712,02	3,71	37,30	7,99
2	60/40	6,47	1,92	97,85	1,55	639,09	3,19	32,33	8,24
3	50/50	6,46	1,91	94,97	1,52	527,84	2,67	27,92	8,43
4	40/60	6,40	1,72	80,80	1,46	330,48	1,87	23,26	9,23
5	30/70	6,36	1,96	88,62	1,42	223,30	1,13	12,93	9,79

Además, la Tabla 57, indica que la menor contracción después de C_{ss} y CT, de la combinación de MCB y MD2, se da en el porcentaje de 70/30, determinándose como mezcla óptima; obteniendo un valor a la σ_{cd} de 2,83MPa.

La Figura 134, nos permite observar que el mayor valor de f_{opt} , de la combinación MCB y MD2, lo obtiene la mezcla, en porcentaje de 70/30, con un valor de 26,54MPa/kg⁸.

Figura 134. f_{opt} de la mezcla de MCB/MD2

⁸La optimización tradicional para minimizar el peso del ladrillo, depende de las proporciones de la mezcla y del material empleado (Del Coz Díaz et al., 2011)

En el caso de la variación a la resistencia, a medida que se incrementa la diatomita, esta disminuye, por lo tanto, la resistencia por tracción indirecta de la probeta disminuye de la misma forma, factor de importancia en la selección de la mezcla óptima (Figura 135).

Figura 135. Resistencia a la tracción Indirecta de la mezcla de MCB/MD2

Del análisis de las combinaciones realizadas, la resistencia a la rotura que presentan las probetas y su densidad aparente, se debe seleccionar la mezcla óptima, con base al mayor factor de optimización resultante, además de la temperatura de cocción.

La mezcla 70/30, presenta el mayor factor de optimización, sin embargo, el peso alcanzado por la probeta la hace no elegible, por lo que se eligió como mezcla óptima (en ambos ensayos) la que presenta los niveles 60/40, debido a las garantías físicas y la pureza que ofrecen las tierras diatomitas de la muestra, cabe indicar que no podemos trabajar con niveles más elevados, ya que estos afectarían las propiedades mecánicas de los ladrillos y aumentarían la fragilidad de los mismos.

b) Análisis de resistencia a la compresión diametral (σ_{cd}) y temperatura

Los ensayos descritos en la Tabla 58, nos permite apreciar el efecto que tiene la temperatura (550°C, 750°C y 950°C) en la resistencia a la tracción indirecta, a medida que la temperatura se eleva, la resistencia del material (probeta) aumenta, por lo tanto a 950°C, se logra el mayor factor de optimización, con 26,57MPa/kg, y una resistencia a la rotura de 2,83MPa (70/30); para el caso de la muestra seleccionada (60/40), el factor de optimización a 500°C es de 6,59MPa/kg, pasando a 10,15MPa/kg a 750°C y llegando a 21,95MPa/kg a 950°C, con un incremento total de 15,36MPa/kg, de mayor resistencia; así mismo, la resistencia a la rotura, es mayor, existiendo un incremento de 1,37MPa, desde los 500°C, hasta los 900°C, estableciendo las ventajas de la cocción a temperatura adecuada sobre las piezas cerámicas; cabe anotar que a temperaturas menores la resistencia disminuye notablemente, afectando directamente la calidad del producto cerámico; por lo tanto la relación temperatura – resistencia, es directamente proporcional a la calidad del producto, esto se puede observar de mejor manera en la Figura 136 y Tabla 59⁹.

Los resultados de los análisis se describen en la Tabla 59, para las 5 mezclas MCB/MD2.

Tabla 59. Incidencia de la temperatura en la resistencia a tracción indirecta (Probetas), mezcla MCB/MD2

MEZCLA	Temperatura	550 °C		750 °C		950 °C	
	MCB/MD2	σ_{cd}	f_{opt}	σ_{cd}	f_{opt}	σ_{cd}	f_{opt}
Nº	%	(MPa)	(MPa/kg)	(MPa)	(MPa/kg)	(MPa)	(MPa/kg)
1	70/30	0,96	8,51	1,37	13,45	2,83	26,54
2	60/40	0,73	6,59	1,11	10,15	2,10	21,95
3	50/50	0,53	5,80	0,81	8,26	1,44	15,47
4	40/60	0,41	4,58	0,60	5,97	0,96	10,83
5	30/70	0,23	2,78	0,33	3,93	0,66	8,31

⁹Bajo norma(INEN 297, 1978)

En la Figura 136, se puede evidenciar que a partir de los 750°C la resistencia aumenta notablemente hasta los 950°C este dato es importante para la cocción del ladrillo para cumplir con la resistencia mecánica conforme lo establece la norma.

Figura 136. Efecto de la T°C a la tracción indirecta, MCB/MD2

Tabla 60.Efecto de la temperatura en la resistencia a tracción indirecta, mezcla óptima

MUESTRA DE DIATOMITA	MEZCLA		TEMPERATURA	RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA	FACTOR DE OPTIMIZACIÓN
Identificación	Arcilla/Diatomita	%	°C	MPa	MPa/kg
Mina Santa Elena (MD2)	MCB/MD2	60/40	550	0,73	6,59
			750	1,11	10,15
			950	2,10	21,95

c) Elaboración del ladrillo con la mezcla óptima

Para la fabricación del ladrillo adicionando tierras diatomitas, se eligió como mezcla óptima, a la obtenida de la combinación 60/40, MCB/MD2 (arcilla/diatomita), explicándose anteriormente el fundamento; los resultados obtenidos en principio no fueron favorables al proceso para lograr un ladrillo de calidad, ya que los mismos sufrían fracturas en el proceso de cocción, observar Figura 137; pese a realizar el ensayo bajo el mismo esquema que para la obtención de la mezcla óptima, tanto en el secado, como para la cocción, problema que se lo identificó con el volumen de la pieza.

Figura 137. Ladrillos fisurados durante el proceso de cocción

El problema además se agrava debido a que en el proceso de secado el agua interna no se escurre con facilidad por los poros del ladrillo, de acuerdo a Cladera, Etxeberria, Schiess, & Perez, 2008 este fenómeno no produce alteraciones químicas en la composición del mismo debido a que la baja temperatura elimina de forma gradual el agua intersticial y parte de la plasticidad hasta reducir a un 5% con fuerte retracción que puede producir fisuras en la pieza, para solucionar este inconveniente el proceso de secado debe ser gradual. Otro de los factores que puede alterar el resultado final es la característica química y mineralógica de la diatomita, estas presentan gran capacidad de absorción y retención de agua, lo que no permite la evaporación rápida, factor que se le atribuye a la estructura interna de los fósiles microscópicos que la componen.

Según Elías, 2001 la misma composición de las diatomitas a nivel de estructura interna hace que la distribución granulométrica sea inadecuada, generando un mínimo de contacto entre las partículas durante la cocción, generando problemas a la hora del secado, al momento de la evaporación del agua, se generan espacios que terminan en fisuras.

La solución más fácil al problema sería lograr un secado óptimo, el cual debe ser lento, lo que generaría un coste por tiempo, espacio y mano de obra, lo que significa un problema económico; la solución al inconveniente se da mediante la incorporación de un corrector orgánico a la mezcla (aserrín) en un porcentaje al 2%, a la mezcla seleccionada, sin descuidar las propiedades mecánicas del producto final, procediendo a elaborar el nuevo ladrillo (Tabla 61).

Tabla 61. Mezcla óptima en ladrillos con diatomita

MUESTRA DE DIATOMITA	MEZCLA		DOSIFICACIÓN PARA 5 Kg		AGUA
	Identificación	Descripción	%	(kg)	Litros
Mina Santa Elena (MD2)	MCB/MD2 (60/40) +Aserrín	Arcilla (MCB)	60	3,00	2,30
		Diatomita (MD2)	40	2,00	2,30
		Aserrín	2	0,10	2,30

El resultado obtenido fue favorable a la estructura del ladrillo, como se aprecia en la Figura 138, los ladrillos se presentan sólidos y su estructura es robusta, sin fisuras ni quebraduras, observándose un muy buen acabado en los mismos, sin haber descuidado las características físicas y mecánicas de un ladrillo apto para construcciones.

Figura 138. Ladrillo elaborado con mezcla MCB/MD2 (diatomita Santa Elena)

El ladrillo obtenido de la mina Santa Elena, es de color naranja claro, clasificado según la difracción MUNSELL, en escala 10YR 8/4, Figura 138; su peso promedio es de 3,59kg; su densidad aparente es de 1,20g/cm³. Su porosidad es limitada, con poros muy pequeños misma que influye directamente en la resistencia del ladrillo.

Bajo norma (INEN 297, 1978), a través del ensayo de compresión simple, la resistencia de los ladrillos luego de la cocción, en el proceso que duró 11 horas, a 950°C (estabilización de 2,5 horas) es aceptable, para las cinco muestras elaboradas el promedio es de 9,34MPa, siendo clasificado como un ladrillo **MACIZO TIPO C**. En la Figura 139 se puede ver los valores de la resistencia obtenidos de los ladrillos elaborados.

MD2	(MPa)
1	8,33
2	10,29
3	8,54
4	10,40
5	9,12
PROMEDIO	9,34

Figura 139. Resistencia a la compresión del ladrillo con diatomita MD2

Los ladrillos producidos con diatomita de Santa Elena mantienen un promedio de resistencia a la compresión simple de 9,34MPa, factor que se le atribuye a la incorporación de corrector orgánico al 2% (aserrín), reduciendo la resistencia del ladrillo, debido a que se genera mayor porosidad, por lo que no se recomienda una adición mayor, ya que afectaríamos la resistencia mecánica del producto final.

El modo de falla en los ladrillos guarda similitud con el de los ladrillos convencionales, al momento de la aplicación de la carga, este empieza a fallar por aplastamiento, factor que se presentó en todas las muestras, las fisuras se hicieron notorias a nivel de caras produciendo resquebrajamiento, debido a la disgregación de las partículas, hasta la rotura total.

La porosidad en los ladrillos es evidente, esto se refleja en el peso del ladrillo, a mayor presencia de estos, este se torna más ligero; la presencia de porosidad en el ladrillo, elaborado con diatomeas, se debe a dos factores principalmente, a la propia estructura de los elementos que conforman la tierra diatomea (caparazones de las diatomeas) y al corrector orgánico agregado, al momento de hacer la mezcla, el cual al fundirse a altas temperaturas generan espacios.

La densidad, absorción, porosidad y capilaridad se resumen en la Tabla 62.

Analizando los resultados, el peso del ladrillo producido con la composición MCB/MD2, (5 muestras) tienen un promedio de peso de 3,60kg, mucho más liviano que los ladrillos tradicionales y mejorados tradicionales de los sectores de Catamayo y Malacatos, con diferencias de entre 25% a 37% de peso aproximadamente.

La Tabla 62, nos permite apreciar el porcentaje de absorción del ladrillo, el cual es alto en relación a lo establecido por la norma (25% - INEN 297, 1978), con un promedio de 36,73%, factor que le atribuimos a la estructura misma de la diatomea, que al momento de fundirse en la cocción genera vacíos o poros.

La porosidad muestra un valor promedio de 43,71%, (no existe norma para este análisis), pero el nivel de la misma podría establecer una consistencia frágil para el ladrillo, esta característica le atribuimos a los espacios dejados por los esqueletos calcáreos de las conchas presentes en la diatomea, que al fundirse en la cocción generan poros.

Tabla 62.Resultados de la caracterización del ladrillo mejorado

MEZCLA		LADRILLO	PESO SECO	DENSIDAD APARENTE	DENSIDAD REAL	ABSORCIÓN	POROSIDAD	CAPILARIDAD
ID	%	N°	kg	g/cm³	g/cm³	%	%	g/cm².min ^{0,5}
MCB/MD2+2%	60/40+2	I MD2	3,83	1,28	2,64	30,65	39,28	0,65
		II MD2	3,39	1,14	2,64	40,03	45,50	
		III MD2	3,38	1,12	2,64	40,07	45,52	
		IV MD2	3,80	1,26	2,64	34,21	42,96	
		V MD2	3,58	1,17	2,64	38,70	45,29	
MCB/MD2 + Aserrín 2%			3,596	1,19	2,64	36,73	43,71	0,65

La variación dimensional, Tabla 63, muestra un promedio de 7,40mm, (INEN 297, 1978, establece 8mm), por lo tanto, el ladrillo cumple con la norma.

Tabla 63.Promedio de Variación dimensional ladrillos MCB/MD2 + 2% aserrín

Ladrillo		Largo	Ancho	Alto	Variación dimensional
MEZCLA	%	cm	cm	cm	mm
MCB/MD2+As	60/40+2	26,99	13,18	8,61	7,40

5.1.4.3. Caracterización de técnicas analíticas

DRX de mezcla óptima

En la Figura. 140, indica los XRD de la muestra luego del tratamiento térmico a tres diferentes temperaturas, donde el sílice amorfa se convierte progresivamente en cristobalita entre temperaturas de 750°C y 950°C Alyosef et al., 2014, el cuarzo permanece inalterado hasta 950°C, en el caso de la calcita pasa a formar dióxido de carbono debido a que se descompone entre temperaturas de 700°C – 900°C, los otros minerales determinados como oligoclasa y moscovita se deben a la transformación de los minerales arcillosos de montmorillonita, caolinita y calcita.

Figura 140. Difractograma de rayos X. Mezcla óptima, Santa Elena

Análisis térmogravimétrico

El ensayo termo gravimétrico muestra MD2, Figura 141, se pueden observar 4 pérdidas de masa y diferentes picos de transformación; la primera pérdida de masa de 5,04%, entre la temperatura ambiente y 133,22°C; la segunda pérdida 0,96%, se registra entre 132,08°C a 206,95°C; la tercera pérdida 3,08%, se da entre 206,95°C y 558,6°C; y, la última pérdida de 15,63%, se da entre 785,47°C y 1000°C; la pérdida total alcanza 24,72%. La pérdida de la MCB es de 6,89%. Los resultados podrían deberse a la evaporación del agua libre a baja temperatura, la expulsión de la materia orgánica en los espacios porosos de la estructura de los esqueletos de la diatomita y de la deshidratación de los minerales arcillosos, (Al-Wakeel, 2009).

