

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

Reducción de la absorción de agua en tejas vidriadas cerámicas en condiciones de cocción inferiores a 1000 °C de un taller artesanal del sector Racar

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química


Autores:

Karen Eliana Andrade Morales

Jessenia Gabriela Pintado Tuapante

Director:

Sandra Catalina Peñaherrera Palacios

ORCID:  0000-0002-1054-4605

Cuenca, Ecuador

2023-11-14

Resumen

Las tejas vidriadas elaboradas en talleres artesanales presentan, en muchas ocasiones, valores deficientes de absorción de agua y resistencia a la flexión. Estos parámetros son importantes pues definen la calidad de la teja. Esta investigación tiene como objetivo mejorar la absorción de agua de las tejas cerámicas vidriadas de un taller artesanal del sector Racar a temperaturas de cocción inferiores a 1000°C, buscando el cumplimiento del valor requerido en la norma INEN 990. Para ello, se realizó la caracterización de las materias primas y la pasta, se estudió la influencia de la reducción de tamaño en los parámetros de plasticidad y contracción, y se formularon mezclas variando la dosificación con el fin de obtener los parámetros óptimos que permitan reducir la absorción de agua. Además, se analizó las temperaturas de cocción del vidriado de 850°C, 900°C y 950°C con el fin de definir una temperatura idónea para la elaboración de tejas. La temperatura de cocción del vidriado que proporcionó mejores resultados fue de 950°C y la mezcla óptima encontrada corresponde a $x_1=30\%$; $x_2=20\%$; $x_3=50\%$; a partir de la cual se obtuvieron tejas curvas vidriadas que presentan valores de 81,40 kg/cm² para la resistencia a la flexión y 14,19% para la absorción de agua, y tejas planas vidriadas con valores de 74,90 kg/cm² para la resistencia mecánica y 15,22% para la absorción de agua. Con ello, se logró una mejoría respecto a los valores obtenidos con la dosificación de los artesanos en tejas curvas y planas vidriadas de 20,3% para la resistencia a la flexión y 19,08% para la absorción de agua (en tejas curvas); y de 23% para la resistencia a la flexión y 16% para la absorción de agua (en tejas planas); lo que conlleva un acercamiento a la norma INEN 990.

Palabras clave: arcilla, tejas, absorción de agua, producción artesanal



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

Glazed tiles made in artisan workshops often have poor water absorption and bending resistance values. These parameters are important as they define the quality of the tile. This research aims to improve the water absorption of glazed ceramic tiles from a craft workshop in the Racar sector at firing temperatures below 1000°C, seeking compliance with the value required in the INEN 990 standard. To this end, the characterization of the raw materials and the paste, the influence of grinding on the plasticity and contraction parameters was studied, and mixtures were formulated by varying the dosage in order to obtain the optimal parameters that allow reducing water absorption. In addition, the glaze firing temperatures of 850°C, 900°C and 950°C were analyzed in order to define an ideal temperature for the production of tiles. The glaze firing temperature that provided the best results was 950°C and the optimal mixture found corresponds to $x_1=30\%$; $x_2=20\%$; $x_3=50\%$; from which curved glazed tiles were obtained that have values of 81.40 kg/cm² for flexural resistance and 14.19% for water absorption, and flat glazed tiles with values of 74.90 kg/cm² for mechanical resistance and 15.22% for water absorption. With this, an improvement was achieved with respect to the values obtained with the artisans' dosage in curved and flat glazed tiles of 20.3% for bending resistance and 19.08% for water absorption (in curved tiles); and 23% for flexural resistance and 16% for water absorption (in flat tiles); which entails an approach to the INEN 990 standard.

Keywords: clay, tiles, water absorption, artisanal production



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
Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	9
Índice de ecuaciones.....	12
Dedicatoria.....	13
Agradecimientos.....	15
Introducción.....	16
Objetivos.....	18
Objetivo general.....	18
Objetivos específicos.....	18
Capítulo 1.....	19
1. Marco teórico.....	19
1.1. Definición de teja.....	19
1.2. Geometría de la teja.....	19
1.3. Clasificación de las tejas.....	19
1.4. Materias primas usadas para la producción artesanal de tejas.....	20
1.4.1. Características de las arcillas.....	20
1.5. Absorción de agua en tejas vidriadas.....	20
1.5.1. Factores que influyen a la absorción de agua de las tejas.....	21
1.5.1.1. Composición química y mineralógica de las arcillas.....	21
1.5.1.2. Granulometría.....	23
1.5.1.3. Compacidad.....	24
1.5.1.3.1. Factores que determinan la compacidad.....	27
1.5.1.4. Condiciones de cocción.....	29
1.5.1.4.1. Ciclo de cocción.....	29
1.5.1.4.2. Transformaciones que suceden durante la cocción.....	30
1.5.2. Relación entre absorción de agua y resistencia mecánica.....	37
1.5.2.1. Requisitos para tejas de acuerdo a normativa.....	38
1.5.3. Problemas en tejas asociados a una alta absorción de agua.....	38
1.6. Caracterización de las materias primas y la pasta.....	39

