

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

**Propuesta de optimización enfocada en la reducción de absorción de agua y mejora de la resistencia mecánica en ladrillos cerámicos artesanales, buscando cumplir lo establecido en la Norma NTE INEN 3049**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico


### **Autores:**

Erika Daniela Jácome Barros

Wilson Antonio Bravo León

### **Director:**

Sandra Catalina Peñaherrera Palacios

ORCID:  0000-0002-1054-4605

**Cuenca, Ecuador**

2024-01-23

## Resumen

El presente estudio tiene como propósito buscar la reducción de absorción de agua y mejorar la resistencia a la compresión, en ladrillos cerámicos artesanales producidos en un taller ubicado en Racar, con la finalidad de cumplir los requisitos de la norma NTE INEN 3049. Este trabajo forma parte del proyecto “Mi primera certificación INEN: Apoyo para su implementación a los talleres productores ladrilleros y tejeros cerámicos de Racar”. Se lleva a cabo en tres etapas, empezando por una caracterización de materias primas y pastas, con la que se analizan los parámetros de humedad, pH, plasticidad, granulometría, contracción, absorción de agua y porosidad. Como segunda etapa, se realiza una nueva dosificación de pastas conservando las materias primas mediante un diseño experimental de mezclas, que conduzcan a reducir la absorción de agua y mejorar la resistencia a la compresión. Finalmente, se realiza una prueba de campo con las dosificaciones de las mezclas óptimas y se evalúan los parámetros de absorción de agua, resistencia a la compresión, succión de agua, tolerancia dimensional y alabeo.

En la última etapa se consigue para los dos tipos de ladrillos Tochano y Visto, bajar la absorción y succión de agua, incrementar la resistencia mecánica, apropiada tolerancia dimensional y alabeo. En consecuencia, los dos tipos de ladrillos cumplen con lo que estipulado por la Norma INEN 3049-3, para ladrillos cerámicos no estructurales.

*Palabras clave:* mampostería, tratamiento térmico, procesos de mezcla



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

The purpose of this study is to reduce water absorption and improve the compressive strength of handmade ceramic bricks produced in a workshop located in Racar, with the intention of meeting the requirements of the NTE INEN 3049 standard. This work is part of the project "My first INEN certification: Support for its implementation in the brick and ceramic tile producing workshops of Racar". It is carried out in three stages, starting with a characterization of raw materials and pastes, with which the parameters of humidity, pH, plasticity, granulometry, shrinkage, water absorption and porosity are analyzed. As a second stage, a new dosage of pastes is carried out, conserving the raw materials by means of an experimental design of mixtures, which leads to a reduction in water absorption and an improvement in compressive strength. Finally, a pilot test is carried out with the dosage of the optimum mix and the parameters of water absorption, compressive strength, water suction, dimensional tolerance and warpage are evaluated. The results obtained for the two types of bricks, Tochano and fair-faced, are low water absorption and suction, high mechanical resistance, appropriate dimensional tolerance and warping. Consequently, the two types of bricks comply with the stipulations of INEN 3049-3, for non-structural ceramic bricks.

*Keywords:* masonry walls, heat treatment, mixing process



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Dedicatoria.....	11
Dedicatoria.....	12
Agradecimiento .....	13
Introducción.....	14
Objetivos .....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos .....	15
1. Marco teórico.....	16
1.1. Definiciones.....	16
1.1.1. Tipos de ladrilleras en el Ecuador .....	16
1.1.1.1. Artesanales .....	16
1.1.1.2. Semi artesanales .....	16
1.1.1.3. Industriales .....	16
1.1.2. Ladrillos cerámicos .....	17
1.1.3. Tipos de ladrillos.....	17
1.1.3.1. De acuerdo a la aplicación: .....	17
1.1.3.2. De acuerdo a la presencia o no de perforaciones: .....	18
1.1.4. Proceso productivo de la ladrillera en estudio.....	20
1.2. Arcillas usadas para la producción de ladrillos .....	25
1.2.1. Propiedades de las arcillas .....	27
1.2.1.1. Acomodamiento de partículas. ....	27
1.2.1.2. Compacidad .....	27
1.2.1.3. pH .....	28
1.2.1.4. Plasticidad .....	28
1.2.1.5. Humedad.....	29
1.2.1.6. Granulometría.....	29
1.2.1.7. Contracción .....	30
1.2.1.8. Absorción de agua de las arcillas cocidas .....	31

1.2.1.9. Porosidad .....	31
1.2.2. Transformaciones que ocurren durante la cocción de arcillas .....	32
1.3. Caracterización de los ladrillos .....	33
1.3.1. Absorción de agua .....	33
1.3.2. Resistencia a la compresión .....	34
1.3.3. Succión de agua .....	35
1.3.4. Tolerancia dimensional .....	35
1.3.5. Alabeo .....	36
1.4. Diseño experimental .....	37
1.4.1. Principios básicos del diseño de experimentos .....	37
1.4.2. Diseño de experimentos con mezclas .....	38
2. Metodología .....	40
2.1. Caracterización de las arcillas y pastas .....	40
2.1.1. Análisis químico .....	40
2.1.2. Análisis mineralógico racional aproximado .....	40
2.1.3. Humedad .....	41
2.1.4. pH .....	41
2.1.5. Plasticidad .....	42
2.1.6. Granulometría .....	43
2.1.7. Cocción .....	44
2.1.8. Contracción .....	44
2.1.9. Absorción de agua y porosidad .....	45
2.2. Pruebas realizadas en ladrillos .....	45
2.2.1. Absorción de agua .....	46
2.2.2. Resistencia a la compresión .....	46
2.2.3. Succión de agua .....	47
2.2.4. Tolerancia dimensional .....	47
2.2.5. Medición del alabeo .....	48
2.3. Diseño experimental .....	49
2.4. Prueba de campo .....	49
3. Resultados y Discusión .....	51
3.1. Prueba diagnóstica del producto .....	51
3.2. Caracterización de arcillas y pastas .....	55
3.2.1. Análisis químico y mineralógico racional aproximado .....	55
3.2.2. Humedad .....	57

3.2.3. pH.....	59
3.2.4. Plasticidad .....	59
3.2.5. Granulometría .....	60
3.2.6. Contracción.....	62
3.2.7. Absorción de agua y porosidad.....	63
3.3. Diseño experimental .....	64
3.3.1. Ladrillo Tochano.....	64
3.3.2. Ladrillos Visto.....	74
3.4. Prueba de campo .....	83
3.4.1. Ladrillos Tochano .....	84
3.4.2. Ladrillo Visto .....	85
Conclusiones y Recomendaciones .....	93
Conclusiones .....	93
Recomendaciones .....	95
Referencias bibliográficas .....	96
Anexos.....	102
Anexo A: Monitoreo del horno artesanal y Ciclos de cocción a escala de laboratorio. ....	102
Anexo B: Resultados de ladrillos de referencia de absorción de agua y resistencia a la compresión .....	105
Anexo C: Resultados CESEMIN del análisis químico de materia prima. ....	106
Anexo D: Ejemplo de cálculos del análisis mineralógico racional aproximado para la arcilla A1 y resultados .....	107
Anexo E: Porcentajes de humedades para tres lotes de cada tipo de ladrillo Tochano y Visto. ....	111
Anexo F: Cálculos de plasticidad. ....	112
Anexo G: Cálculos de contracción al secado, a la quema y total .....	114
Anexo H: Cálculos de absorción y espacio poroso.....	117

## Índice de figuras

Figura 1: Ladrillos de perforación horizontal .....	18
Figura 2: Ladrillos de perforación vertical .....	19
Figura 3: Ladrillos macizos. ....	19
Figura 4: Diagrama de flujo del Proceso productivo del taller en estudio. ....	20
Figura 5: Recepción de la materia prima en el acopio. ....	21
Figura 6: Preparación de la materia prima.....	21
Figura 7: Zona de dosificación .....	22
Figura 8: Tolva de alimentación de la primera trituradora de rodillos. ....	23
Figura 9: Mezcladora de tornillo sin fin .....	23
Figura 10: Formación de ladrillo en extrusora. ....	23
Figura 11: Zona de Secado.....	24
Figura 12: Horno vertical artesanal .....	25
Figura 13: Tipos de Diseño Simplex. ....	39
Figura 14: Resultados de absorción de agua para los ladrillos tipo Tochano y Visto de partida. .....	53
Figura 15: Resultados de resistencia mecánica para los ladrillos tipo Tochano y Visto de partida.....	54
Figura 16: Curva granulométrica de las materias primas .....	61
Figura 17: Curva granulométrica de las pastas.....	62
Figura 18: Distintos modelos ajustados a los datos de absorción de agua del diseño experimental para ladrillos Tochano. ....	68
Figura 19: Gráfica de contorno estimada de Absorción de agua .....	68
Figura 20: Distintos modelos ajustados a los datos de contracción del diseño experimental para ladrillo Tochano. ....	69
Figura 21: Gráfica de contorno estimada de Contracción .....	70
Figura 22: Distintos modelos ajustados a los datos de plasticidad del diseño experimental para ladrillos Tochano .....	70
Figura 23: Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Plasticidad. ....	71
Figura 24: Gráfica de superficie de la respuesta estima para la multirrespuesta.....	72
Figura 25: Gráfica de contornos de la respuesta estima para la multirrespuesta.....	72
Figura 26: Deseabilidad máxima de la multirrespuesta para la mezcla y resultado de la mezcla óptima de ladrillos Tochano .....	73
Figura 27: Mezcla óptima de ladrillos Tochano .....	74

Figura 28: Distintos modelos ajustados a los datos de absorción de agua del diseño experimental para ladrillos Visto.....	77
Figura 29: Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Absorción de agua.....	78
Figura 30: Distintos modelos ajustados a los datos de contracción del diseño experimental para ladrillos Visto .....	78
Figura 31: Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Contracción .....	79
Figura 32: Distintos modelos ajustados a los datos de plasticidad del diseño experimental para ladrillos Visto. ....	80
Figura 33: Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Plasticidad. ....	80
Figura 34: Gráfica de superficie de la respuesta estima para la multirrespuesta.....	81
Figura 35: Gráfica de contornos de la respuesta estima para la multirrespuesta. ....	81
Figura 36: Deseabilidad máxima de la multirrespuesta para la mezcla de ladrillos Visto.....	82
Figura 37: Resultado de la mezcla óptima de ladrillos Visto. ....	83
Figura 38: Gráficas de los resultados de absorción de agua para los ladrillos tipo Tochano y Visto obtenidos en la prueba de campo .....	86
Figura 39: Gráficas de los resultados de resistencia mecánica para los ladrillos tipo Tochano y Visto obtenidos en la prueba de campo.....	87
Figura 40: Gráficas de los resultados de succión de agua para los ladrillos tipo Tochano y Visto obtenidos en la prueba de campo .....	89



## Índice de tablas

Tabla 1: Valores aceptados de Absorción de agua respecto a la Norma INEN 3049 .....	34
Tabla 2: Valores aceptados de resistencia a la compresión respecto a la Norma INEN 3049. .....	34
Tabla 3: Valores de Succión de agua respecto a la Norma INEN 3049 .....	35
Tabla 4: Fórmulas teóricas representativas de minerales.....	41
Tabla 5: Resultados de los ensayos ladrillo Tochano.....	51
Tabla 6: Resultados de los ensayos ladrillo Visto. ....	52
Tabla 7: Resultados Análisis químico.....	55
Tabla 8: Análisis mineralógico racional aproximado.....	56
Tabla 9: Registro de valores de porcentajes de humedad de materias primas.....	57
Tabla 10: Porcentajes de humedad para cada Pasta.....	58
Tabla 11: Resultados de pH de las muestras .....	59
Tabla 12: Resultados plasticidad.....	59
Tabla 13: Resultados del análisis granulométrico de las materias primas.....	60
Tabla 14: Resultados del análisis granulométrico de las pastas.....	61
Tabla 15: Resultados de contracción al secado, a la quema y total.....	63
Tabla 16: Resultados de absorción de agua y porosidad.....	64
Tabla 17: Restricciones para el diseño experimental del ladrillo Tochano .....	65
Tabla 18: Ensayos de dosificación obtenida por el programa.....	65
Tabla 19: Resultados de las variables de salida obtenidos a 700°C.....	66
Tabla 20: Resultados de las variables de salida obtenidos a 750°C.....	66
Tabla 21: Resultados de las variables de salida obtenidos a 800°C.....	67
Tabla 22: Restricciones para el diseño experimental de ladrillos Visto .....	74
Tabla 23: Ensayos de dosificación obtenida por el programa.....	75
Tabla 24: Resultados de las variables de salida obtenidos a 700°C.....	75
Tabla 25: Resultados de las variables de salida obtenidos a 750°C.....	76
Tabla 26: Resultados de las variables de salida obtenidos a 800°C.....	76
Tabla 27: Resultados de los ensayos de los ladrillos de la prueba de campo para ladrillos Tochano .....	84
Tabla 28: Resultados de los ensayos de los ladrillos de la prueba de campo para ladrillos Visto.....	85
Tabla 29: Resumen de los resultados de absorción de agua .....	88
Tabla 30: Resumen de los resultados de resistencia a la compresión.....	88
Tabla 31: Resultados de tolerancia dimensional.....	89

Tabla 32: Límites de tolerancia dimensional para ladrillos Tochano .....	90
Tabla 33: Resultados de tolerancia dimensional para ladrillos Visto.....	90
Tabla 34: Límites para tolerancia dimensional para ladrillos Visto.....	91
Tabla 35: Resultados obtenidos para Alabeo .....	91

### Dedicatoria

Dedicado a mis padres y hermanos, por ser mis amigos, por educarme con valores, por ser la fuerza en cada una de mis decisiones, de mis logros, por siempre estar presentes y contar con su apoyo incondicional. A mi sobrina Sofía por ser mi nueva motivación para seguir adelante.

A mis amigos y a todas aquellas personas que fueron parte de mi formación universitaria. Principalmente a mi compañero de tesis, que fue una parte fundamental para la culminación de esta tesis, por su apoyo, por sus consejos y su compañía.

***Erika Daniela Jácome Barros.***

### Dedicatoria

Este trabajo de titulación primeramente lo dedico a Dios por haberme permitido tener salud y conocimiento para cumplir con el objetivo de obtener mi título profesional. Dedico especialmente a mis padres y hermanas por ser un pilar fundamental durante toda mi vida y que con su apoyo incansable me han permitido cumplir mis metas.

A demás, a mis compañeros con los cuales hemos compartido este periodo universitario y a mi compañera de tesis por el esfuerzo conjunto durante todo el desarrollo de esta tesis.

***Wilson Antonio Bravo León.***

### Agradecimiento

Agradecemos en gran medida a nuestra alma mater la Universidad de Cuenca, por brindarnos la oportunidad de formarnos con excelencia en nuestra profesión, así como también un extenso agradecimiento a la Facultad de Ciencias Químicas por su honorable dirección, para fomentar un espacio de digno de aprendizaje.

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a nuestra tutora de tesis Ing. Quím. Catalina Peñaherrera Palacios por su paciencia, experiencia y orientación, los cuales fueron una guía indispensable en el proceso de investigación y elaboración de nuestro trabajo de titulación.

Así mismo, queremos expresar nuestra gratitud a la directora del proyecto de vinculación del cual forma parte este trabajo, Ing. Quím. Daniela Albuja Arias. Y a todos aquellos que contribuyeron con el desarrollo de este trabajo de titulación.

De igual manera, extendemos un reconocimiento a los responsables del Taller de aplicaciones constructivas y bioclimáticas de la Facultad de arquitectura y urbanismo de la Universidad de Cuenca y del laboratorio de Ensayos Destructivos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, por brindarnos la apertura y el apoyo necesario.

Finalmente nos gustaría hacer un extensivo agradecimiento al propietario de la ladrillera y a su equipo de trabajo por permitirnos acceder al taller, por la colaboración y disposición que fueron fundamentales en todas las etapas de este trabajo.

***Con Gratitud,***

***Daniela y Antonio***

## Introducción

La provincia del Azuay tiene como sectores representativos en la producción de ladrillos cerámicos a Susudel, Sinincay y Racar, de los cuales en su mayoría fabrican con técnicas empíricas por la experiencia adquirida a través de los años. Con el afán de mejorar las técnicas de fabricación y las propiedades del producto final la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca ha desarrollado varios proyectos de servicio comunitario y el presente trabajo corresponde a uno de ellos denominado: “Mi Primera Certificación INEN: Apoyo para su implementación a los Talleres Productores Ladrilleros y Tejeros Cerámicos de Racar”.

En base a trabajos de titulación anteriores se sabe que los ladrillos producidos en el taller de estudio no cumplen con los requisitos establecidos en la norma NTE INEN 3049 – 3, para las propiedades de absorción de agua y resistencia a la compresión. El objetivo del presente trabajo es buscar la reducción de absorción de agua y mejorar la resistencia mecánica en los ladrillos cerámicos artesanales producidos en un taller semiartesanal ubicado en Racar, con el propósito cumplir los requisitos de la norma NTE INEN 3049. Las actividades se realizan en tres etapas:

En la primera etapa se elabora un diagnóstico inicial de absorción de agua y resistencia a la compresión en los ladrillos producidos actualmente, al igual de una caracterización de materias primas y pastas actuales.

En la segunda etapa se busca mejorar la dosificación de pastas que conduzcan a una reducción de la absorción de agua e incremento de la resistencia a la compresión mediante la aplicación de un diseño experimental de mezclas de tipo simplex centroide.

En la tercera etapa se ejecuta una prueba de campo en el taller, posteriormente con los ladrillos resultantes se analizan las propiedades de absorción de agua, resistencia a la compresión, succión de agua, tolerancia dimensional y alabeo, con el fin de evaluar si los resultados obtenidos son favorables con respecto a los valores iniciales y a lo estipulado en la norma INEN 3049-3.

## Objetivos

### Objetivo general

- Buscar la reducción de absorción de agua y mejorar la resistencia mecánica, en los ladrillos cerámicos artesanales producidos en el taller en estudio, ubicado en Racar, buscando cumplir los requisitos de la norma NTE INEN 3049.

### Objetivos específicos

1. Identificar y caracterizar las materias primas y pastas utilizadas en la producción de los diferentes tipos de ladrillos, realizando un diagnóstico inicial de absorción de agua y resistencia mecánica.
2. Generar una propuesta de disminución de absorción de agua y mejora de resistencia mecánica, para ladrillos cerámicos no estructurales, en función de la dosificación y/o granulometría.
3. Aplicar las mejoras obtenidas mediante la implementación de una prueba de campo en el taller.
4. Evaluar y analizar los parámetros físicos más importantes establecidos para el nuevo producto, conforme lo determinado en la norma NTE INEN 3049.

## 1. Marco teórico

### 1.1. Definiciones

En el Ecuador existen diversos emplazamientos dedicados al rubro ladrillero, existiendo alrededor de 1734 productores de ladrillos; siendo las provincias con mayores productores: Cotopaxi, Pichincha, Chimborazo, Azuay y Loja (Tenesaca Zhagui, 2019).

#### 1.1.1. Tipos de ladrilleras en el Ecuador

En el país se puede apreciar diferentes métodos de producción de ladrillos, el principal es el método artesanal que perdura hasta la actualidad, también se observa procesos semi artesanales e industriales, que han ido evolucionando a través del tiempo, con implementación de criterios técnicos y nuevas tecnologías en maquinarias y hornos, simplificando el proceso y mejorando la calidad del producto (Barranzuela Lescano, 2014).

##### 1.1.1.1. Artesanales

Este tipo de ladrilleras se caracterizan por usar herramientas manuales en el proceso, en ocasiones se labora con ganado para la mezcla de la pasta. El producto que se elabora generalmente es el ladrillo panelón o ladrillos para piso; los cuales se caracterizan por su variabilidad de una unidad a otra. Para la cocción, se emplean hornos tradicionales de leña (Barranzuela Lescano, 2014 ; Deleg Quichimbo, 2010).

##### 1.1.1.2. Semi artesanales

En estas ladrilleras se utilizan equipos a pequeña escala como molinos, mezcladoras, extrusoras, ventiladores. La característica que más resalta es, que durante la formación de los ladrillos la extrusa trabaja a bajas presiones, obteniendo ladrillos de superficie lisa. Cuentan con hornos tradicionales abiertos, tipo volcán, o en ocasiones con hornos de tiro invertido para la cocción (Barranzuela Lescano, 2014 ; Deleg Quichimbo, 2010).

##### 1.1.1.3. Industriales

Este tipo de ladrilleras cuentan con maquinarias a gran escala, garantizando uniformidad, calidad y resistencia. La cantidad de personal es menor, ya que las máquinas se encargan de dosificar, mezclar y moldear la pasta. Este proceso difiere de los dos anteriores por el empleo



de hornos industriales generalmente tipo túnel para la cocción, obteniendo un producto final uniforme (Barranzuela Lescano, 2014 ; Deleg Quichimbo, 2010).

### 1.1.2. Ladrillos cerámicos

Los ladrillos son piezas con forma de paralelepípedos, obtenidas a base de materias primas arcillosas sometidas a un tratamiento de calor a temperaturas elevadas, que presentan características finales distintas a las iniciales, como el color, textura, mayor resistencia, dimensión, entre otras (Barranzuela Lescano, 2014).

La Norma NTE INEN 3049 - 1 ( 2018) define a los ladrillos como productos cerámicos, producidos en diversos tamaños, formas y diseños de acuerdo a las funciones estructurales constructivas a desempeñar en obras como casas, edificios, industrias, pisos, entre otros.

### 1.1.3. Tipos de ladrillos

Los ladrillos se clasifican en varios tipos de acuerdo a diversos criterios:

#### 1.1.3.1. De acuerdo a la aplicación:

##### **Ladrillos Estructurales (E)**

Ladrillos que por su diseño y resistencia pueden permitir la construcción de muros que soporten cargas adicionales a su propio peso (NTE INEN 3049 - 1, 2018).

##### **Ladrillos No estructurales (NE)**

Ladrillos que por su diseño y resistencia **no** permiten la construcción de muros que soporten cargas adicionales a su propio peso (NTE INEN 3049 - 1, 2018).

##### **Ladrillos de Fachadas (F)**

Ladrillos que por sus características de tamaño, color, acabado y durabilidad, son aptos para construir fachada en ladrillo a la vista con fines arquitectónicos que pueden estar expuestos a la intemperie (NTE INEN 3049 - 1, 2018).

### 1.1.3.2. De acuerdo a la presencia o no de perforaciones:

#### Unidades de perforación horizontal (PH)

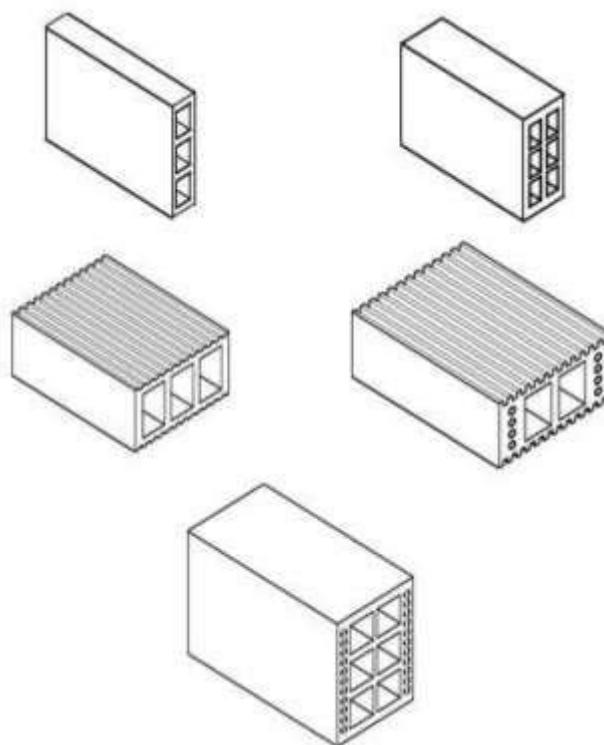
En los ladrillos de PH la cara que se asienta sobre el muro es paralela a las perforaciones del mismo, como se muestra en la Figura 1.

#### Unidades de perforación vertical (PV)

En los ladrillos de PV las perforaciones son perpendiculares a la cara que se asienta sobre el muro, como se observa en la Figura 2.

#### Unidades macizas (M)

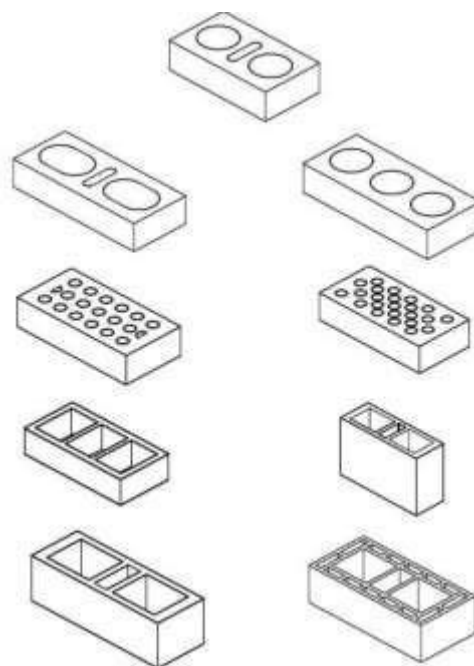
Los ladrillos macizos están conformados por un prisma rectangular, en ocasiones puede presentar perforaciones que no supera el 25% de su masa, como se observa en la Figura 3.



**Figura 1:**

*Ladrillos de perforación horizontal.*

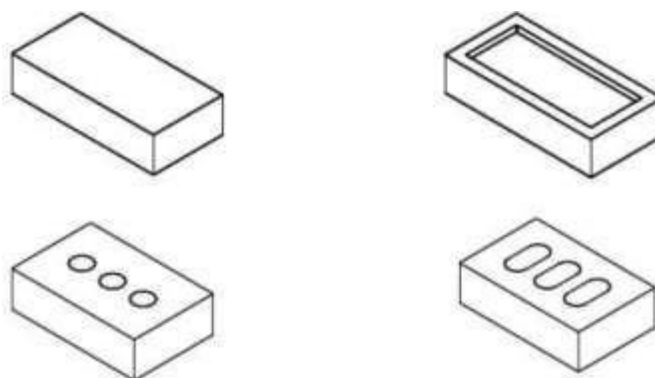
Nota. Diferentes tipos de ladrillos de perforaciones horizontales. Fuente: NTE INEN 3049 - 2 (2019).



**Figura 2:**

*Ladrillos de perforación vertical.*

Nota. Diferentes tipos de ladrillos con perforación vertical. Fuente: NTE INEN 3049 - 2 (2019)



**Figura 3:**

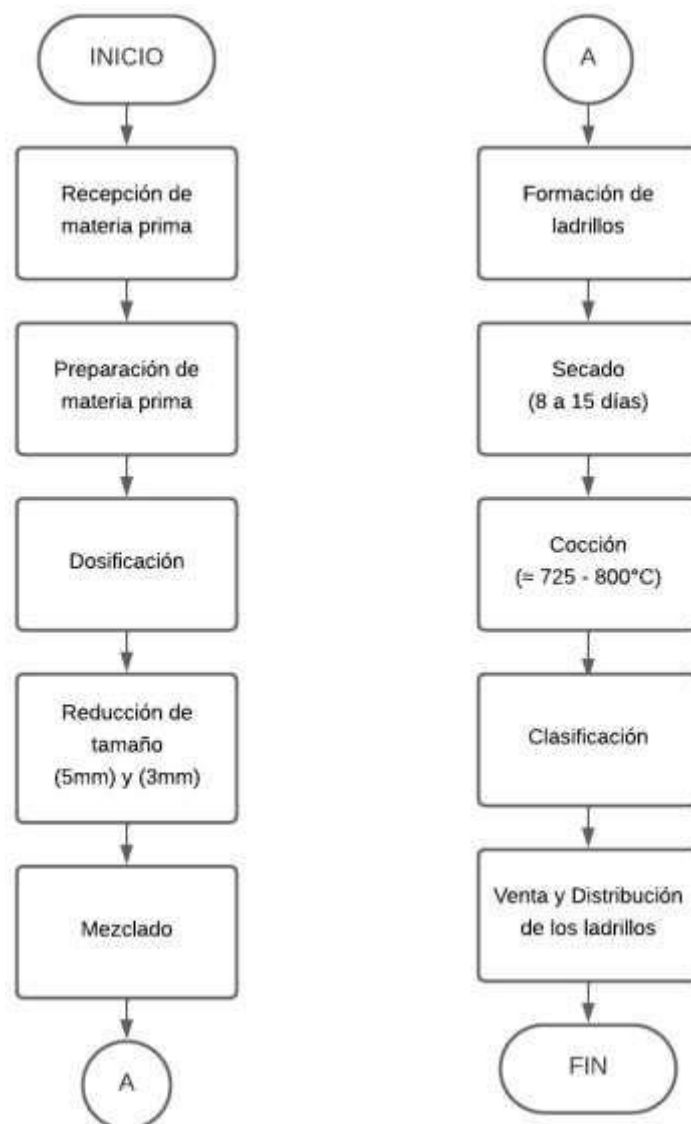
*Ladrillos macizos.*

Nota. Diferentes tipos de ladrillos macizos. Fuente: NTE INEN 3049 - 2 (2019).