Figura 141. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), MD2 (Santa Elena)

DSC – TGA, en simultáneo muestran (diatomita, MD2), cuando la temperatura se aumenta, se generan varios picos, los cuales se pueden apreciar en la Figura 141, a partir del espectro DSC se evidencia 3 picos endotérmicos a 91.24°C, 782.06°C y 1116°C y un pico exotérmico que se forma a partir de 1200°C.

El pico endotérmico centrado a 91.24°C, según Ibrahim & Selim, 2012, se atribuye a la liberación de agua absorbida por la diatomita en nivel superficial y los poros, otro pico endotérmico se presentó por la eliminación de materia orgánica a 558°C .

A 785,45°C, se observa un pico endotérmico amplio, asumiendo que produjo por la degradación de la calcita, y la eliminación de algunos compuestos de alto contenido molecular, generando una pérdida de peso de 15,49%.

Entre 1000°C y 1200°C, observamos una pérdida pequeña de peso, atribuyéndole a la deshidratación completa de la estructura de la diatomita y la formación de un nuevo material de silicato.

A los 1116°C, se aprecia un pico endotérmico, producido por cristalización mineral, el cual presenta bajo punto de fusión, empezando la formación de un pico exotérmico, de dirección al eje vertical, factor suficiente para no quemar a temperaturas mayores a 1000°C.

La muestra MD3, presenta un mayor grado de picos endotérmicos tal como se aprecia en la Figura 142; la curva de TGA, demuestra que desde 25°C (ambiente), hasta 195,60°C se pierde en peso 6,22%; a partir de la finalización del primer evento inicia otra pérdida de peso de 0,79%, que finaliza a los 366,89°C; seguidamente y a partir de este punto, a una temperatura de 559,73°C, se pierde 3,25%, de peso, la última fase termina a 1000°C, perdiendo un 7,63% de peso, por la eliminación de algunos compuestos de alto contenido molecular .

Figura 142. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), MD3 (Santa Elena)

Las dos primeras pérdidas están ligadas se deben a la pérdida de agentes volátiles y al contenido de agua; la tercera pérdida es por el desdoblamiento de algunos compuestos minerales como el cuarzo y la calcita (entre otros); la última pérdida corresponde a la eliminación de algunos compuestos que contienen alto contenido molecular.

De los resultados simultáneo DSC – TGA, para MD3, se establece que cuando la temperatura se incrementa, se producen varios picos endotérmicos en la Figura 141, podemos apreciar 4 picos, a 111,66°C, 504,15°C y a 763,91°C. El pico endotérmico centrado a 111,66°C, se causa por pérdida de agua, absorbida en la diatomita (Chaisena & Rangsiwatananon, 2004); el segundo pico endotérmico centrado a 504,15°C, es propio de la degradación de compuestos minerales, como el cuarzo y la eliminación de materia orgánica (Meradi et al., 2015).

A 763,91°C, se aprecia un pico endotérmico extenso, asumiendo que se debe a la degradación del mineral de calcita y la eliminación de algunos compuestos de alto contenido molecular, generando una pérdida de peso de 15,49%.

Entre 1000°C y 1200°C, se aprecia una pérdida de peso mínima, atribuida a la deshidratación completa de la estructura de diatomita y la formación de un nuevo material de silicato.

A 1137,11°C, existe un pico endotérmico, producto de la cristalización, llegando prácticamente a la fusión, a partir del cual inicia la formación del pico exotérmico, en dirección al eje vertical, recomendando no quemar a más de 1000°C (Ibrahim & Selim, 2012).

La reacción endotérmica de la caolinita se da 550°C – 600°C; así como, la brusca reacción exotérmica intensa a 950°C – 1000°C. El pico endotérmico acompaña la deshidratación del mineral y la reacción exotérmica se asocia a la formación de $7 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Grim & Rowland, 1942).

Análisis de microscopía SEM

La combinación de las minas 60/40 + 2% de aserrín (Ceibopamba, MCB y Santa Elena, MD2), es determinada como mezcla óptima. La Figura 143 a) indica la materia prima de diatomea con forma ovalada y estructura porosa además de presencia de cuarzo D1, en la Fig. 143 b) se observa illita D2, mientras en la Fig. 143 c) se muestra el proceso de sinterización dando como resultados una plagioclasa y una disminución de la porosidad a consecuencia del sellado gradual de la fase líquida como reacción de la condensación de deshidratación entre los enlaces de hidroxilo y el flujo mejorado de SiO_2 fundido en forma de poros cerrados D.

Figura 143. Análisis de la combinación MCB/MD2, ladrillo mejorado, sector Santa Elena, microscopía SEM

5.1.5. Sector Zamora Chinchipe

5.1.5.1.Preparación de la pasta y elaboración de ladrillo con incorporación de materia prima alternativa

Para la elaboración del geopolímero, se realizó una mezcla entre la materia prima (relave de mina de oro en polvo), con la solución de hidróxido de sodio (NaOH), hasta obtener una pasta homogénea.

Para producir el geopolímero a partir del relave, se analizaron varias concentraciones de solución de hidróxido de sodio (NaOH), en porcentajes 5; 7,50; 10 y 12,50M (molar); en la preparación empleamos agua destilada (conductividad 0,1 μ S/cm). La preparación de la solución de hidróxido de sodio es exotérmica, por lo tanto, hay que dejar enfriar (temperatura ambiente), antes de utilizar la misma.

La pasta geopolimérica una vez preparada se deja reposar (proceso que duro de 8 a 10 horas), con el objetivo de que la solución alcalina la active (químicamente), induciendo a una cierta cantidad de átomos de Al y Si, a disolverse o hidrolizarse, a partir de la fuente primaria de aluminosilicatos; una vez concluido este proceso, se coloca la pasta resultante en los moldes en capas, con el fin de eliminar las burbujas de aire atrapadas; luego las muestras fueron colocadas en un horno a 50°C para curado por el lapso de una hora; transcurrido este tiempo, se procedió a elevar la temperatura a una rata de 2°C/min, hasta llegar a los diferentes niveles de temperatura: 90°C, 120°C, 150°C y 180°C por un espacio de tiempo de 8 horas; con el objetivo de determinar el nivel óptimo que debe tener esta para garantizar un ladrillo de calidad. Una vez concluido el curado prolongado, se deja reposar las probetas (discos) para su enfriamiento por un lapso de 8 a 10 horas y se procede a valora el factor de optimización (f_{opt}), aplicando el ensayo de resistencia a la tracción indirecta mediante el Método Brasileño.

a) Diseño estadístico

En el presente estudio muestra un arreglo estadístico, dispuesto en un diseño factorial, de dos factores, con cuatro niveles y tres repeticiones para cada caso Figura 144 y Tabla 64.

Figura 144. Descripción del número de mezclas a realizar

Tabla 64. Mezclas NaOH y relave de mina, en diferentes contenidos de solución y temperatura.

Molaridad (NaOH)	Contenido de solución (CS)	Temperatura °C
5	22	90
	24	120
	150	150
	26	180
7,5	22	90
	24	120
	150	150
	26	180
10	22	90
	24	120
	150	150
	26	180
12,5	22	90
	24	120
	150	150
	26	180

ANEXO V. (Arreglo Factorial y cálculos, Zamora Chinchipe)

b) Resultados de compresión diametral (σ_{cd}) - Selección de la mezcla óptima

La valoración del factor óptimo (f_{opt}), se las resume en las Figura 145 y 146, observándose que, si se mantiene la concentración constante y se cambian las temperaturas de curado, los valores más altos de f_{opt} se alcanzan a 120°C en todas las concentraciones, y, el

valor máximo de f_{opt} , se alcanza a una concentración de NaOH de 12,50M en todas las temperaturas aplicadas para el curado. En consecuencia, a concentración de 12,50M se produce una mejor activación de la superficie del material empleado en una temperatura de 120°C; a temperaturas superiores no mejoran los procesos de vitrificación y posterior polimerización de los grupos Si-O-Al o Si-O-Si; el espectro de infrarrojo indica que en la superficie del aluminosilicato se produce una tensión que facilita a la cinética de la reacción de interacción Si-O-Si o Si-O-Al por el Na y OH existente en la solución activante. Un aumento sustantivo de la temperatura desfavorece a la geopolimerización, debido a que se produce una rápida evaporación y poli condensación del silicato y aluminato generado, produciendo primeramente un gel y posteriormente una solidificación de la superficie sin alcanzar la polimerización, lo que se traduce en el fisuramiento y una geopolimerización incompleta, afectando directamente a sus propiedades mecánicas.

Figura 145. Incremento del f_{opt} por efecto de la temperatura

Figura 146. Incremento del f_{opt} por combinaciones

Como podemos observar en la Tabla 65, la mezcla óptima se obtiene en una concentración de 12,5M al 26% de contenido de solución y temperatura de 120°C, misma que dio como resultado de f_{opt} 6,44MPa/kg y una resistencia a la tracción indirecta promedio de 0,56MPa. A temperaturas mayores ocurre el fisuramiento de los discos.

Tabla 65. Efecto del incremento del contenido de solución sobre el f_{opt} y de la temperatura de curado en la resistencia a la tracción de discos

CÓDIGO	M	CONTENIDO DE SOLUCIÓN %	T°C	MUESTRA	d (cm)	e cm	CARGA (kg)	σ _{cd} MPa	f _{opt} (MPa/kg)	f _{opt} Promedio
PZ_24/7,5-90°C	7,5	24	90	1	7,11	1,65	7,63	0,04	0,39	0,44
		24	90	2	7,12	1,54	8,50	0,04	0,49	
		24	90	3	7,19	1,51	7,27	0,04	0,45	
PZ_24/12,5-90°C	12,5	24	90	1	7,00	1,32	13,49	0,09	0,98	1,66
		24	90	2	7,02	1,38	26,61	0,17	1,88	
		24	90	3	7,01	1,39	28,88	0,18	2,11	
PZ_22/7,5-120°C	7,5	22	120	1	7,13	1,60	61,25	0,33	3,29	3,54
		22	120	2	7,15	1,58	57,57	0,32	3,24	
		22	120	3	7,15	1,49	68,33	0,40	4,08	
PZ_26/12,5-120°C	12,5	26	120	1	7,06	1,38	100,42	0,64	7,47	6,44
		26	120	2	7,10	1,42	77,48	0,48	5,26	
		26	120	3	7,12	1,35	86,64	0,56	6,58	
PZ_22/7,5-150°C	7,5	22	150	1	7,17	1,61	20,29	0,11	1,16	1,39
		22	150	2	7,13	1,49	25,67	0,15	1,72	
		22	150	3	7,14	1,56	21,24	0,12	1,30	
PZ_24/12,5-150°C	12,5	24	150	1	7,11	1,43	28,88	0,18	2,25	2,71
		24	150	2	7,11	1,42	43,04	0,27	3,29	
		24	150	3	7,11	1,45	33,69	0,20	2,58	
PZ_24/7,5-180°C	7,5	24	180	1	7,12	1,55	24,92	0,14	1,71	1,70
		24	180	2	7,17	1,71	26,89	0,14	1,48	
		24	180	3	7,12	1,72	34,64	0,18	1,90	
PZ_22/12,5-180°C	12,5	22	180	1	6,97	1,40	36,62	0,23	2,91	3,04
		22	180	2	7,00	1,43	49,93	0,31	3,68	
		22	180	3	6,95	1,52	36,43	0,22	2,53	

Debemos indicar que la geopolimerización es una reacción química de minerales, basada principalmente de sílice y alúmina (silicoaluminatos), como ya se explicó anteriormente, constituida siempre por un elemento del primer grupo de la tabla periódica.

La alcalinidad de las soluciones activantes induce a que cierta cantidad de átomos de Al y Si se disuelvan o se hidrolicen a partir de la fuente primaria de aluminosilicato, para formar monómeros inorgánicos en la solución y luego poder ser poli condensados, dando lugar a un material con una estructura compacta similar a la de las rocas.

Así mismo la demasiada cantidad de líquido formará poros, afectando negativamente al proceso de geopolimerización y la estructura del ladrillo.

De acuerdo al trabajo realizado en la parte experimental y coincidiendo con algunos autores en trabajos similares, la temperatura acelera la cinética de reacción de la geopolimerización, pero es necesario tener en cuenta que el aumento exagerado en la temperatura de curado puede afectar de manera negativa las propiedades mecánicas de los discos.

5.1.5.2. Caracterización del ladrillo mejorado con incorporación de materia prima alternativa, a base de lodos de relave de mina o ladrillos ecológicos

Una vez obtenida la mezcla óptima, se procedió a la elaboración de los ladrillos, como establece la norma, (estudio de 5 unidades).

a) Análisis de caracterización de ladrillos a base de lodos de relaves o ladrillos ecológicos

El ladrillo producido con lodos de relave, presentan un color gris claro Figura 147; la densidad de los ladrillos es de $2,76\text{g/cm}^3$ y su peso promedio es de 2800g (2,80kg), considerado

un ladrillo liviano, pudiendo establecer que se debe a la alta porosidad que presenta. La presencia de poros, es una característica que podría ser dañina en cuanto a la reducción de la resistencia de los ladrillos. Estos poros siempre aparecerán aun cuando el proceso de curado de los ladrillos sea controlado. Con respecto a los ladrillos elaborados, los poros son relativamente pequeños por lo que la resistencia a compresión no se vio afectada por la presencia de los mismos.

Figura 147.Ladrillo ecológico

La Tabla 66, nos permite observar el comportamiento en la absorción del agua, en los ladrillos ecológicos, la cual se podría calificar como medianamente alta; factor que le atribuimos a los poros presentes en el ladrillo Figura 148 lo que produce una mayor acumulación del agua a nivel de cavidades internas en la estructura del ladrillo, sobrepasando la norma, para ladrillos Tipo C, que establece un máximo de 25% de absorción.