#### 1.1.4. Proceso productivo de la ladrillera en estudio

En el caso de estudio, la ladrillera aplica el método semiartesanal, es decir, existen tanto procesos manuales, como procesos mecanizados para la fabricación de dos tipos de ladrillos de perforación horizontal llamados por el propietario como Tochano y Visto.

En la Figura 4 se presenta el proceso de producción:



**Figura 4:**

*Diagrama de flujo del Proceso productivo del taller en estudio.*

### 1. Recepción de materia prima

Normalmente, se abastece de material para un periodo de 8 a 15 días. Para cada materia prima se apila el contenido de algunas volquetas uno encima de otro, ver Figura 5. Durante la recepción de materia prima, en el lugar de acopio, se separan las arcillas para ladrillos Tochano y ladrillos Visto.



**Figura 5:**

*Recepción de la materia prima en el acopio.*

### 2. Preparación de materia prima

Debido al apilamiento de varias cargas de volquetas del mismo material y al permanecer a la intemperie en el lugar de acopio, la materia prima tiende a compactarse, por lo que es necesario disgregarla con la ayuda de un azadón para facilitar la carga durante la dosificación, además de remover cualquier impureza presente, como piedras o restos de materia orgánica como se observa en la Figura 6.



**Figura 6:**

*Preparación de la materia prima.*

### 3. Dosificación

En la dosificación se utilizan diferentes arcillas de acuerdo al tipo de ladrillo a producir, en el caso del ladrillo Tochano se emplean las arcillas codificadas como: A1, A3, A4 y A5, en cambio para el ladrillo Visto se emplean las arcillas codificadas como: A2, A3 y A5, las cuales provienen de sectores cercanos como: Sayausí, Cumbe, Racar y Santa Ana. Por otro lado, el agua que se agrega se obtiene de la recolección de lluvia o del río cercano. La dosificación se realiza en un espacio cubierto como se muestra en la Figura 7, se miden por carretillas las cantidades de arcillas y se agrega el agua necesaria de acuerdo con la experiencia del operario. Se deja reposar por mínimo 12 horas para que se homogenice la humedad en la mezcla antes de la producción. Normalmente se producen lotes de 5000 ladrillos.



**Figura 7:**

*Zona de dosificación.*

### 4. Reducción de tamaño y mezclado

La reducción de tamaño se ejecuta por medio de dos trituradoras de rodillos, como se muestra en la Figura 8, de distintas aperturas, la primera con una distancia entre rodillos de 5mm y la segunda con una distancia entre rodillos de 3mm, conectadas a través de una banda transportadora.

La pasta que sale de la segunda trituradora de rodillos se traslada mediante una banda transportadora hacia la mezcladora de tornillo sin fin (véase Figura 9) en esta etapa de ser necesario se agregan pequeñas cantidades de agua, según sea conveniente en base a la experiencia del operador, partiendo de una inspección manual de la plasticidad de la pasta.



**Figura 8:**

*Tolla de alimentación de la primera trituradora de rodillos.*



**Figura 9:**

*Mezcladora de tornillo sin fin.*

## 5. Formación

La pasta se traslada por una banda transportadora desde la mezcladora hacia la extrusora con bomba de vacío, la cual le confiere la forma al ladrillo, dependiendo del molde utilizado como se observa en la Figura 10.



**Figura 10:**

*Formación de ladrillo en extrusora.*

## 6. Secado

Todas las piezas de ladrillo frescas son almacenadas en espacios cubiertos adecuados y destinados al secado natural, como se observa en la Figura 11, que permiten el libre acceso del aire y el calor solar. Los ladrillos son apilados mediante un sistema FIFO (primero en ingresar, primero en salir). La duración de esta etapa depende del clima, siendo el mínimo y más común de 8 días, sin embargo, en épocas lluviosas puede extenderse hasta 15 días.



**Figura 11:**

*Zona de Secado.*

## 7. Cocción

La cocción se realiza en un horno tipo volcán, los ladrillos se acomodan en capas horizontales sucesivas y cada una en posición transversal respecto a la anterior. Se utilizan como combustibles aserrín y leña. El ciclo de quema tiene una duración aproximada de 48 horas, divididas en periodos de calentamiento, cocción y enfriamiento. En la primera etapa de calentamiento se usa leña como combustible por un periodo de tiempo aproximado de 4 horas; en la etapa de cocción se utiliza aserrín y ventilación de aire, (Véase Figura 12) hasta alcanzar la temperatura más alta, la cual se encuentra dentro del rango de 700 a 850°C, con una duración de 25 horas; finalmente se deja enfriar de manera natural por aproximadamente 20 horas.





**Figura 12:**

*Horno vertical artesanal.*

## **8. Clasificación**

Esta operación se realiza posterior al enfriamiento. Se descarga el horno y a la vez se clasifican según el tipo en Tochano y Visto, además se retiran los ladrillos que presenten fallas.

## **9. Venta y Distribución**

Los ladrillos son producidos bajo pedido en su mayoría, por lo que son cargados directamente desde el horno sin pasar por una zona de almacenamiento de producto terminado, en camiones o tráileres que los transportan a todas las regiones del Ecuador.

### **1.2. Arcillas usadas para la producción de ladrillos**

Para la producción de ladrillos cerámicos generalmente se utiliza arcillas rojas, que son un tipo de arcillas que se caracterizan por la presencia de óxido de hierro, brindan buena plasticidad, son aptas para la cocción a altas temperaturas en hornos cerámicos, y por su disponibilidad geográfica (Zea Osorio, 2005). Desde el punto de vista mineralógico las arcillas para la fabricación de ladrillos están conformadas en su mayor parte por minerales filosilicatos, además de minerales no arcillosos y materia orgánica (Maldonado Carrasco, 2003).

Los filosilicatos que se encuentran en mayor proporción en la arcilla, poseen estructura compuesta por un tetraedro de  $\text{SiO}_4$  y por un octaedro de hidróxido de aluminio o a su vez de hidróxido de magnesio dependiendo de su yacimiento (Díaz & Torrecillas, 2002).

El efecto principal de cada componente químico presente en la arcilla según SACMI (2004):

$\text{Al}_2\text{O}_3$ : material arcilloso que brinda plasticidad y refractariedad.

$\text{SiO}_2$ : material arcilloso que proporciona suficiente plasticidad, forma parte de su estructura.

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$ : son compuestos que aportan color, en gran cantidad también pueden considerarse como material fundente.

$\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ : son compuestos que controlan la contracción, ya que forman silicatos de calcio y magnesio.

$\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ : actúan como fundentes, forman fases vítreas; pueden afectar la expansión térmica de la pieza cerámica.

Según Galindo Oramas (2017) las arcillas utilizadas para la fabricación de ladrillos poseen abundancia de materiales illíticos o caoliníticos y si la relación de pesos entre  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  es superior a 1,19 indica la presencia de cuarzo libre, en forma de arena cuarcífera que no pertenece a su estructura o cuarzo procedente de feldespato. Así como también, si el porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se encuentra entre 4 a 10% tras la cocción, las pastas se considera una arcilla de cocción roja.

Los minerales arcillosos y no arcillosos presentes en la arcilla se clasifican en minerales primarios y secundarios. Los primarios hacen referencia a los que integraban las rocas ígneas manteniendo su composición a lo largo del tiempo, los residuos poco alterados más expuestos son el cuarzo, feldespatos, minerales pesados, entre otros. Mientras que los minerales secundarios se originaron a través de rocas originales que fueron afectadas por la acción de agentes químicos o físicos, por lo que se lo puede asociar a los minerales de la arcilla; así como también, con algunos minerales hidratados, carbonatados, sulfatados, entre otros. Es así, que las propiedades adquiridas por los minerales secundarios son: grano fino, amplia superficie específica, solubilidad, atacabilidad. Por el contrario, las propiedades atribuidas a los minerales primarios son: granos gruesos, menor superficie específica, mayor resistencia química, mayor estabilidad térmica, disminución en la solubilidad, entre otros (García Verduch, 1985).

Las arcillas rojas corresponden a la clasificación de arcillas secundarias, formadas a partir de la meteorización de su roca de origen, caracterizadas por su color que va del rojo al negro y en ocasiones presentando colores amarillos o grises; por lo común cuando el contenido de arenas no es alto poseen buena plasticidad, buena trabajabilidad (Salazar, s. f.), estas arcillas son aptas para la fabricación de piezas cerámicas debido a que, el contenido de sílice según Florez Arenas, (2016b) es de 50% a 60%, lo que indica contenido de cuarzo libre aportando el carácter desengrasante, que ejerce la reducción en la contracción durante el secado y cocción.

Según, Maldonado Carrasco (2003) las principales características de las arcillas son:

- Formadas por cristales muy pequeños;
- Tienen capacidad de intercambiar iones;
- Son capaces de variar su composición química interna;
- Pueden alojar moléculas en el espacio interlaminar.

Estas características tienen gran influencia en las propiedades de las arcillas para uso cerámico.

### **1.2.1. Propiedades de las arcillas**

#### **1.2.1.1. Acomodamiento de partículas.**

Las partículas de la arcilla tienen formas distintas: de placa y de varilla. Las cuales tienden a acomodarse, asentarse, apilarse o resbalar entre ellas siguiendo una orientación preferida; las partículas en forma de placas tienden a apilarse una sobre otra (paralelamente), mientras que las de forma de varillas se agrupan unas a lado de otras (perpendicularmente). Algunas propiedades que cambian según su ordenamiento son: permeabilidad diferencial, contracción en el secado, resistencia en fresco, contracción en la cochura, resistencia tras la cochura (Singer & Singer, 1971).

#### **1.2.1.2. Compacidad**

Es una propiedad importante, ya que tiene una fuerte influencia en todas las etapas en las que se involucra la pieza cerámica. Antes de la cocción, mientras mayor sea la compacidad mejor resistencia mecánica tendrá la pieza cruda, menor permeabilidad, se mantendrá libre de roturas durante todo el proceso de secado y cocción. Después de la cocción, la compacidad

actúa en el tamaño, la absorción de agua, y la resistencia mecánica de la pieza cocida (Picón Sibri, 2022).

La compacidad o compactibilidad refleja el comportamiento de la pieza durante el proceso cerámico, además determina una relación con las afecciones sobre las propiedades físicas y mecánicas de la pieza cocida (Corredor Méndez, 2020).

Es definida como la relación existente entre el volumen ocupado por el sólido, y el volumen del producto moldeado o volumen total. Los factores que influyen en la compacidad son según SACMI (2004):

- Forma de las partículas;
- Tamaño de las partículas;
- Características de los aglomerados;
- Porcentaje de agua.

#### **1.2.1.3. pH**

El pH es una propiedad química que representa una medida directa de acidez o alcalinidad de una solución acuosa. Se define como el logaritmo negativo de protones ( $H^+$ ) activos en una solución (Osorio, 2012).

El pH influye sobre la plasticidad, de manera que, si en el extremo de cada serie de las partículas de arcilla se encuentra un ion hidrógeno este es floculante mientras que si se encuentra el ion hidroxilo es un defloculante, por lo tanto, muchas arcillas rojas comúnmente utilizadas para ladrillo, arcillas grasas o arcillas plásticas presentan acidez con  $pH < 7,0$  y un rango óptimo que varía en un intervalo de  $pH 6$  a  $8,5$ . En su lugar, arcillas ricas en caolinita usadas en alfarería, presentan alcalinidad y un  $pH > 7,0$  y un rango óptimo de  $pH 7,3$  a  $10,5$  (Singer & Singer, 1971).

#### **1.2.1.4. Plasticidad**

El término plasticidad en las arcillas hace referencia al hecho de que al absorber una determinada cantidad de agua adquiere la capacidad de deformarse sin rotura al ejercer presión sobre ella, manteniendo la forma al suprimir la presión (Barranzuela Lescano, 2014), por lo tanto el termino plástico hace referencia al estado en que se encuentran, en relación directa con la cantidad de agua (Singer & Singer, 1971).

Aunque no existe una clasificación exacta debido a la complejidad de esta propiedad, las arcillas pueden clasificarse según su plasticidad en grasas o magras.

Las arcillas grasas, poseen alta plasticidad inclusive a pequeñas humedades, debido a que se encuentran constituidas de una gran concentración de minerales arcillosos y baja concentración de arenas silíceas, dándole la característica de ser untuosa al tacto, ser fácilmente moldeable. Las arcillas magras, por su parte son aquellas que poseen baja plasticidad, constituidas por minerales de mayor tamaño de partícula, son quebradizas y arenosas (Zea Osorio, 2005).

La plasticidad se determina mediante el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad; el límite líquido es la cantidad de agua que contiene el material en el momento que pierde la fluidez de un líquido denso; el límite plástico es el menor contenido de agua para poder moldear la arcilla y el índice de plasticidad representa el rango del porcentaje de humedad en cual la arcilla muestra un comportamiento plástico, a mayor índice de plasticidad indica que el material presenta mayor contenido de mineral arcillosos y presenta un rango más amplio para trabajar, en cambio, a un menor índice de plasticidad es menos arcilloso el mineral y es más susceptible a cambios de consistencia cuando se varía la humedad (Santos Amado et al., 2011).

#### **1.2.1.5. Humedad**

La humedad es la relación entre la masa de agua contenida por unidad de masa de las partículas sólidas; este factor es clave en el comportamiento de las arcillas porque puede influir en algunas propiedades físicas como: la densidad aparente, espacio poroso, plasticidad, contracción, entre otros (Tenesaca Zhagui, 2019).

En la fabricación de ladrillos es esencial que la arcilla se mezcle con un nivel de humedad correcto, por lo que, al agregar agua durante la dosificación se debe tomar en cuenta que el clima y/o las condiciones de almacenamiento húmedos o secos pueden afectar la humedad de la arcilla, por lo tanto estos niveles deben controlarse constantemente para realizar ajustes en la cantidad de agua del proceso (Castro Lopes, 2021).

#### **1.2.1.6. Granulometría**

La granulometría se fundamenta en el tamaño de partícula, el material arenoso o desengrasante posee diámetros de partícula igual o mayor a 2mm, y todo por debajo de este

tamaño de partícula son materiales finos correspondientes a limos y arcillas (Santos Amado et al., 2011).

La granulometría está relacionada con las propiedades de compacidad y plasticidad en la arcilla cruda. La compacidad se ve afectada por el contenido de partículas finas y gruesas presentes, por lo que sí existe una proporción adecuada contribuyen a la compactación eficiente de la arcilla (Barrachina Albert, 2011). La plasticidad tiende a ser mayor con un contenido significativo de partículas finas, por otro lado, la presencia excesiva de partículas gruesas puede reducir la plasticidad, sin embargo, una cantidad moderada puede mejorar la resistencia del ladrillo (Benites Zapata, 2017).

La granulometría también juega un papel importante en la absorción, ya que, cuando se tiene tamaño de partícula grandes estas tendrán menor área superficial disponible, menores lugares donde el agua puede ser absorbida, por ende, tendrá una menor absorción de agua. Mientras que, las partículas de tamaño inferior poseen un área superficial mayor significando una mayor absorción de agua, en efecto los ladrillos fabricados a partir de arcillas de una combinación equilibrada de partículas con diámetros pequeños y grandes tienden a disminuir su absorción de agua (Vásquez Montenegro, 2016).

#### **1.2.1.7. Contracción**

Es una propiedad que usa para determinar en parte el comportamiento de la arcilla durante el secado y la cocción de la misma.

Existen dos tipos de contracción que se llevan a cabo durante el proceso, la contracción al secado y la contracción a la quema (Barranzuela Lescano, 2014).

Contracción al secado: Para poder moldear la pieza la arcilla debe estar en estado plástico por lo que requiere que se agregue agua. Durante el secado pierde esta cantidad de agua, lo que produce una disminución de las dimensiones de la pieza, pudiendo presentar grietas o un excesivo encogimiento, dependiendo de su naturaleza o del contenido de materia orgánica y humedad que se añadió.

La contracción al secado constituye un inconveniente en la industria ladrillera, ya que son las diferencias de contracción las que dan lugar a la rotura de las piezas en el secado, debido a que la contracción al secado es proporcional al contenido de agua presente y a la presión ejercida en la formación; por lo que se puede presentar distintos porcentajes de contracción para una misma arcilla con diferente porcentaje de humedad o granulometría variable, si

presenta una fina granulometría, mayor será la contracción para una determinada humedad (Bocanegra Bernal, 2021).

Contracción a la quema: Se produce en inferior porcentaje que la contracción al secado, a causa de los cambios que se dan en las arcillas durante la cocción, debido a que ocurren varias transformaciones como reordenamiento de moléculas, nucleación de poros, densificación; a media que la temperatura aumenta el material absorbe energía en forma de calor, generando cambios volumétricos, tal como la contracción, la cual es mayor mientras más alta sea la temperatura (Urbina Tirado, 2015).

La contracción experimentada en el secado y en la cocción es conocida como contracción total, para arcillas utilizadas en fabricación de ladrillos el rango ideal es de 1% a 6%, ya que trabajar con arcillas que presenten contracciones superiores, sugiere un riesgo de fisura o deformación (Zea Osorio, 2005).

#### **1.2.1.8. Absorción de agua de las arcillas cocidas**

La absorción de agua en las arcillas cocidas se determina mediante el incremento de la masa de una pieza seca tras la inmersión en agua durante un tiempo hasta su saturación; y su valor es expresado en porcentaje (Bautista Gallegos & Roldan Banegas, 2022).

Esta propiedad de las arcillas intervine en las características del producto final, una alta absorción presente provoca una elevada permeabilidad, baja consistencia física, decoloración en la pieza, afecta la durabilidad, entre otras (Afanador García et al., 2013).

La absorción está relacionada con la porosidad posterior a la cocción, y va a depender del grado de sinterización y vitrificación alcanzado durante este proceso, los cuales tienen relación con el tamaño de partícula del material y con la compacidad o acomodamiento de las partículas durante su formación (Tenesaca Zhagui, 2019).

#### **1.2.1.9. Porosidad**

Los materiales frecuentemente contienen porosidad, ya sea por diseño o por las limitaciones del proceso. En el caso de los materiales cerámicos, la porosidad se produce por desgasificaciones debidas principalmente a la deshidroxilación de los minerales de la arcilla y una sinterización incompleta con la formación de fase vítrea parcial entre los bordes de grano; el porcentaje de poros estarán relacionados con el tamaño de partícula y su grado de empaquetamiento (Sandoval & Ibañez, 2000).

En las piezas cerámicas la porosidad se mide mediante la determinación de la absorción de agua, la cantidad de agua que absorbe un ladrillo afecta directamente a la durabilidad y robustez, ya que, los poros funcionan como capilares; los ladrillos deben ser porosos, pero no en exceso, los valores más altos de absorción de agua causan expansiones, eflorescencias y expansiones seguidas de contracciones, se provocan agrietamientos y fisuras (Ullauri et al., 2022). Según Singer & Singer (1971), la densidad de la pieza aumenta a medida que la porosidad disminuye, mejorando la resistencia mecánica.

Según Kömmerling (2011) la porosidad de algunos materiales usados en la construcción son:

- Ladrillos huecos 45%;
- Ladrillos comunes de media cal 45%;
- Ladrillos comunes de cal 36%;
- Ladrillos de máquina 32.7%;
- Tejas comunes 29%.

### 1.2.2. Transformaciones que ocurren durante la cocción de arcillas

La cocción está constituida por las etapas de: calentamiento, cocción y enfriamiento, donde se someten los ladrillos secos a condiciones de alta temperatura en tiempos prolongados, con el propósito de conseguir propiedades físicas, mecánicas y de apariencia finales distintas a las iniciales (Barranzuela Lescano, 2014).

El ciclo de cocción del horno depende de factores como: tipo de horno, combustible, acomodamiento de los ladrillos en el horno, temperatura máxima a alcanzar, el tiempo de quema a temperatura máxima, granulometría y composición química y mineralógica de la arcilla (Rabilero Bouza, 2019). En las distintas etapas del ciclo de cocción se desarrollan transformaciones dependiendo de las temperaturas que alcanzan. Como menciona Tenesaca Zhagui (2019):

1. Se elimina el agua de hidratación de la arcilla a 100°C.
2. La oxidación de materia orgánica tiene lugar a temperaturas de 200 °C a 500°C.
3. La pérdida de los grupos OH<sup>-</sup> de la estructura cristalina llamada etapa de deshidroxilación se da entre 450°C a 600°C.
4. A 573°C se produce la inversión del cuarzo de: baja temperatura  $\alpha \rightarrow$  alta temperatura  $\beta$ .



5. A 800°C tiene lugar la descomposición del carbonato de calcio, causando liberación  $\text{CO}_2$ .
6. De 800°C a 900°C presenta una sinterización rápida, causada por la descomposición del  $\text{CaO}$ , el cual produce una contracción rápida y una reducción de poros.

### 1.3. Caracterización de los ladrillos

Es importante conocer las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos, ya que permiten determinar la calidad del ladrillo tanto para su resistencia como su durabilidad. Se determinan mediante un control de calidad con ensayos de carácter destructivo y no destructivo aplicados a los ladrillos.

Las propiedades físicas como la absorción de agua y la succión de agua de los ladrillos tienen relación con el material utilizado en su producción (Huamani Mollo & Solis Guerra, 2020); mientras que las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión reflejan el comportamiento ante la presencia de fuerzas extremas aplicadas, ya que soportan tanto cargas verticales como horizontales, lo que puede generar fracturas en los ladrillos aumentando la vulnerabilidad de sus ocupantes (Afanador García et al., 2013).

#### 1.3.1. Absorción de agua

La absorción es la “capacidad de un material de succionar y contener agua en los poros existentes dentro de su propia masa”. Los valores de absorción son un indicador del grado de cocción y de durabilidad. También es un factor que ayuda a la clasificación del producto final (NTE INEN 3049 - 1, 2018).

La absorción es una propiedad muy importante en los materiales de construcción ya que puede predecir el alcance, el uso y durabilidad del mismo, basado en el nivel de absorción que presente. Existen ciertos límites para la absorción óptima de agua de los ladrillos, estos estándares se establecen en función de su tipo, finalidad y teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento adicionales de la estructura. Un ladrillo cerámico de alta calidad tiene una tasa de absorción de agua de 6% al 14% (Afanador García et al., 2013).

La absorción de agua presenta una relación inversamente proporcional con la resistencia mecánica, ya que una baja absorción de agua aumenta la resistencia mecánica del ladrillo. Por el contrario, la porosidad es directamente proporcional a la absorción de agua, por cuanto mayor sea el volumen de huecos en el ladrillo o mayormente poroso, más agua absorberá y

disminuye su capacidad de soportar una carga, por lo tanto, afecta a la resistencia mecánica (Optolov, s. f.).

La absorción de agua no debe ser inferior al 6%, por lo que, un número insuficiente de poros reducirá la adherencia con el mortero y su rendimiento térmico. (Optolov, s. f.). Los valores de absorción de agua de acuerdo a la normativa vigente para ladrillos estructurales y ladrillos no estructurales se observan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Valores aceptados de Absorción de agua respecto a la Norma INEN 3049.

TIPO	Promedio 5 unidades (%)	Unidad (%)
Estructurales	13	16
No estructurales	17	20

Nota. <sup>a</sup>(NTE INEN 3049 - 2, 2019). <sup>b</sup>(NTE INEN 3049 - 3, 2019)

### 1.3.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la “capacidad que tiene una pieza de soportar carga perpendicular al plano de apoyo y distribuida homogéneamente sobre su plano de carga. Se expresa en pascales (Pa)” (NTE INEN 3049 - 1, 2018).

La resistencia a la compresión de ladrillos, se usa como control de calidad de su elaboración, dosificación de materias primas, temperatura y tiempo de cocción (Afanador García et al., 2013), según la normativa vigente los valores de resistencia a la compresión para ladrillos estructurales y ladrillos no estructurales se observa en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Valores aceptados de resistencia a la compresión respecto a la Norma INEN 3049.

Unidades para muros de mampostería reforzada y parcialmente reforzada, mampostería de cavidad reforzada, mampostería no reforzada y otras.		
Tipo	Resistencia mínima a la compresión MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Promedio de 5 unidades	Individual
Estructurales	5,00 (50)	3,50 (35)
No estructurales	3,00 (30)	2,00 (20)

Nota. <sup>a</sup>(NTE INEN 3049 - 2, 2019). <sup>b</sup>(NTE INEN 3049 - 3, 2019).

### 1.3.3. Succión de agua

La succión es una propiedad que influye en la adherencia entre el ladrillo y el mortero. Es una medida de la velocidad de succión del agua de un ladrillo cocido y seco, durante un minuto de exposición (NTE INEN 3049 - 1, 2018).

Para entender de mejor manera la succión, las agrupaciones españolas ANFAPA (Asociación de Fabricantes de Morteros) y SATE (Sistema de Aislamiento Térmico Exterior), indican que la interacción ladrillo/mortero se debe a un proceso físico mecánico donde el mortero en estado plástico es aplicado sobre las piezas facilitando que el cemento penetre en los poros del ladrillo y al formarse las agujas del cemento hidratado se completa el fraguado, donde se generan enlaces físicos entre el mortero y el ladrillo colocado.

Se pueden presentar ladrillos con bajo nivel de succión y otros con un alto nivel de succión, por lo tanto, se puede considerar un punto medio de succión para que se genere un anclaje mecánico correcto sin dañar el mortero ni el ladrillo (Asociación nacional de fabricantes de morteros y SATE, 2021b). En el caso que se presente una baja succión, la cual puede llegar hasta valores de  $0,01 \text{ g/cm}^2 \text{ min}$ , el ladrillo apenas succiona la lechada, por tanto, disminuye el anclaje o adherencia y pueden llegar a desprenderse las piezas. Por otro lado, sí existe una succión alta, con valores superiores a  $0,10 \text{ g/cm}^2 \text{ min}$ , se debe contemplar la posibilidad de deshidratación del mortero (Asociación nacional de fabricantes de morteros y SATE, 2021a), por ello, en la Tabla 3 se observa los tiempos recomendados de humedecimiento previo dependiendo de la succión de los ladrillos.

**Tabla 3:** Valores de Succión de agua respecto a la Norma INEN 3049.

Succión $\text{g/cm}^2/\text{min}$	Tiempo recomendado de humedecimiento previo (min)
<0,10	ninguno
<0,15	0,5 a 1,0
<0,25	3 a 5

Nota. (NTE INEN 3049 - 2, 2019).

### 1.3.4. Tolerancia dimensional

Para la fabricación de diferentes piezas se considera como un factor importante la tolerancia dimensional, ya que no se puede tener una medida exacta. La tolerancia en general es la

variación que se puede considerar, esta variación se obtiene a partir de la diferencia entre el límite máximo y el límite mínimo de una dimensión específica (IMH Campus, s. f.).

Para considerarse ladrillos estructurales, la diferencia entre la dimensión declarada por el fabricante y el promedio de dimensiones reales, no puede superar al valor Promedio (D), así como también, la diferencia entre el máximo valor y el mínimo valor del grupo de muestras, no debe superar al Recorrido (R) NTE INEN 3049 - 2 (2019).

Así mismo, para considerase ladrillos no estructurales la normativa establece la tolerancia para ladrillos cerámicos “para todas las formas y tamaños que se fabriquen, las dimensiones exteriores de las unidades de cualquier tipo o clase pueden variar  $\pm 3$  % de las medidas nominales especificadas” (NTE INEN 3049 - 3, 2019).

### **1.3.5. Alabeo**

Es un factor que debe ser considerado, por lo que si se presenta un alto rango de alabeo existe la posibilidad de presentar fallas tanto de tracción por flexión de la unidad, como también se puede producir una baja adherencia con el mortero (Seminario Colán, 2014).

El alabeo, es un parámetro que cuantifica la deformación o curvatura de la superficie de contacto en un ladrillo, brinda una noción de la calidad y seguridad del producto, dado que una excesiva curvatura ya sea cóncava o convexa impide una adecuada instalación en construcciones.

En la norma se menciona que para ladrillos estructurales “las caras y aristas de las unidades de mampostería estructural, no se pueden desviar del plano o línea respectivamente en más de un 1% de su dimensión nominal” (NTE INEN 3049 - 2, 2019).

Así mismo, para ladrillos no estructurales se considera las

Tolerancias de distorsión de las caras o aristas de unidades individuales, medidas en relación con una superficie plana o con una línea recta, respectivamente, no deben exceder  $\pm 2$  % de la dimensión de la cara o arista en la que se mide la distorsión (NTE INEN 3049 - 3, 2019).

#### 1.4. Diseño experimental

Para la obtención de información mediante el diseño estadístico de experimentos, existen dos maneras principales: la primera consiste en el monitoreo estadístico por medio de herramientas que conducen a mejorarlo a partir de señales útiles, mientras que la segunda se basa en la ejecución de experimentos mediante variaciones al proceso estratégicamente para provocar esas señales que permitan mejorarlo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

El diseño de experimento se puede definir como un conjunto de técnicas para manipular el proceso, mediante pruebas planificadas estratégicamente de modo que proporcione información útil para su mejora (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Dicho de otra forma, se define como una secuencia de pruebas que producen cambios intencionados en las variables de entrada de un proceso, para analizar los cambios ocurridos en las variables de salida. Por lo tanto, el diseño experimental es la serie de pasos planeados para realizar experimentos que aseguren un resultado válido y objetivo con datos coherentes que permitan un análisis e inferencia correcta del problema (Gonzalez Casique, 2019); también tiene por objetivo generar conocimiento con la mayor información, eficacia y bajo costo (Fernández Bao, 2020).

##### 1.4.1. Principios básicos del diseño de experimentos

El diseño de experimentos con lleva una planificación, para que esta sea correcta se debe tener en cuenta un enfoque científico aplicando los principios básicos: aleatorización, repetición y bloqueo, que tienen como objetivo validar el análisis proporcionando datos verídicos que respondan a la problemática planteada.

**Aleatorización:** está basado en que el orden de corridas sea aleatorio para los experimentos, lo cual favorece la probabilidad de que los errores en la medición de las variables no controlables no sean dependientes entre sí, evitando el sesgo del experimento (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). No obstante, se debe tener presente que cuando en los diseños aleatorizados existe una dependencia positiva entre observaciones estos presentan menor eficiencia que los diseños sistemáticos (Fernández Bao, 2020).

**Repetición:** consiste en valorar más de una vez un tratamiento, con el objetivo de que el investigador posea una estimación precisa tanto del error como del parámetro a analizar (Gonzalez Casique, 2019). Permiten diferenciar si la variabilidad total de los datos corresponde al error aleatorio y/o a los factores (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

**Bloqueo:** Consiste en bloquear o anular los factores que afectan la respuesta observada, con el fin, de obtener de cada bloque conjuntos de datos más homogéneos que el conjunto total de datos. Para ello, se usan estrategias de operación que facilitan el bloqueo de factores (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Este principio, tiene el propósito de mejorar la precisión con la que se comparan los factores y con ello disminuir la variabilidad generada por las alteraciones de factores que no son de interés (Gonzalez Casique, 2019).

#### 1.4.2. Diseño de experimentos con mezclas

En el diseño de mezclas, los factores de trabajo dependen de las proporciones de los componentes de la mezcla, por ende, las respuestas optimizadas se encuentran en función de las proporciones de los componentes con respecto al 100% y no de la cantidad individual de cada componente. La característica común de este tipo de diseño es que la proporción de cada componente no puede variar de manera independiente ya que cada componente está condenado a la suma fija o constante de todos los componentes (100%) (Salamanca et al., 2015).

Según García León (2018), los objetivos generales que se esperan lograr con el diseño de mezclas son los siguientes:

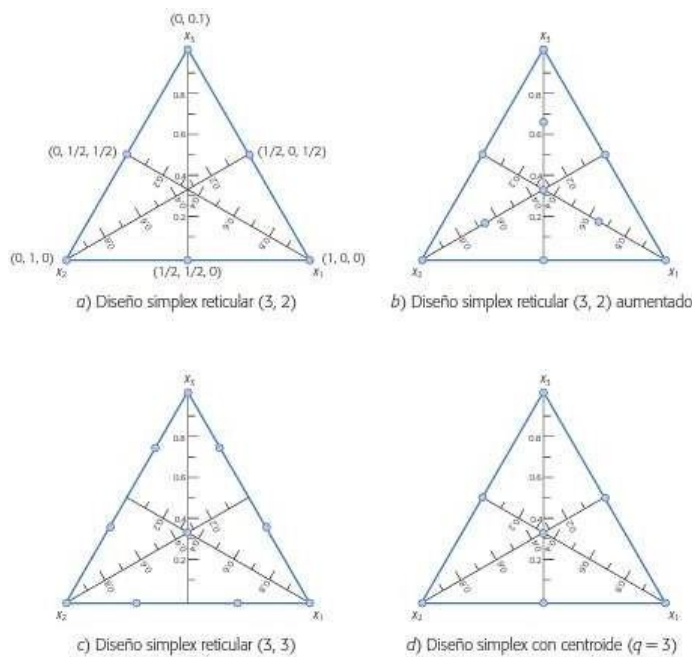
1. Entender cómo y por qué los componentes de la mezcla se comportan de una manera específica.
2. Determinar la composición (es) de la mezcla donde la respuesta se encuentra cerca de un máximo, mínimo o un valor deseable.
3. Determinar la composición (es) de la mezcla, que se encuentra en un valor óptimo con el mínimo valor de error.
4. Determinar la composición (es) de la mezcla donde los efectos de las variables no controlables, como temperatura o humedad son mínimas.
5. Encontrar un modelo matemático que intuya el comportamiento del sistema y sirva para ensayos de optimización en un futuro.

Un diseño de mezclas es un experimento especial donde la respuesta depende únicamente de la proporción de cada factor, en este tipo de diseño los factores son componentes o ingredientes que componen una mezcla (Napolitano, s. f.). Un diseño de mezclas consiste en realizar una serie de experimentos en los que se prueben combinaciones específicas; si se supone que se tiene una cantidad  $q$  de ingredientes donde se expresan las proporciones en las que intervienen los componentes de la mezcla como:  $x^1, x^2, x^3, \dots, x^n$ , es indispensable que

se satisfagan dos restricciones  $0 \leq x_i \leq 100$  en cada componente  $i$ , como se expresa a continuación:

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n = 100$$

Las restricciones indican que la suma de los componentes de una mezcla debe ser el 100%, es decir, que los componentes no son independientes entre sí, y que sus proporciones van a variar entre 0 y 100 (Ortega-Pérez et al., 2015).



**Figura 13:**

*Tipos de Diseño Simplex.*

Nota. Fuente: (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

Los modelos estadísticos básicos en el diseño de experimentos por mezclas de componentes son: simplex – reticular o lattice: todas las posibles combinaciones de componentes o mezclas forman parte de los puntos del diseño, es decir, se componen por puntos en la frontera; y simplex – centroide: se aplica comúnmente para pocos componentes, los puntos son definidos de la siguiente manera, cada dos vértices del simplex se encuentran definidos en todos los puntos medios de las aristas; cada tres vértices del simplex se definen en los centroides de cada cara definida con el propósito de conseguir el centroide global (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008), como se muestra en la Figura 13.

## 2. Metodología

### 2.1. Caracterización de las arcillas y pastas

#### Muestreo de las arcillas y pastas

Se realizó un muestreo en zigzag, el cual es una combinación entre el muestreo sistemático y el muestreo aleatorio.

El muestreo de materias primas se realizó en un periodo de un mes (marzo – abril 2023), constó de 10 submuestras para la homogenización y cuarteo necesario hasta la obtención de 1kg de muestra representativa **que sirvió para todos los análisis de caracterización.**

El muestreo de pastas se realizó a partir de tres lotes diferentes durante la producción (mayo -junio 2023).

Los etiquetados de las muestras se realizaron de la siguiente manera:

- Fecha del muestreo.
- Condición climática presente: sol, sol intenso, lluvia, lluvia intensa.
- Código Arcillas: A1, A2, A3, A4, A5
- Código Pastas: pasta de ladrillo Tochano (Pasta Tochano), pasta de ladrillo Visto (Pasta Visto).
- Responsable del muestreo.

#### 2.1.1. Análisis químico

El análisis químico es un análisis cuantitativo importante a evaluar, por la información relevante que proporciona sobre el porcentaje de óxidos existentes en su composición. Este análisis en específico se realiza por el método de extracción ácida, fusión con hidróxidos, espectroscopia de absorción atómica técnica a la llama, en el laboratorio CESEMIN.

#### 2.1.2. Análisis mineralógico racional aproximado

De los resultados obtenidos en el análisis químico, expresados como óxidos, se calcularon en cada caso los porcentajes de las especies minerales atribuibles a cada elemento, empezando por los porcentajes de feldspatos, porcentaje de sustancia arcillosa asumida como caolinita y porcentaje de sílice libre (Véase Tabla 4) (Bernal et al., 2003).



**Tabla 4:** Fórmulas teóricas representativas de minerales.

Mineral	Fórmula	PM (g/mol)
<b>Feldespatos de potasio (Ortoclasa)</b>	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	556,48
<b>Feldespatos de sodio (Albita)</b>	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	524,48
<b>Caolinita</b>	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	258,16

Nota. Adaptado de (Bernal et al., 2003).

### 2.1.3. Humedad

La determinación de la humedad porcentual se realizó a partir del muestreo con el fin de observar si existe variabilidad en el porcentaje de humedad de la misma por: condiciones ambientales, stock de materiales y producción. El equipo utilizado para este método fue la balanza analizadora de humedad modelo WBA-100M, este equipo funciona en base al principio termogravimétrico.

Procedimiento:

1. Se homogenizó la muestra.
2. Se colocó una cantidad de 2 a 3 gramos en el equipo.
3. Finalmente, se esperó que el equipo consiga peso constante y se refleje la humedad porcentual.

### 2.1.4. pH

Para medir el pH de las muestras de arcilla se utilizó el potenciómetro marca Sper Scientific modelo 860033 – Benchtop Water Quality Meter y se siguieron los pasos descritos a continuación recomendados por Singer & Singer (1971):

1. Se determinó la humedad de la muestra.
2. Se pesó 20g netos de la muestra que pase por tamiz malla N°20 serie ASTM, y se los colocaron sobre una placa de vidrio.
3. Se agregó sobre la muestra, lentamente y con un constante movimiento, 20ml de agua destilada, se homogenizó con ayuda de una espátula hasta obtener una pasta con superficie clara y brillante.

4. Se continuó adicionando más agua y se mezcló hasta obtener una pasta demasiado blanda como para permanecer sobre la placa de vidrio.
5. Se trasvasó la muestra a un vaso de precipitación de 100ml, con ayuda del goteo de agua de una pipeta, con el objetivo de dejar sin residuos la placa de vidrio, luego se completó con agua destilada hasta un volumen de 50ml.
6. Se agitó mediante una varilla de vidrio hasta que esté uniformemente mezclada y se procedió a determinar el valor del pH en el potenciómetro.

### **2.1.5. Plasticidad**

Para su cuantificación, se realizó mediante el método de Atterberg, el cual permite definir los límites correspondientes entre los estados que puede presentar una arcilla: líquido, plástico o sólido.

#### **Límite Líquido**

1. Se colocó en una cápsula 150 a 200g de muestra, que haya pasado por el tamiz N°40 serie ASTM.
2. Se agregó agua, revolviendo con una espátula hasta conseguir homogeneidad.
3. Se colocó la cuchara de Casagrande en una superficie horizontal, firme y plana.
4. Se agregó en el centro de la cuchara una porción de material y se moldeó hasta conseguir una profundidad de 10mm en la parte más profunda.
5. Con el acanalador se dividió la muestra a lo largo del eje de simetría de la cuchara formando una ranura.
6. Se dejó caer la cuchara a razón de máximo 2 golpes por minuto, hasta que los taludes se junten una distancia de 13mm.
7. Se realizó las determinaciones por triplicado en los siguientes rangos: 25 a 35 golpes, 20 a 30 golpes y entre 15 a 25 golpes. Aumentando la cantidad de agua con el fin de acrecentar la humedad, disminuyendo el número de golpes. Entre cada rango debe existir una diferencia de mínimo 5 golpes.
8. Se registró el número de golpes y se tomó aproximadamente 6 gramos de la parte de unión de los taludes y se determinó su humedad.

### Límite Plástico

1. Se colocó en una cápsula 100 gramos de muestra que haya pasado por el tamiz N°40 serie ASTM.
2. Se agregó agua y se homogenizó con una espátula.
3. Se tomó entre 1,5 a 3 gramos de la masa y se moldeó hasta obtener una forma elipsoidal.
4. Se enrolló la muestra con la palma de la mano o los dedos hasta conseguir pequeños cilindros, también se puede realizar sobre una superficie plana como una placa de vidrio.
5. Se enrolló hasta conseguir un diámetro de 3,2mm en máximo 2 minutos, hasta que se observen fisuras a lo largo de los cilindros. Caso contrario cambiar de muestra.
6. Por último, se determinó la humedad de los cilindros fisurados por triplicado.

### Índice de plasticidad

El índice de plasticidad es la diferencia del límite líquido y el límite plástico.

#### 2.1.6. Granulometría

Se utilizó el método húmedo - seco, el cual es recomendado por aportar valores más reales por el tipo de materia prima.

El proceso que se utilizó para la medición de este parámetro se basó en la norma ASTM C 117, (1995):

1. Se coloca la muestra de ensayo sobre el tamiz más fino de la batería de tamices.
2. Se adiciona suficiente agua para cubrir la muestra, sin ningún detergente o agente dispersante. Se agita manualmente con suficiente vigor y se deja que decante y pase.
3. Se adiciona una segunda carga de agua a la muestra, se agita y decanta como antes. Se repite esta operación hasta que el agua que pase a través del tamiz sea clara.
4. Se regresa el material retenido a un recipiente echando agua para limpiar la muestra lavada. Se seca el agregado lavado hasta masa constante a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , y se determina la masa de la muestra.
5. Se coloca la muestra seca en el tamiz superior de la batería de tamices ASTM.

6. Se agita manual o mediante un agitador mecánico durante 15 minutos, transcurrido este tiempo se apaga el tamizador, se deja reposar la muestra por al menos 5 minutos. Luego se determina la masa del material retenido en cada tamiz.
7. Se calcula el porcentaje de material retenido en cada uno. El material que pasó por el tamiz más fino durante el deslamado se lo reporta junto con lo del ciego, como porcentaje de finos o inferior a malla N°325 serie ASTM.

Nota: No se contó con el tamiz malla N°200 de la serie ASTM, debido a la disponibilidad de material en el laboratorio CESEMIN.

### **2.1.7. Cocción**

Previo a los ensayos de caracterización de materias primas y pastas se ejecutó un monitoreo de la temperatura a la que trabaja el horno de la ladrillera en estudio, con el propósito de replicar las mismas condiciones en el horno marca Nabertherm modelo N60/H del laboratorio de cerámica aplicada en base a estos resultados. Tomando en cuenta que la duración de esta operación en el horno artesanal alcanzó la temperatura más alta aproximadamente a 14 horas y debido a que el horno del laboratorio requiere un apagado manual se realizó un escalamiento a 8 horas, con tres temperaturas máximas 700°C, 725°C y 750°C.

### **2.1.8. Contracción**

La contracción de la materia prima, se determinó con la misma granulometría de estudio en la ladrillera artesanal.

#### **Contracción al secado**

1. Cada materia prima y pasta se amasó con una cantidad de agua calculada para alcanzar una humedad aproximada del 25%, con el objetivo de mantener las condiciones de trabajo en la ladrillera.
2. Se elaboraron placas con dimensiones de 10cm de largo, 5cm de ancho y 1cm de espesor con cada arcilla y pasta, sobre un molde de yeso se golpeó para compactar bien el material.
3. Se realizaron dos marcas interpuestas con un calibrador con abertura de 50mm, y se colocó una identificación en cada placa y la fecha respectiva.
4. Se desmoldearon las placas, dejándolas secar por unos minutos, posteriormente se dejó secar al ambiente mínimo 5 días.

5. Una vez transcurrido ese tiempo, se miden y registraron las marcas de cada placa.

### **Contracción a la quema**

Para esta fase se quemaron las placas a distintas temperaturas de cocción: 700°C, 725°C y 750°C, con una duración aproximada de 8 horas. Culminada la cocción se limpiaron las placas, y se midieron las marcas realizadas con anterioridad con mucha precaución.

#### **2.1.9. Absorción de agua y porosidad**

En el ensayo de absorción de agua y porosidad se utilizaron las mismas placas que fueron quemadas para el ensayo de contracción. El procedimiento aplicado se basó en la norma NTE INEN 3049 - 5 (2019), ensayo por ebullición:

1. Se pesan las muestras secas, luego se sumergen las placas o piezas de material quemado en agua limpia de 15,5°C a 30°C, se acomodan de tal forma que el agua pueda circular libremente por todas las piezas.
2. Se colocan en un recipiente apto para el fuego durante 2 horas, se calienta el agua de manera que durante la primera hora llegue a ebullición, tener en cuenta que las piezas no estén en contacto directo con el fondo del recipiente donde se va a realizar la ebullición. Se dejan enfriar hasta temperatura ambiente.
3. Se extraen las placas, se remueve el agua de la superficie con un paño húmedo y se pesa antes de que transcurran 300s de haberlas sacado del agua.
4. Inmediatamente se determina el volumen de cada placa, introduciéndola en una probeta de 1000ml con un volumen conocido de agua. Medir exactamente el volumen de agua desplazado por la placa con la ayuda de una pipeta serológica.

## **2.2. Pruebas realizadas en ladrillos**

### **Muestreo de ladrillos cerámicos**

El muestreo de ladrillos fue de tipo simple aleatorio y se basó en la norma NTE INEN 3049 - 5 (2019), "los especímenes deben ser seleccionados de manera que sean representativos del lote entero de unidades del que se toman, de la variedad de colores, texturas y tamaños del envío".

Para la prueba diagnóstica inicial se separaron 25 ladrillos Tochano y 25 ladrillos Visto correspondientes a los lotes quemados en el mes de mayo – junio 2023 del taller en estudio; 15 ladrillos de cada tipo se destinaron al ensayo de absorción de agua y 10 ladrillos al ensayo de resistencia a la compresión.

Mientras que para la prueba de campo se tomaron 65 ladrillos de cada tipo, Tochano y Visto, fabricados en base a la dosificación planteada. De los cuales, 15 se utilizaron para los ensayos de absorción de agua, 15 para los ensayos de resistencia a la compresión, 15 para los ensayos de succión de agua, 10 para los ensayos de tolerancia dimensional y 10 para los ensayos de alabeo.

Además, se tomaron 5 ladrillos de cada tipo de un solo lote, pues se consideró pertinente realizar nuevamente los ensayos de absorción de agua y resistencia a la compresión, para corroborar que se conserven las condiciones de trabajo del taller, considerando además que la prueba de resistencia a la compresión se realizó en un laboratorio diferente al que se usó para las pruebas iniciales.

### **2.2.1. Absorción de agua**

Para este ensayo se siguió el método descrito en la norma NTE INEN 3049 - 5 (2019): “se sumergen los especímenes, sin inmersión parcial preliminar, en agua limpia (blanda, destilada o de lluvia) entre 15,5°C y 30°C durante 24h. Se retira el espécimen, se seca el exceso de agua con un paño húmedo y se pesa esta acción debe hacerse antes de que pasen 300s de retirado del agua. Para el estudio, se requiriere de 5 unidades de mampostería”.

Esta prueba fue realizada por triplicado en el laboratorio de Cerámica aplicada, con el objetivo de abarcar mayor información de varios lotes que puedan representar valores reales de estudio en la ladrillera.

### **2.2.2. Resistencia a la compresión**

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó según la norma NTE INEN 3049 - 5 (2019). Para el estudio, se requiriere de 5 unidades de mampostería.

Este ensayo tipo destructivo para los ladrillos del diagnóstico se ejecutó por duplicado, por la disponibilidad del laboratorio de Ensayos Destructivos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, en el equipo marca MetroCom Engineering s.p.a. Mientras que para los ladrillos producto de la prueba de campo se realizó por triplicado, en el taller de aplicaciones

constructivas y bioclimáticas de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca, en el equipo marca ELE International modelo 36 - 0735/02.

Para este ensayo se empleó platinas de madera con una dimensión de 40x15cm con un espesor de 4mm colocadas una por debajo y otra en la parte superior del espécimen con el objetivo de minimizar el desgaste de los platos del equipo, además de distribuir homogéneamente la carga.

### **2.2.3. Succión de agua**

Para este ensayo se sigue el procedimiento presentado por la norma NTE INEN 3049 - 5 (2019): para empezar, se debe determinar el área de la superficie de la pieza que debe estar en contacto con el agua, con una precisión de  $\pm 1,6\text{mm}^2$ , además de determinar la masa del espécimen con aproximación de 0,5g. Una vez calculados esos valores se ajusta la posición de la bandeja de manera que la superficie del fondo esté nivelada, se colocan los soportes (soportes metálicos), luego se agrega el agua hasta que el nivel de esta sea de  $3,2\text{mm} \pm 0,25\text{mm}$  por encima de la parte superior de los soportes; en este caso que la unidad tiene superficies estriadas, se suman la profundidad de las estrías. Para el estudio, se requiriere de 5 unidades de mampostería.

Esta prueba fue realizada por triplicado en el laboratorio de Cerámica aplicada, con el objetivo de abarcar mayor información.

### **2.2.4. Tolerancia dimensional**

Para este ensayo se sigue el procedimiento presentado por la norma NTE INEN 3049 - 5 (2019): Medir la longitud tanto a lo largo de ambas superficies de colocación como en las caras desde el punto central de los bordes de las unidades. Estas cuatro mediciones se registran con aproximación a 1,0mm, y se registra el promedio con aproximación a 0,5mm, como longitud. De manera análoga, se miden el ancho y la altura, y se registra el promedio de las cuatro mediciones respectivas con aproximación de 0,5mm (NTE INEN 3049 - 5, 2019).

Para ello, se empleó una regla metálica graduada en divisiones de 1mm. Este ensayo fue realizado en el laboratorio de Cerámica aplicada solamente a los ladrillos resultantes de la prueba piloto, para cada tipo se escogió 10 unidades de muestra.

### 2.2.5. Medición del alabeo

Para este ensayo se sigue el procedimiento presentado por la norma NTE INEN 3049 - 5 (2019): Si la superficie que se va a medir es cóncava, se coloca la escuadra a lo largo o diagonalmente y se selecciona el lugar en donde se presenta la mayor desviación de la planitud. Se selecciona la mayor distancia desde la superficie de la unidad hasta la escuadra. Utilizando la regla de acero o cuña, se mide esta distancia con precisión de 1,0mm, y esto se registra como alabeo cóncavo de la superficie.

Si el alabeo que se va a medir es de un borde cóncavo, se coloca la escuadra entre los extremos del borde que se va a medir. Se selecciona la mayor distancia desde el borde de la unidad hasta la escuadra. Con la regla de acero o cuña de medición, se mide la distancia con precisión de 1,0mm y se registra como alabeo cóncavo del borde.

Si el alabeo de la superficie que se va a medir es convexo, se coloca la unidad con la superficie convexa en contacto con una superficie plana, con las esquinas aproximadamente equidistantes de la superficie. Con una regla de acero o cuña se mide la distancia, con precisión de 1,0mm, de cada una de las cuatro esquinas, a partir de la superficie plana. El alabeo convexo de la unidad se registra como el promedio de las cuatro mediciones.

Si el alabeo que se va a medir es de un borde convexo, se coloca la escuadra entre los extremos del borde que se va a medir. Se selecciona la mayor distancia desde el borde de la unidad hasta la escuadra. Con la regla de acero o cuña de medición, se mide la distancia con precisión de 1,0mm y se registra como alabeo convexo del borde.

Para ello, se emplearon dos reglas metálicas graduadas en divisiones de 1mm. Este ensayo se realizó solamente a los ladrillos resultantes de la prueba de campo, para cada tipo se escogen 10 unidades de muestra como lo recomienda la norma (NTE INEN 3049 - 5, 2019).



### 2.3. Diseño experimental

Conociendo las condiciones económicas y de operación del taller, se decidió no hacer pruebas de cambio de tamaño de granulometría, pues estos cambios implicarían la necesidad de adquisición o modificación de maquinaria, por lo que el estudio se enfocó en el cambio de la dosificación.

Para el diseño experimental se empleó el programa Statgraphics, con un diseño de mezclas tipo simplex centroide.

Las variables de entrada a usar para la pasta de ladrillo Tochano fueron las arcillas: A1, A3, A4 y A5 y para la pasta de ladrillo Visto fueron las arcillas: A2, A3 y A5; las variables de salida para los dos tipos de pasta para ladrillo Tochano y ladrillo Visto fueron: absorción de agua, contracción e índice de plasticidad.

Para conocer los máximos y mínimos de cada componente requeridos por el método, se analizaron los resultados de la caracterización de materia prima de cada arcilla, así como los resultados de la caracterización de las pastas que sirvieron como factor de referencia.

Por último, se analizaron los estadísticos resultantes del programa, con mayor énfasis en el valor P, que en estadística es usado como una medida de la probabilidad, al azar, de una muestra que sea significativa para la población, comúnmente es usado para conocer la confianza del 95%, es por ello, que es considerado significativo cuando este valor es igual o menor al 5% (Molina Arias, 2017) y el  $R^2$ , con el objetivo de conocer cuál es el modelo matemático que se ajusta mejor en cada caso.

Para los ensayos del diseño experimental, se modificaron las temperaturas máximas de estudio a 700°C, 750°C y 800°C, debido a que en trabajos de titulación anteriores realizados en el mismo taller los monitoreos del horno exhiben temperaturas hasta los 800°C. Los ciclos de cocción tanto para la caracterización como para el diseño experimental se encuentran en el Anexo A.

### 2.4. Prueba de campo

Con los resultados del diseño experimental se realizó una prueba de campo en el taller, manteniendo las condiciones normales de trabajo. En esta prueba se elaboraron 100 ladrillos con los porcentajes de arcillas dados por la respuesta optimizada de la dosificación de la pasta para ladrillo Tochano y 100 ladrillos con los porcentajes de arcillas dados por la respuesta

optimizada de la dosificación de la pasta para ladrillos Visto. Como medida de control se monitoreó la temperatura del horno durante la producción de cada tipo de ladrillo.

Finalmente, en estos ladrillos se emplearon las mismas pruebas aplicadas en el diagnóstico que se realizaron en los ladrillos producidos en el taller, para evaluar los cambios obtenidos con las nuevas dosificaciones experimentales.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Prueba diagnóstica del producto

Los resultados presentados corresponden a las primeras pruebas realizadas a los ladrillos del diagnóstico; tomando en cuenta que las condiciones del taller se conservan como se observa en el Anexo B.

**Tabla 5:** Resultados de los ensayos ladrillo Tochano.

<b>Ladrillo Tochano</b>	
<b>Absorción de agua (%)</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>
<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 1</b>
17,29	3,02
20,00	1,79
17,51	2,30
17,80	2,11
17,41	2,78
<i>Promedio: 18,00</i>	<i>Promedio: 2,40</i>
<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 2</b>
17,49	2,41
17,94	2,05
18,21	1,95
17,67	2,23
17,39	2,86
<i>Promedio: 17,74</i>	<i>Promedio: 2,30</i>
<b>Ensayo 3</b>	
17,69	
18,62	
17,33	
17,91	
18,10	
<i>Promedio 17,93</i>	
<i>Promedio Total: 17,89</i>	<i>Promedio Total: 2,35</i>

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los ensayos por triplicado de absorción de agua realizados en los ladrillos Tochano del diagnóstico, se observa que el promedio para los tres ensayos es de 17,89% y el rango del promedio de 5 unidades es de 17,74% a 18,00%. En la misma tabla se observan los resultados por duplicado de resistencia a la compresión que presentan un promedio total para ambos ensayos de 2,35MPa y el rango del promedio de 5 unidades es de 2,30MPa a 2,40MPa.

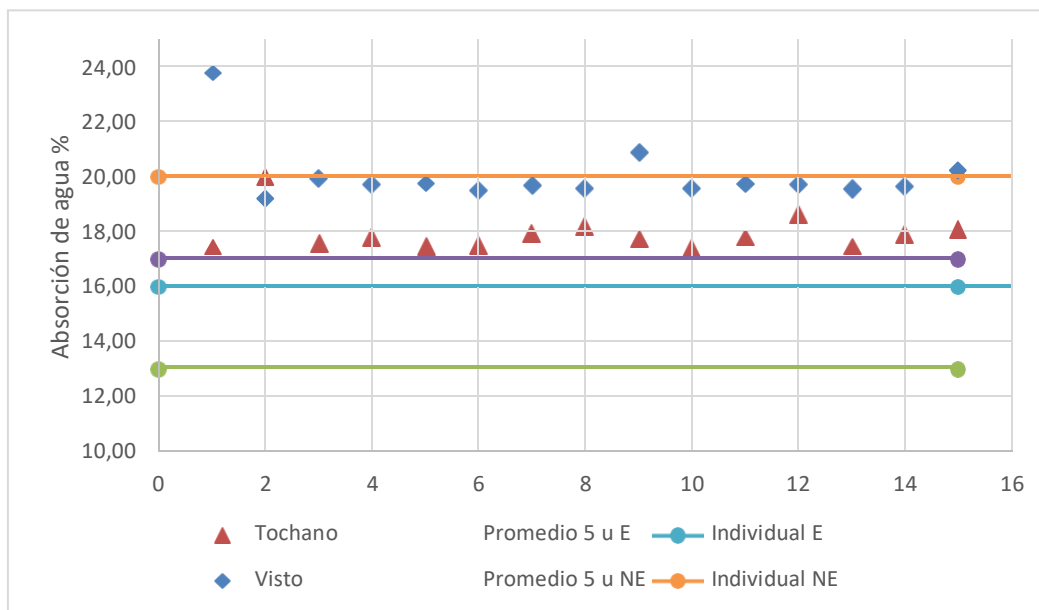
**Tabla 6:** Resultados de los ensayos ladrillo Visto.