Tabla 66. Porcentaje de absorción de agua en ladrillos ecológicos

LADRILLO	W seco(g)	W saturado en (g) - (24 horas)	ABSORCIÓN (%)
1	2444,75	3229,20	32,09
2	2470,30	3251,12	31,61
3	2501,35	3312,80	32,44
4	2457,53	3240,16	31,85
5	2485,83	3281,96	32,02
PROMEDIO	2471,95	3263,05	32,00

Figura 148. Absorción del ladrillo ecológico

En la Tabla 67, podemos observar, que el porcentaje de porosidades presentes en el ladrillo ecológico es de un 46,52%.

De acuerdo a lo que dice Callister, 1995, la porosidad ser controlada adecuadamente al producir un ladrillo; si esta es reducida, la resistencia mecánica y la resistencia al ataque corrosivo producida por otros agentes es mayor en los cerámicos; además, las características de aislamiento térmico y de resistencia al choque térmico disminuyen, desde luego la porosidad óptima depende de las condiciones ambientales, las características de la materia prima utilizada y la mecánica en la elaboración de los ladrillos.

Según este criterio, el ladrillo ecológico, producido con relaves de mina, como alternativa para el empleo de desechos mineros y características amigables con el medio ambiente, debe sumar estudios que incorpore propuestas para el uso de algún tipo de material anexo (mezcla) o se realice un mejor proceso en el manejo y elaboración de la pasta a emplearse, permitiendo con ello disminuir el porcentaje de porosidad presente en la estructura interna del

ladrillo, y poder garantizar así su resistencia mecánica, las propiedades estructurales y la calidad del mismo.

Tabla 67. Porosidad del ladrillo ecológico

LADRILLO #	Densidad Real (g/cm ³)	Densidad Aparente (g/cm ³)	W seco (g)	W saturado (24 h) (g)	W sumergido (g)	Porosidad Abierta (%)	Porosidad Cerrada (%)	Porosidad Total (%)
1	2,76	1,51	2444,75	3229,20	1221,40	39,07	6,22	45,29
2	2,76	1,44	2470,30	3251,12	1279,90	39,61	8,22	47,83
3	2,76	1,49	2501,35	3312,80	1302,60	40,37	5,65	46,01
4	2,76	1,48	2457,53	3240,16	1250,65	39,34	7,22	46,56
5	2,76	1,47	2485,83	3281,96	1291,25	39,99	6,93	46,92
PROMEDIO	2,76	1,48	2471,95	3263,05	1269,16	39,68	6,85	46,52

b) Características Mecánicas, resistencia a la compresión simple

Se aplicó el ensayo de compresión simple a los ladrillos elaborados, obteniendo un resultado de 11,95MPa (Figura 149), valor que ha sido correlacionado con la norma (INEN 297, 1978).

MUESTRA	(MPa)
1	12,10
2	11,50
3	12,40
4	11,80
5	11,95
PROMEDIO	11,95

Figura 149. Resistencia a la compresión diametral, ladrillos ecológicos

Los ladrillos fabricados de forma tradicional presentan una falla diferente, a los ladrillos elaborados con lodos de relaves o también denominados ladrillos ecológicos, al momento de someterlos al ensayo de compresión, estos presentan fisuras que generan falla por aplastamiento a nivel de caras. La falla que presenta el ladrillo ecológico es de tipo vertical (luego de aplicada la carga); lo que nos permite deducir que el ladrillo elaborado con lodos de relave minero

presenta una buena adherencia entre partículas, factor que se le atribuye a la reacción que produce la solución alcalina activadora, generando con ello una base estructural en el ladrillo, más compacta y con buenas características mecánicas, el cual de acuerdo a los resultados obtenidos y observando la normativa se clasifica como ladrillo macizo tipo B o C.

5.1.5.3. Caracterización de técnicas analíticas

DRX de mezcla óptima

La Figura 150 se aprecia tres picos de interés (mezcla óptima) cuarzo, oligoclasa Illita, las cuales luego del proceso de polimerización disminuye su intensidad, siendo más representativo en el cuarzo.

Figura 150. Difractograma de rayos X. Mezcla óptima, Relave de mina

Análisis de microscopía SEM

En la micrografía SEM Figura 151, a) se aprecia la estructura fina de la matriz (E1) con componentes: silicio, aluminio, magnesio, potasio y hierro; mientras que la Figura 151, b) indica

cristales de NaOH y estructura amorfa del relave (E2) con presencia de silicio, aluminio, potasio y sodio y finalmente en la Figura 151, c) se observa la homogeneidad de la matriz densa de geopolímero (M), por la disolución de Si y Al en la solución de NaOH.

Por la presencia de los grupos OH en el geopolímero, existe un mayor contenido de O, debido a la fuente de hidrólisis de aluminosilicatos formada por cadenas de Si-O-Si o Si-O-Al reemplazados por el Na, de la solución activante, criterio validado por Zhang et al (2011), cuando menciona que durante el proceso de geopolimerización, la solución alcalina de hidróxido de sodio NaOH, disuelve las especies de aluminio (Al) y sílice (Si), esto se atribuyen a la capacidad estabilizadora del Na⁺ ante la presencia de monómero de silicato en una elevada relación de líquido a sólido, de igual forma la generación de cationes metálicos permiten el equilibrio de carga de las especies de alúmina como efecto del NaOH.

Figura 151. Micrografía SEM, a) Materia prima, b) Materia prima y solución NaOH a temperatura ambiente, c) Mezcla óptima.

Finalmente con la evaluación realizada a cada una de las materias primas empleadas en las combinaciones de mezclas óptimas y análisis de las características, físico-químicas,

mecánicas y mineralógicas de los ladrillos fabricados para los sectores de Catamayo, Malacatos, Zamora Chinchipe y Santa Elena se determina que los ladrillos para los tres primeros sectores son clasificados de acuerdo a la norma ecuatoriana como ladrillo MACIZO TIPO A o B y para el sector Santa Elena se clasifica como un ladrillo MACIZO TIPO C.

En resumen, la Tabla 68, presenta una comparación de los resultados de los análisis mecánicos a los ladrillos artesanales, ladrillos artesanales mejorados artesanales y ladrillos con incorporación de materias primas alternativas.

Tabla 68. Especificaciones técnicas del ladrillo

CARACTERIZACIÓN DE LOS LADRILLOS ARTESANALES, ARTESANALES MEJORADOS Y ARTESANALES CON INCORPORACIÓN DE MATERIAS PRIMAS ALTERNATIVAS								
ÍTEM	SECTOR		CATAMAYO (CT.)		MALACATOS (ML.)		SANTA ELENA (SE)	ZAMORA CHINCHIPE(ZCH)
	Ensayos	unidad	Artisanal	Mejorado	Artisanal	Mejorado	Mejorado	Mejorado
1	Variabilidad Dimensional	mm	10,15	7,98	10,00	7,61	7,40	7,53
2	Peso Ladrillo	gr	4200,00	4808,80	4540,00	4666,00	3590,00	2800,00
3	Densidad Aparente	gr/cm3	1,48	1,61	1,53	1,50	1,19	1,48
4	Absorción de Humedad	%	20,96	15,63	27,51	21,27	36,73	32,00
5	Peso Específico Aparente	gr	-	2,20	-	1,50	2,64	2,76
6	Porosidad Aparente	%	30,93	25,70	27,51	21,27	43,71	46,52
7	Compresión Diametral	MPa	-	12,15	-	4,72	2,10	0,56
8	Compresión Simple	MPa	4,60	14,85	4,97	20,39	9,34	11,95
9	Temperatura de Cocción	T°C	800,00 Aprox.	950,00	800,00 Aprox.	950,00	950,00	120,00
10	DRX	mineral	-	* Cuarzo, albita, moscovita	-	**Cuarzo, albita hematita	*** cuarzo, moscovita, albita	****Cuarzo, illita, moscovita, oligoclasa
11	Factor de Optimización	MPa/kg	-	12,40	-	47,00	21,95	6,44
12	Mezcla Seleccionada	%	-	50/50 (C3)	-	80/20 (a)	60/40 (b)	12,50M, 26CS

6.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones finales que se pueden extraer del presente trabajo de investigación, de acuerdo con los objetivos específicos inicialmente planteados son:

- Los problemas relacionados con el proceso de fabricación, generadores de pérdidas importantes. Entre las principales razones para la baja eficiencia técnica están la falta de un nivel de mecanización, los hornos rudimentarios con sistemas de combustión deficientes y desprovistos de sistemas de instrumentación y control, además de la capacidad de laboratorio nula en los grupos de productores.
- La producción de ladrillos en los sectores de Catamayo y Malacatos se sustenta en dos vectores con efectivos y potenciales poderes de degradación ambiental: la extracción de arcilla para servir como materia prima básica y el uso descontrolado de deforestación de árboles nativos para producción de leña como combustible en los hornos.
- La producción de ladrillo en los sectores de Catamayo y Malacatos no cumple con los estándares de calidad debido a factores como amasado inadecuado lo que provoca una falta de homogeneidad en las mezclas, procesos de producción practicados son netamente rudimentarios.
- La temperatura de cocción es inadecuada lo que produce que los correctores como el tamo de arroz, caña de azúcar y aserrín no se queme en su totalidad debido a las bajas temperaturas lo que trae consigo la falta de un proceso de sinterización de las arcillas.
- En la optimización de las mezclas de arena y arcilla, en cuanto a la resistencia mecánica de los ladrillos producidos con los materiales de Catamayo en la mezcla identificada como C3 (50/50) MV1/MI2 más el 2% de aserrín, obteniendo un Fopt.

de 12,40MPa/kg, sus características físico – mecánicas, mejoraron notablemente, con respecto al ladrillo convencional. Respecto a los ladrillos elaborados con arcillas recolectadas en el sector de Malacatos la mezcla seleccionada para su fabricación fue la combinación 80/20MCB/MCA más el 2% de aserrín, obteniendo un F_{opt} de 47MPa/kg, siendo el factor de optimación más elevado de todas las mezclas probadas; para este proceso el ensayo de tracción indirecta es un medio adecuado para determinar la mezcla óptima debido a que la resistencia a la tracción depende principalmente de la resistencia de los granos minerales y de la matriz que los une, además de la composición química, los materiales arcillosos tienden a formar soluciones sólidas durante la cocción.

- La producción de ladrillo en laboratorio cumplen el plan preestablecido de la curva de calentamiento evitando roturas durante este proceso, logrando una cocción uniforme y efectos esperados sin sobrepasar la máxima temperatura admisible por los materiales y así se evitan deformaciones y/o roturas de las piezas durante el enfriamiento, un control adecuado y programado de temperatura evita el fisuramiento en los cerámicos más aún cuando en su composición química se detecta la presencia de illita y motmorillonita que confiere una alta plasticidad a las pastas cerámicas.
- Referente al uso de tierras diatomeas si consideramos que la construcción civil tiene un impacto directo y significativo sobre el medio ambiente y sus recursos naturales, la utilización de nuevas técnicas con bajo impacto ambiental ha sido primordial para el avance de nuevas tecnologías y nuevos métodos constructivos, estas nuevas técnicas y conceptos se están volviendo cada vez más y más fuerte en las soluciones ecológicamente aplicables a la construcción civil. Por lo tanto, se concluye que el uso de arcillas con adición de arena diatomeas es una buena alternativa constructiva,

disminuyendo así la degradación del medio ambiente y disminuyendo los costos globales de una construcción.

- El uso de arcillas con las tierras diatomeas nos da una combinación de 60/40 más 2 % de aserrín a una temperatura de cocción de 950°C, la cristalización del material ocurre a una temperatura de 1116°C, presentando un bajo punto de fusión, lo que indica que la temperatura no debe superar los 1000°C.
- La inclusión de tierras diatomeas en la fabricación de ladrillo contribuye en la disminución del peso en un 21% con respecto a los ladrillos artesanales.
- La caolinita de la muestra otorga propiedades refractarias y contribuye a la resistencia mecánica de los ladrillos, la resistencia obtenida es de 9,34MPa que mejoran la calidad en un 117% respecto a la normativa.
- En lo referente a los ladrillos con material de relave, la presencia de sílice y alúmina en las muestras se asocia a la acción del activador alcalino de hidróxido de sodio para formar un polímero inorgánico donde se obtuvo como mezcla óptima una concentración molar de 12.5M, en un 26% de contenido de solución a una temperatura de 120°C.
- El proceso de geopolimerización en las muestras de relave de mina, ocurre a 120°C a temperaturas superiores no mejoran los procesos de vitrificación y posterior polimerización debido a una rápida evaporación y poli condensación del silicato y aluminato produciendo un gel y solidificación de la superficie afectando la resistencia del geopolímero.
- La mezcla óptima de geopolimerización permitió la elaboración de ladrillos ecológicos que cuentan con una resistencia a la compresión de 12MPa superando en un 50% lo que establece la normativa ecuatoriana.

6.1. CONCLUSIONES RESUMIDAS.

Las conclusiones finales que se pueden extraer del presente trabajo de investigación, de acuerdo con los objetivos específicos inicialmente planteados son:

1. En la optimización de las mezclas de arena y arcilla, en cuanto a la resistencia mecánica de los ladrillos producidos con los materiales de Catamayo en la mezcla identificada como C3 (50/50) MV1/MI2 más el 2% de aserrín, obteniendo un Factor de Optimización (FO) 12,40MPa/kg, sus características físico – mecánicas, mejoraron notablemente, con respecto al ladrillo convencional.
2. Los ladrillos elaborados con arcillas recolectadas en el sector de Malacatos la mezcla seleccionada para su fabricación fue la combinación (80/20) MCB/MCA más el 2% de aserrín, obteniendo un Factor de Optimización (FO) de 47MPa/kg, siendo el valor más elevado de todas las mezclas probadas.
3. La producción de ladrillos en los sectores de Catamayo y Malacatos se sustenta en dos vectores con efectivos y potenciales poderes de degradación ambiental: la extracción de arcilla para servir como materia prima básica y el uso descontrolado de deforestación de árboles nativos para producción de leña como combustible en los hornos.
4. El uso de arcillas con las tierras diatomeas nos da una combinación de (60/40) MCB/MD2 más 2 % de aserrín a una temperatura de cocción de 950°C, la vitrificación del material ocurre a una temperatura de 1116°C, presentando un bajo punto de fusión, lo que indica que la temperatura no debe superar los 1000 °C.