<b>Ladrillo Visto</b>	
<b>Absorción de agua (%)</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>
<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 1</b>
23,75	0,92
19,21	2,12
19,94	1,62
19,72	1,68
19,68	1,71
<i>Promedio: 20,46</i>	<i>Promedio: 1,61</i>
<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 2</b>
19,51	2,06
19,52	1,85
19,59	1,78
20,80	1,61
19,59	1,85
<i>Promedio: 19,80</i>	<i>Promedio: 1,83</i>
<b>Ensayo 3</b>	
19,65	
19,72	
19,48	
19,65	
20,24	
<i>Promedio: 19,75</i>	
<i>Promedio Total: 20,00</i>	<i>Promedio Total: 1,72</i>

De igual manera, se observa en la Tabla 6, los resultados de los ensayos por triplicado de absorción de agua para ladrillos Visto de diagnóstico, el promedio para los tres ensayos es de

20,00% superior al de los ladrillos Tochano, y el rango del promedio de 5 unidades es 19,80% a 20,46%. En la misma tabla se observan los resultados por duplicado de resistencia a la compresión que presentan un promedio total para ambos ensayos de 1,72MPa y el rango del promedio de 5 unidades es de 1,61MPa a 1,83MPa.

Con estos resultados se elaboran gráficas que faciliten su comprensión y que permitan comparar con las normas establecidas para este tipo de ladrillos.



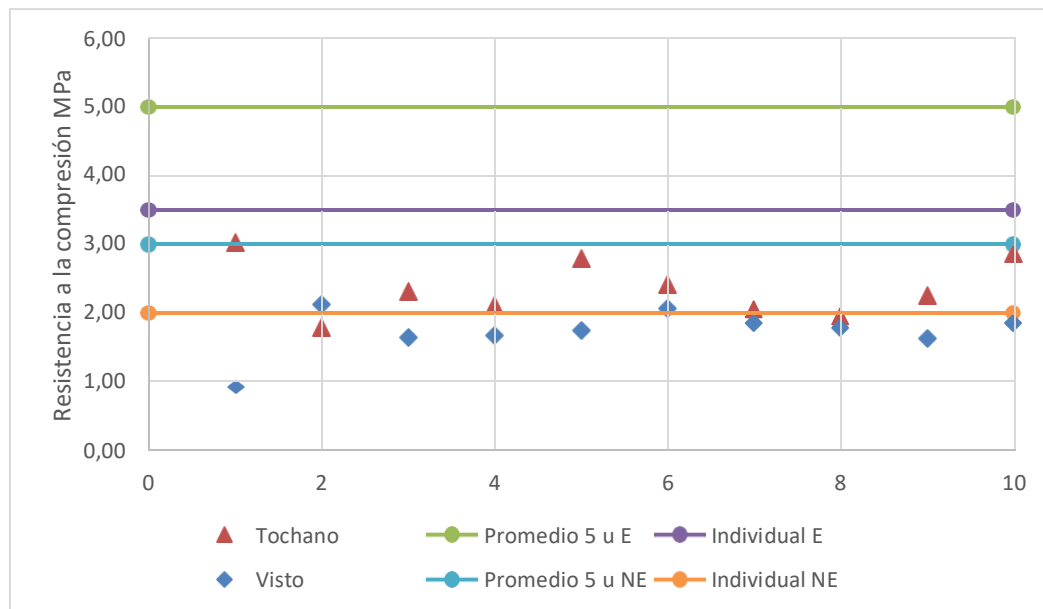
**Figura 14:**

*Resultados de absorción de agua para los ladrillos tipo Tochano y Visto de diagnóstico.*

Nota. Las líneas coloreadas representan los límites máximos permitidos según la norma NTE INEN 3049 de absorción de agua. La línea de color verde indica el valor promedio de 5 unidades para ladrillos estructurales. La línea celeste representa el valor individual para los ladrillos estructurales. La línea morada indica el valor promedio de 5 unidades para ladrillos No estructurales. La línea naranja representa el valor individual para los ladrillos No estructurales.

En la Figura 14 se muestran los resultados de absorción para cada tipo de ladrillo y representado por las líneas de colores las estimaciones aceptadas en norma. En el caso de ladrillos tipo Tochano, superan tanto el valor máximo permitido de 13,00% para ladrillos estructurales, así como el valor permitido de 17,00% para ladrillos no estructurales. Mientras que los ladrillos tipo Visto en su totalidad se encuentran por encima del 19,00% superando los

valores normados para ladrillos estructurales y no estructurales, pero se acercan más a cumplir con los parámetros expuestos en la norma para ladrillos no estructurales.



**Figura 15:**

*Resultados de resistencia mecánica para los ladrillos tipo Tochano y Visto de diagnóstico.*

Nota. Las líneas coloreadas representan los límites mínimos permitidos según la norma NTE INEN 3049 de resistencia a la compresión. La línea de color verde indica el valor promedio de 5 unidades para ladrillos estructurales. La línea morada representa el valor individual para los ladrillos estructurales. La línea de color celeste indica el valor promedio de 5 unidades para ladrillos No estructurales. La línea naranja representa el valor individual para los ladrillos No estructurales.

En la Figura 15, se exponen los valores resultantes del ensayo de compresión, los ladrillos tipo Tochano y ladrillos tipo Visto, no cumplen los valores estipulados en norma tanto para ladrillos estructurales (5MPa), como para ladrillos no estructurales (3MPa), aunque se acercan a cumplir lo estipulado en la normativa para ladrillos no estructurales.

### 3.2. Caracterización de arcillas y pastas

A continuación, se muestran los resultados de la caracterización tanto de las materias primas como de las pastas para los dos tipos de ladrillos correspondientes al mismo muestreo para todas las pruebas.

#### 3.2.1. Análisis químico y mineralógico racional aproximado.

**Tabla 7:** Resultados Análisis químico.

Óxido	%A1	%A2	%A3	%A4	%A5
SiO <sub>2</sub>	53,21	52,61	64,63	64,72	58,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,09	16,28	17,27	17,59	19,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,74	7,55	4,70	4,82	6,78
CaO	N.D.	0,00	N.D.	N.D.	N.D.
MgO	0,34	0,43	0,30	0,31	0,29
Na <sub>2</sub> O	N.D.	0,70	N.D.	0,23	0,27
K <sub>2</sub> O	0,81	0,71	0,79	0,78	0,62
<b>Perdidas al Fuego</b>	11,41	9,02	7,27	8,52	9,33

Nota. No Detectado (N.D.) Análisis realizado por el laboratorio CESEMIN (Véase Anexo C).

Como se puede observar en la Tabla 7, las muestras analizadas de materias primas presentan similitudes en cuanto a su constitución de acuerdo al porcentaje de los óxidos, fundamentalmente presentan sílice, que se encuentra en porcentajes superiores al 50% de su composición, conteniendo la arcilla A4 el mayor porcentaje correspondiente al 64,72% de SiO<sub>2</sub>; respecto a la alúmina poseen alrededor de 16% a 21%, figurando A1 con el mayor contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (21,09%); sobre el óxido de hierro poseen desde 4,70% a 7,55%, lo cual indica que todas las arcillas corresponderían a arcillas de cocción rojas, resaltando A2 con el mayor porcentaje de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,55%). Ninguna de las muestras de arcilla presenta CaO en su constitución o está presente en una mínima cantidad indetectable por el equipo de absorción atómica del laboratorio CESEMIN, lo que indica que no existe presencia de carbonatos. Situación similar se presenta para el caso del Na<sub>2</sub>O para la arcilla A1 y A3. La arcilla que presentó mayor pérdida al fuego fue A1 con un valor de 11,41%, mientras que la que presentó menor porcentaje de pérdidas al fuego fue A3 (7,27%).

En la Tabla 8, se muestran los resultados del análisis mineralógico racional aproximado (Véase Anexo D), realizado a partir del análisis químico.

**Tabla 8:** *Análisis mineralógico racional aproximado.*

Arcilla	Feldspatos		%Sustancia arcillosa	%Sílice libre	Impurezas			%MO
	%Potasio	%Sodio			%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	
<b>A1</b>	4,80	0,00	51,15	26,29	6,74	0,00	0,34	4,28
<b>A2</b>	4,20	5,92	36,34	28,90	7,55	0,00	0,43	3,95
<b>A3</b>	4,68	0,00	41,54	42,27	4,70	0,00	0,30	1,48
<b>A4</b>	4,62	1,95	41,42	41,11	4,82	0,00	0,31	2,74
<b>A5</b>	3,67	2,28	45,26	33,59	6,78	0,00	0,29	3,02

La muestra que presenta mayor contenido de sustancia arcillosa es A1, mientras que para comparar los valores de sílice libre se realiza el cálculo de la relación  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ , obteniendo para las muestras de materia prima: A1 (2,52), A2 (3,23), A3 (3,74), A4 (3,68), A5 (3,08), superando el valor 1,19 lo que indica una probable presencia de cuarzo libre, lo que se corrobora mediante los porcentajes de sílice libre obtenidos: A1 (26,29%), A2 (28,90%), A3 (42,27%), A4 (41,11%), A5 (33,59%), siendo la A3 la que contiene el mayor porcentaje de sílice libre; por lo tanto, está fue la muestra con mayor valor de la relación  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ .

La arcilla con mayor contenido de materia orgánica fue A1 (4,28%), mientras que A3 (1,48%) es la que menor contenido de materia orgánica presenta. Por otro lado, el contenido de feldspatos totales de manera descendente es: A2 (10,13%), A4 (6,56%), A5 (5,95%), A1 (4,80%) y A3 (4,68%).



### 3.2.2. Humedad

En la Tabla 9, se presentan los valores de humedad de las materias primas, se registró la condición climática en la que se tomaron las muestras con el fin de conocer si existe variación de los valores con respecto al clima; ya que, la materia prima permanece al aire libre en el lugar de acopio.

**Tabla 9:** Registro de valores de porcentajes de humedad de materias primas.

	A1	A2	A3	A4	A5	Fecha	Condición climática
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		
1	26,68	19,27	28,58	21,21	19,53	9-mar	Lluvia
2	26,79	19,58	28,97	21,13	20,29	10-mar	Lluvia
3	23,69	18,69	29,82	21,73	19,03	13-mar	Sol
4	23,71	18,31	29,75	21,56	19,00	14-mar	Sol
5	23,69	18,28	29,71	22,51	18,89	15-mar	Sol
6	23,65	18,33	29,68	22,52	19,02	16-mar	Sol
7	23,58	18,01	29,81	21,64	19,15	17-mar	Sol
8	23,06	18,58	29,63	21,47	19,10	20-mar	Sol
9	25,68	19,52	30,85	21,87	18,25	21-mar	Sol intenso
10	25,63	19,60	28,47	22,78	18,35	22-mar	Sol intenso
11	25,53	19,28	30,53	22,07	19,22	23-mar	Sol intenso
12	24,32	22,56	28,32	21,47	19,03	24-mar	Sol intenso
13	23,95	24,11	27,43	23,20	20,81	27-mar	Lluvia
14	26,99	24,23	28,69	21,74	22,40	28-mar	Lluvia intensa
15	23,25	24,65	28,24	21,65	22,42	29-mar	Lluvia
16	23,58	23,22	28,36	21,74	22,12	30-mar	Lluvia
17	23,43	22,45	27,75	22,12	21,23	31-mar	Sol
18	21,95	19,96	28,48	22,63	20,81	1-abr	Sol
19	22,25	20,04	29,50	21,74	22,42	3-abr	Lluvia
20	22,22	19,80	29,45	18,90	18,44	4-abr	Lluvia intensa
21	21,34	18,27	29,98	18,57	19,22	5-abr	Sol
22	21,23	18,23	29,56	18,45	19,11	6-abr	Sol intenso
22	20,90	18,21	29,33	18,33	18,87	7-abr	Sol intenso
<b>Promedio</b>	23,79	20,14	29,17	21,35	19,86		
<b>Desviación estándar</b>	1,76	2,20	0,87	1,40	1,39		

Los resultados presentan una variación dependiente de la condición climática en base a los resultados a la desviación estándar para todas las muestras de materia prima; sin embargo, la cantidad de agua concerniente a esas variaciones de humedad es mínima, si se considera el tipo de material.

En la Tabla 10, se presentan valores promedio de porcentajes de humedades para pasta de ladrillo Tochano y pasta para ladrillo Visto (véase tabla completa en Anexo E).

**Tabla 10:** *Porcentajes de humedad para cada Pasta.*

<b>Tipo de ladrillo</b>	<b>Muestra</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>Ladrillo Tochano</b>	A1	21,95
	A3	28,48
	A4	22,63
	A5	20,81
	<b>Pasta</b>	<b>25,08</b>
<b>Ladrillo Visto</b>	A2	19,80
	A3	29,45
	A5	18,44
	<b>Pasta</b>	<b>24,41</b>

El valor promedio de la pasta para ladrillo Visto es 24,41% y de la pasta para ladrillo Tochano de 25,08%, es decir, se trabaja con una humedad muy cercana para los dos tipos de pastas. Al igual que, se observa que la pasta al ser una mezcla de distintas arcillas posee un valor intermedio de porcentaje de humedad correspondiente a cada una de las materias primas para su dosificación.

### 3.2.3. pH

**Tabla 11:** Resultados de pH de las muestras.

Muestra	pH
A1	6,79
A2	7,48
A3	6,08
A4	6,53
A5	5,91
<b>Pasta Tochano</b>	6,65
<b>Pasta Visto</b>	6,75

En base a los resultados obtenidos de la Tabla 11, se puede observar que todas las muestras de arcilla son ácidas y se encuentran dentro del rango óptimo de máxima moldeabilidad (pH: 6 a 8,5) a excepción de la arcilla A5 con un valor de 5,91.

Por otro lado, las pastas de ladrillo Tochano y ladrillo Visto, son ácidas y presentan un pH óptimo de 6,65 y 6,75 respectivamente; demostrando que el uso de estas materias primas es coherente para la elaboración de ladrillos, por su buena plasticidad, resistencia en crudo y máxima moldeabilidad.

### 3.2.4. Plasticidad

**Tabla 12:** Resultados plasticidad.

Muestra	LL	LP	IP
A1	36,44	26,32	10,12
A2	31,37	24,61	6,76
A3	43,15	25,63	17,53
A4	41,60	29,94	11,65
A5	30,54	21,61	8,93
<b>Pasta Tochano</b>	38,72	23,81	14,91
<b>Pasta Visto</b>	39,77	27,53	12,25

Nota. Límite líquido (LL), límite plástico (LP), Índice de plasticidad (IP).

En la Tabla 12 se observa los resultados de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para las muestras de materia prima y pastas. (véase cálculos en Anexo F).

Según los valores obtenidos del Índice de plasticidad se puede evidenciar que la arcilla que brinda mayor plasticidad a la mezcla es la A3 con el mayor valor (IP:17,53), y la menos arcillosa, es decir, con menor plasticidad es la arcilla A2 (IP:6,76), concordando con lo se obtuvo en el análisis mineralógico racional.

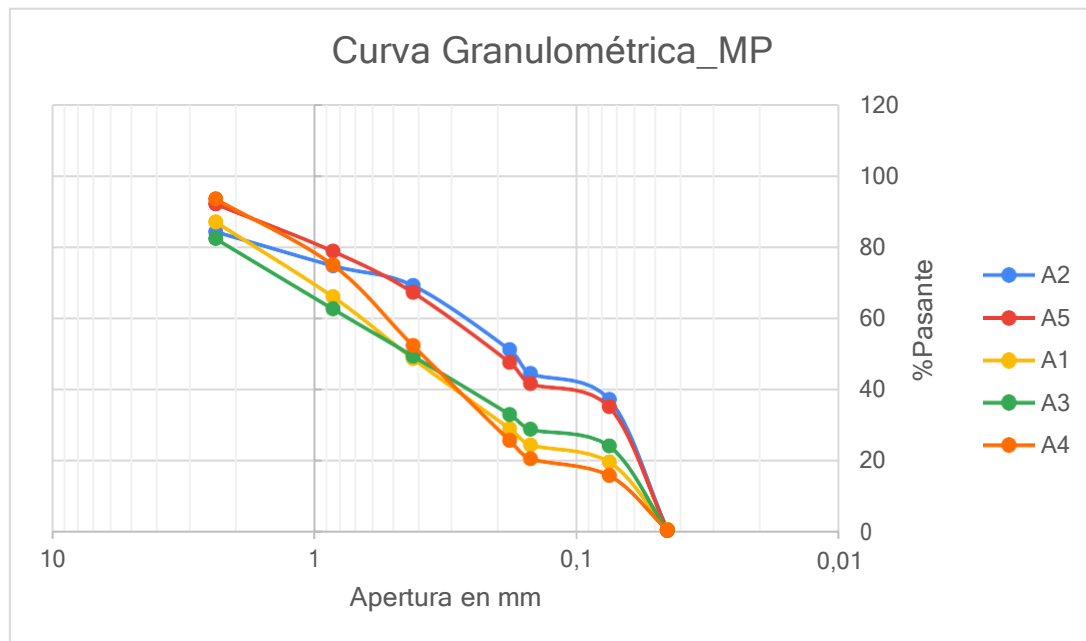
### 3.2.5. Granulometría

En la Tabla 13 se exponen los porcentajes retenidos en gramos y el porcentaje pasantes en gramos de las arcillas en estudio.

**Tabla 13:** Resultados del análisis granulométrico de las materias primas.

MP	A1		A2		A3		A4		A5		
	Nº Tamiz	%Ret.	%Pasa	%Ret.	%Pasa	%Ret.	%Pasa	%Ret.	%Pasa	%Ret.	%Pasa
	8	13,09	86,91	15,86	84,14	17,81	82,19	6,64	93,36	8,08	91,92
	20	20,99	65,93	9,52	74,62	19,70	62,49	18,53	74,83	13,24	78,68
	40	17,38	48,54	5,58	69,04	13,24	49,25	22,63	52,20	11,59	67,09
	80	19,62	28,92	18,01	51,03	16,36	32,89	26,62	25,58	19,57	47,51
	100	4,56	24,36	6,63	44,40	4,19	28,70	5,09	20,49	5,99	41,52
	120	4,80	19,56	7,27	37,13	4,69	24,01	4,72	15,77	6,51	35,01
	325	19,03	0,52	36,54	0,59	23,72	0,30	15,40	0,37	34,46	0,55
<b>Fondo</b>		0,52		0,59		0,30		0,37		0,55	

Nota. Materia Prima (MP), % Retenido (% Ret.), %Pasante (% Pasa).



**Figura 16:**

*Curva granulométrica de las materias primas.*

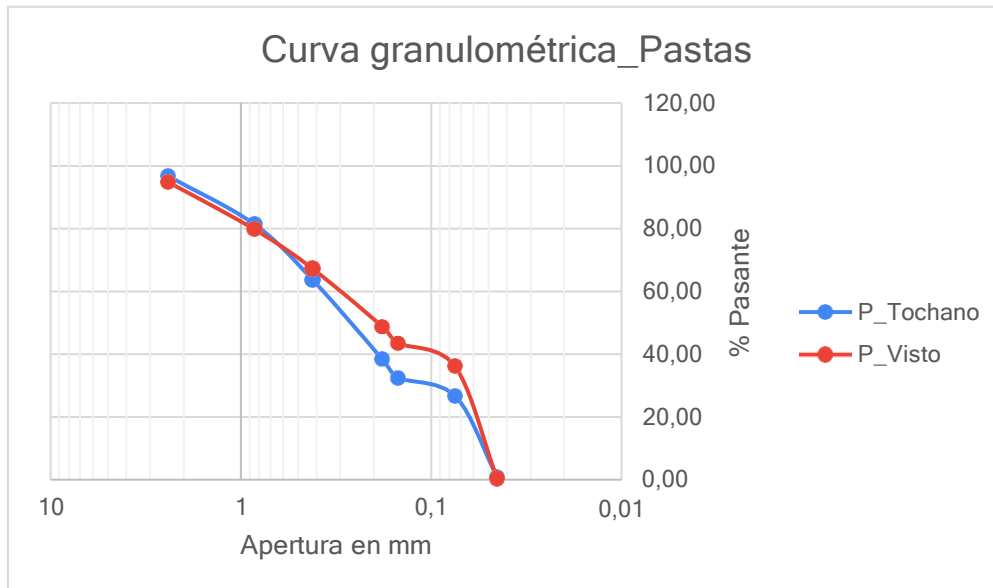
En la Figura 16 se muestra la distribución del tamaño de partícula mediante la curva granulométrica en la que se observa que la arcilla A2 seguida de la A5 tienen los porcentajes más altos de retenidos en el tamiz N° 325 serie ASTM, lo que evidencia que tienen partículas de mayor tamaño que las demás materias primas, lo que concuerda con los resultados obtenidos de plasticidad.

La Tabla 14, describe de igual manera, los porcentajes en gramos de retenido y pasante, en este caso de las pastas en estudio.

**Tabla 14:** *Resultados del análisis granulométrico de las pastas.*

MP	Pasta Tochano		Pasta Visto		
	N° Tamiz	%Ret.	%Pasa	%Ret.	%Pasa
	8	3,30	96,70	5,18	94,82
	20	15,34	81,36	15,09	79,74
	40	17,71	63,65	12,55	67,18
	80	25,43	38,22	18,55	48,63
	100	5,79	32,43	5,15	43,48
	120	5,76	26,66	7,40	36,08
	325	25,90	0,76	35,80	0,28
	Fondo	0,76		0,28	

Nota. Materia Prima (MP), % Retenido (% Ret.), %Pasante (% Pasa).



**Figura 17:**

*Curva granulométrica de las pastas.*

La Figura 17, representa la curva granulométrica, se evidencia similitud al de sus materias primas, esto tiene sentido ya que las pastas son una mezcla de toda la distribución granulométrica de las arcillas utilizadas. La pasta para ladrillo Tochano tiene más cantidad de partículas de tamaño fino que la pasta para ladrillo Visto.

### 3.2.6. Contracción

En la Tabla 15, se muestran los resultados de la contracción al secado y la contracción a la quema de las placas a temperaturas de 700, 725 y 750°C.

La contracción a la quema se da en un porcentaje menor; las contracciones al secado presentan valores que van desde 4% a 10%, dependiendo de la arcilla; con respecto a la misma arcilla se observa un poco de variabilidad de los resultados, la cual se podría deberse a la distinta presión ejercida durante el prensado por cada operario al realizar las placas. Se evidencia que la arcilla A3 seguida de la A5 tienen contracciones al secado mayores, lo que concuerda con su índice de plasticidad (más alto). En cuanto a las pastas se ve que la del ladrillo Tochano presenta una mayor contracción al secado que la pasta para ladrillo Visto.

El comportamiento de la contracción a la quema de las arcillas A1, A3, A4 y A5 concuerda con lo esperado. A mayor temperatura de cocción la contracción también será mayor. Sin embargo, la arcilla A2 no cumple con el mismo criterio; ya que presenta una contracción negativa a 725 °C y 750°C por lo que presenta una leve deformación. Esta causa puede tener

relación con su composición química ya que es la única arcilla que presenta un porcentaje alto de  $\text{Na}_2\text{O}$  en comparación a las demás arcillas con 0,70%, por lo que su presencia en la cocción causa expansión térmica.

De acuerdo a la contracción total, en las tres temperaturas de cocción, A3 y A5 superan el rango sugerido para trabajar de 1% a 6%, por lo cual se debe tener en cuenta durante la dosificación para evitar riesgos de fisuras, deformaciones o pérdidas en el producto final. Las arcillas A1, A4 se encuentran en el rango mencionado. Los cálculos de cada una de las placas se muestran en el Anexo G.

**Tabla 15:** Resultados de contracción al secado, a la quema y total.

Código	Contracción								
	700 °C			725 °C			750 °C		
	Secado %	Quema %	Total %	Secado %	Quema %	Total %	Secado %	Quema %	Total %
<b>A1</b>	3,52	0,15	3,67	4,01	0,19	4,21	4,27	0,35	4,70
<b>A2</b>	4,40	0,18	5,00	3,96	-0,41	3,55	4,08	-0,26	3,95
<b>A3</b>	9,85	0,24	10,09	8,60	0,23	8,78	9,73	0,32	10,06
<b>A4</b>	5,75	0,18	5,93	5,31	0,24	5,55	6,97	0,56	7,53
<b>A5</b>	5,91	0,07	5,98	6,88	0,38	7,26	7,61	1,03	8,64
<b>Pasta Tochano</b>	10,32	0,13	10,45	10,89	0,32	11,22	9,66	0,40	10,06
<b>Pasta Visto</b>	7,34	0,11	7,45	6,75	0,32	7,08	7,26	0,44	7,70

### 3.2.7. Absorción de agua y porosidad

La absorción de agua y la porosidad tienen relación directa, como se puede observar en la Tabla 16, donde se presentan los valores de absorción, espacio poroso en función de las temperaturas de cocción, mientras se incrementa la temperatura la absorción de agua disminuye al igual que el espacio poroso.

Sin embargo, A2 a 700°C y 725°C posee un espacio poroso similar, con un pequeño incremento de 0,20%; en A4 algo similar sucede a 725°C y 750°C teniendo una variación de 0,02% de espacio poroso, A5 presenta un espacio poroso similar a 700°C y 725°C, esto se

debe a que no se considera un valor de porosidad individual obtenido para las placas (Ver anexo H).

La materia prima que menor porcentaje de absorción presento en todos los casos es A5, mientras A1 es la arcilla con mayor porcentaje de absorción. La pasta para ladrillo Visto posee un valor similar de absorción de agua a temperaturas de 725°C y 750°C con 18,62% y 18,63% respectivamente, pese a que el espacio poroso varia en 2,36%.

**Tabla 16:** Resultados de absorción de agua y porosidad.

Código	700 °C		725 °C		750 °C	
	% absorción	% EP	% absorción	% EP	% absorción	% EP
A1	32,22	45,42	31,12	44,58	30,16	43,02
A2	27,39	41,29	26,71	41,49	25,88	38,76
A3	26,20	39,87	26,14	37,97	24,08	34,65
A4	27,13	42,03	26,87	38,24	26,65	38,26
A5	20,15	31,29	20,17	31,42	19,90	32,98
Pasta Tochano	22,28	39,28	20,14	34,90	19,75	34,10
Pasta Visto	19,55	33,51	18,62	29,97	18,63	32,33

Nota. Espacio Poroso (EP)

### 3.3. Diseño experimental

Las dosificaciones para el diseño experimental fueron obtenidas mediante el programa estadístico Statgraphics, empleando el diseño Simplex - Centroide.

Los distintos modelos ajustados a los datos de absorción de agua, contracción y plasticidad del diseño experimental para ladrillos Tochano y ladrillos Visto, se trabajó en el escenario más bajo, así que, se ingresaron los resultados obtenidos con la menor temperatura (700°C). Dado que durante los diferentes monitoreos del horno hay mucha variabilidad con respecto a la temperatura más alta alcanzada, como se ve en el Anexo A.

#### 3.3.1. Ladrillo Tochano

En la Tabla 17, se muestran las restricciones requeridas por el programa para establecer los límites máximos y mínimos de cada variable de entrada.

En la Tabla 18, se muestran los resultados de los experimentos arrojados por el programa para encontrar la dosificación adecuada, como se observa al elegir el diseño simplex



centroide, las cantidades de cada componente se encuentran tanto en los vértices como entre vértices en los centros de las aristas, esto asegura un estudio estadísticamente aceptable.

**Tabla 17:** Restricciones para el diseño experimental del ladrillo Tochano.

<b>Ladrillo Tochano</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Límite superior e inferior</b>	<b>Justificación</b>
<b>A1</b>	31	Alto contenido de pérdidas al fuego
	12	Presenta alta absorción Buena plasticidad
<b>A3</b>	64	Afecta a la contracción
	45	Alta plasticidad
<b>A4</b>	35	Presenta contracción moderada
	16	Bajo contenido de material arcilloso
<b>A5</b>	27	Baja disponibilidad de materia prima
	8	Absorción baja Buena plasticidad

**Tabla 18:** Ensayos de dosificación obtenida por el programa.

<b>Ensayo Tochano</b>	<b>A1</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>A5</b>
1	12,00	45,00	25,50	17,50
2	16,75	49,75	20,75	12,75
3	18,33	45,00	22,33	14,33
4	12,00	54,50	16,00	17,50
5	12,00	64,00	16,00	8,00
6	12,00	45,00	35,00	8,00
7	31,00	45,00	16,00	8,00
8	21,50	54,50	16,00	8,00
9	21,50	45,00	16,00	17,50
10	21,50	45,00	25,50	8,00
11	18,33	51,33	22,33	8,00
12	12,00	45,00	16,00	27,00
13	18,33	51,33	16,00	14,33
14	12,00	54,50	25,50	8,00
15	12,00	51,33	22,33	14,33

En las Tablas 19, 20 y 21, se presentan los resultados aplicados a las placas resultantes de los ensayos de dosificación obtenida para el diseño experimental, quemadas a 700°C, 750°C y 800°C.

**Tabla 19:** Resultados de las variables de salida obtenidos a 700°C.

<b>Ensayo</b>	<b>%Absorción</b>	<b>%Contracción</b>	<b>IP</b>
1	21,24	5,89	11,78
2	20,35	7,56	11,81
3	20,72	5,53	13,83
4	20,27	6,71	12,11
5	21,09	6,07	11,50
6	19,39	6,42	12,57
7	21,38	6,06	13,42
8	15,84	6,60	12,58
9	21,25	6,53	13,41
10	22,02	6,50	9,04
11	22,47	6,09	12,84
12	19,94	7,32	11,24
13	19,96	6,44	13,43
14	20,83	6,40	14,96
15	21,27	6,11	13,95

**Tabla 20:** Resultados de las variables de salida obtenidos a 750°C.

<b>Ensayo</b>	<b>%Absorción</b>	<b>%Contracción</b>	<b>IP</b>
1	20,96	6,75	11,78
2	19,92	6,42	11,81
3	20,33	6,69	13,83
4	19,37	6,19	12,11
5	21,44	5,50	11,50
6	20,88	7,61	12,57
7	21,02	6,80	13,42
8	21,32	6,52	12,58
9	21,11	5,75	13,41
10	21,92	7,31	9,04
11	21,07	5,86	12,84
12	20,04	7,27	11,24
13	20,15	6,57	13,43
14	20,12	6,80	14,96
15	20,90	6,32	13,95

**Tabla 21:** Resultados de las variables de salida obtenidos a 800°C.

Ensayo	%Absorción	%Contracción	IP
1	20,30	6,63	11,78
2	20,76	6,13	11,81
3	20,49	5,97	13,83
4	20,46	6,54	12,11
5	20,50	5,62	11,50
6	20,23	6,32	12,57
7	20,72	7,11	13,42
8	20,72	6,84	12,58
9	19,51	6,01	13,41
10	21,68	6,46	9,04
11	20,86	5,86	12,84
12	19,89	7,81	11,24
13	19,29	5,88	13,43
14	16,91	6,22	14,96
15	19,94	6,85	13,95

En la Figura 18, se muestran los resultados de absorción de agua ajustados a diferentes modelos, donde el valor P es mayor a 0,05 en cada caso, por lo que, no existe una relación estadísticamente significativa entre la absorción, contracción o plasticidad individual y los componentes, lo que puede significar que más variables están influyendo sobre cada muestra, esto es correcto ya que se están analizando por separado. Por lo tanto, para este estudio se debe tomar en cuenta otros resultados obtenidos del programa para saber cuál es el modelo adecuado, así en la parte inferior de la misma figura, en cambio, se muestra el valor de  $R^2$ , donde se observa que se ajusta al modelo cúbico especial con un  $R^2=96,8992\%$  el más cercano al 100%, con el cual sugiere el programa trabajar obteniendo los óptimos en porcentajes de cada muestra de arcilla para minimizar la absorción: A5: 8,00%, A1: 21,50%, A3: 54,40%, A4: 16,00%.

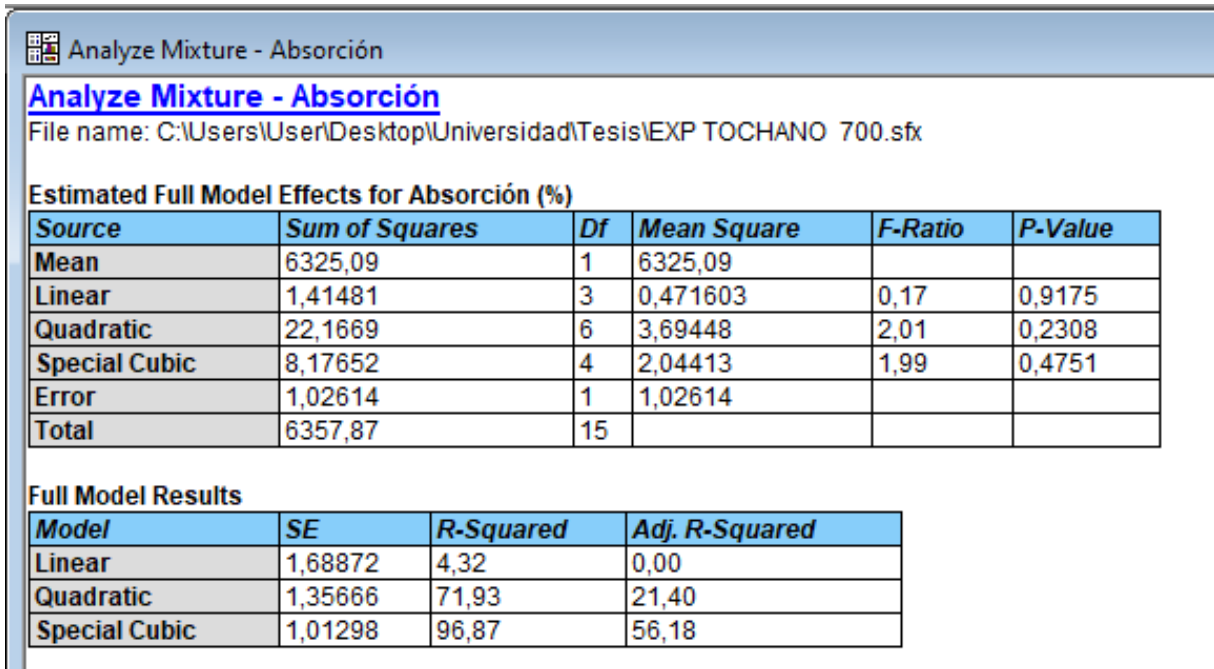


Figura 18:

Distintos modelos ajustados a los datos de absorción de agua del diseño experimental para ladrillos Tochano.

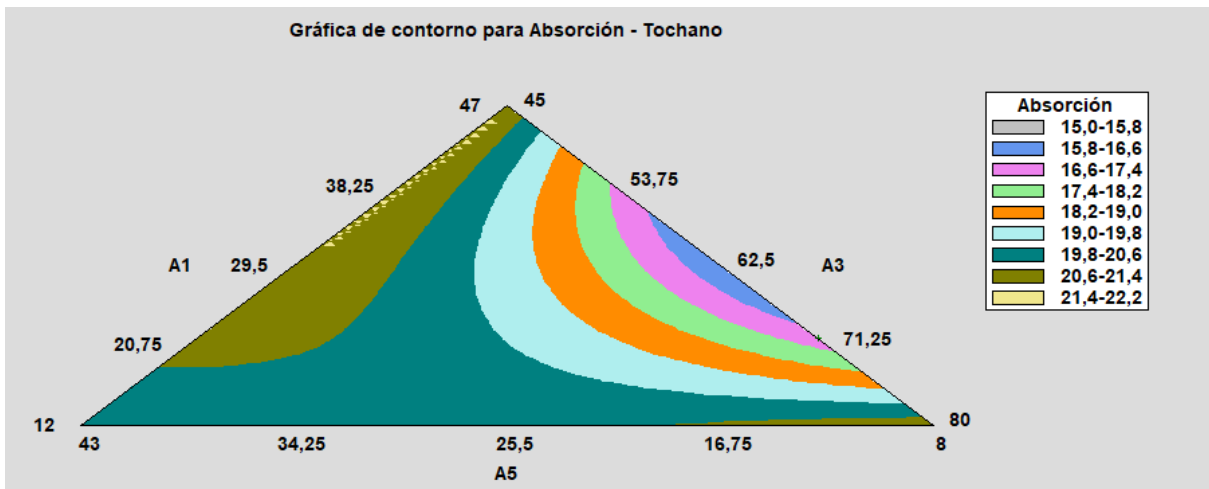


Figura 19:

Gráfica de contorno estimada de Absorción de agua.

La Figura 19, muestra la gráfica de contorno en la cual se expone la influencia de la arcilla A3 en las regiones celeste y rosa que representan los porcentajes más bajos de absorción que van desde 15,80% a 17,40%, por otro lado, la arcilla A5 representa esos valores cuando se acerca al mínimo, mientras que A1 cuando se acerca a su máximo.

En la Figura 20 muestra los distintos modelos ajustados a los datos de contracción del diseño experimental para ladrillo Tochano.

Analyze Mixture - Contracción					
<b>Analyze Mixture - Contracción</b>					
File name: C:\Users\User\Desktop\Universidad\Tesis\EXP TOCHANO 700.sfx					
Estimated Full Model Effects for Contracción (mm)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Mean	617,348	1	617,348		
Linear	0,511884	3	0,170628	0,58	0,6431
Quadratic	1,24841	6	0,208068	0,52	0,7779
Special Cubic	0,245713	4	0,0614282	0,03	0,9942
Error	1,76917	1	1,76917		
Total	621,123	15			
Full Model Results					
Model	SE	R-Squared	Adj. R-Squared		
Linear	0,544668	13,56	0,00		
Quadratic	0,634804	46,63	0,00		
Special Cubic	1,3301	53,14	0,00		

**Figura 20:**

*Distintos modelos ajustados a los datos de contracción del diseño experimental para ladrillo Tochano.*

Para el caso de contracción, en la Figura 20 en la parte inferior, se muestra el valor de  $R^2$ , donde se observa que de igual forma al anterior se ajusta al modelo cúbico especial con un  $R^2=53,1395\%$  el más cercano al 100%, el programa sugiere en este caso los óptimos en porcentajes de cada muestra de arcilla con el objetivo de mantener la contracción en 7%, valor acorde a las pruebas de laboratorio sea: A5: 22,90%, A1: 12,70%, A3: 48,10%, A4: 16,30%.

En la Figura 21 se puede observar, de la misma manera la mayor influencia de la arcilla A3, se puede ver que las regiones celeste y azul se encuentran en un rango aceptable para mantener la contracción deseada con valores de 6,70 - 6,94 y 6,94 - 7,18 respectivamente, se concentran en el centro y hacia la esquina inferior izquierda.

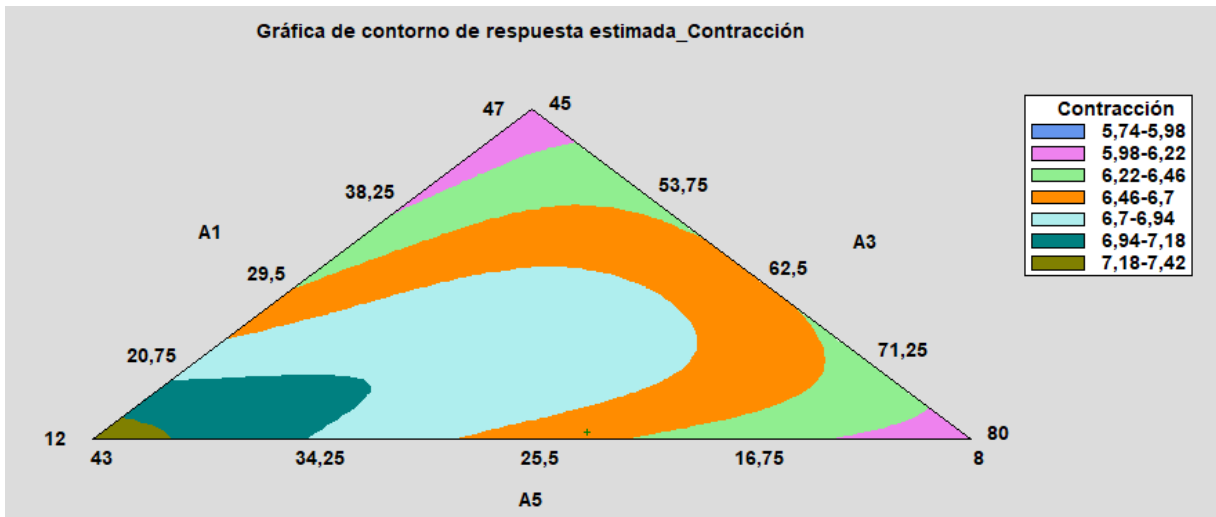


Figura 21:

Gráfica de contorno estimada de Contracción.

La Figura 22 presenta los distintos modelos ajustados a los datos de plasticidad del diseño experimental para ladrillo Tochano.

Analyze Mixture - IP

**Analyze Mixture - IP**  
File name: C:\Users\User\Desktop\Universidad\Tesis\EXP TOCHANO 700.sfx

Estimated Full Model Effects for IP

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Mean	2368,06	1	2368,06		
Linear	0,407684	3	0,135895	0,05	0,9827
Quadratic	21,5915	6	3,59858	2,89	0,1324
Special Cubic	2,72163	4	0,680408	0,19	0,9144
Error	3,51156	1	3,51156		
Total	2396,3	15			

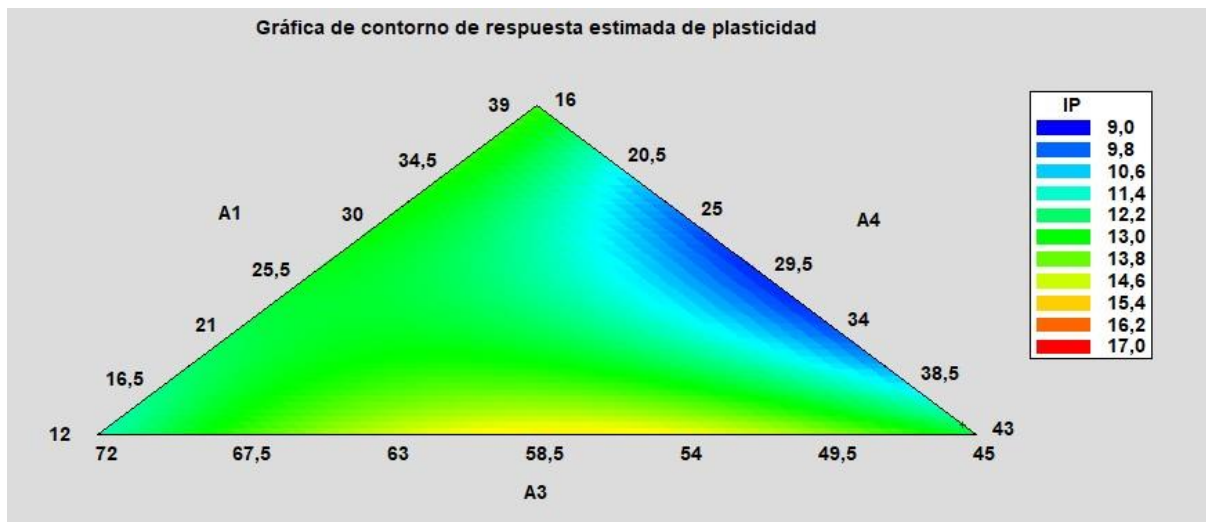
Full Model Results

Model	SE	R-Squared	Adj. R-Squared
Linear	1,59045	1,44	0,00
Quadratic	1,11653	77,92	38,18
Special Cubic	1,87392	87,56	0,00

Figura 22:

Distintos modelos ajustados a los datos de plasticidad del diseño experimental para ladrillos Tochano.

Finalmente, al comparar el valor de  $R^2$  de la Figura 22 se observa, al igual que los anteriores, se ajusta al modelo cúbico especial con un  $R^2=87,5608\%$  el más cercano al 100%, de igual forma el programa sugiere los óptimos en porcentajes de cada muestra de arcilla con el objetivo de mantener la plasticidad en 13, valor acorde a las pruebas de laboratorio: A5: 8,10%, A1: 12,80%, A3: 45,00%, A4: 34,10%.



**Figura 23:**

*Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Plasticidad.*

En la Figura 23 se puede ver la influencia de la arcilla A4, en el área de la gráfica de color verde claro que corresponde a los valores más cercanos o igual a 13 de plasticidad.

Una vez analizado por separado las variables y su comportamiento, es importante conocer el análisis de las tres variables en conjunto y su comportamiento frente a los componentes para conocer la mezcla óptima necesaria para la ejecución de la prueba de campo. Para ello, el programa permite la opción multirrespuesta en la que se analizan las variables de absorción, contracción y plasticidad.

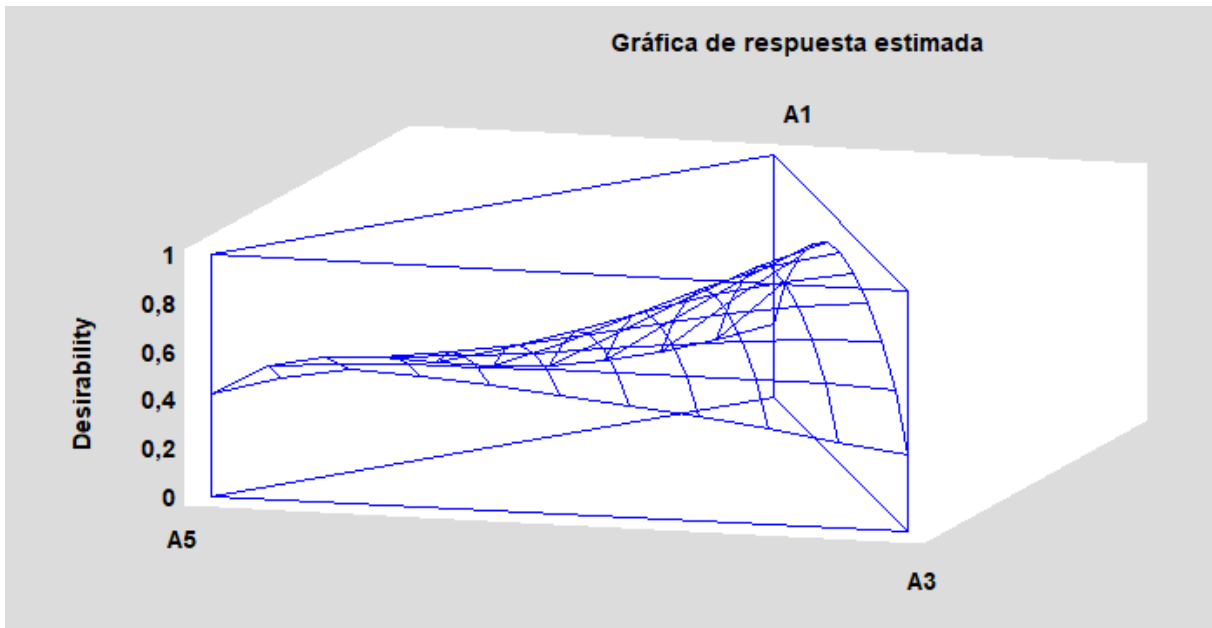


Figura 24:

Gráfica de superficie de la respuesta estimada para la multirrespuesta.

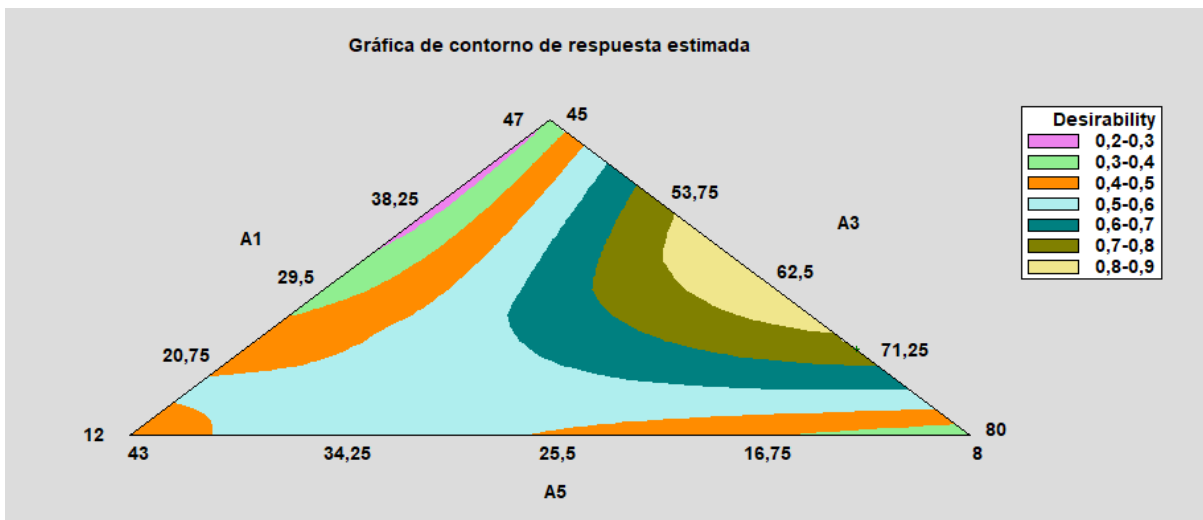


Figura 25:

Gráfica de contornos de la respuesta estima para la multirrespuesta.

En la Figura 24 se puede observar, que la curvatura de esta exhibe mejores valores de deseabilidad, con una tendencia influenciada por las arcillas A3 y A5, cabe mencionar que esta gráfica mantiene en el valor mínimo (16%) a la arcilla A4 debido a que este tipo de gráfica es triaxial por lo que al tener cuatro componentes la de menor influencia se mantiene constante. Es posible también observar lo expuesto en este párrafo en la Figura 25, con la que se puede visualizar claramente que las regiones de mayor deseabilidad que se



encuentran representadas por los colores verde (0,7 – 0,8) y color crema (0,8 – 0,9), se concentran en los puntos medios de A3 y A5 y más cercano al mínimo de A1, recordando que en este caso la A4 se mantiene en su mínimo.

Multiple Response Optimization						
Response	Desirability Low	Desirability High	Goal	Weights First	Weights Second	Impact
Absorción	15,84	22,47	Minimize	1,0		4,0
Contracción	5,53	7,56	7,0	1,0	1,0	2,0
IP	9,04	14,96	13,0	1,0	1,0	2,0

Row	Absorción	Contracción	IP	Predicted Desirability	Observed Desirability
1	21,24	5,89	11,78	0,242739	0,276348
2	20,35	7,56	11,81	0,405079	0,0
3	20,72	5,53	13,83	0,394501	0,0
4	20,27	6,71	12,11	0,493655	0,511631
5	21,09	6,07	11,5	0,318204	0,315328
6	19,39	6,42	12,57	0,586926	0,584193
7	21,38	6,06	13,42	0,300602	0,29581
8	15,84	6,6	12,58	0,875216	0,898139
9	21,25	6,53	13,41	0,331416	0,367378
10	22,02	6,5	9,04	0,0924219	0,0
11	22,47	6,09	12,84	0,187677	0,0
12	19,94	7,32	11,24	0,424316	0,43151
13	19,96	6,44	13,43	0,630206	0,513003
14	20,83	6,4	14,96	0,0	0,0
15	21,27	6,11	13,95	0,412683	0,285679

**Figura 26:**

*Deseabilidad máxima de la multirrespuesta para la mezcla y resultado de la mezcla óptima de ladrillos Tochano.*

Este procedimiento ayuda a determinar la combinación de factores experimentales, es decir las variables de salida del estudio que optimizan simultáneamente varias respuestas. Lo hace maximizando una función de deseabilidad, en este caso se basa en los objetivos para cada una de las respuestas establecidas como: minimizar Absorción, mantener en 7% Contracción y mantener Plasticidad en 13, como se muestra en la Figura 26, la deseabilidad máxima se logra en el ensayo número 8, con el valor óptimo de deseabilidad más cercano a 1 correspondiente a 0,875216. Como resultado en los valores óptimos de: A5: 8,00%, A1: 21,50%, A3: 54,50%, A4: 16,00%, con los cuales las variables absorción, contracción y plasticidad forman parte del rango aceptable para el objetivo deseable con 15,90%, 6,48 % y 12,75% respectivamente, como se muestra en la Figura 27.

Multiple Response Optimization			
<b>Optimize Desirability</b>			
Optimum value = 0,875216			
Factor	Low	High	Optimum
A1	12,0	31,0	21,5
A5	8,0	27,0	8,0
A3	45,0	64,0	54,5
A4	16,0	35,0	16,0
Response	Optimum		
Absorción	15,9342		
Contracción	6,47631		
IP	12,7543		

**Figura 27:**

*Mezcla óptima de ladrillos Tochano.*

### 3.3.2. Ladrillos Visto

En la Tabla 22, se muestran las restricciones requeridas por el programa para establecer los límites máximos y mínimos de cada variable de entrada.

**Tabla 22:** *Restricciones para el diseño experimental de ladrillos Visto.*

Ladrillo Visto		
Componentes	Límite superior e inferior	Justificación
A2	40	Baja plasticidad
	25	Alta absorción por lo que no es recomendable utilizar en mayor cantidad
A3	55	Presenta una contracción menor en comparación a las otras materias primas
	40	Contribuye con el color por el contenido de óxido de hierro
A5	35	Aporta plasticidad a la mezcla
	20	Contracción alta que puede afectar en la mezcla
		Poca disponibilidad de materia prima
		Buena plasticidad

En la Tabla 23, se muestran los resultados de los ensayos arrojados por el programa para encontrar la dosificación adecuada, como se observa al elegir el diseño simplex centroide, las cantidades de cada componente se encuentran tanto en los vértices como entre vértices en los centros de las aristas, esto asegura un estudio estadísticamente aceptable.

**Tabla 23:** *Ensayos de dosificación obtenida por el programa.*

Ensayo	A2	A3	A5
1	40,00	40,00	20,00
2	25,00	47,50	27,50
3	25,00	55,00	20,00
4	32,50	47,50	20,00
5	32,50	40,00	27,50
6	25,00	40,00	35,00
7	30,00	45,00	25,00
8	25,00	40,00	35,00
9	25,00	55,00	20,00
10	40,00	40,00	20,00
11	25,00	47,50	27,50
12	32,50	40,00	27,50
13	32,50	47,50	20,00
14	30,00	45,00	25,00

En las Tablas 24, 25 y 26, se presentan los resultados aplicados a temperaturas de 700°C, 750°C y 800°C.

**Tabla 24:** *Resultados de las variables de salida obtenidos a 700°C.*

Ensayo	%Absorción	%Contracción	IP
1	19,97	6,99	11,56
2	20,31	7,48	13,70
3	20,26	6,90	14,08
4	20,08	7,30	14,03
5	20,09	7,60	15,35
6	20,20	7,28	13,64
7	21,69	7,49	9,37
8	20,20	7,28	13,64
9	20,26	6,90	14,08
10	19,97	6,99	11,56
11	20,31	7,48	13,70
12	20,09	7,60	15,35
13	20,08	7,30	14,03
14	21,69	7,49	9,37

**Tabla 25:** Resultados de las variables de salida obtenidos a 750°C.

Ensayo	%Absorción	%Contracción	IP
1	19,55	7,52	11,56
2	19,65	7,03	13,70
3	19,80	6,48	14,08
4	19,71	7,13	14,03
5	19,51	6,81	15,35
6	20,04	7,44	13,64
7	21,19	6,95	9,37
8	20,04	7,44	13,64
9	19,80	6,48	14,08
10	19,55	7,52	11,56
11	19,65	7,03	13,70
12	19,51	6,81	15,35
13	19,71	7,13	14,03
14	21,19	6,95	9,37

**Tabla 26:** Resultados de las variables de salida obtenidos a 800°C.

Ensayo	%Absorción	%Contracción	IP
1	18,66	6,71	11,56
2	19,73	6,76	13,70
3	19,59	6,44	14,08
4	19,71	7,07	14,03
5	19,75	6,82	15,35
6	19,97	6,92	13,64
7	20,65	6,12	9,37
8	19,97	6,92	13,64
9	19,59	6,44	14,08
10	18,66	6,71	11,56
11	19,73	6,76	13,70
12	19,75	6,82	15,35
13	19,71	7,07	14,03
14	20,65	6,12	9,37

La Figura 28, muestra los resultados de ajustar distintos modelos a los datos de absorción de agua.