5. En lo referente a los ladrillos con material de relave, la presencia de sílice y alúmina en las muestras se asocia a la acción del activador alcalino de hidróxido de sodio para formar un polímero inorgánico donde se obtuvo como mezcla óptima una concentración molar de 12.5M, en un 26% de contenido de solución a una temperatura de 120°C.
6. El proceso de geopolimerización en las muestras de relave de mina, ocurre a 120°C a temperaturas superiores no mejoran los procesos de vitrificación y posterior polimerización debido a una rápida evaporación y poli condensación del silicato y aluminato produciendo un gel y solidificación de la superficie afectando la resistencia del geopolímero.

6.2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE FUTURO

Después de la conclusión de la presente tesis, la misma podrá ser utilizada por otros investigadores, empresas privadas y gubernamentales, estudiantes de Graduación y Post graduación, pudiendo desarrollar trabajos futuros en las siguientes áreas de investigación:

- Conformar un organismo gubernamental de control de la calidad del ladrillo artesanal, que exija el cumplimiento de las normas Técnicas Ecuatorianas (INEN);
- Realizar un estudio socio - económico y financiero, que valide la información técnica del presente estudio, a fin de mejorar la economía y desarrollo local;
- Proponer capacitaciones para los productores de ladrillo de la localidad, para con ello obtener productos con altos estándares de calidad; esto permitirá mejorar sus ingresos y por consiguiente su nivel de vida;
- Incentivar a los productores de ladrillo, la adquisición de hornos eléctricos con tecnología de punta, para los procesos de cocción del ladrillo, garantizando el control de temperatura y tiempo de cocción; para aprovechar los bajos costos de energía eléctrica proveniente de las nuevas plantas hidroeléctricas existentes en el Ecuador;
- Referente a los relaves mineros, se debe implementar un adecuado control de manejo ambiental en donde se considere o se definan la secuencia de las fases de tiempo que se aplicarán durante la vida de la instalación como son: Construcción, operación, cierre, post-cierre;
- En el Ecuador no existen estudios para uso de los materiales de mina por lo que con el presente estudio se da inicio a nuevas investigaciones enfocadas a reutilizar este tipo de material.
- Se puede iniciar estudios de material de relave con desgrasantes como el aserrín;
- A partir de este estudio se debe tener presente la aplicación de herramientas de análisis y de estudio de impactos ambientales que se generan en el sector y ampliarlo a nivel nacional;
- Se ha comprobado que hasta la fase de producción se registra la mayor parte de los impactos ambientales de todo el ciclo de vida del ladrillo; sin embargo, sería interesante y relevante, para permitir una evaluación completa y amplia, un estudio profundo de lo que sucede después de la producción. Una investigación de las

prácticas de uso y destino final del ladrillo traería una idea real y global de los verdaderos impactos ambientales del ladrillo en todo su recorrido;

- El Ecuador en los últimos años se encuentra con un interesante número de proyectos hidroeléctricos, el uso de la electricidad en sustitución de la leña parece ser la alternativa más lógica y viable, lo que resultaría en ganancias ambientales y en calidad de los productos. Se necesitaría por tanto estudiar procesos industriales de fabricación en continuo, alimentados por hornos eléctricos.

7 BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO M145-91. (2004). Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. Annual Book of AASHTO Standards, 1–8.
- Al-Wakeel, M. I. (2009). Characterization and process development of the Nile diatomaceous sediment. *International Journal of Mineral Processing*, 92(3–4), 128–136.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.03.008>
- Alyosef, H. A., Ibrahim, S., Welscher, J., Inayat, A., Eilert, A., Denecke, R., ... Enke, D. (2014). Effect of acid treatment on the chemical composition and the structure of Egyptian diatomite. *International Journal of Mineral Processing*, 132, 17–25.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.09.001>
- Arias, R., & Meneses, J. (2016). Caracterización residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
- Arsenović, M., Pezo, L., Mančić, L., & Radojević, Z. (2014). Thermal and mineralogical characterization of loess heavy clays for potential use in brick industry. *Thermochimica Acta*, 580, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.01.026>
- ASTM C373. (1999). Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. Annual Book of ASTM Standards, 88(Reapproved), 1–2. <https://doi.org/10.1520/C0373-88R06.much>
- ASTM D2487-00. (2006). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards, D5521-5, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D2487-11>.
- ASTM D422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Annual Book

- of ASTM Standards, D422-63, 1–8. <https://doi.org/West Conshohocken, PA>.
- ASTM D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/D4318>
- ASTM D4972. (2005). Standard Test Method for pH of Soils. Annual Book of ASTM Standards, 1, 3–7. <https://doi.org/10.1520/D3638-12.2>
- ASTM D854-02. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Annual Book of ASTM Standards, 4(May), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0854-10>.
- Ávila, J. (2009). Acidez Del Suelo. Magnesio Heliconia S.A (Vol. 14). Retrieved from http://www.nuprec.com/Nuprec_Sp_archivos/Literatura/Acidez del Suelo/Fuentes y efectos.pdf
- Banco Cental del Ecuador. (2017). Reporte de minería.
- Barranzuela, J. (2014). Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región piura, 95. Retrieved from http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1755/ICI_199.pdf?sequence=1
- Bartkowiak, M., & Zakrzewski, R. (2004). Thermal degradation of lignins isolated from wood. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 77(1), 295–304. <https://doi.org/10.1023/B:JTAN.0000033214.95457.fe>
- Beraldo, A., & Carvalho, J. (2001). Eucalyptus grandis wood – Portland cement particleboard . *Agribuilding*, (september), 3–6.
- Bories, C., Borredon, M. E., Vedrenne, E., & Vilarem, G. (2014). Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. *Journal of*

Environmental Management, 143, 186–196.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.006>

Boutterin, C., & Davidovits, J. (2003). Geopolymeric Cross-Linking (LTGS) and Building materials. *Geopolymer* '88, 1(July), 79–88.

Callister, W. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Reverté, S.A. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.

Chaisena, A., & Rangsiwatananon, K. (2004). Effects of thermal and acid treatments on some physico-chemical properties of Lampang diatomite. *J. Sci. Technol*, 11(6), 289–299.

Chen, C., Li, Q., Shen, L., & Zhai, J. (2012). Feasibility of manufacturing geopolymer bricks using circulating fluidized bed combustion bottom ash. *Environmental Technology*, 33(11), 1313–1321. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.626797>

Cladera, A., Etxeberria, M., Schiess, I., & Perez, A. (2008). Ladrillos cerámicos en la construcción para el desarrollo. *Tecnología Y Materiales de Construcción Para El Desarrollo*, 6.

Colín-García, M., Heredia, A., Santos-Rodriguez, D., T, C., Figueira, E., Almeida, S., ... Vrieling, E. (2013). Sílice de las algas diatomeas (Clase Bacillariophyceae) como material complejo y su importancia nanotecnológica. *La Granja. Revista de Ciencias de La Vida*, 17(1390–3799), 5–15.

Corzo, A. (2014). Facultad de Ciencias Forestales Lima – Perú. Universidad Nacional de Santiago Del Estero. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim>

- Das Braja, M. (1999). Principios de Ingenieria de Cimentaciones.pdf (Cuarta Edi). California.
- Davidovits, J. (1982). Mineral polymers and methods of making them.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J. (2002). Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications – Geopolymer Institute. In Geopolymer 2002 International Conference. Melbourne, Australia. Retrieved from <https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/16-environmentally-driven-geopolymer-cement-applications/>
- Davidovits, J. (2008). Geopolymer Chemistry and Applications.
- Davidovits, J. (2015). Geopolymer and Applications. France: Institut Geopolymere.
- Davidovits, J., & Davidovics, M. (1991). Geopolymer: Ultra-High temperature Tooling Material for the Manufacture of Advanced composites. 36th SAMPE Symposium, 36(2), 1939–1949. Retrieved from <http://www.geopolymer.org/library/recent-literature-in-applied-science-and-technology>
- Del Coz Díaz, J. J., García Nieto, P. J., Álvarez Rabanal, F. P., & Lozano Martínez-Luengas, A. (2011). Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method. Engineering Structures, 33(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.012>
- Demirbaş, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. Fuel, 76(5), 431–434. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)85520-2)
- Díaz, J. (2011). Comportamiento monotónico de suelos diatomáceos 1, 12(1), 27–34.
- Dimas, D., Giannopoulou, I., & Panias, D. (2009). Polymerization in sodium silicate

- solutions: A fundamental process in geopolymerization technology. *Journal of Materials Science*, 44(14), 3719–3730. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3497-5>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Duxson, P., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W. M., & van Deventer, J. S. J. (2007). The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292(1), 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.05.044>
- EcuRed. (2011). Bagazo de caña. Retrieved March 8, 2018, from https://www.ecured.cu/Bagazo_de_caña
- Elías, X. (2001). Optimización de procesos cerámicos industriales (Vol. 2, p. 35).
- Espinoza, I. (2007). Caracterización del yacimiento de diatomita de Loma Larga, Municipio de Acatlán, Hidalgo y evaluación de sus aplicaciones alternas.
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. *Microporous and Mesoporous Materials*, 86(1–3), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.05.057>
- Galán-Arboledas, R. J., Cotes-Palomino, M. T., Bueno, S., & Martínez-García, C. (2017). Evaluation of spent diatomite incorporation in clay based materials for lightweight bricks processing. *Construction and Building Materials*, 144, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.202>
- Gallegos, H., & Casabone, C. (2006). *Albañilería Estructural*. Pontificia Universidad Católica

del Perú - Fondo Editorial.

Gao, M., Sun, C., & Zhu, K. (2004). Thermal degradation of wood treated with guanidine compounds in air. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 75(1), 221–232.

García, V. J., Zúñiga-suárez, A. R., Márquez, C. O., Pérez, J. G., Fernández-martínez, F., & Hernández-olivares, F. (2016). Strength Developing in Clay-Andesite Brick. *Materials Sciences and Applications*, 7(August), 403–420.

Gasteiger, H. A., Frederick, W. J., & Streisel, R. C. (1992). Solubility of Aluminosilicates in Alkaline Solutions and a Thermodynamic Equilibrium Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 31(4), 1183–1190.
<https://doi.org/10.1021/ie00004a031>

Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Santa Elena. (2014). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial cantón Santa Elena. Secretaria Nacional de Planificación Y Desarrollo, (1).

Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Chanduy. (2014). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial parroquia Chanduy. Secretaria Nacional de Planificación Y Desarrollo.

Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Malacatos. (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial parroquia Malacatos del canton y provincia de Loja. Secretaria Nacional de Planificación Y Desarrollo.

Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Timbara. (2014). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial parroquia Timbara. Secretaria Nacional de Planificación Y Desarrollo.

- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial Zamora Chinchipe. (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial provincial Zamora Chinchipe. Secretaria Nacional de Planificación Y Desarrollo.
- Gomes, C. F. (1986). A argilas "o que são e para que servem". (Fundação Calouste Gulbenkian, Ed.).
- Grim, R., & Rowland, R. (1942). Differential thermal analysis of clay minerals and other hydrous materials. Part 1 and part 2. American mineralogist. Retrieved from <http://www.bcin.ca/Interface/openbcin.cgi?submit=submit&Chinkey=34337>
- Herdoíza, D. L., Fierro-renoy, V., & Fierro-renoy, C. (2017). Minería a Gran Escala : Una Nueva Industria para Ecuador. *Polémika*, 67–91.
- Hernández, J., Ocente, I., García, R., Jiménez, P., & Hernández, C. (2015). Los materiales diatomíticos en Andalucía: Distribución espacial, características geotécnicas y su uso como materiales marginales en la red viaria. (Vol. 1542).
- Ibrahim, S. S., & Selim, A. Q. (2012). Heat treatment of natural diatomite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48(2), 413–424. <https://doi.org/10.5277/ppmp120208>
- Iglesias, I., Acosta, B., Yu, R., Ruiz, G., Aineto, M., & Acosta, A. (2011). Study of mechanical characterization of ceramic specimens from a brazilian test adaptation. *Materiales de Construcción*, 61(303), 417–429. <https://doi.org/10.3989/mc.2011.55809>
- Illana, C., & Blanco, M. N. (2008). Usos industriales de las algas diatomeas. *Quercus*, 267(January 2008), 32–37.
- INEC 293 NTE. (2014). Ladrillos cerámicos. Definiciones. clasificación y condiciones generales. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

- INEN 067 NTE. (1981). Materiales refractarios. Formas y dimensiones recomendadas de ladrillos y piezas de caras planas. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 456.
- INEN 294, N. (1978). Ladrillos cerámicos determinación de la resistencia a la compresión. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 296, N. (2015). Ladrillos cerámicos. Determinación de absorción de humedad. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 297, N. (1978). Ladrillos cerámicos. Requisitos. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 297, 7.
- James, W., & Campbell, P. (2003). Brick: A World History.
- Jiménez, R., & Crespo, R. (2013). Caracterización de aridos finos y minerales arcillosos con el empleo del azul de metileno como herramienta para la clasificación. In *Minerales Industriales para la Construcción* (pp. 1–10). La Habana.
- Junge, K. (2000). Additives in the brick and tile industry. *Ziegelindustrie International* 8, 8(12), 25–39.
- Junge, K. (2001). Oversupply of energy due to combustible additives. *Ziegelindustrie International*, 9(12), 10–14.
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, 20(14), 1261–1277.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>
- Laboratorio Proinstra s.a. (2015). Análisis de difracción de rayos X. Quito.
- Lee, W. K. W., & Van Deventer, J. S. J. (2002). Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*

Aspects, 211(1), 49–66. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00237-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00237-6)

Linares González, J., Huertas, F., & Capel Martínez, J. (1983). La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento. Cuadernos de Prehistoria de La Universidad de Granada, 8, 479–490.