Analyze Mixture - Absorción					
Analyze Mixture - Absorción					
File name: C:\Users\User\Desktop\Universidad\Tesis\EXP VISTO Pf.sfx					
Estimated Full Model Effects for Absorción (%)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Mean	5809,93	1	5809,93		
Linear	0,150427	2	0,0752133	0,20	0,8190
Quadratic	1,21645	3	0,405483	1,14	0,3908
Special Cubic	2,8521	1	2,8521	22344164997431,35	0,0000
Error	8,93507E-13	7	1,27644E-13		
Total	5814,15	14			
Full Model Results					
Model	SE	R-Squared	Adj. R-Squared		
Linear	0,608167	3,57	0,00		
Quadratic	0,597086	32,40	0,00		
Special Cubic	3,57273E-7	100,00	100,00		

**Figura 28:**

*Distintos modelos ajustados a los datos de absorción de agua del diseño experimental para ladrillos Visto.*

Tomando en cuenta el criterio antes explicado del valor P, el modelo cúbico especial es el que se ajusta mejor a los datos con un valor P de 0, teniendo una confianza del 100%, se confirma mediante la figura 28 en la parte inferior, se muestra el valor de R<sup>2</sup>, donde se puede observar que se ajusta al modelo cúbico especial con un R<sup>2</sup>=100%, con el que el programa sugiere los óptimos en porcentajes de cada muestra de arcilla para minimizar la absorción: A5: 20,00%, A2: 40,00%, A3: 40,00%.

En la Figura 29, se observa que la correlación entre los componentes de la mezcla es inversamente proporcional entre dos de ellas, si una se encuentra en el máximo la otra se encontrará en el mínimo mientras que la tercera podrá moverse en el rango de mínimo a máximo. Las áreas coloreadas de verde pastel y lila corresponden a una baja absorción, lo que puede notar en la gráfica es que estas regiones se posicionan en los vértices del triángulo con mayor influencia en el objetivo de disminuir la absorción la región inferior derecha donde se encuentra el punto óptimo de: A3: 40,00%, A2: 40,00% y A5:20,00%.

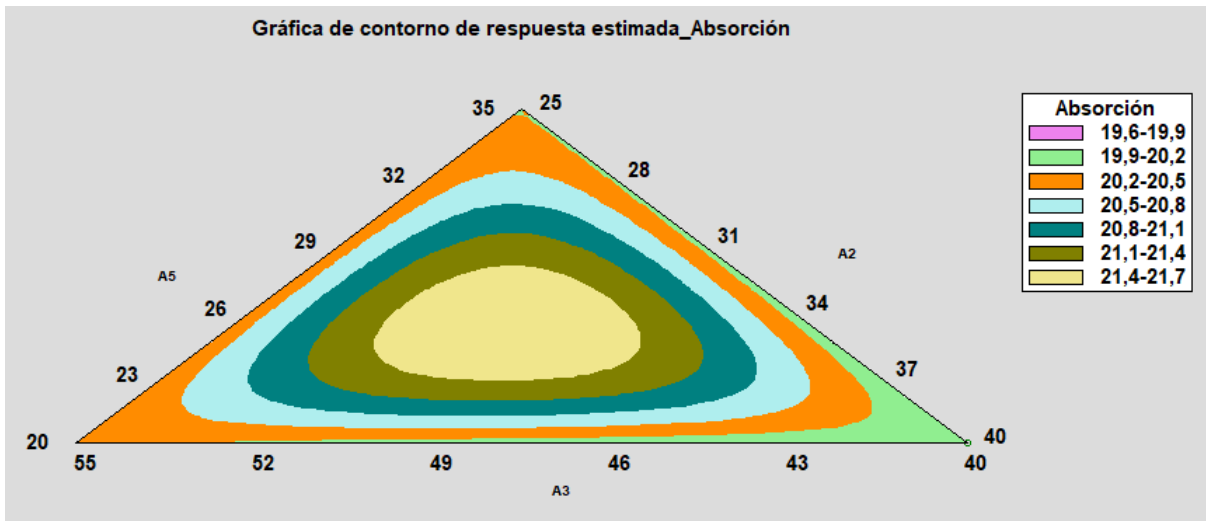


Figura 29:

Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Absorción de agua.

En la Figura 30 muestra los diferentes modelos ajustados a los datos de contracción.

Analyze Mixture - Contracción

**Analyze Mixture - Contracción**  
File name: C:\Users\User\Desktop\Universidad\Tesis\EXP VISTO Pf.sfx

Estimated Full Model Effects for Contracción (mm)

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Mean	696,117	1	696,117		
Linear	0,811627	2	0,405813	6,09	0,0166
Quadratic	0,732761	3	0,244254	10658,35	0,0000
Special Cubic	0,000183333	1	0,000183333		
Error	-1,30819E-14	7	-1,86884E-15		
Total	697,662	14			

Full Model Results

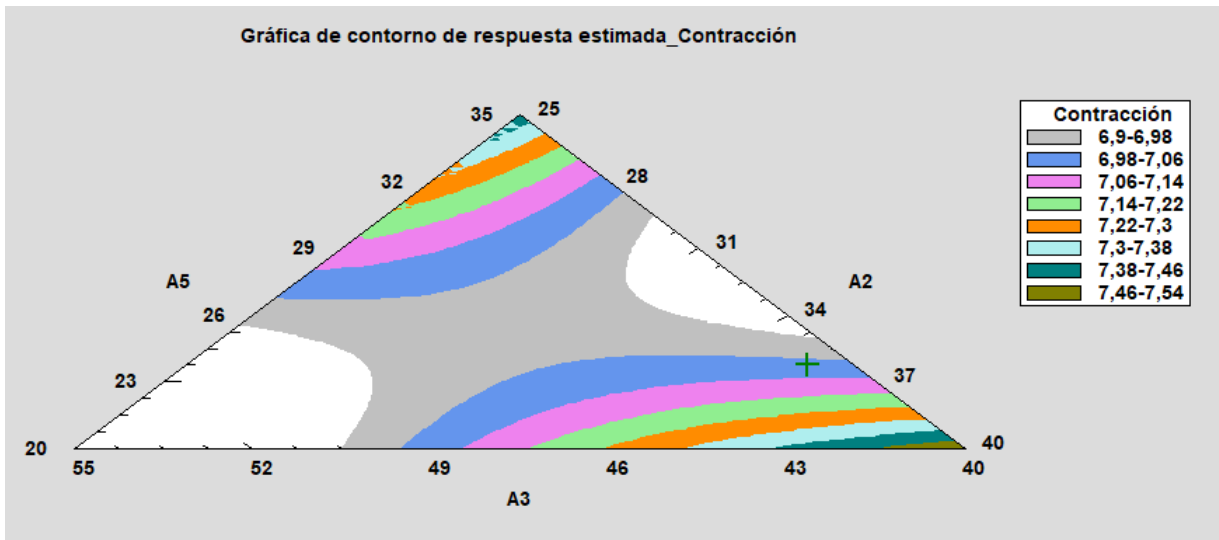
Model	SE	R-Squared	Adj. R-Squared
Linear	0,25813	52,55	43,92
Quadratic	0,00478714	99,99	99,98
Special Cubic	0,0	100,00	100,00

Figura 30:

Distintos modelos ajustados a los datos de contracción del diseño experimental para ladrillos Visto.

Para el caso de contracción, el menor valor de P se encuentra ajustando al modelo cuadrático con un valor de 0, teniendo una confianza del 100%, se confirma mediante la misma figura en

la parte inferior, donde se muestra el valor de  $R^2$ , al compararlo se puede observar que se ajusta al modelo cuadrático con un  $R^2=99,98\%$ , con el que obtuvieron los óptimos sugeridos por el programa en porcentajes de cada muestra de arcilla con la finalidad de mantener en 7% la contracción: A5: 23,80%, A2: 35,40%, A3: 40,80%, porcentajes similares con referencia a los de absorción.



**Figura 31:**

*Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Contracción.*

En la Figura 31, se puede observar como la tendencia de los valores en un rango cercano a 7 se encuentra en la parte centro superior e inferior con una tendencia hacia la derecha, demostrando la influencia de A2, en las regiones de color azul, mientras que la parte céntrica correspondería a valores menores de contracción representados por el color plomo. La relación entre los componentes de mezcla se mantiene como en el caso de absorción, dos de ellas se comportan inversamente mientras que la última se mueve libre por su rango correspondiente.

Para el caso de la plasticidad, en la Figura 32, se observa que el modelo cúbico especial es el que se ajusta mejor a los datos con un valor P de 0, teniendo una confianza del 100%, se confirma mediante la misma figura en la parte inferior, donde se muestra el valor de  $R^2$ , al compararlo se puede observar que se ajusta al modelo cúbico especial con un  $R^2=100\%$ , con el que obtuvieron los óptimos sugeridos por el programa en porcentajes de cada muestra de arcilla con el objetivo de mantener la plasticidad en 12, de igual manera la variación no es significativa de los valores anteriores obtenidos tanto para absorción como para contracción.

Analyze Mixture - Plásticidad

File name: C:\Users\User\Desktop\Universidad\Tesis\EXP VISTO Pf.sfx

Estimated Full Model Effects for Plásticidad

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Mean	2404,11	1	2404,11		
Linear	3,51395	2	1,75697	0,44	0,6562
Quadratic	8,18414	3	2,72805	0,61	0,6288
Special Cubic	35,9495	1	35,9495	389187396439223,84	0,0000
Error	6,46594E-13	7	9,23706E-14		
Total	2451,76	14			

Full Model Results

Model	SE	R-Squared	Adj. R-Squared
Linear	2,00303	7,37	0,00
Quadratic	2,11983	24,55	0,00
Special Cubic	3,03925E-7	100,00	100,00

Figura 32:

Distintos modelos ajustados a los datos de plasticidad del diseño experimental para ladrillos Visto.

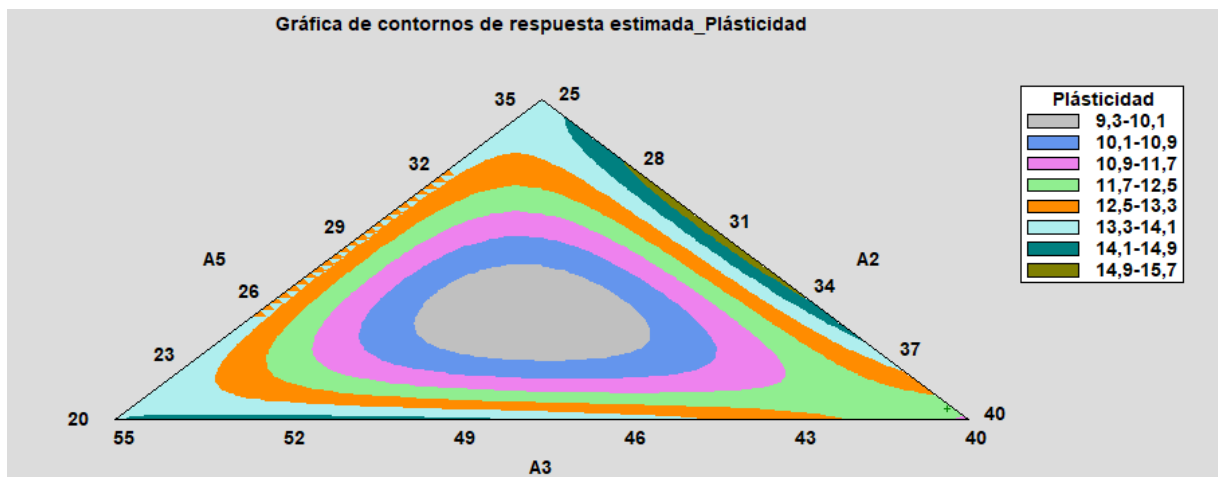


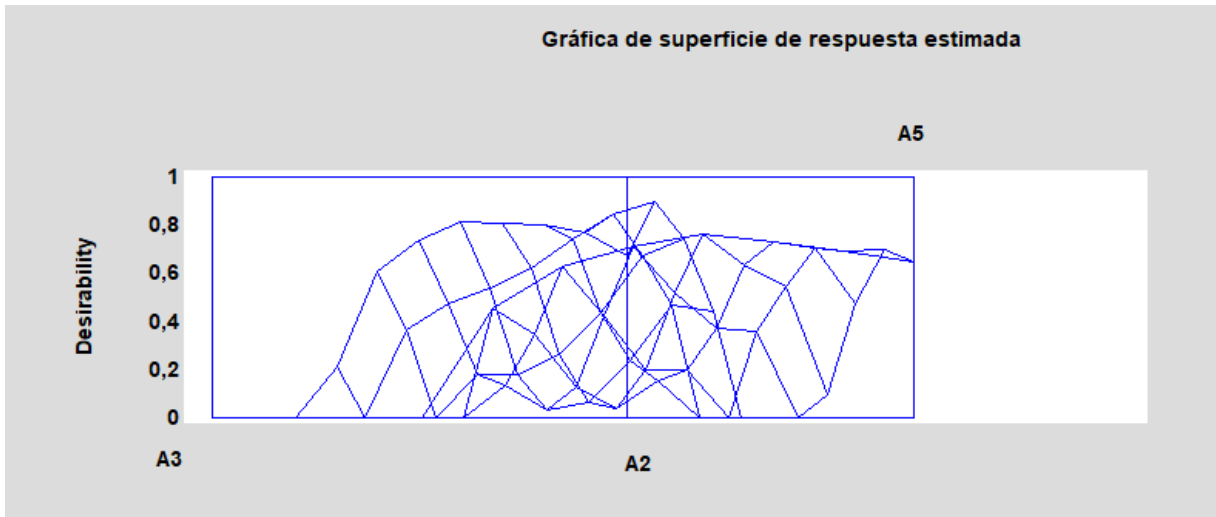
Figura 33:

Gráfica de contornos de la respuesta estima para la Plasticidad.

En la Figura 33, se puede ver que las regiones comprometidas en un rango aceptable para mantener la plasticidad en 12 son de color verde pastel y naranja con valores que van desde 11,7 – 13,3, se concentran alrededor del centro tendiendo al borde del triángulo sin llegar a las aristas que corresponden a valores que superan este rango, la relación entre los componentes de mezcla se mantiene como en cada caso entre dos ellas se comportan inversamente mientras que una queda libre de moverse por su rango; sin embargo, en este caso, se puede notar que para llegar al óptimo se alejan de los valores medios.

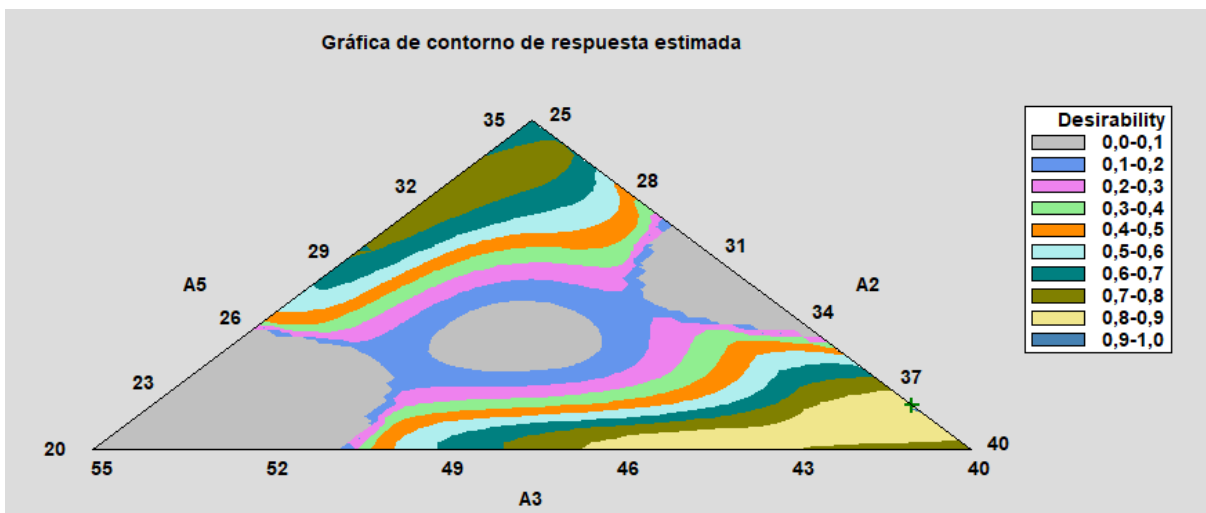


Como en el caso de los ladrillos Tochano, tras analizar las variables de salida del estudio por separado se requiere conocer el análisis conjunto de las tres variables y su comportamiento frente a los componentes para conocer la mezcla óptima necesaria para la ejecución de la prueba de campo.



**Figura 34:**

*Gráfica de superficie de la respuesta estima para la multirrespuesta.*



**Figura 35:**

*Gráfica de contornos de la respuesta estima para la multirrespuesta.*

Las Figuras 34 y Figura 35, representan las distintas mezclas en función de la deseabilidad, donde se puede visualizar que en la gráfica de superficie existen picos que se acercan a una mejor deseabilidad en A2 y A5, mientras que conforme se acerca al centro de la gráfica, la deseabilidad disminuye, por ende, se alejan del objetivo planteado al programa ya mencionado en el anterior párrafo. Para observar de mejor manera se presenta la gráfica de contorno, donde las regiones coloreadas de verde, color piel y azul representan esos picos de deseabilidad con rangos de 0,7 - 0,8, 0,8 - 0,9 y 0,9 - 1 respectivamente, como ya se explicó en el área central del triángulo se encuentran los puntos más bajos de deseabilidad, mientras que en el punto de gráfica simbolizado por la cruz verde es donde convergen las tres especificaciones de minimizar – Absorción, mantener en 7% – Contracción y mantener – Plasticidad en 12.

Multiple Response Optimization						
Response	Desirability Low	Desirability High	Goal	Weights First	Weights Second	Impact
Absorción	19,97	21,69	Minimize	1,0		5,0
Plásticidad	9,37	15,35	12,0	1,0	1,0	2,0
Contracción	6,9	7,6	7,2	1,0	1,0	2,0

Row	Absorción	Plásticidad	Contracción	Predicted Desirability	Observed Desirability
1	19,97	11,56	7,52	0,672983	0,671435
2	20,31	13,7	7,03	0,631323	0,627781
3	20,26	14,08	6,48	0,0	0,0
4	20,08	14,03	7,13	0,741169	0,738803
5	20,09	15,35	6,81	0,0	0,0
6	20,2	13,64	7,44	0,649435	0,648686
7	21,69	9,37	6,95	0,0	0,0
8	20,2	13,64	7,44	0,649435	0,648686
9	20,26	14,08	6,48	0,0	0,0
10	19,97	11,56	7,52	0,672983	0,671435
11	20,31	13,7	7,03	0,631323	0,627781
12	20,09	15,35	6,81	0,0	0,0
13	20,08	14,03	7,13	0,741169	0,738803
14	21,69	9,37	6,95	0,0	0,0

**Figura 36:**

*Deseabilidad máxima de la multirrespuesta para la mezcla de ladrillos Visto.*

Con la misma premisa, de la maximización de la función de deseabilidad, en este caso se busca: minimizar Absorción, mantener en 7% Contracción y mantener Plasticidad en 12, como se muestra en la Figura 36, la deseabilidad máxima se logra en el ensayo número 4, con el valor óptimo de deseabilidad más cercano a 1 correspondiente a 0,741791. Resultando en los valores óptimos mostrados en la Figura 37 de: A5: 22,00%, A2: 38,00%, A3: 40,00%, con los

cuales las variables absorción, contracción y plasticidad se acercan a los deseables con 20%, 7,20 % y 13,00% respectivamente.

Multiple Response Optimization			
<b>Optimize Desirability</b>			
Optimum value = 0,904443			
Factor	Low	High	Optimum
A5	20,0	35,0	22,0054
A3	40,0	55,0	40,0
A2	25,0	40,0	37,9946
Response	Optimum		
Absorción	20,0031		
Plásticidad	13,1121		
Contracción	7,2		

**Figura 37:**

*Resultado de la mezcla óptima de ladrillos Visto.*

### 3.4. Prueba de campo

Se realizó la prueba de campo, en el taller en sus condiciones normales de operación, con las dosificaciones óptimas tanto para los ladrillos Tochano como para Visto. A los ladrillos resultantes se les aplicó los ensayos de absorción de agua y resistencia mecánica, establecidos en la norma NTE INEN 3049.

Durante la prueba de campo se controla la temperatura máxima a la que llega el horno, donde se obtiene para ladrillo Tochano 784°C y para ladrillo Visto 752°C.

## 3.4.1. Ladrillos Tochano

**Tabla 27:** Resultados de los ensayos de los ladrillos de la prueba de campo para ladrillos Tochano.

<b>Ladrillos Tochano</b>			
	Absorción de agua (%)	Succión de agua (g/cm <sup>2</sup> min)	Resistencia a la compresión (MPa)
	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 1</b>
	15,13	0,032	4,65
	16,34	0,029	5,92
	15,87	0,029	4,53
	15,45	0,026	5,38
	15,89	0,027	5,48
Promedio	<b>15,74</b>	<b>0,029</b>	<b>5,19</b>
	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 2</b>
	16,27	0,026	4,35
	15,42	0,027	5,86
	16,18	0,026	5,93
	15,66	0,025	4,76
	15,85	0,028	4,58
Promedio	<b>15,88</b>	<b>0,026</b>	<b>5,10</b>
	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 3</b>
	15,27	0,022	4,19
	15,97	0,027	4,79
	15,43	0,024	5,88
	15,16	0,025	4,16
	15,39	0,022	6,59
Promedio	<b>15,44</b>	<b>0,024</b>	<b>5,12</b>
<b>Promedio Total</b>	<b>15,69</b>	<b>0,026</b>	<b>5,14</b>

En la Tabla 27, se exponen los resultados obtenidos para ladrillos Tochano, los mismos que muestran una mejoría considerable mediante la variación en la dosificación empleada, muestran una reducción en absorción de agua, el rango promedio de 5 unidades es de 15,44% a 15,88%, que en comparación con los ladrillos del diagnóstico inicial con un rango promedio de 5 unidades de 17,74% a 18,00% con un porcentaje de mejora respecto al inicial de 12,30%.

La resistencia a la compresión, tiene una relación inversamente proporcional a la absorción de agua, es decir, si la absorción disminuye la resistencia incrementa debido a que los ladrillos con baja absorción de agua contienen menos poros creando una estructura más sólida por ende mayor resistencia y durabilidad, antes del cambio se obtuvo un rango del promedio de 5 unidades de 2,30MPa a 2,40MPa, que incrementó incrementando con la nueva dosificación

a un rango promedio de 5 unidades de 5,10MPa a 5,19MPa, con un porcentaje de mejora en comparación al inicial de 118,72%.

Los resultados promedio de 5 unidades para succión de agua cumplen con lo establecido en la Norma NTE INEN 3049-2 para los ladrillos Tochano, ya que el valor promedio obtenido fue de 0,026 g/cm<sup>2</sup> min, que se encuentra por debajo del mínimo aceptado (0,10 g/cm<sup>2</sup> min).

### 3.4.2. Ladrillo Visto

**Tabla 28:** Resultados de los ensayos de los ladrillos de la prueba de campo para ladrillos Visto.

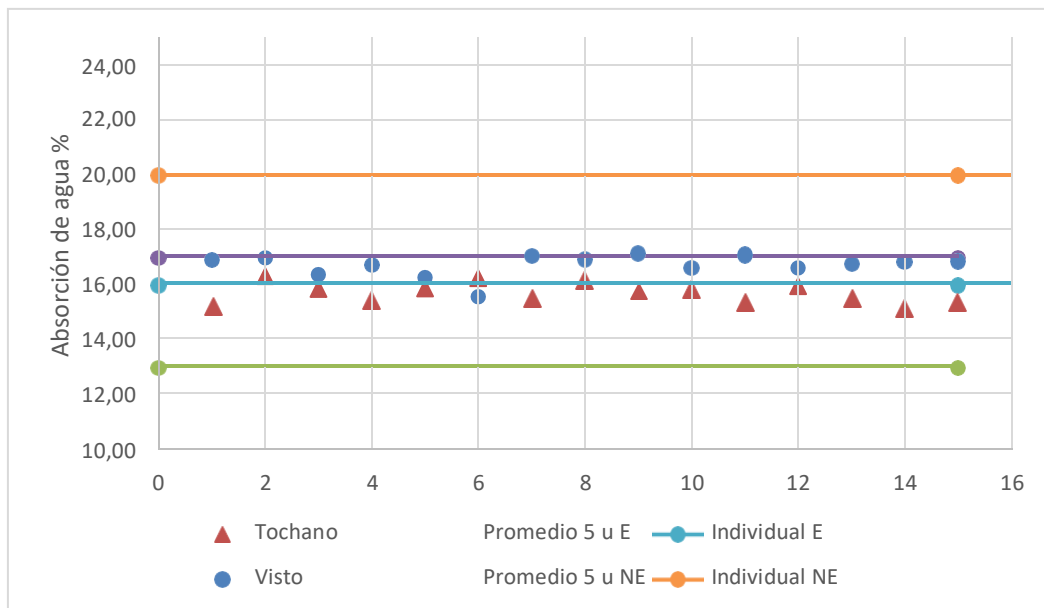
<b>Ladrillos Visto</b>			
	Absorción de agua (%)	Succión de agua (g/cm <sup>2</sup> min)	Resistencia a la compresión (MPa)
	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 1</b>
	16,91	0,050	3,94
	17,00	0,054	4,37
	16,39	0,046	3,51
	16,74	0,048	4,41
	16,29	0,045	4,21
Promedio	<b>16,67</b>	<b>0,049</b>	<b>4,09</b>
	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 2</b>
	15,59	0,040	3,60
	17,06	0,055	4,35
	16,94	0,053	4,95
	17,15	0,062	4,00
	16,64	0,047	3,80
Promedio	<b>16,68</b>	<b>0,051</b>	<b>4,14</b>
	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 3</b>
	17,10	0,058	3,91
	16,64	0,047	4,10
	16,64	0,046	4,54
	16,85	0,048	3,05
	16,87	0,050	4,37
Promedio	<b>16,82</b>	<b>0,050</b>	<b>3,99</b>
Promedio Total	<b>16,72</b>	<b>0,050</b>	<b>4,07</b>

En la Tabla 28, se muestran los resultados de las propiedades de los ladrillos Visto obtenidos de la prueba de campo. Con respecto a la absorción de agua de los ladrillos del diagnóstico que tenían un rango promedio de 5 unidades de 19,75% a 20,46%, a los ladrillos producto de

la prueba de campo con un rango promedio de 5 unidades de 16,67% a 16,82%, se obtuvo un porcentaje de mejora del 16,40%. Por otro lado, la resistencia a la compresión se incrementa de un rango promedio de 5 unidades de 1,61MPa a 1,83MPa a un rango promedio de 5 unidades de 3,99MPa a 4,14MPa, demostrando un porcentaje de mejora del 136,63% con respecto al diagnóstico inicial.

De igual forma para la succión de agua para este tipo de ladrillos cumplen con lo establecido en la norma NTE INEN 3049-2, con un valor promedio de 0,05 g/cm<sup>2</sup> min; inferior al mínimo establecido (0,10 g/cm<sup>2</sup> min).

En la Figura 38, se muestran todos los resultados obtenidos delimitados por las líneas coloreadas que representan los parámetros normativos para ladrillos estructurales y no estructurales de absorción de agua, donde los ladrillos Tochano resultantes de la prueba de campo cumplen en su totalidad con la norma NTE INEN 3049 - 3 (2019) para ladrillos no estructurales.



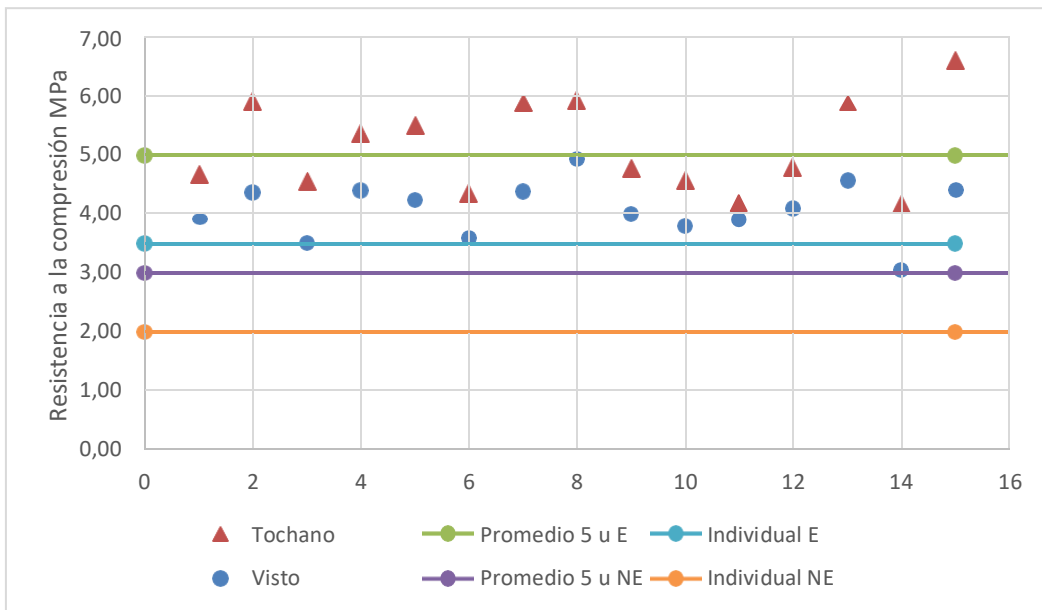
**Figura 38:**

*Gráficas de los resultados de absorción de agua para los ladrillos tipo Tochano y Visto obtenidos en la prueba de campo.*

Nota. Las líneas coloreadas representan los límites máximos permitidos según la norma NTE INEN 3049 de absorción de agua. La línea de color verde indica el valor promedio de 5 unidades para ladrillos estructurales. La línea celeste representa el valor individual para los ladrillos estructurales. La línea de color morado indica el valor promedio de 5 unidades para

ladrillos No estructurales. La línea naranja representa el valor individual para los ladrillos No estructurales.