López, H. (2015). El palacio de Carondelet: Historia del palacio de gobierno, en la ciudad de Quito (Colección Los Ladrillos de Quito) (Vol. 1). Quito: CreateSpace Independent Publishing Platform.

Lu, X., & Wang, H. (2012). Microbial Oxidation of Sulfide Tailings and the Environmental Consequences. Elements, 8(2), 119–124. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.2.119>

Meradi, H., Atoui, L., Bahloul, L., Boubendira, K., Bouazdia, A., & Ismail, F. (2015). Characterization by Thermal Analysis of Natural Kieselguhr and Sand for Industrial Application. Energy Procedia, 74(213), 1282–1288. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.773>

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2005). Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros.

Miras, A., Gonzáles, I., Galán, E., & Romero, A. (2013). Efectos del tratamiento térmico en la mejora de propiedades industriales en materiales Diatomíticos. Revista de La Sociedad Española de Mineralogía, 17, 75–76.

Montero, E., & Valle, L. (2012). Chan Chan Ayer Hoy (SIAN de Lu). Lima-Perú.

Munsell, A. H. (1990). Munsell soil color charts. Baltimore.

Muñiz-Villarreal, M. S., Manzano-Ramírez, A., Sampieri-Bulbarela, S., Gasca-Tirado, J. R., Reyes-Araiza, J. L., Rubio-Ávalos, J. C., ... Amigó-Borrás, V. (2011). The effect of

- temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. *Materials Letters*, 65(6), 995–998. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.12.049>
- Nhuchhen, D. R., & Salam, A. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, 99, 55–63. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.04.015>
- Ojuri, O. O., Adavi, A. A., & Oluwatuyi, O. E. (2017). Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction. *Transportation Geotechnics*, 10, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.001>
- Paladines, J., & Zúñiga-Suárez, A. R. (2016). Fabricación de ladrillos a base de lodos de relaves de minas. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). www.EngineeringBooksPdf.com. Woodhead Publishing in materials.
- Quillupangui, L. (2011). Diseño y simulación de un sistema de molde para ladrillo crudo con medida 34X16X7 centímetros. Universidad Politécnica Salesiana. Retrieved from <https://www.ups.edu.ec/informacion-graduado?pId=8904363>
- Rodríguez, J., Loredó, J., Felipe, L., García, J., & Sancho, J. (1998). Caracterización de las Diatomitas de Río Seco (Piura, Perú). *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica Y Vidrio*, 38(5), 403–408. Retrieved from <http://boletines.secv.es/upload/20090519155319.199837403.pdf>

- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Revista de La Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú*, 13(1), 75–82.
- Rubio, A., & López, M. (2012). *Silicatos - Guía interactiva de Minerales y Rocas*. Retrieved March 12, 2018, from <http://www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/page.php?q=6e92d050809>
- Saldarriaga, D. S. (2009). *Fabricación de ladrillos aislantes y revestimientos cerámicos con diatomita de San Juan, Argentina*. Universidad de Piura.
- Sánchez, A. (2012). *Estudio geológico estructural e inventario de deslizamientos del área 1 de la cuenca de Catamayo*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Santos, J., Malagón, P., & Córdova, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna-Colombia*, 78.
- Shi, C., & Fernández-Jiménez, A. (2006). Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1656–1663. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.008>
- Sindhunata. (2006). *A Conceptual Model of Geopolymerisation*. The University of Melbourne - Australia.
- Smol, J., & Stoermer, E. (2010). *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences* - Google Libros. Cambridge University Press. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=SpuPKw7zZGAC&pg=PA3&lpg=PA3&dq=Stoe>

rmer+y+Smol,+diatomea&source=bl&ots=TOQScy8tSs&sig=35Ak_zTh9Tir8PXVzx95
XFjXTMQ&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiOzcDR0M7ZAhWLq1kKHVF1BD8Q6AEI
OTAG#v=onepage&q=Stoermer y Smol%2C diatomea&f

Somayaji, S. (2001). Civil engineering materials (Vol. 2). New Jersey: Prentice-Hall.

Souza Santos, P. (1986). Ciência e tecnologia de argilas. (Edgar Blucher Ltda, Ed.) (2nd ed., Vol. 1). São Paulo.

Souza Santos, P. (1992). Ciência e Tecnologia de Argilas. (Edgar Blucher Ltda, Ed.) (2nd ed.). São Paulo. Retrieved from <http://www.fnac.pt/Ciencia-e-tecnologia-de-argilas-vol-SANTOS-PERSIO-DE-SOUZA/a630170>

Stevenson, M., & Sagoe-Crentsil, K. (2005). Relationships between composition, structure and strength of inorganic polymers : Part I Metakaolin-derived inorganic polymers. *Journal of Materials Science*, 40(8), 2023–2036. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1226-2>

Stidolph, S., Sterrenburg, F., Smith, K., & Kraberg, A. (2013). Stuart R. Stidolph Diatom Atlas. Retrieved March 2, 2018, from <https://pubs.usgs.gov/of/2012/1163/index.html>

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. https://doi.org/10.1007/SpringerReference_4898

Torrent, V., & Barrón, V. (1999). Laboratory measurement of soil color: theory and practice. *Soil color*. Soil Science Society of America. Madison, WI. USA.

Torrisi, G. S., & Crisafulli, F. J. (2011). Nueva teoria de falla para mamposteria. *Mecánica Computacional*, (October), 1–4.

Uribe, R. (2014). Mejores prácticas de control tecnológico de materias primas arcillosas (pp. 1–82).

- Van Jaarsveld, J. G. S., & Van Deventer, J. S. J. (1999). Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(10), 3932–3941. <https://doi.org/10.1021/ie980804b>
- Weil, M., Dombrowski, K., & Buchwald, A. (2005). Development of Geopolymers Supported by Systems Analysis. In Bilek and Kersner (Ed.), *Proceedings of the 2nd Int, Symposium of Non-Traditional Cement and Concrete* (pp. 25–31). Retrieved from <http://www.uni-weimar.de/projekte/geton/Downloads/BrnoMW.pdf>
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247–266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2002). Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering*, 15(12), 1131–1139. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00255-8)
- Zhang, Y., Guo, C., Yao, X., Qu, Y., & Zhou, N. (2013). Engineering geological characterization of clayey diatomaceous earth deposits encountered in highway projects in the Tengchong region, Yunnan, China. *Engineering Geology*, 167, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.009>

ANEXOS

ANEXO I (Sector Catamayo)

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DIAMETRAL PRIMERA DOSIFICACIÓN, CATAMAYO

Norma: Ensayo Brasileño

PASTILLAS ARCILLA COCIDA

#	ARCILLA	ARENA	PESO	φ1	φ2	φ3	φ prom.	h1	h2	h3	h prom.	ÁREA	Volumen	Densidad	CARGA VERSA TESTER	K ANILLO	CARGA	kN	lbf	Ft	Ft	Ft(MPa)Peso	Fc
			(gr)	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm²	cm³	g/cm³			kg/cm²	0,0098	224,8	kN/m²	MPa		PROM.
1	30	70	135,4	6,9	6,9	6,9	6,9	2,2	2,0	2,0	2,1	37,9	78,4	1,7	104,0	0,8517	88,6	0,9	195,1	384,5	0,4	2,8	3,02
2	30	70	114,4	6,9	6,9	6,9	6,9	1,9	1,7	1,6	1,8	37,9	66,4	1,7	84,0	0,8517	71,5	0,7	157,6	366,7	0,4	3,2	
3	30	70	106,7	6,9	6,9	6,9	6,9	1,7	1,7	1,5	1,6	37,9	62,3	1,7	81,0	0,8517	69,0	0,7	152,0	377,0	0,4	3,5	
4	40	60	146,9	6,9	6,8	6,9	6,9	2,3	2,3	2,3	2,3	37,0	84,2	1,7	146,0	0,8517	124,3	1,2	273,9	496,8	0,5	3,4	3,65
5	40	60	150,6	6,9	6,9	6,9	6,9	2,3	2,3	2,3	2,3	36,9	86,2	1,7	164,0	0,8517	139,7	1,4	307,7	544,6	0,5	3,6	
6	40	60	146,3	6,9	6,8	6,9	6,9	2,3	2,3	2,1	2,3	36,9	83,6	1,8	169,0	0,8517	143,9	1,4	317,1	578,7	0,6	4,0	
7	50	50	113,7	6,8	6,8	6,8	6,8	1,8	1,9	1,8	1,8	36,4	66,5	1,7	170,0	0,8517	144,8	1,4	319,0	726,4	0,7	6,4	6,11
8	50	50	118,3	6,8	6,8	6,8	6,8	1,9	1,8	1,9	1,9	36,3	67,4	1,8	170,0	0,8517	144,8	1,4	319,0	715,4	0,7	6,0	
9	50	50	119,9	6,8	6,8	6,8	6,8	1,9	1,9	1,9	1,9	36,2	68,7	1,7	171,0	0,8517	145,6	1,4	320,9	705,7	0,7	5,9	
10	60	40	129,2	6,7	6,7	6,7	6,7	2,1	2,3	2,1	2,1	35,2	75,4	1,7	182,0	0,8517	155,0	1,5	341,5	674,7	0,7	5,2	4,74
11	60	40	139,0	6,7	6,8	6,7	6,7	2,4	2,2	2,4	2,3	35,7	82,4	1,7	217,0	0,8517	184,8	1,8	407,2	741,2	0,7	5,3	
12	60	40	144,8	6,7	6,7	6,7	6,7	2,4	2,4	2,4	2,4	35,4	84,0	1,7	159,0	0,8517	135,4	1,3	298,3	530,3	0,5	3,7	
13	70	30	145,2	6,7	6,7	6,7	6,7	2,6	2,4	2,4	2,5	35,1	86,2	1,7	195,0	0,8517	166,1	1,6	365,9	630,6	0,6	4,3	4,88
14	70	30	149,8	6,7	6,7	6,7	6,7	2,6	2,5	2,4	2,5	35,1	87,7	1,7	215,0	0,8517	183,1	1,8	403,4	684,1	0,7	4,6	
15	70	30	123,9	6,7	6,7	6,7	6,7	2,2	2,1	2,1	2,1	34,9	74,5	1,7	190,0	0,8517	161,8	1,6	356,5	709,8	0,7	5,7	

ANEXO II (Correctores)

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DIAMETRAL, SEGUNDA DOSIFICACIÓN, CATAMAYO, ADICIONANDO 2% DE CORRECTOR
Norma: Ensayo Brasileño

PASTILLAS ARCILLA COCIDAS

PASTILLAS	FUNDENTE 2%	DOSIFICACIONES			PESO	φ1	φ2	φ3	φ prom.	h1	h2	h3	h prom.	Área	Vol.	Densidad	CARGA	ANILLO	CARGA	kN	lbf	Ft	Ft	Ft	Ft	Ft(MPa)/Pe so	Ft
		ARCILLA	ARENA	AGUA	W gramos	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm²	cm³	g/cm³	VERSA TESTER	CONST.	kgf	0,0098 0665	224,808 93	kg/m²	kN/m²	lbf/m²	MPa	kg	PROM.
54	ASERRIN	50	50	300	71,44	6,826	6,785	6,903	6,84	1,246	1,240	1,208	1,23	36,72	45,22	1,58	180	0,8305	149,5	1,47	329,57	113028,39	1108,43	249184,93	1,11	15,52	12,42
55		50	50	300	79,61	6,793	6,837	6,819	6,82	1,355	1,371	1,372	1,37	36,49	49,85	1,60	178	0,8305	147,8	1,45	325,91	101073,72	991,19	222829,39	0,99	12,45	
56		50	50	300	92,61	6,767	6,846	6,836	6,82	1,588	1,566	1,534	1,56	36,49	57,02	1,62	177	0,8305	147,0	1,44	324,08	87856,90	861,58	193691,29	0,86	9,30	
57	TAMO DE ARROZ	50	50	300	94,74	6,796	6,930	6,873	6,87	1,551	1,682	1,640	1,62	37,03	60,15	1,58	125	0,8305	103,8	1,02	228,87	59255,65	581,10	130636,33	0,58	6,13	6,44
58		50	50	300	83,07	6,899	6,908	6,922	6,91	1,427	1,437	1,392	1,42	37,50	53,20	1,56	108	0,8305	89,7	0,88	197,74	58251,36	571,25	128422,25	0,57	6,88	
59		50	50	300	85,81	6,862	6,920	6,870	6,88	1,415	1,532	1,462	1,47	37,22	54,70	1,57	106	0,8305	88,0	0,86	194,08	55394,41	543,23	122123,76	0,54	6,33	
60	BAGAZO	50	50	300	85,11	6,891	6,803	6,913	6,87	1,569	1,493	1,461	1,51	37,06	55,87	1,52	115	0,8305	95,5	0,94	210,56	58710,90	575,76	129435,37	0,58	6,76	7,64
61		50	50	300	72,28	6,849	6,921	6,85	6,87	1,282	1,306	1,273	1,29	37,10	47,75	1,51	101	0,8305	83,9	0,82	184,92	60366,39	591,99	133085,09	0,59	8,19	
62		50	50	300	75,31	6,905	6,819	6,866	6,86	1,423	1,248	1,286	1,32	37,00	48,80	1,54	105	0,8305	87,2	0,86	192,25	61323,82	601,38	135195,86	0,60	7,99

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DIAMETRAL, SEGUNDA DOSIFICACIÓN, CATAMAYO, ADICIONANDO 4% DE CORRECTOR
Norma: Ensayo Brasileño

PASTILLAS ARCILLA COCIDA																											
PASTILLAS	FUNDENTE 4%	DOSIFICACIONES			PESO	φ1	φ2	φ3	φ prom.	h1	h2	h3	h prom.	Área	Vol.	Densidad	CARGA VERSA TESTER	ANILLO CONST.	CARGA	kN	lbf	Ft	Ft	Ft	Ft	Ft(MPa)/Pe so	Ft
		ARCILLA	ARENA	AGUA	W gramos	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm²	cm³	g/cm³			kgf	0,009 80665	224,8089 3	kg/m²	kN/m²	lbf/m²	MPa	kg	PRO M.
66	ASERRIN	50	50	300	66,92	6,951	6,844	6,993	6,93	1,272	1,177	1,181	1,21	37,71	45,63	1,47	61	0,8305	50,7	0,50	111,69	38465,6 2	377,2 2	84802, 18	0,38	5,64	6,030
67		50	50	300	65,03	6,947	6,865	6,839	6,88	1,204	1,265	1,176	1,22	37,22	45,22	1,44	75	0,8305	62,3	0,61	137,32	47411,6 3	464,9 5	10452 4,75	0,46	7,15	
68		50	50	300	68,70	6,866	6,921	6,881	6,89	1,170	1,211	1,276	1,22	37,28	45,44	1,51	59	0,8305	49,0	0,48	108,03	37144,1 9	364,2 6	81888, 91	0,36	5,30	
69	TAMO DE ARROZ	50	50	300	76,09	6,971	6,880	6,930	6,93	1,310	1,404	1,343	1,35	37,69	50,96	1,49	54	0,8305	44,8	0,44	98,87	30477,8 7	298,8 9	67192, 19	0,30	3,93	3,798
70		50	50	300	82,29	6,920	6,998	6,842	6,92	1,492	1,493	1,456	1,48	37,61	55,68	1,48	57	0,8305	47,3	0,46	104,36	29419,0 7	288,5 0	64857, 95	0,29	3,51	
71		50	50	300	68,76	7,015	6,893	6,888	6,93	1,265	1,182	1,261	1,24	37,74	46,65	1,47	45	0,8305	37,4	0,37	82,39	27768,6 8	272,3 2	61219, 46	0,27	3,96	
72	BAGAZO	50	50	300	61,89	6,929	6,875	6,939	6,91	1,197	1,237	1,224	1,22	37,55	45,78	1,35	43	0,8305	35,7	0,35	78,73	26965,9 3	264,4 5	59449, 70	0,26	4,27	3,705
73		50	50	300	66,25	6,896	6,915	6,925	6,91	1,311	1,330	1,314	1,32	37,52	49,47	1,34	44	0,8305	36,5	0,36	80,56	25529,5 7	250,3 6	56283, 06	0,25	3,78	
74		50	50	300	71,16	6,878	6,970	6,988	6,95	1,427	1,421	1,363	1,40	37,89	53,18	1,34	41	0,8305	34,1	0,33	75,07	22235,4 8	218,0 6	49020, 84	0,22	3,06

ANEXO III (Sector Malacatos)

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL, SECTOR MALACATOS

Norma: Ensayo Brasileño

Mezcla	Porcentaje (%)	Wsia (g)	Dsi (cm)	Esi (cm)	Dsia (mm)	Esia (mm)	Ws (g)	Ds (cm)	Es (cm)	Ds (mm)	Es (mm)	Wh (g)	Dh (cm)	Eh (cm)	ft (MPa)	F.I.O (MPa/kg)	Factor Indicador de optimización (MPa/kg)	Volumen secado al aire libre (cm ³)	Volumen secado a la estufa (cm ³)	Volumen de cocción (mm ³)	Csia (%)	Css (%)	CT (%)
MCB/MCA	50/50	123,42	6,75	1,78	67,50	17,82	112,69	6,63	1,83	66,30	18,33	106,75	6,47	1,75	3,91	36,61	43,04	63,78	63,28	57,66	0,78	8,88	9,67
	60/40	127,69	6,66	1,73	66,56	17,25	103,91	6,56	1,71	65,62	17,14	100,18	6,50	1,69	4,49	44,79	44,55	60,03	57,96	56,04	3,44	3,31	6,75
	70/30	123,95	6,70	1,77	67,05	17,73	102,58	6,53	1,72	65,31	17,24	97,28	6,48	1,69	2,60	26,77	26,77	62,61	57,74	55,72	7,77	3,51	11,28
	80/20	119,33	6,72	1,79	67,16	17,89	106,16	6,69	1,76	66,94	17,60	100,39	6,63	1,73	4,72	47,00	46,27	63,37	61,93	59,92	2,26	3,25	5,51
	100/0	127,69	6,73	1,77	67,34	17,69	106,36	6,65	1,75	66,47	17,50	100,77	6,52	1,70	3,50	34,72	34,77	63,02	60,73	56,69	3,63	6,66	10,30
	30/70	125,75	6,71	1,76	67,09	17,55	107,61	6,60	1,73	66,01	17,25	101,99	6,56	1,71	3,52	34,53	34,65	62,04	59,04	57,76	4,83	2,18	7,01
MCB/MAF	90/10	140,10	6,96	1,88	69,58	18,79	115,12	6,67	1,80	66,75	18,05	109,52	6,61	1,80	2,27	20,70	20,76	71,46	63,15	61,95	11,63	1,90	13,53
	80/20	147,90	7,02	1,86	70,16	18,58	126,96	6,72	1,82	66,66	14,73	121,19	6,67	1,72	1,78	14,73	14,72	71,85	64,55	60,10	10,16	6,90	17,05
	70/30	170,33	7,04	1,89	70,36	18,88	142,95	6,70	1,80	66,98	18,04	136,80	6,49	1,75	1,65	12,08	12,83	73,41	63,54	57,89	13,44	8,89	22,33
MCB/MPL	50/50	154,89	7,06	1,78	70,64	17,76	123,91	6,60	1,85	66,02	18,53	116,24	6,48	1,78	1,69	14,52	17,08	69,60	63,43	58,61	8,87	7,60	16,47
	60/40	148,74	7,01	1,94	70,09	19,38	118,40	6,75	1,92	67,48	19,18	111,17	6,62	1,83	1,50	13,51	8,93	74,79	68,60	62,99	8,27	8,18	16,45
	70/30	155,23	7,09	1,87	70,93	18,70	125,90	6,81	1,94	68,14	19,43	118,36	6,63	1,85	1,95	16,45	14,33	73,89	70,86	63,87	4,10	9,87	13,97
MPL/MAF	90/10	150,85	7,08	2,08	70,77	20,76	119,46	6,99	2,02	69,86	20,15	111,64	6,84	1,98	0,09	0,79	0,78	81,65	77,25	72,76	5,38	5,82	11,21
	80/20	153,92	7,01	2,04	70,13	20,42	122,31	6,93	2,06	69,31	20,62	115,02	6,89	2,03	0,03	0,27	0,27	78,85	77,77	75,78	1,37	2,56	3,93
	70/30	149,08	6,97	1,99	69,73	19,91	119,37	6,91	1,98	69,10	19,76	112,69	6,85	1,96	0,04	0,34	0,34	76,01	74,08	72,15	2,54	2,61	5,15
MCB/MCH	70/30	149,58	7,05	1,91	70,51	19,08	118,93	6,97	1,90	69,74	19,02	110,48	6,75	1,91	2,47	22,37	22,44	74,49	72,66	68,50	2,45	5,74	8,19
	60/40	152,56	7,14	2,11	71,37	21,09	124,61	6,96	2,00	69,56	20,03	116,05	6,78	1,93	2,40	20,65	20,76	84,36	76,10	69,67	9,79	8,45	18,24
	50/50	151,97	7,02	2,35	70,25	23,53	119,72	6,91	2,19	69,10	21,92	110,75	6,82	2,12	1,80	16,24	15,96	91,21	82,20	77,53	9,88	5,68	15,56
MCH/MAF	70/30	131,60	7,06	1,80	70,58	17,96	99,85	6,64	1,92	66,40	19,15	91,82	6,55	1,86	0,56	6,05	5,04	70,27	66,31	62,52	5,65	5,71	11,36
	80/20	152,70	7,04	1,94	70,39	19,40	116,13	6,64	2,02	66,35	20,18	107,62	6,56	1,97	0,94	8,77	8,94	75,49	69,78	66,43	7,56	4,80	12,36
	90/10	150,19	7,02	1,91	70,23	19,08	117,33	6,68	1,96	66,77	19,59	109,75	6,64	1,97	1,88	17,17	20,54	73,92	68,58	68,16	7,23	0,61	7,84

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA **LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**

Análisis: ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE, MEZCLAS ÓPTIMAS, SECTOR MALACATOS

Norma: NTE INEN 294 – 1977

N° LADRILLO	FECHA DE ENSAYO	LARGO cm		PROMEDIO	PESO Kg	ANCHO cm			PROMEDIOS	ESPESOR	CARGA Pmx kN	Área de contacto cm ²	Volumen cm ³	Densidad gr/cm ³	f'c MPa	f'c MPa
1	04/04/2016	25,71	25,62	25,67	4,60	13,08	13,15	13,12	13,12	8,61	580,50	336,69	2898,87	1,59	17,24	175,75
2	04/04/2016	25,79	25,83	25,81	4,61	13,35	13,25	13,12	13,24	8,46	530,20	341,70	2890,76	1,59	15,52	158,17
3	04/04/2016	26,59	26,35	26,47	4,61	13,21	13,28	13,30	13,26	8,56	590,20	351,11	3005,53	1,53	16,81	171,35
4	04/04/2016	25,98	26,01	26,00	4,54	13,10	13,13	13,30	13,18	8,40	404,50	342,53	2877,23	1,58	11,81	120,38
5	04/04/2016	26,03	26,04	26,04	4,45	13,02	13,01	13,12	13,05	8,48	429,30	339,76	2881,14	1,54	12,64	128,80
6	04/04/2016	25,95	26,03	25,99	4,48	13,12	13,21	13,11	13,15	8,50	413,50	341,68	2904,26	1,54	12,1	123,36
7	04/04/2016	27,19	27,10	27,15	4,72	13,42	13,38	13,02	13,27	8,40	426,20	360,30	3026,56	1,56	11,83	120,58
8	04/04/2016	27,05	26,95	27,00	4,66	13,38	13,28	13,15	13,27	8,41	421,10	358,33	3013,52	1,55	11,75	119,79
9	04/04/2016	27,21	26,98	27,10	4,68	13,40	13,33	13,24	13,32	8,39	430,30	360,96	3028,45	1,55	11,92	121,52

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE, MEZCLAS ÓPTIMAS, SECTOR MALACATOS

Norma: NTE INEN 294 – 1977

DATOS DE ENSAYO									
Nº	Identificación de la muestra	Referencia de Laboratorio	Edad días	Largo cm	Ancho cm	Espesor cm	Carga kN	Esf MPa	Densidad (kg/m³)
1	RM-CS-LAD-010	15-011	30	26,28	12,93	8,34	354,4	10,43	1,65
2	RM-CS-LAD-011	15-012	30	26,28	13,17	8,34	333	9,64	1,63
3	RM-CS-LAD-012	15-013	30	26,28	13,32	8,29	325,2	9,3	1,65
4	RM-CS-LAD-013	15-014	30	26,39	13,08	8,48	299,3	8,67	1,47
5	RM-CS-LAD-014	15-015	30	26,45	13,13	8,41	266,5	7,67	1,49
6	RM-CS-LAD-015	15-016	30	26,42	13,11	8,39	280,2	8,09	1,49
EQUIPO UTILIZADO: Máquina de Compresión Simple ACCU-TEK									1Mpa=10kg/cm²
TIPOS DE FALLA									
1: Doble cono	2: Cono y falla vertical	3: Falla vertical	4: Fractura diagonal	5: Fractura lateral	6: Fractura en borde

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE, MEZCLAS ÓPTIMAS, SECTOR MALACATOS

Norma: NTE INEN 294 – 1977

DATOS DE ENSAYO									
N°	Identificación de la muestra	Referencia de Laboratorio	Edad días	Largo cm	Ancho cm	Espesor cm	Carga kN	Esf. MPa	Densidad (kg/m ³)
1	RM-CS-LAD-010	15-011	30	30	13,09	8,49	751,9	21,93	1,63
2	RM-CS-LAD-011	15-012	30	26,01	13,15	8,25	730,2	21,19	1,68
3	RM-CS-LAD-012	15-013	30	25,95	13,13	8,45	700,1	20,55	1,63
4	RM-CS-LAD-013	15-014	30	26,36	13,18	8,21	650,8	18,73	1,59
5	RM-CS-LAD-014	15-015	30	26,35	13,22	8,18	680,5	19,54	1,60
EQUIPO UTILIZADO: Máquina de Compresión Simple ACCU-TEK									1Mpa=10kg/cm ²
TIPOS DE FALLA									
1: Doble cono	2: Cono y falla vertical		3: Falla vertical	4: Fractura diagonal		5: Fractura lateral		6: Fractura en borde

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: CARACTERIZACIÓN CONVENCIONAL, MEZCLAS ÓPTIMAS, SECTOR MALACATOS

Norma: Absorción, variación dimensional, otras.