En la Figura 39, se observan los resultados obtenidos para ladrillos Tochano y ladrillos Visto producto de la prueba de campo, para el ensayo de resistencia a la compresión, cumplen en su totalidad la norma *NTE INEN 3049 - 3 (2019)* para ladrillos no estructurales.



**Figura 39:**

*Gráficas de los resultados de resistencia mecánica para los ladrillos tipo Tochano y Visto obtenidos en la prueba de campo.*

Nota. Las líneas coloreadas representan los límites mínimos permitidos según la norma NTE INEN 3049 de resistencia a la compresión. La línea de color verde indica el valor promedio de 5 unidades para ladrillos estructurales. La línea celeste representa el valor individual para los ladrillos estructurales. La línea de color morado indica el valor promedio de 5 unidades para ladrillos No estructurales. La línea naranja representa el valor individual para los ladrillos No estructurales.

En la Tabla 29 y Tabla 30 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para ambos tipos de ladrillos.

**Tabla 29:** Resumen de los resultados de absorción de agua.

Absorción de agua (%)							
Tipo de ladrillo	Norma INEN 3049				Inicial	Optimizado	%Mejora respecto a inicial
	E		NE				
	Individual	Prom. 5 U	Individual	Prom. 5 U			
<b>Tochano</b>	16,00	13,00	20,00	17,00	17,89	15,69	<b>12,30</b>
<b>Visto</b>	16,00	13,00	20,00	17,00	20,00	16,72	<b>16,40</b>

Nota. Estructural (E), No estructural (NE), Promedio de 5 unidades (Prom.5 U).

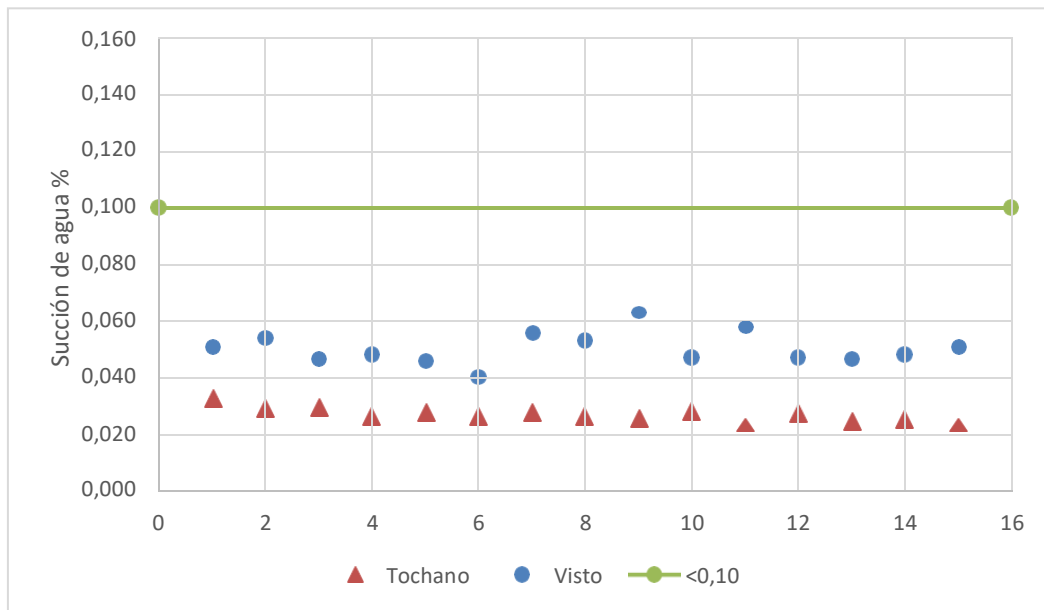
**Tabla 30:** Resumen de los resultados de resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión (MPa)							
Tipo de ladrillo	Norma INEN 3049				Inicial	Optimizado	%Mejora respecto a inicial
	E		NE				
	Individual	Prom. 5 U	Individual	Prom. 5 U			
<b>Tochano</b>	3,50	5,00	2,00	3,00	2,35	5,14	<b>118,72</b>
<b>Visto</b>	3,50	5,00	2,00	3,00	1,72	4,07	<b>136,63</b>

Nota. Estructural (E), No estructural (NE), Promedio de 5 unidades (Prom.5 U).

Adicionalmente, se analizaron otros parámetros como parte de los objetivos planteados para la realización de este trabajo de titulación: succión de agua, tolerancia dimensional y distorsión de caras o aristas también conocido como alabeo.





**Figura 40:**

*Gráficas de los resultados de succión de agua para los ladrillos tipo Tochano y Visto obtenidos en la prueba de campo.*

En la Figura 40, se muestran los resultados de succión de agua que cumplen con lo expuesto en la norma para los dos tipos de ladrillos siendo estos aceptables en función de la calidad del ladrillo.

En la Tabla 31 se muestran los resultados de tolerancia dimensional de los ladrillos Tochano.

**Tabla 31:** *Resultados de tolerancia dimensional.*

Ladrillo Tochano	Dimensiones		
	Largo	Ancho	Alto
1	38,80	9,10	18,40
2	38,90	9,20	18,30
3	38,85	9,25	18,30
4	38,80	9,25	18,30
5	38,80	9,15	18,40
6	38,90	9,20	18,35
7	38,85	9,20	18,40
8	38,90	9,15	18,35
9	38,90	9,10	18,40
10	38,80	9,20	18,30
<b>Promedio</b>	<b>38,85</b>	<b>9,18</b>	<b>18,35</b>

**Tabla 32:** Límites de tolerancia dimensional para ladrillos Tochano.

<b>Ladrillos Tochano</b>			
<b>Límites para el promedio de las dimensiones</b>			
	<b>Dimensiones</b>		
	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
<b>Dimensión nominal</b>	<b>38cm</b>	<b>9cm</b>	<b>18cm</b>
<b>Cálculo (D)</b>	$\pm 2$	$\pm 1$	$\pm 1$
<b>Valores dentro de los cuales puede resultar el promedio de las dimensiones reales</b>	36 a 40cm	8 a 10cm	17 a 19cm
<b>Recorrido de las dimensiones</b>			
<b>Cálculo (R)</b>	4cm	1cm	1cm

Nota. (D): Diferencia entre la dimensión nominal y el promedio de las dimensiones reales.

(R): Diferencia entre la mayor y menor medida de una dimensión entre piezas individuales.

En la Tabla 32, se muestran los límites de la tolerancia dimensional para ladrillos Tochano, dado que las dimensiones declaradas por el fabricante para ladrillos Tochano son: longitud, 38cm, Ancho, 9cm y Alto, 18cm, esto quiere decir, que en longitud las dimensiones aceptadas son 36 a 40 cm, ya que el valor D es  $\pm 2$ , para ancho son de 8 a 10cm y para alto de 17 a 19cm, ya que les corresponde un valor calculado D de  $\pm 1$ . Si se observa la Tabla 31, todos los valores cumplen con estas especificaciones para ladrillos estructurales. Al igual que, tomando en cuenta la normativa para ladrillos no estructurales se cumple en su totalidad ya que las medidas nominales se encuentran dentro del  $\pm 3\%$  de variación.

**Tabla 33:** Resultados de tolerancia dimensional para ladrillos Visto.

<b>Ladrillo Visto</b>	<b>Dimensiones</b>		
	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
<b>1</b>	28,00	8,20	13,10
<b>2</b>	27,90	8,20	13,00
<b>3</b>	27,90	8,15	13,10
<b>4</b>	27,80	8,25	13,00
<b>5</b>	28,00	8,25	13,10
<b>6</b>	27,90	8,20	13,00
<b>7</b>	27,90	8,15	13,05
<b>8</b>	28,00	8,25	13,10
<b>9</b>	27,90	8,20	13,00
<b>10</b>	28,00	8,15	13,05
<b>Promedio</b>	<b>27,93</b>	<b>8,20</b>	<b>13,05</b>

**Tabla 34:** Límites para tolerancia dimensional para ladrillos Visto.

<b>Ladrillos Visto</b>			
<b>Límites para el promedio de las dimensiones</b>			
	Dimensiones		
	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
<b>Dimensión nominal</b>	<b>28cm</b>	<b>8cm</b>	<b>13cm</b>
<b>Cálculo (D)</b>	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$
<b>Valores dentro de los cuales puede resultar el promedio de las dimensiones reales</b>	27 a 29cm	7 a 9cm	12 a 14cm
<b>Recorrido de las dimensiones</b>			
<b>Cálculo (R)</b>	3cm	1cm	1cm

Nota. (D): Diferencia entre la dimensión nominal y el promedio de las dimensiones reales.

(R): Diferencia entre la mayor y menor medida de una dimensión entre piezas individuales.

En la Tabla 34, se muestran los límites de la tolerancia dimensional para ladrillos Visto, dado que las dimensiones declaradas por el fabricante para ladrillos Visto son: longitud, 28cm, Ancho, 8cm y Alto, 13cm, y el valor calculado D para largo, ancho y alto es de  $\pm 2$ , las dimensiones aceptadas para longitud son 27 a 29 cm, para ancho son de 7 a 9cm y para alto de 12 a 14cm. Todos los valores de la Tabla 33, cumplen con estas especificaciones para ladrillos estructurales. Al igual que, tomando en cuenta la normativa para ladrillos no estructurales se cumple en su totalidad ya que las medidas nominales se encuentran dentro del  $\pm 3\%$  de variación.

En la Tabla 35 muestra los resultados obtenidos para el ensayo de alabeo de los dos tipos de ladrillos.

**Tabla 35:** Resultados obtenidos para Alabeo.

<b>Tipo</b>	<b>Dimensión Nominal (mm)</b>	<b>Cara</b>	<b>Promedios diagonales (mm)</b>	<b>% Respecto a la dimensión nominal</b>
<b>Ladrillo Tochano</b>	380	Cara 1	1,50	0,39
	180	Cara 2	1,50	0,83
<b>Ladrillo Visto</b>	280	Cara 1	1,00	0,36
	130	Cara 2	1,50	1,15

Como se observa en la Tabla 35, en lo referente al alabeo, los resultados promedios para ladrillos tipo Tochano y Visto, son similares y los porcentajes respecto a la dimensión nominal no superan el 2% exigido por la norma para ladrillos no estructurales, mientras que para ladrillos estructurales según la norma no debe superar el 1%, por consecuente sólo los ladrillos Tochano cumplen con esta norma.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

La caracterización de materias primas y pastas permitió concluir que, de los 5 tipos de arcilla, la arcilla con mejores características es la A3, presenta un pH óptimo y confiere el carácter plástico a la pasta. Por otro lado, las arcillas que ayudan a controlar la excesiva contracción son A1 y A2, del mismo modo la arcilla que contribuye a mejorar la absorción de agua es la A5.

El diagnóstico inicial reafirmó que las muestras de los dos tipos de ladrillos fabricados en el taller no cumplen con los requisitos de absorción de agua y resistencia a la compresión, establecidos en la norma NTE INEN 3049, ladrillos cerámicos.

La propuesta planteada para la reducción de absorción de agua y mejorar la resistencia mecánica se enfocó en generar dosificaciones idóneas mediante diseño experimental de mezclas, con las que se consiguieron las mezclas óptimas para los dos tipos de ladrillos, lo que permitió mejorar estas propiedades en el producto final, cumpliendo con la normativa vigente para ladrillos no estructurales. Las mezclas que se aplicaron en la prueba de campo corresponden a los porcentajes óptimos obtenidos; para ladrillo Tochano es: A1: 21,50%, A3: 54,50%, A4: 16,00% y A5: 8,00%. Y para ladrillo Visto es: A2: 38,00%, A3: 40,00%, y A5: 22,00%.

El porcentaje de absorción de agua para el ladrillo Tochano disminuyó de 17,89% a 15,69% lo que implica una mejora en relación al valor inicial de 12,30%; para el ladrillo Visto se disminuyó de 20,00% a 16,72% es decir una mejora en relación al valor inicial de 16,40%.

Con respecto a la resistencia mecánica, se alcanzaron mejoras más significativas para el ladrillo Tochano se incrementó de 2,35 MPa a 5,14 MPa lo que implica una mejora de 118,72% en relación al valor inicial; en cambio para el ladrillo Visto se incrementó de 1,72 MPa a 4,07 MPa demostrando una mejora al valor inicial de 136,63%.

Adicional se analizaron otras propiedades establecidas en la norma NTE INEN 3049 en los ladrillos productos de la dosificación adecuada como succión de agua, tolerancia dimensional y alabeo. Con respecto a succión de agua de los dos tipos de ladrillos se encuentran por debajo del 0,10 g/cm<sup>2</sup> min por lo que no requieren humedecimiento previo para su colocación, como lo estipula la norma NTE INEN 3049-2. En cuanto a la tolerancia dimensional, los valores se encuentran dentro del rango de  $\pm 3\%$  requerido por la norma NTE INEN 3049-3 para

ladrillos No estructurales. Además, el ladrillo Tochano admite para la longitud  $\pm 2$ cm de variación entre medidas, para ancho y alto la variación entre medidas va en  $\pm 1$ cm, los ladrillos analizados se encuentran dentro de los rangos mencionados, es decir cumple en su totalidad con la norma NTE INEN 3049-2 para ladrillos Estructurales; de igual manera, para ladrillo Visto la variación admitida entre medidas para largo, ancho y alto es de  $\pm 1$ cm, por lo que, los ladrillos se encuentran dentro de estos rangos y cumplen con la norma NTE INEN 3049-2 para ladrillos Estructurales. En relación al alabeo los dos tipos de ladrillos presentan valores inferiores al 2% de su dimensión nominal cumpliendo lo requerido para ladrillos no estructurales, además el ladrillo tipo Tochano cumple con lo requerido para ladrillos estructurales.

<b>RESUMEN DE VALORES DE ABSORCIÓN DE AGUA (%)</b>				
<b>Tipo</b>	Inicial	Optimizado	Estructural (INEN 3049)	No estructural (INEN 3049)
<b>Tochano</b>	17,89	15,69	13,00	17,00
<b>Visto</b>	20,00	16,72	13,00	17,00

<b>RESUMEN DE VALORES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)</b>				
<b>Tipo</b>	Inicial	Optimizado	Estructural (INEN 3049)	No estructural (INEN 3049)
<b>Tochano</b>	2,35	5,14	5,00	3,00
<b>Visto</b>	1,72	4,07	5,00	3,00

Tras realizados los ensayos de absorción de agua, resistencia a la compresión, succión de agua, tolerancia dimensional y alabeo, en ladrillos obtenidos con las óptimas dosificaciones en la prueba de campo, se ha identificado que las propiedades cumplen en su totalidad con la norma INEN 3049-3, para ladrillos no estructurales, se puede concluir que, los ladrillos Tochano y Visto, pueden ser utilizados con fines no estructurales.

## Recomendaciones

Se recomienda en primera instancia, que el taller implemente las dosificaciones optimizadas obtenidas en el presente trabajo, que garantizan la reducción de la absorción de agua y la mejora de la resistencia a la compresión.

Se recomienda realizar controles a lo largo de toda la producción, de ser necesario la adquisición de equipos determinados que contribuyan para este propósito, en puntos estratégicos como:

- Mezclado: controlar la humedad de cada materia prima.
- Formación de los ladrillos: comprobar que la presión en la bomba de vacío sea apropiada y constante para conseguir una resistencia en verde adecuada.
- Horno: Llevar un control constante de la temperatura durante todo el ciclo de cocción.

También se recomienda la evaluación de las características mecánicas de los equipos presentes en el proceso como: trituradoras de rodillo, mezcladora, extrusora, bomba de vacío, bandas transportadoras, horno; con la finalidad de realizar mantenimientos preventivos o correctivos dependiendo el caso.

Por otro lado, a la dirección del proyecto “Mi primera certificación INEN: Apoyo para su implementación a los talleres productores ladrilleros y tejeros cerámicos de Racar”, se recomienda, evaluar el desarrollo de futuros trabajos de titulación en la ladrillera, en temas como: Control de parámetros en el proceso, modificar la granulometría para cumplir los parámetros de la norma NTE INEN 3049-2, realizar un estudio económico, implementación de un secadero que aproveche el calor del horno durante la cocción; con el fin de seguir mejorando los productos de la ladrillera artesanal.

**Referencias bibliográficas**

- Afanador García, N., Jaime, A. I., & Durán, C. L. (2013). Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander. *Épsilon*, 1(20), 101-119.
- American Society for Testing and Materials. (1995). <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-de-el-salvador/mecanica-de-suelos/astm-c-0117-95-norma-astm-c0117-95/58838329>
- Asociación nacional de fabricantes de morteros y SATE. (2021a, julio 21). *Morteros de albañilería en contacto con ladrillos de baja succión—Artículos técnicos Morteros de Albañilería*. ANFAPA - Asociación nacional de fabricantes de morteros y SATE. <https://anfapa.com/articulos-tecnicos-morteros-de-albanileria/1254/morteros-de-albanileria-en-contacto-con-ladrillos-de-baja-succion>
- Asociación nacional de fabricantes de morteros y SATE. (2021b, julio 28). *Morteros de albañilería en contacto con ladrillos de alta succión—Artículos técnicos Morteros de Albañilería*. ANFAPA - Asociación de fabricantes de morteros y SATE. <https://anfapa.com/articulos-tecnicos-morteros-de-albanileria/1256/morteros-de-albanileria-en-contacto-con-ladrillos-de-alta-succion>
- Barrachina Albert, E. (2011). Valorización de arcillas españolas para su incorporación en la formulación de pastas cerámicas de cocción blanca [Ph.D. Thesis, Universitat Jaume I]. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://doi.org/10.6035/11810.2011.15008>
- Barranzuela, J. (2014). *PROCESO PRODUCTIVO DE LOS LADRILLOS DE ARCILLA PRODUCIDOS EN LA REGION PIURA*. 95.
- Barranzuela Lescano, J. E. (2014). Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la Región Piura. *Universidad de Piura*. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1755>



- Bautista Gallegos, M. E., & Roldan Banegas, C. F. (2022). *Estudio del proceso productivo de la elaboración de ladrillos artesanales basado en la norma INEN 3049* [bachelorThesis, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/39402>
- Benites Zapata, V. B. (2017). *Adobe estabilizado con extracto de cabuya (Furcraea andina)*. <https://hdl.handle.net/11042/2993>
- Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J., & Quintero, J. (2003). Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.27\(105\).2003.2092](https://doi.org/10.18257/raccefyn.27(105).2003.2092)
- Bocanegra Bernal, M. H. (2021). La contracción de secado de los productos cerámicos de construcción base arcilla. *Issuu*, 178. [https://issuu.com/creativosrood/docs/cicdech\\_178\\_mayo\\_18/s/12352053](https://issuu.com/creativosrood/docs/cicdech_178_mayo_18/s/12352053)
- Castro Lopes, M. (2021, julio 12). Control de humedad en fabricación de ladrillos -Sensores NIR - SCL [Empresa]. SCL Sistemas de Control de Línea, S.L. <https://scl.es/blog/fabricacion-de-ladrillos-sensores-nir-ndc/>
- Corredor Méndez, K. L. (2020, mayo 11). *Estudio para determinar la factibilidad en la fabricación de ladrillos de arcilla a partir del reciclaje de las colillas de cigarrillo*. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1144>
- Coyago, J. A. R. (2021). “DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LADRILLOS MACIZOS FABRICADOS CON DIFERENTES TIPOS DE ARCILLA DEL CANTÓN PASTAZA Y SU COMPARACIÓN CON EL LADRILLO COMÚN”.
- Deleg Quichimbo, N. M. (2010). *Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia Susudel* [bachelorThesis]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2397>
- Díaz, L. A., & Torrecillas, R. (2002). *Arcillas cerámicas: Una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones*. <https://digital.csic.es/handle/10261/4676>

- Fernández Bao, S. (2020). *Diseño de experimentos: Diseño factorial* [Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya].  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/339723>
- Florez Arenas, A. (2016). *Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de ladrillos en la ladrillera Mariscal Robledo S.A.*  
<https://hdl.handle.net/11059/6338>
- Galindo Oramas, R. (2017). <https://rafagalindoceramica.com/>. *Rafael Galindo Ceramista.*  
<https://rafagalindoceramica.com/>
- García León, R. A. (2018). *Determinación de la mezcla óptima de arcilla para el mejoramiento de la calidad del bloque h-10 en la industria cerámica.*  
<http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/1970>
- García Verduch, A. (1985). Origen y composición de las arcillas cerámicas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 24(6), 395-404.
- Gonzalez Casique, C. (2019). *Análisis de diseño de experimentos con respuesta múltiple que mejore las oportunidades de innovación.*  
<https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/791>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda edición). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.  
[https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)
- Huamani Mollo, M. A., & Solís Guerra, S. (2020). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de unidades de albañilería de arcilla maciza adicionadas con diatomita del yacimiento de San Juan de Tarucani, Arequipa 2020. *Universidad Continental.*  
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8087>

- IMH Campus. (s. f.). *Tolerancias Dimensionales* [Carpeta]. IMH. Recuperado 18 de octubre de 2023, de <https://www.imh.eus/es/imh/comunicacion/docu-libre/medicion-tridimensional/resultados/tolerancias/dimensionales>
- Kömmerling, R. (2011, enero 14). Los materiales aislantes: La Porosidad. *Retó KÖMMERLING*. <https://retokommerling.com/los-materiales-aislantes-la-porosidad/>
- LADRILLOS CERÁMICOS. PARTE 1: TÉRMINOS Y DEFINICIONES, CLASIFICACIÓN Y REQUISITOS DE LAS DIMENSIONES MODULARES*. (2018). Servicio Ecuatoriano de Normalización.
- LADRILLOS CERÁMICOS. PARTE 2: UNIDADES DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL. REQUISITOS*. (2019). Servicio Ecuatoriano de Normalización.
- LADRILLOS CERÁMICOS. PARTE 3: UNIDADES DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL. REQUISITOS*. (2019).
- LADRILLOS CERÁMICOS. PARTE 5: METODOS DE ENSAYO*. (2019). Servicio Ecuatoriano de Normalización.
- Maldonado Carrasco, D. A. (2003). Estudio de La Arcilla para La Fabricacion Del Ladrillo Cocido en Huancayo y Pucallpa. *Universidad Nacional de Ingeniería*. <https://es.scribd.com/document/380617515/ESTUDIO-DE-LA-ARCILLA-PARA-LA-FABRICACION-DEL-LADRILLO-COCIDO-EN-HUANCAYO-Y-PUCALLPA>
- Molina Arias, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? *Pediatría Atención Primaria*, 19(76), 377-381.
- Napolitano, N. (s. f.). Diseño de Experimentos. *Universidad Nacional Autónoma de México*. [https://tuaulavirtual.educatic.unam.mx/pluginfile.php/1760839/mod\\_resource/content/1/Napolitano%20Dise%C3%B1o%20de%20experimentos.pdf](https://tuaulavirtual.educatic.unam.mx/pluginfile.php/1760839/mod_resource/content/1/Napolitano%20Dise%C3%B1o%20de%20experimentos.pdf)
- Optolov. (s. f.). *Baja absorción de agua. Métodos de prueba de ladrillo Material de ladrillo*. Recuperado 31 de julio de 2023, de <https://optolov.ru/es/floors-and-floor->

coverings/nizkoe-vodopogloshchenie-metody-ispytanii-kirpicha-material-dlya-kirpicha.html

- Ortega-Pérez, D. C., Bustamante-Rua, M. O., Gutiérrez-Rôa, D. F., & Correa-Espinal, A. A. (2015). Diseño de mezclas en formulaciones industriales. *DYNA*, 82(189), 149-156. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.42785>
- Osorio, N. W. (2012). pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, Vol. 1(No 4).
- Picón Sibri, C. F. (2022). *Determinación del rango de temperaturas para la cocción de ladrillos y tejas artesanales del cantón Cuenca, en base a los requisitos de absorción de agua y resistencia mecánica establecidos en las normas NTE INEN 3049 Parte 3 y NTE INEN 990* [bachelorThesis, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/38706>
- Rabilero Bouza, A. C. (2019). *Manual Técnico cerámica roja*. 76.
- SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada: Vol. Vol 1* (Arnold van Gelder). Faenza Editrice Ibérica.
- Salamanca, G., Reyes Méndez, L. M., Osorio, M., & Rodríguez Arias, N. (2015). Diseño experimental de mezclas como herramienta para la optimización de cremolácteos de mango. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2(1), 16-24.
- Salazar, H. (s. f.). *Arcilla Roja*. Scribd. Recuperado 21 de noviembre de 2023, de <https://es.scribd.com/document/346094783/Arcilla-Roja>
- Sandoval, F., & Ibañez, A. (2000). *Discusion sobre la influencia de la porosidad en la resistencia mecanica de las baldosas ceramicas*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/509769596/Porosidad-en-La-Resistencia-Mecanica>
- Santos Amado, J. D., Malagón Villafrades, P. Y., & Córdoba Tuta, E. M. (2011). Caracterización De Arcillas Y Preparación De Pastas Cerámicas Para La Fabricación De Tejas Y Ladrillos En La Región De Barichara, Santander. *DYNA*, 78(167), 50-58.

- Seminario Colán, R. (2014). Variabilidad de las propiedades de los ladrillos industriales de 18 huecos en la ciudad de Piura. *Universidad de Piura*.  
<https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1749>
- Singer, F., & Singer, S. . S. (1971). *Cerámica Industrial, enciclopedia de la química industrial* (Ediciones Urmo).
- Tenesaca Zhagui, E. P. (2019). *Caracterización de arcillas y pastas usadas en la elaboración artesanal de ladrillos en la parroquia Susudel y su optimización para la fabricación de ladrillos para recubrimiento de pisos* [bachelorThesis].  
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31735>
- Tenezaca Zhagui, E. (2019). *Caracterizacion de arcillas y pastas usadas en la elaboracion artesanal de ladrillos en la parroquia Susudel y su optimizacion para la fabricacion de ladrillos para recubrimiento de pisos*. 152.
- Ullauri, M. del C. A., Bastidas, M. R., Bustamante, J. R., & Carchipulla, E. C. (2022). El ladrillo artesanal de Cuenca (Ecuador): Una caracterización inicial en el marco patrimonial. *Conservar Patrimonio*, 41, 68-94. <https://doi.org/10.14568/cp26915>
- Urbina Tirado, C. J. (2015). Influencia de la temperatura de cocción sobre la contracción, absorción y resistencia a la compresión en ladrillos de arcilla cocidos. *Universidad Nacional de Trujillo*. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/2548>
- Vásquez Montenegro, H. E. (2016). Evaluación de la producción y mejoramiento de la calidad estructural del ladrillo artesanal producidos en la comunidad del frutillo, Bambamarca, Cajamarca 2016. *Universidad César Vallejo*.  
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/17020>
- Zea Osorio, N. L. (2005). Caracterización de las arcillas para la fabricación de ladrillos artesanales. *Universidad de San Carlos de Guatemala*.

## Anexos

## Anexo A: Monitoreo del horno artesanal y Ciclos de cocción a escala de laboratorio.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	27	0	21
30	45	30	46,7
60	65	60	67,8
90	95	90	85,2
120	182	120	91,6
150	262	150	112,9
180	345	180	132,2
210	414	210	194
240	449	240	235
270	474	270	308
300	500	300	357
330	521	330	380
360	547	360	408
390	576	390	417
420	600	420	432
450	627	450	450
480	655	480	472
510	689	510	481
540	717	540	500
570	<b>725</b>	570	508
600	724	600	551
630	716	630	587
660	706	660	620
690	696	690	630
720	688	720	655
750	676	750	680
780	662	780	692
810	650	810	698
		840	<b>700</b>
		870	696
		900	690
		930	678

Nota. Se presenta los valores testeados durante dos quemas en el horno artesanal con intervalos de 30min, posterior con estos datos se elabora el ciclo de cocción del horno artesanal y escalamiento para el horno del laboratorio de Cerámica Aplicada.

<b>Ciclo de cocción horno artesanal</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Temperatura Inicial °C</b>	<b>Temperatura Final °C</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	20	200	180
2	200	572	420
3	572	572	30
4	572	725	165
5	725	725	75
			870
		<b>tiempo en horas</b>	15

<b>Ciclo de cocción para 700 °C</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Temperatura Inicial °C</b>	<b>Temperatura Final °C</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	20	200	108
2	200	572	252
3	572	572	18
4	572	700	99
5	700	700	45
6	700	20	20
			542
		<b>tiempo en horas</b>	9

<b>Ciclo de cocción para 725 °C</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Temperatura Inicial °C</b>	<b>Temperatura Final °C</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	20	200	108
2	200	572	252
3	572	572	18
4	572	725	99
5	725	725	45
6	725	20	20
			542
		<b>tiempo en horas</b>	9

<b>Ciclo de cocción para 750 °C</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Temperatura Inicial °C</b>	<b>Temperatura Final °C</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	20	200	83
2	200	572	204
3	572	572	18
4	572	700	78
5	700	750	53
6	750	750	45
7	750	20	20
			501
<b>tiempo en horas</b>			<b>8,4</b>

<b>Ciclo de cocción para 800 °C</b>			
<b>Tramo</b>	<b>Temperatura Inicial °C</b>	<b>Temperatura Final °C</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	20	200	108
2	200	572	204
3	572	572	18
4	572	725	81
5	725	800	50
6	800	800	45
7	800	20	20
			526
<b>tiempo en horas</b>			<b>8,8</b>



**Anexo B: Resultados de ladrillos de referencia de absorción de agua y resistencia a la compresión.**

Muestra	TOCHANO		VISTO	
	Absorción de agua (%)	Resistencia a la Compresión (MPa)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la Compresión (MPa)
1	17,69	2,20	19,10	1,63
2	18,62	1,85	19,25	1,61
3	17,33	2,51	19,35	2,11
4	17,44	2,98	19,68	1,77
5	18,10	2,47	19,50	0,98
Promedio	<b>17,84</b>	<b>2,40</b>	<b>19,38</b>	<b>1,62</b>

Nota. Estos ensayos se realizaron conjuntamente con los ladrillos producto de la prueba de campo, con la finalidad de comparar que los resultados del diagnóstico inicial se conserven a través del tiempo.

	Tochano		Visto	
	Absorción de agua (%)	Resistencia a la Compresión (MPa)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la Compresión (MPa)
<b>Desv. Estándar Prueba inicial</b>	0,48	0,50	0,29	0,43
<b>Desv. Estándar Segunda prueba</b>	0,53	0,42	0,22	0,41
<b>Diferencia</b>	0,05	0,08	0,07	0,02

Nota. La diferencia entre las desviaciones estándar es mínima por lo que se consideró mantener los datos iniciales.

## Anexo C: Resultados CESEMIN del análisis químico de materia prima.

 <b>CESEMIN</b> Centro de Servicios y Análisis de Minerales Metálicos y No Metálicos	<b>REPORTE DE RESULTADOS</b>  <b>UCUENCA</b>	RNM-37-41 Hoja 1 de 1
--	--	--------------------------

**CLIENTE:** MI PRIMERA CERTIFICACIÓN INEN: APOYO PARA SU IMPLEMENTACIÓN A LOS TALLERES PRODUCTORES LADRILLEROS Y TEJEROS CERÁMICOS DE RACAR.

**MUESTRAS:** 5 MUESTRAS

**FECHA:** 2023-09-01

### ANÁLISIS QUÍMICO

%ÓXIDO	A1	A3	A4	A2	A5
SiO <sub>2</sub>	53,21	64,63	64,72	52,61	58,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,09	17,27	17,59	16,28	19,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,74	4,70	4,82	7,55	6,78
CaO	N.D.	N.D.	N.D.	0,00	N.D.
MgO	0,34	0,30	0,31	0,43	0,29
Na <sub>2</sub> O	N.D.	N.D.	0,23	0,70	0,27
K <sub>2</sub> O	0,81	0,79	0,78	0,71	0,62
Pérdidas al Fuego	11,41	7,27	8,52	9,02	9,33

### OBSERVACIONES:

- Extracción Ácida  
Espectroscopia de Absorción Atómica Técnica a la llama.
- N.D. No detectado



Responsable análisis  
Ing. Sonia Astudillo

ISABEL  
CRISTINA LEÓN  
JARAMILLO

Firmado digitalmente por ISABEL CRISTINA LEÓN JARAMILLO  
Fecha: 2023.09.01  
18:25:40 -0500

Coordinación CESEMIN  
Ing. Isabel León

cc. archivo

**Notas:** Este informe sólo afecta a los objetos sometidos a ensayo.  
Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del CESEMIN.  
El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo, los análisis se efectúan sobre la muestra entregada por el cliente.  
Los datos sobre la muestra, incluido el nombre, son proporcionados por el Cliente y son de su entera responsabilidad.

FMC2302-02

Universidad de Cuenca, sector Balzoy Email: marcela.idrovo@ucuenca.edu.ec  
Cuenca - Ecuador

Anexo D: Ejemplo de cálculos del análisis mineralógico racional aproximado para la arcilla A1 y resultados.

Cálculo de Feldespatos.

	Peso molecular (g/mol)	%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	94	0,81
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	102	0,88
<b>6SiO<sub>2</sub></b>	360,48	3,11
<b>Feldespato de K</b>		<b>4,80</b>

	Peso molecular (g/mol)	%
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	62	0,00
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	102	0,00
<b>6SiO<sub>2</sub></b>	360,48	0,00
<b>Feldespato de Na</b>		<b>0,00</b>

Cálculo de sustancia arcillosa.

	Peso molecular (g/mol)	%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	102	20,21
<b>2SiO<sub>2</sub></b>	120,16	23,81
<b>2H<sub>2</sub>O</b>	36	7,13
<b>Sustancia Arcillosa</b>		<b>51,15</b>

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ arcilla} = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Total} - \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ feldespato}$$

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TOTAL</b>	21,09
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,88
<b>Feldespato</b>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Arcilla	<b>20,21</b>

Cálculo de sílice libre.

$$\text{SiO}_2 \text{ Libre} = \text{SiO}_2 \text{ Total} - \text{SiO}_2 \text{ Feldespato} - \text{SiO}_2 \text{ arcilla}$$

<b>SiO<sub>2</sub> Total</b>	<b>53,21</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	3,11
<b>Feldespato</b>	
<b>SiO<sub>2</sub> Arcilla</b>	23,81
<b>SiO<sub>2</sub> Libre</b>	<b>26,29</b>

Cálculo de Materia Orgánica ( M.O.)

$$\text{M.O.} = \text{P.F} - \text{H}_2\text{O caolinita}$$

<b>Perdidas al fuego</b>	<b>11,41</b>
<b>H<sub>2</sub>O Caolinita</b>	7,13
<b>Materia Orgánica</b>	<b>4,28</b>

Resultado del análisis aproximado de las materias primas.

### RESULTADOS A1

<b>Feldespatos TOTALES</b>	4,80	Feldespato de K	4,80
		Feldespato de Na	0,00
<b>Sustancia arcillosa</b>	<b>51,15</b>		
<b>Sílice Libre</b>	26,29		
<b>Impurezas</b>	7,08	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,74
		CaO	N.D.
		MgO	0,34
<b>TOTAL</b>	<b>89,32</b>		

## RESULTADOS A2

<b>Feldespatos TOTALES</b>	10,13	Feldespato	4,20
		Feldespato de Na	5,92
<b>Sustancia arcillosa</b>	<b>36,34</b>		
<b>Sílice Libre</b>	<b>28,90</b>		
<b>Impurezas</b>	7,98	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,55
		CaO	0,00
		MgO	0,43
<b>TOTAL</b>	<b>83,35</b>		

## RESULTADOS A3

<b>Feldespatos TOTALES</b>	4,68	Feldespato	4,68
		Feldespato de Na	0,00
<b>Sustancia arcillosa</b>	<b>41,54</b>		
<b>Sílice Libre</b>	<b>42,27</b>		
<b>Impurezas</b>	5,00	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70
		CaO	0,00
		MgO	0,30
<b>TOTAL</b>	<b>93,48</b>		

---

 RESULTADOS A4
 

---

<b>Feldespatos TOTALES</b>	6,56	Feldespato de K	4,62
		Feldespato de Na	1,95
<b>Sustancia arcillosa</b>	<b>41,42</b>		
<b>Sílice Libre</b>	41,11		
<b>Impurezas</b>	5,13	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,82
		CaO	0,00
		MgO	0,31
<b>TOTAL</b>	94,23		

---



---

 RESULTADOS A5
 

---

<b>Feldespatos TOTALES</b>	5,95	Feldespato de K	3,67
		Feldespato de Na	2,28
<b>Sustancia arcillosa</b>	<b>45,26</b>		
<b>Sílice Libre</b>	33,59		
<b>Impurezas</b>	7,07	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,78
		CaO	0,00
		MgO	0,29
<b>TOTAL</b>	91,87		

---

**Anexo E: Porcentajes de humedades para tres lotes de cada tipo de ladrillo Tochano y Visto.**

<b>N° Lote</b>	<b>Tipo de ladrillo</b>	<b>Fecha</b>	<b>Muestra</b>	<b>% Humedad</b>
<b>1</b>		29-may	A1	20,81
		29-may	A3	28,97
		29-may	A4	23,00
		29-may	A5	20,12
		30-may	Pasta	25,20
<b>2</b>	Tochano	6-jun	A1	22,25
		6-jun	A3	27,88
		6-jun	A4	22,19
		6-jun	A5	21,40
		7-jun	Pasta	24,99
<b>3</b>		14-jun	A1	22,81
		14-jun	A3	28,60
		14-jun	A4	22,70
		14-jun	A5	20,90
		15-jun	Pasta	25,04
<b>1</b>		16-jun	A2	19,90
		16-jun	A3	29,80
		16-jun	A5	18,10
		17-jun	Pasta	25,01
<b>2</b>	Visto	20-jun	A2	20,30
		20-jun	A3	29,04
		20-jun	A5	18,90
		21-jun	Pasta	24,20
<b>3</b>		29-jun	A2	19,20
		29-jun	A3	29,50
		29-jun	A5	18,33
		30-jun	Pasta	24,03

**Anexo F: Cálculos de plasticidad.**

Determinación del límite plástico.

Muestra	%HR			Promedio
<b>A1</b>	26,31	26,29	26,35	26,32
<b>A2</b>	24,62	24,59	24,61	24,61
<b>A3</b>	25,65	25,62	25,61	25,63
<b>A4</b>	29,94	29,96	29,93	29,94
<b>A5</b>	21,58	21,61	21,63	21,61
<b>Pasta Tochano</b>	23,84	23,79	23,81	23,81
<b>Pasta Visto</b>	27,56	27,5	27,52	27,53

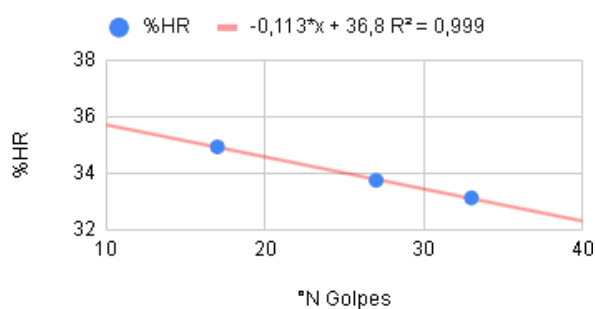
Determinación del límite líquido.

Muestra	N° Golpes	%HR	Coficiente X	Termino Independiente	Límite líquido
<b>A1</b>	33	33,14	-0,11	36,80	36,44
	27	33,76			
	17	34,94			
<b>A2</b>	33	30,18	-0,04	31,50	31,37
	27	30,31			
	17	30,81			
<b>A3</b>	30	39,26	-0,14	43,60	43,15
	24	40,45			
	16	41,24			
<b>A4</b>	30	38,04	-0,13	42,00	41,60
	24	39,28			
	16	39,84			
<b>A5</b>	32	29,00	-0,12	30,90	30,54
	23	28,64			
	16	27,24			
<b>Pasta Tochano</b>	34	34,22	-0,15	39,20	38,72
	29	34,84			
	17	36,70			
<b>Pasta Visto</b>	34	33,78	-0,20	40,40	39,77
	22	36,00			
	16	37,31			

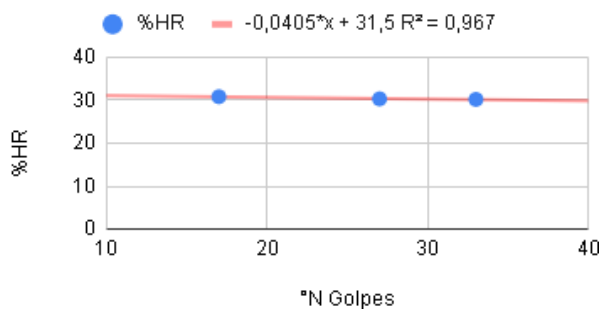


## Gráficas utilizadas para determinar el límite líquido

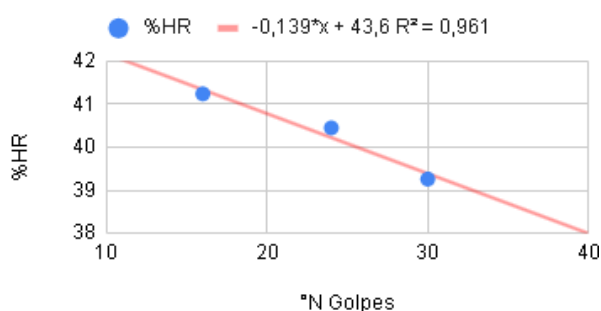
A1



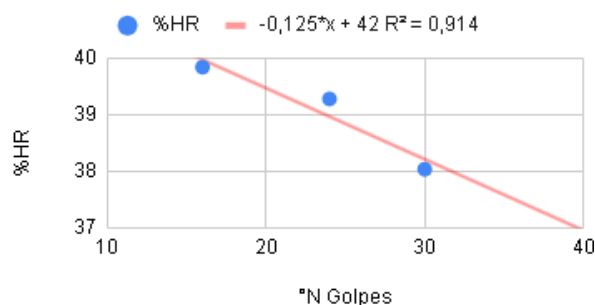
A2



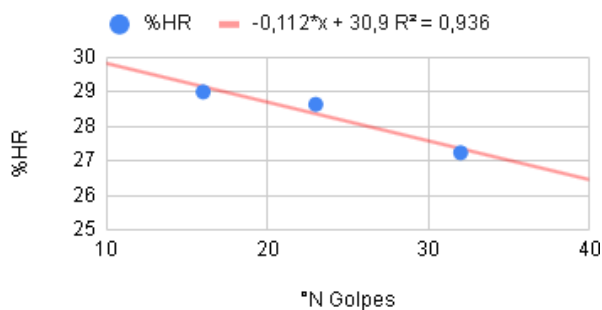
A3



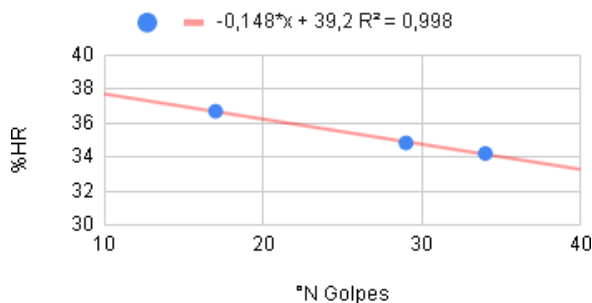
A4



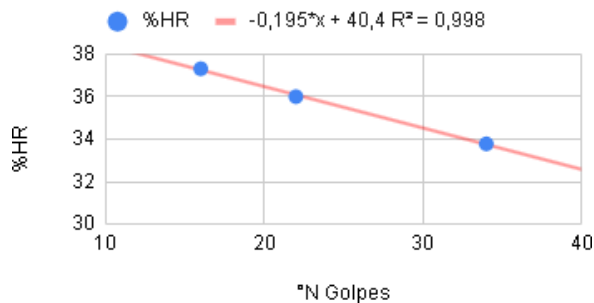
A5



Pasta Tochano



Pasta visto



**Anexo G: Cálculos de contracción al secado, a la quema y total.**

Cálculos de contracción al secado, a la quema y total a temperatura de cocción de 700 °C.

<b>Ciclo de cocción a 700 °C</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Placa</b>	<b>Ls (mm)</b>	<b>Lq (mm)</b>	<b>% contracción secado</b>	<b>% contracción a la quema</b>	<b>% contracción total</b>
<b>A1</b>	1	48,16	48,12	3,68	0,08	3,76
	2	48,40	48,37	3,20	0,06	3,26
	3	48,16	48,02	3,68	0,29	3,97
<b>A2</b>	1	47,66	47,36	4,68	0,63	5,31
	2	47,77	47,66	4,46	0,23	4,69
	3	47,97	48,12	4,06	-0,31	3,75
<b>A3</b>	1	45,01	44,94	9,98	0,16	10,14
	2	45,09	44,96	9,82	0,29	10,11
	3	45,13	45,00	9,74	0,29	10,03
<b>A4</b>	1	47,02	46,87	5,96	0,32	6,28
	2	47,26	47,22	5,48	0,08	5,56
	3	47,10	47,03	5,80	0,15	5,95
<b>A5</b>	1	46,89	46,87	6,22	0,04	6,26
	2	47,17	47,16	5,66	0,02	5,68
	3	47,07	47,00	5,86	0,15	6,01
<b>Pasta Tochano</b>	1	44,91	44,87	10,18	0,09	10,27
	2	44,93	44,85	10,14	0,18	10,32
	3	44,68	44,63	10,64	0,11	10,75
<b>Pasta Visto</b>	1	46,31	46,20	7,38	0,24	7,62
	2	46,27	46,27	7,46	0,00	7,46
	3	46,41	46,37	7,18	0,09	7,27

Nota. Longitud inicial de las marcas en las placas es de 50mm, Longitud de la marca posterior al secado (Ls), Longitud de la marca posterior de la quema (Lq).

Cálculos de contracción al secado, a la quema y total a temperatura de cocción de 725 °C.

Ciclo de cocción a 725 °C						
Muestra	Placa	Ls (mm)	Lq (mm)	% contracción secado	% contracción a la quema	% contracción total
A1	1	48,26	48,22	3,48	0,08	3,56
	2	47,85	47,68	4,30	0,36	4,66
	3	47,87	47,80	4,26	0,15	4,41
A2	1	48,12	48,50	3,76	-0,79	2,97
	2	47,85	47,89	4,30	-0,08	4,22
	3	48,09	48,26	3,82	-0,35	3,47
A3	1	45,69	45,59	8,62	0,22	8,84
	2	45,64	45,53	8,72	0,24	8,96
	3	45,77	45,73	8,46	0,09	8,55
A4	1	47,30	47,25	5,40	0,11	5,51
	2	47,43	47,25	5,14	0,38	5,52
	3	47,31	47,20	5,38	0,23	5,61
A5	1	46,40	46,25	7,20	0,32	7,52
	2	46,73	46,45	6,54	0,60	7,14
	3	46,55	46,45	6,90	0,21	7,11
Pasta Tochano	1	44,52	44,38	10,96	0,31	11,27
	2	44,54	44,42	10,92	0,27	11,19
	3	44,6	44,43	10,80	0,38	11,18
Pasta Visto	1	46,66	46,52	6,68	0,30	6,98
	2	46,66	46,49	6,68	0,36	7,04
	3	46,55	46,41	6,90	0,30	7,20

Nota. Longitud inicial de las marcas en las placas es de 50mm, Longitud de la marca posterior al secado (Ls), Longitud de la marca posterior de la quema (Lq).

Cálculos de contracción al secado, a la quema y total a temperatura de cocción de 750 °C.

Ciclo de cocción a 750 °C						
Muestra	Placa	Ls (mm)	Lq (mm)	% contracción secado	% contracción a la quema	% contracción total
A1	1	47,83	47,77	4,34	0,13	4,47
	2	47,84	47,57	4,32	0,56	4,88
	3	47,92	47,75	4,16	0,35	4,51
A2	1	47,98	48,07	4,04	-0,19	3,85
	2	48,09	48,1	3,82	-0,02	3,80
	3	47,81	47,97	4,38	-0,33	4,05
A3	1	45,14	45,01	9,72	0,29	10,01
	2	45,13	44,97	9,74	0,35	10,09
	3	45,13	44,98	9,74	0,33	10,07
A4	1	46,47	46,07	7,06	0,86	7,92
	2	46,56	46,34	6,88	0,47	7,35
	3	46,52	46,36	6,96	0,34	7,30
A5	1	46,06	45,69	7,88	0,80	8,68
	2	46,1	45,38	7,80	1,56	9,36
	3	46,43	46,09	7,14	0,73	7,87
Pasta Tochaño	1	45,08	44,83	9,84	0,55	10,39
	2	45,17	45,09	9,66	0,18	9,84
	3	45,26	45,05	9,48	0,46	9,94
Pasta Visto	1	46,39	46,28	7,22	0,24	7,46
	2	46,33	45,99	7,34	0,73	8,07
	3	46,39	46,23	7,22	0,34	7,56

Nota. Longitud inicial de las marcas en las placas es de 50mm, Longitud de la marca posterior al secado (Ls), Longitud de la marca posterior de la quema (Lq).

**Anexo H: Cálculos de absorción y espacio poroso.**

Cálculos de absorción y espacio poroso a temperatura de cocción de 700 °C.

<b>Ciclo de cocción a 700 °C</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Placa</b>	<b>Ps (g)</b>	<b>Ph (g)</b>	<b>% absorción</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>% EP</b>
<b>A1</b>	1	66,25	87,65	32,30	45	47,56
	2	78,32	103,77	32,49	59	43,14
	3	70,81	93,59	32,17	50	45,56
<b>A2</b>	1	77,59	98,76	27,28	50	42,34
	2	74,61	95,42	27,89	50	41,62
	3	73,95	93,91	26,99	50	39,92
<b>A3</b>	1	60,11	75,78	26,07	40	39,18
	2	61,53	77,47	25,91	40	39,85
	3	60,98	77,21	26,62	40	40,58
<b>A4</b>	1	63,98	81,07	26,71	40	42,73
	2	65,57	83,62	27,53	45	40,11
	3	71,72	91,19	27,15	45	43,27
<b>A5</b>	1	75,91	91,18	20,12	38	<b>40,18</b>
	2	72,36	87,02	20,26	48	30,54
	3	78,17	93,87	20,08	49	32,04
<b>Pasta Tochaño</b>	1	73,88	89,96	21,77	40	40,20
	2	71,39	87,56	22,65	40	40,43
	3	66,40	81,29	22,42	40	37,23
<b>Pasta Visto</b>	1	67,02	81,27	21,26	38	37,50
	2	70,61	83,66	18,48	40	32,63
	3	77,20	91,79	18,90	48	30,40

Nota. Peso seco (Ps), Peso húmedo (Ph). No se considera el valor de 40,18 en A5 por que está muy alejada de los otros dos valores.

Cálculos de absorción y espacio poroso a temperatura de cocción de 725 °C.

<b>Ciclo de cocción a 725 °C</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Placa</b>	<b>Ps (g)</b>	<b>Ph (g)</b>	<b>% absorción</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>% EP</b>
<b>A1</b>	1	63,18	82,76	30,99	45	43,51
	2	65,95	86,36	30,95	45	45,36
	3	68,55	90,09	31,42	48	44,88
<b>A2</b>	1	69,90	88,70	26,90	48	39,17
	2	64,43	81,65	26,73	38	45,32
	3	73,89	93,48	26,51	49	39,98
<b>A3</b>	1	60,32	76,01	26,01	40	39,23
	2	65,94	83,11	26,04	45	38,16
	3	62,37	78,81	26,36	45	36,53
<b>A4</b>	1	63,01	80,02	27,00	45	37,80
	2	72,02	91,34	26,83	49	39,43
	3	67,23	85,23	26,77	48	37,50
<b>A5</b>	1	69,32	83,54	20,51	48	29,63
	2	74,74	89,55	19,82	45	32,91
	3	75,48	90,71	20,18	48	31,73
<b>Pasta Tochano</b>	1	71,53	85,91	20,10	40	35,95
	2	69,09	83,09	20,26	40	35,00
	3	64,00	76,83	20,05	38	33,76
<b>Pasta Visto</b>	1	63,79	75,83	18,87	40	30,10
	2	69,97	82,75	18,26	45	28,40
	3	75,51	89,64	18,71	45	31,40

Nota. Peso seco (Ps), Peso húmedo (Ph).

Cálculos de absorción y espacio poroso a temperatura de cocción de 750 °C.

<b>Ciclo de cocción a 750 °C</b>						
<b>Muestra</b>	<b>Placa</b>	<b>Ps (g)</b>	<b>Ph (g)</b>	<b>% absorción</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>% EP</b>
<b>A1</b>	1	73,53	95,67	30,11	50	44,28
	2	67,87	88,85	30,91	50	41,96
	3	72,7	94,11	29,45	50	42,82
<b>A2</b>	1	72,56	91,32	25,85	49	38,29
	2	81,97	102,94	25,58	55	38,13
	3	76,09	96,03	26,21	50	39,88
<b>A3</b>	1	58,83	72,96	24,02	40	35,33
	2	54,74	67,93	24,10	40	32,98
	3	59,08	73,34	24,14	40	35,65
<b>A4</b>	1	71,05	90,21	26,97	50	38,32
	2	64,57	81,69	26,51	45	38,04
	3	72,6	91,81	26,46	50	38,42
<b>A5</b>	1	76,46	91,49	19,66	45	33,40
	2	71,22	85,33	19,81	45	31,36
	3	76,04	91,42	20,23	45	34,18
<b>Pasta Tochano</b>	1	72,34	86,65	19,78	40	35,78
	2	66,56	79,78	19,86	40	33,05
	3	59,8	71,52	19,60	35	33,49
<b>Pasta Visto</b>	1	71,98	85,36	18,59	40	33,45
	2	77,45	92,08	18,89	45	32,51
	3	84,26	99,78	18,42	50	31,04

Nota. Peso seco (Ps), Peso húmedo (Ph).

Cálculos de absorción y espacio poroso a temperatura de cocción de 725 °C.

<b>Ciclo de cocción a 725 °C</b>						
Muestra	Placa	Ps (g)	Ph (g)	% absorción	Volumen (ml)	% EP
A1	1	63,18	82,76	30,99	45	43,51
	2	65,95	86,36	30,95	45	45,36
	3	68,55	90,09	31,42	48	44,88
A2	1	69,90	88,70	26,90	48	39,17
	2	64,43	81,65	26,73	38	45,32
	3	73,89	93,48	26,51	49	39,98
A3	1	60,32	76,01	26,01	40	39,23
	2	65,94	83,11	26,04	45	38,16
	3	62,37	78,81	26,36	45	36,53
A4	1	63,01	80,02	27,00	45	37,80
	2	72,02	91,34	26,83	49	39,43
	3	67,23	85,23	26,77	48	37,50
A5	1	69,32	83,54	20,51	48	29,63
	2	74,74	89,55	19,82	45	32,91
	3	75,48	90,71	20,18	48	31,73
Pasta Tochano	1	71,53	85,91	20,10	40	35,95
	2	69,09	83,09	20,26	40	35,00
	3	64,00	76,83	20,05	38	33,76
Pasta Visto	1	63,79	75,83	18,87	40	30,10
	2	69,97	82,75	18,26	45	28,40
	3	75,51	89,64	18,71	45	31,40

Nota. Peso seco (Ps), Peso húmedo (Ph).



Cálculos de absorción y espacio poroso a temperatura de cocción de 750 °C.

<b>Ciclo de cocción a 750 °C</b>						
Muestra	Placa	Ps (g)	Ph (g)	% absorción	Volumen (ml)	% EP
A1	1	73,53	95,67	30,11	50	44,28
	2	67,87	88,85	30,91	50	41,96
	3	72,7	94,11	29,45	50	42,82
A2	1	72,56	91,32	25,85	49	38,29
	2	81,97	102,94	25,58	55	38,13
	3	76,09	96,03	26,21	50	39,88
A3	1	58,83	72,96	24,02	40	35,33
	2	54,74	67,93	24,10	40	32,98
	3	59,08	73,34	24,14	40	35,65
A4	1	71,05	90,21	26,97	50	38,32
	2	64,57	81,69	26,51	45	38,04
	3	72,6	91,81	26,46	50	38,42
A5	1	76,46	91,49	19,66	45	33,40
	2	71,22	85,33	19,81	45	31,36
	3	76,04	91,42	20,23	45	34,18
Pasta Tochano	1	72,34	86,65	19,78	40	35,78
	2	66,56	79,78	19,86	40	33,05
	3	59,8	71,52	19,60	35	33,49
Pasta Visto	1	71,98	85,36	18,59	40	33,45
	2	77,45	92,08	18,89	45	32,51
	3	84,26	99,78	18,42	50	31,04

Nota. Peso seco (Ps), Peso húmedo (Ph).