Nº	Mezcla	Porcentaje de mezcla (%)	Absorción (%)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad Abierta (%)	Porosidad Cerrada (%)	Porosidad Total (%)	Capilaridad	Variación dimensional (mm)	Compresión simple (MPa)	Peso kg
1	MCB/MCA	80/20	21,27	1,50	21,27	21,48	42,76	0,39	7,61	20,39	4,65
2	MCB/MCH	70/30	23,83	1,41	23,83	22,06	45,89	0,03	7,70	12,18	4,49
3	MCA/MCA	60/40	22,56	1,62	22,56	15,69	38,26	0,22	8,60	16,52	4,61
4	MCB/MPL	70/30	25,43	1,80	25,43	5,92	31,35	0,28	7,31	11,83	4,69
5	MCA/MAF	90/10	25,66	1,59	25,66	13,79	39,46	0,30	5,90	9,79	4,72
6	MCB/MAF	90/10	27,89	1,51	28,34	30,85	42,19	0,33	6,20	8,15	4,32

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA **LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**

Análisis: ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE, LADRILLOS ARTESANALES, SECTOR MALACATOS

Norma: NTE INEN 294 – 1977

COMPRESIÓN SIMPLE PARA PRODUCTORES DE LA REGIÓN (1 y 2)									
DATOS DE ENSAYO									
Nº	Identificación de la muestra	Referencia de Laboratorio	Edad días	Largo cm	Ancho cm	Espesor cm	Carga kN	Esf MPa	Densidad (kg/m³)
1	RM-CS-LAD-001	15-011	30	26,51	9,65	7,56	120	4,69	2,08
2	RM-CS-LAD-002	15-012	30	26,42	9,61	7,28	137	5,42	2,32
3	RM-CS-LAD-003	15-013	30	26,23	9,49	8,01	135	5,42	2,18
4	RM-CS-LAD-004	15-014	30	26,29	9,45	7,89	134	5,39	2,26
5	RM-CS-LAD-005	15-015	30	26,44	9,64	7,95	150	5,88	2,25
6	RM-CS-LAD-006	15-016	30	27,20	13,53	7,84	136	3,69	1,47
7	RM-CS-LAD-007	15-017	30	26,95	13,43	8,07	120	3,31	1,45
8	RM-CS-LAD-008	15-018	30	26,57	13,44	8,20	164	4,59	1,46
9	RM-CS-LAD-009	15-019	30	27,09	13,35	8,10	152,5	4,22	1,47
10	RM-CS-LAD-010	15-020	30	27,10	13,43	7,88	136,9	3,76	1,50
EQUIPO UTILIZADO: Máquina de Compresión Simple ACCU-TEK									1Mpa=10kg/cm²
TIPOS DE FALLA									
1: Doble cono	2: Cono y falla vertical		3: Falla vertical	4: Fractura diagonal	5: Fractura lateral		6: Fractura en borde

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA **LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**

Análisis: ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE, LADRILLOS ARTESANALES, SECTOR MALACATOS

Norma: NTE INEN 294 – 1977

COMPRESIÓN SIMPLE PARA PRODUCTORES DE LA REGIÓN (3 y 4)									
DATOS DE ENSAYO									
Nº	Identificación de la muestra	Referencia de Laboratorio	Edad días	Largo cm	Ancho cm	Espesor cm	Carga kN	Esf MPa	Densidad (kg/m³)
1	RM-CS-LAD-011	15-011	30	26,49	13,35	7,98	180	5,09	1,64
2	RM-CS-LAD-012	15-012	30	26,61	13,35	7,88	178	5,04	1,68
3	RM-CS-LAD-013	15-013	30	26,58	13,34	8,10	172	4,85	1,59
4	RM-CS-LAD-014	15-014	30	26,38	13,40	8,10	220	6,22	1,64
5	RM-CS-LAD-015	15-015	30	26,46	13,35	8,01	180	5,10	1,67
6	RM-CS-LAD-016	15-016	30	26,88	13,41	7,91	155,7	4,32	1,68
7	RM-CS-LAD-017	15-017	30	26,85	13,55	8,02	182	5,00	1,66
8	RM-CS-LAD-018	15-018	30	26,89	13,56	8,13	169,3	4,65	1,62
9	RM-CS-LAD-019	15-019	30	27,07	13,66	8,15	140,8	3,81	1,59
10	RM-CS-LAD-020	15-020	30	26,73	13,29	8,23	152,3	4,29	1,57
EQUIPO UTILIZADO: Máquina de Compresión Simple ACCU-TEK									1Mpa=10kg/cm²
TIPOS DE FALLA									
1: Doble cono	2: Cono y falla vertical		3: Falla vertical	4: Fractura diagonal		5: Fractura lateral		6: Fractura en borde

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

Análisis: ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE, LADRILLOS ARTESANALES, SECTOR MALACATOS

Norma: NTE INEN 294 – 1977

COMPRESIÓN SIMPLE PARA PRODUCTORES DE LA REGIÓN (Productores 5)									
DATOS DE ENSAYO									
Nº	Identificación de la muestra	Referencia de Laboratorio	Edad días	Largo cm	Ancho cm	Espesor cm	Carga kN	Esf MPa	Densidad (kg/m³)
1	RM-CS-LAD-011	15-011	30	27,30	13,66	8,18	260	6,97	1,54
2	RM-CS-LAD-012	15-012	30	26,92	13,53	8,33	200	5,48	1,56
3	RM-CS-LAD-013	15-013	30	27,06	13,79	7,95	230	6,17	1,59
4	RM-CS-LAD-014	15-014	30	27,36	13,35	8,00	210	5,75	1,60
5	RM-CS-LAD-015	15-015	30	27,05	13,75	7,88	195	5,24	1,60
EQUIPO UTILIZADO: Máquina de Compresión Simple ACCU-TEK									1Mpa=10kg/cm²
TIPOS DE FALLA									
1: Doble cono	2: Cono y falla vertical		3: Falla vertical	4: Fractura diagonal		5: Fractura lateral		6: Fractura en borde

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA **LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**

Análisis: CARACTERIZACIÓN CONVENCIONAL, MEZCLAS ÓPTIMAS, SECTOR MALACATOS

Norma: Absorción, variación dimensional, otras.

Productor	Absorción (%)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad Abierta (%)	Porosidad Cerrada (%)	Porosidad Total (%)	Capilaridad	Variación dimensional (mm)	Compresión simple (MPa)	Peso Kg
P1	27,68	1,59	27,68	11,51	39,19	0,25	11,50	5,36	4,33
P2	31,88	1,41	31,88	14,25	46,13	0,31	12,80	3,92	4,27
P3	23,27	1,53	23,27	18,37	41,64	0,23	9,10	5,26	4,66
P4	27,67	1,51	27,67	14,87	42,54	0,24	7,80	4,41	4,76
P5	27,05	1,63	27,05	10,64	37,68	0,24	8,80	5,92	4,70
PROMEDIO	27,51	1,53	27,51	13,93	41,44	0,25	10,00	4,97	4,54

ANEXO IV (Sector Santa Elena)

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

DISEÑO EXPERIMENTAL MEZCLA OPTIMA

MATERIAL: Muestra:MD2 – MD3

PROVIENE: Santa Elena-Guayaquil

DOSIFICACIÓN: DIATOMEA/ARCILLA/AGUA

Masa= 1000 gr

MEZCLA MCB/ MD2

N°	Arcilla		Diatomea		Agua	
	%	gr	%	gr	ml	%
1	70%	700	30%	300	370	37
2	60%	600	40%	400	400	40
3	50%	500	50%	500	440	44
4	40%	400	60%	600	470	47
5	30%	300	70%	700	490	49

MEZCLA MCB/MD3

N°	Arcilla		Diatomea		Agua	
	%	gr	%	gr	ml	%
1	70%	700	30%	300	390	39
2	60%	600	40%	400	430	43
3	50%	500	50%	500	450	45
4	40%	400	60%	600	490	49
5	30%	300	70%	700	520	52

Observaciones:

A mayor cantidad de diatomita mayor cantidad de agua, debido a la alta absorción del agua de la tierra diatomea.

CÁLCULOS

		LADRILLOS ARCILLA/DIATOMEA ANTES DEL SECADO																		
MEZCLA	(MCB/MDS)+A	Ladrillo	Largo L (cm)			L prom.	Ancho B (cm)			B prom.	Altura H (cm)			H prom.	Peso	AREA	VOLUMEN	ρ	ρ prom.	DESVIACIÓN
N°	%	N°	L1	L2	L3	cm	B1	B2	B3	(cm)	h1	h2	h3	mm	kg	cm²	cm³	g/cm³	g/cm³	STANDART
1 MCB/MD2+Asr	(60/40)+2	1	27,5	27,7	27,5	27,57	13,40	13,40	13,30	13,37	8,8	8,9	8,8	8,83	5,96	368,47	3254,86	1,83	1,74	0,069
		2	27,2	27,3	27,2	27,23	13,80	13,70	13,60	13,70	8,7	8,8	8,8	8,77	5,42	373,10	3270,81	1,66		
		3	27,5	27,2	27,1	27,27	13,40	13,60	13,50	13,50	8,8	8,7	8,8	8,77	5,44	368,10	3227,01	1,69		
		4	27,5	27,1	27,2	27,27	13,60	13,40	13,60	13,53	8,7	8,8	8,8	8,77	5,74	369,01	3234,98	1,77		
		5	27,6	27,2	27,1	27,30	13,60	13,40	13,50	13,50	8,8	8,7	8,7	8,73	5,57	368,55	3218,67	1,73		

		LADRILLOS ARCILLA/DIATOMEA ANTES DE LA COCCIÓN																		
MEZCLA	(MCB/MDS)+A	Ladrillo	Largo L (cm)			L prom.	Ancho B (cm)			B prom.	Altura H (cm)			H prom.	Peso	AREA	VOLUMEN	ρ	ρ prom.	DESVIACIÓN
N°	%	N°	L1	L2	L3	cm	B1	B2	B3	(cm)	h1	h2	h3	mm	kg	cm²	cm³	g/cm³	g/cm³	STANDART
1 MCB/MD2+Asr	(60/40)+2	1	27,6	26,5	26,6	26,90	13,10	13,20	13,00	13,10	8,5	8,6	8,4	8,50	3,94	352,39	2995,32	1,32	1,34	0,050
		2	26,9	26,5	26,6	26,67	13,00	13,20	13,30	13,17	8,4	8,5	8,6	8,50	3,95	351,11	2984,44	1,32		
		3	26,4	26,6	26,5	26,50	13,10	13,30	13,40	13,27	8,5	8,6	8,7	8,60	3,95	351,57	3023,47	1,31		
		4	26,6	26,7	26,9	26,73	13,2	13,3	13,4	13,30	8,6	8,6	8,7	8,63	4,39	355,55	3069,61	1,43		
		5	27,6	26,7	26,8	27,03	13,40	13,30	13,40	13,37	8,6	8,5	8,7	8,60	4,18	361,35	3107,57	1,35		

		LADRILLOS ARCILLA/DIATOMEA DESPUES DE LA COCCIÓN																					
MEZCLA	(MCB/MDS)+A	Ladrillo	Largo L (cm)			L prom.	Ancho B (cm)			B prom.	Altura H (cm)			H prom.	Peso	AREA	VOLUMEN	ρ	ρ prom.	DESVIACIÓN	CARGA	f' c	f' cm
N°	%	N°	L1	L2	L3	cm	B1	B2	B3	(cm)	h1	h2	h3	mm	kg	cm²	cm³	g/cm³	g/cm³	STANDART	KN	MPa	MPa
1 MCB/MD2+Asr	(60/40)+2	1	27,3	27,4	27,2	27,30	13,20	13,10	13,20	13,17	8,7	8,8	8,6	8,70	3,83	359,45	3127,22	1,22	1,2	0,057	360,3	10,02	9,2
		2	26,8	26,9	26,9	26,87	13,30	13,20	13,10	13,20	8,5	8,5	8,6	8,53	3,39	354,64	3026,26	1,12			288,3	8,13	
		3	26,7	26,8	26,9	26,80	13,10	13,00	13,20	13,10	8,7	8,6	8,6	8,63	3,38	351,08	3030,99	1,12			298,2	8,49	
		4	27,2	27	27,1	27,10	13,20	13,10	13,10	13,13	8,5	8,8	8,6	8,63	3,80	355,91	3072,72	1,24			364,2	10,2	
		5	27	26,9	26,8	26,90	13,30	13,32	13,30	13,31	8,5	8,5	8,6	8,53	3,58	357,95	3054,50	1,17			325,6	9,10	

VARIACION DIMENCIONAL												
MEZCLA	(MCB/MDS)+A	Ladrillo	L prom.	B prom.	H prom.	Lm	Bm	Hm	VDL	VDB	Vh	VARIACION DIMENSIONAL
N°	%	N°	cm	cm	cm	cm	cm	cm	%	%	%	mm
1 MCB/MD2+Asr	(60/40)+0.04	1	27,30	13,17	8,70	26,99	13,18	8,61	3,60	5,85	4,37	7,40
		2	26,87	13,20	8,53				10,07	8,19	3,93	
		3	26,80	13,10	8,63							
		4	27,10	13,13	8,63							
		5	26,90	13,31	8,53

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
DETERMINACION DE SUPERFICIE ESPECIFICA

NORMA:

ASTM D 854

UNE – EN 932:1999

PROVIENE: Santa Elena

MATERIAL:

Muestra MD2

SUPERFICIE ESPECÍFICA			
SIMBOLO	DATO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Ws. (AM)	1	g	Peso azul de metileno (g)
Vol. (AM)sol.	200	ml	Volumen en que se disuelve el azul de metileno (ml)
N	120		Número de incrementos de azul de metileno.
Av.	6,02E+23	mol ⁻¹	Número de Avogadro (moléculas/mol)
Sup. (AM).	1,3E-14	cm ²	Superficie cubierta por un catión de azul de metileno
Ws (arcilla)	10	g	peso muestra (g)

$$Se = \frac{1g}{319,87 \frac{g}{mol}} \times \frac{1}{1000 mL} \times (N \times 0,5mL) \times N_{AV} \times A_{AM} \times \frac{1}{10g}$$

Superficie específica muestra MD2		
Se	73,4	m ² /g
Tabla: Resumen		
ID Muestra	Se m ² /g	Descripción del mineral
Muestra MD2	73,40	Illita y montmorillonita
Muestra MD3	80,74	Illita y montmorillonita
Muestra MDP	83,19	Illita y montmorillonita
Ceibopamba	10,40	Caolinita de elevada cristalinidad, illita y haloisita

ID Muestra	Se m ² /g	Descripción del mineral
Muestra MD2	73,40	Illita y montmorillonita
Muestra 3	80,74	Illita y montmorillonita
Ceibopamba	10,4	Caolinita de elevada cristalinidad, illita y haloisita

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

DETERMINACIÓN DE SUPERFICIE ESPECÍFICA

NORMA:

ASTM D 854

UNE – EN 932 2:1999

PROVIENE: Malacatos

MATERIAL:

Ceibopamba

SUPERFICIE ESPECÍFICA			
SIMBOLO	DATO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Ws. (AM)	1	g	Peso azul de metileno (g)
Vol. (AM)sol.	200	ml	Volumen en que se disuelve el azul de metileno (ml)
N	17		Número de incrementos de azul de metileno.
Av.	6,02E+23	mol ⁻¹	Número de Avogadro (moléculas/mol)
Sup. (AM).	1,3E-14	cm ²	Superficie cubierta por un catión de azul de metileno
Ws (arcilla)	10	g	peso muestra (g)

$$Se = \frac{1g}{319,87 \frac{g}{mol}} \times \frac{1}{1000 mL} \times (N \times 0,5mL) \times N_{AV} \times A_{AM} \times \frac{1}{10g}$$

Superficie específica		
Se	10,4	m ² /g

ANEXO V (Zamora Chinchipe) DISEÑO ESTADÍSTICO DEL ESTUDIO Y CÁLCULOS PARA DETERMINAR fopt

CODIGO	%	Contenido de solución %	Temperatura °C	Muestra #	DIAMETRO (mm)			PROMEDIO	ESPESTORES (mm)			PROMEDIO	CARGA (kg)	Carga (N)	Esfuerzo de Tracción(kg/cm²)	E. Tracción MPa	Prom. oT	Desviación Estandar	w húmedo	W. seco (gr)	W(kg)	Factor de Optimización(MPa/kg)	Promedio	
					D1	D2	D3		E1	E2	E3													
PZ_22/5-90°C	5	22	90	1	70,92	70,79	70,37	7,07	16,37	15,44	15,44	1,58	21,33	208,586	1,2196	0,1196	1,1466	0,0987	120,83	96,31	0,09631	1,24	1,20	0,17
		22	90	2	71,02	70,6	70,14	7,06	16,55	16,42	16,42	1,65	18,88	184,628	1,0343	0,1015			125,13	100,53	0,10053	1,01		
		22	90	3	70,58	70,56	70,71	7,06	13,65	14,27	14,27	1,41	18,5	180,912	1,1859	0,1163			108,84	86,94	0,08694	1,34		
PZ_24/7.5-90°C	7,5	24	90	1	71,43	71,25	70,71	7,11	15,83	16,84	16,84	1,65	7,63	74,614	0,4138	0,0406	0,4438	0,0423	123,97	105,19	0,10519	0,39	0,44	0,05
		24	90	2	71,84	71,07	70,83	7,12	15,35	15,47	15,47	1,54	8,5	83,122	0,4922	0,0483			117,54	98,04	0,09804	0,49		
		24	90	3	71,96	71,96	71,87	7,19	15,26	15,06	15,06	1,51	7,27	71,093	0,4254	0,0417			114,25	93,54	0,09354	0,45		
PZ_22/10-90°C	10	22	90	1	71,22	71,87	72,11	7,17	16,75	17,16	17,16	1,70	5,85	57,207	0,3050	0,0299	0,3455	0,0670	128,18	107,13	0,10713	0,28	0,33	0,07
		22	90	2	71,87	71,37	71,93	7,17	16,15	15,98	15,98	1,60	7,64	74,712	0,4229	0,0415			250,25	102,55	0,10255	0,40		
		22	90	3	72,01	72,2	72,25	7,22	16,11	15,4	15,4	1,56	5,47	53,491	0,3087	0,0303			123,06	103,87	0,10387	0,29		
PZ_24/12,5-90°C	12,5	24	90	1	69,9	70,14	69,99	7,00	12,96	13,35	13,35	1,32	13,49	131,919	0,9279	0,0910	1,5227	0,5200	107,02	92,49	0,09249	0,98	1,66	0,59
		24	90	2	70,87	70,43	69,15	7,02	13,97	13,72	13,72	1,38	26,61	260,219	1,7495	0,1716			106,98	91,38	0,09138	1,88		
		24	90	3	69,89	70,4	70,03	7,01	13,67	13,97	13,97	1,39	28,88	282,418	1,8908	0,1855			103,4	88,09	0,08809	2,11		
PZ_24/5-120°C	5	24	120	1	70,67	70,06	69,83	7,02	15,19	15,66	15,04	1,53	26,43	258,459	1,5672	0,1537	1,7790	0,2642	112,49	87,08	0,08708	1,77	2,03	0,31
		24	120	2	70,73	71,35	70,89	7,10	14,78	13,98	13,7	1,42	32,75	320,262	2,0751	0,2036			113,74	85,74	0,08574	2,37		
		24	120	3	70,17	70,43	70,34	7,03	14,08	14,35	14,38	1,43	26,71	261,197	1,6947	0,1662			111,71	84,91	0,08491	1,96		
PZ_22/7.5-120°C	7,5	22	120	1	71,35	71,42	71,17	7,13	15,98	16,07	16,07	1,60	61,25	598,964	3,4089	0,3344	3,5795	0,4426	128	101,7	0,1017	3,29	3,54	0,47
		22	120	2	71,6	71,46	71,31	7,15	16,49	15,29	15,6	1,58	57,57	562,977	3,2476	0,3186			123,47	98,23	0,09823	3,24		
		22	120	3	71,32	71,46	71,69	7,15	13,86	15,43	15,43	1,49	68,33	668,199	4,0819	0,4004			123,27	98,08	0,09808	4,08		
PZ_22/10-120°C	10	22	120	1	71,79	71,93	71,77	7,18	16,18	15,87	15,48	1,58	33,98	332,290	1,9009	0,1865	1,8767	0,0426	120,7600	95,83	0,09583	1,95	1,94	0,07
		22	120	2	71,63	71,52	71,73	7,16	14,94	15,64	15,2	1,53	32,65	319,284	1,9017	0,1866			114,5500	92,85	0,09285	2,01		
		22	120	3	72,11	71,85	71,42	7,18	15,62	16,19	16,14	1,60	32,94	322,120	1,8275	0,1793			120,7700	96	0,096	1,87		
PZ_26/12-120°C	12,5	26	120	1	70,8	70,42	70,56	7,06	14,01	13,88	13,58	1,38	100,42	982,007	6,5512	0,6427	5,7294	0,8211	111,1800	85,98	0,08598	7,47	6,44	1,11
		26	120	2	70,73	71,39	70,81	7,10	14,14	13,88	14,45	1,42	77,48	757,677	4,9090	0,4816			117,3200	91,56	0,09156	5,26		
		26	120	3	71,85	70,98	70,89	7,12	13,87	13,21	13,47	1,35	86,64	847,253	5,7280	0,5619			109,8100	85,39	0,08539	6,58		
PZ_24/5-150°C	5	24	150	1	71	69,5	69,9	7,01	14,65	14,4	14,5	1,45	22,27	217,778	1,3925	0,1366	1,0955	0,3111	111,9	86,73	0,08673	1,58	1,23	0,36
		24	150	2	71,1	69,15	71	7,04	14,9	15	15,5	1,51	18,78	183,650	1,1219	0,1101			114,17	88,1	0,0881	1,25		
		24	150	3	70,75	70,5	70,5	7,06	15	15	14,65	1,49	12,74	124,584	0,7721	0,0757			114,08	88,36	0,08836	0,86		
PZ_22/7.5-150°C	7,5	22	150	1	71,17	71,86	72	7,17	16,33	16,1	16,01	1,61	20,29	198,416	1,1161	0,1095	1,2913	0,2239	120,13	94,49	0,09449	1,16	1,39	0,29
		22	150	2	71,39	71,27	71,17	7,13	14,96	14,7	14,9	1,49	25,67	251,027	1,5436	0,1514			111,93	88,23	0,08823	1,72		
		22	150	3	71,56	71,38	71,31	7,14	15,29	15,63	15,86	1,56	21,24	207,706	1,2142	0,1191			116,66	91,64	0,09164	1,30		
PZ_24/10-150°C	10	24	150	1	71,24	70,96	70,54	7,09	15,66	14,76	15,79	1,54	35,11	343,341	2,0463	0,2007	1,9141	0,3176	121,0400	93,68	0,09368	2,14	2,05	0,31
		24	150	2	70,12	71,01	71,94	7,10	15,2	15,84	15,71	1,56	37,28	364,561	2,1443	0,2104			118,7700	91,29	0,09129	2,30		
		24	150	3	71,01	71,37	70,37	7,09	12,15	14,96	15,15	1,41	24,35	238,119	1,5518	0,1522			119,2200	89,54	0,08954	1,70		
PZ_24/12,5-150°C	12	24	150	1	71,02	71,08	71,07	7,11	14,5	14,5	14	1,43	28,88	282,418	1,8052	0,1771	2,1989	0,4624	110,4600	78,81	0,07881	2,25	2,71	0,53
		24	150	2	71,07	71,06	71,13	7,11	14,1	14,1	14,5	1,42	43,04	420,888	2,7081	0,2657			113,1500	80,8	0,0808	3,29		
		24	150	3	71,05	71,08	71,09	7,11	14,1	14,7	14,65	1,45	33,69	329,455	2,0836	0,2044			107,9500	79,22	0,07922	2,58		
PZ_24/5-180°C	5	24	180	1	70,5	71	70,5	7,07	15,5	15,5	16,5	1,58	11,14	108,938	0,6338	0,0622	0,9925	0,3409	113,26	90,18	0,09018	0,69	1,05	0,33
		24	180	2	70,2	71	71,2	7,08	16	15,1	15,3	1,55	17,74	173,479	1,0313	0,1012			113,96	90,54	0,09054	1,12		
		24	180	3	71	71	70,5	7,08	15	15,5	17	1,58	23,12	226,090	1,3124	0,1287			119,82	95,94	0,09594	1,34		
PZ_24/7.5-180°C	7,5	24	180	1	71	71,5	71,2	7,12	15	16	15,5	1,55	24,92	243,693	1,4369	0,1410	1,5472	0,2241	105,49	82,48	0,08248	1,71	1,70	0,21
		24	180	2	71,5	72	71,5	7,17	17	17	17,2	1,71	26,89	262,957	1,3996	0,1373			118,44	92,68	0,09268	1,48		
		24	180	3	71	71,5	71	7,12	17	17,5	17	1,72	34,64	338,745	1,8051	0,1771			119,12	93,18	0,09318	1,90		
PZ_22/10-180°C	10	22	180	1	77	71	71	7,30	16	16	16	1,60	45,77	447,585	2,4947	0,2447	2,2102	0,2466	114,9600	92,74	0,09274	2,64	2,23	0,37
		22	180	2	71,5	71,5	72	7,17	16	17	16	1,63	38,22	373,753	2,0786	0,2039			118,0600	95,52	0,09552	2,13		
		22	180	3	70	66,9	70,1	6,90	19	18,5	18,5	1,87	41,62	407,002	2,0572	0,2018			130,4100	104,9	0,1049	1,92		
PZ_22/12,5-180°C	12	22	180	1	69,5	69,8	69,8	6,97	14	14	14	1,40	36,62	358,107	2,3891	0,2344	2,5858	0,5130	99,8900	80,65	0,08065	2,91	3,04	0,59
		22	180	2	70	70	70	7,00	15	14	14	1,43	49,93	488,265	3,1681	0,3108			104,3900	84,37	0,08437	3,68		

FE DE ERRATAS

Página 167.- “Observándose un máximo en la curva D2-DSC en el rango de 304°C - 315°C”,

Debe decir: **“Observándose un pequeño máximo en la curva DSC en el rango de 304°C - 315°C”,**

Página 169.- “A 573°C, el cuarzo trigonal alfa se transforma en cuarzo beta hexagonal. Esta transformación se puede observar explícitamente en la curva D2-DSC en la Figura 111 (a)”

Debe decir: **A 573°C, el cuarzo trigonal alfa se transforma en cuarzo beta hexagonal. Esta transformación se puede observar explícitamente tanto en la curva de DSC (pequeño escalón endotérmico) como en la curva D2-DSC en la Figura 112.**

Página 170.- “Todos los picos relacionados con la liberación de carbonato en la curva D2-DSC de la Figura deben aparecer como picos estrechos en el rango de temperatura de 640°C a 740°C. Varios procesos ocurren en el rango de 700°C a 900°C que son visibles en la curva D2-DSC en la Figura 112 (a)”

Debe decir: **Todos los picos relacionados con la liberación de carbonato en la curva D2-DSC de la Figura deben aparecer como picos estrechos en el rango de temperatura de 640°C a 740°C. Varios procesos ocurren en el rango de 700°C a 900°C que son visibles en la curva D2-DSC en la Figura 112.**

Página 185.-“La curva D2 – DSC a 500°C presenta la deshidroxilación de la caolinita”

Debe decir: **La curva D1 – TGA a 500°C presenta la deshidroxilación de la caolinita**

Página 186.-“**Figura 127.** Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café), M. Ceibopamba”

Debe decir: **Figura 127. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D1 – TGA (café), M. Ceibopamba**

Página 187.-**Figura 128.**Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2 – DSC (café),

Debe decir: **Figura 128.Termogramas TGA (verde), D1-TGA (azul) y D2 – DSC (café),**

Página 188.-**Figura 129.** Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Chinguilamaca

Debe decir:**Figura 129. Termogramas TGA (verde), D1-TGA (azul) y D2-DSC (café), M. Chinguilamaca**

Página 188.-“mostrando únicamente la curva para ATG y D2 – DSC.”

Debe decir: **mostrando únicamente la curva para ATG y DSC.”**

Página 189.- “**Figura 130.**Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Palanda”

Debe decir: **Figura 130. Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y DSC (café), M. Palanda**

Página 190.-“**Figura 131.** Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), M. Arena Fina”

Debe decir: **Figura 131. Termogramas TGA (verde), D1-TGA (azul) y DSC (café), M. Arena Fina.**

Página 203.-“**Figura 141.** Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), MD2 (Santa Elena)”

Debe decir: **Figura 141. Termogramas TGA (verde), D1-TGA (azul) y DSC (café), MD2 (Santa Elena).**

Página 204.: “**Figura 142.** Termogramas TGA (verde), DSC (azul) y D2-DSC (café), MD3 (Santa Elena)”

Debe decir: **Figura 142.** Termogramas TGA (verde), DSC (café), MD3 (Santa Elena)