1.6.1.	Propiedades químicas	39
1.6.2.	Propiedades físicas.....	40
1.7.	Proceso de obtención de las tejas	44
1.8.	Diseño experimental	47
1.8.1.	Diseño de experimentos con mezclas.....	48
1.8.2.	Diseño de vértices extremos	49
1.8.3.	Modelos matemáticos	50
Capítulo 2.....		51
2.	Metodología.....	51
2.1.	Caracterización de materias primas y la pasta.....	51
2.1.1.	Propiedades químicas	51
2.1.2.	Propiedades físicas.....	52
2.2.	Diseño experimental	58
2.2.1.	Aplicación del diseño experimental	58
2.2.1.1.	Componentes y variables de respuesta	59
2.2.1.2.	Restricciones en los componentes	59
2.2.1.3.	Planteamiento de dosificaciones	59
2.2.1.4.	Ajuste de modelo y caracterización de la superficie respuesta.....	60
2.3.	Pruebas en campo	60
2.3.1.	Determinación de las temperaturas del horno artesanal	60
2.3.2.	Determinación de las condiciones actuales de las tejas.....	61
2.3.3.	Determinación de absorción de agua y resistencia a la flexión de tejas elaboradas con la dosificación óptima	61
Capítulo 3.....		63
3.	Análisis y discusión de resultados.....	63
3.1.	Resultados de la caracterización de las materias primas y la pasta.....	63
3.2.	Análisis de los resultados de la caracterización de las materias primas y de la pasta.....	72
3.3.	Resultados del diseño experimental.....	74
3.4.	Análisis del diseño experimental.....	79
3.4.1.	Índice de Plasticidad (y_1)	80
3.4.2.	Contracción total (y_4).....	83
3.4.3.	Porcentaje de absorción de agua (y_5)	91
3.4.4.	Obtención de mezcla óptima	100

Capítulo 4.....	109
4. Conclusiones y recomendaciones	109
4.1. Conclusiones.....	109
4.2. Recomendaciones	110
Referencias.....	111
Anexos	119
Anexo A. Análisis químico y mineralógico racional de las arcillas	119
Anexo B. Determinación de granulometría.....	124
Anexo C. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	129
Anexo D. Determinación de la contracción al secado, contracción a la quema y contracción total	140
Anexo E. Determinación de la absorción de agua y espacio poroso.....	150
Anexo F. Mediciones de absorción de agua y resistencia a la flexión de tejas planas y curvadas elaboradas en el taller artesanal con su dosificación inicial	159
Anexo G. Mediciones de absorción de agua y resistencia a la flexión de tejas planas y curvadas elaboradas en el taller artesanal con la dosificación óptima	167

Índice de figuras

Figura 1. Variación de la compacidad de mezclas de partículas de dos tamaños en función de la proporción de esferas o partículas grandes. Fuente: (Barba et al., 2002).....	26
Figura 2. Variación de la compacidad de mezclas de partículas de dos tamaños en función de la proporción de partículas de tamaño grande y la relación de diámetros. Fuente: (Barba et al., 2002)	27
Figura 3. Compacidad de probetas conformadas a partir de arcillas frente a su contenido en cuarzo. Fuente: (Barba et al., 2002).....	28
Figura 4. Curva dilatométrica de la pieza cruda y cocida. Fuente: (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004)	31
Figura 5. Proceso de sinterización. Fuente: (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004).....	32
Figura 6. Inversión del Cuarzo a distintas temperaturas. Fuente: (Barba et al., 2002)	33
Figura 7. Almacenamiento de las arcillas.....	44
Figura 8. Laminadora y mezcladora	45
Figura 9. Extrusión de las tejas	45
Figura 10. Secado de tejas planas.....	46
Figura 11. Vidriado de tejas.....	47
Figura 12. Ejemplos de diseños de vértices extremos. Fuente: (Ortega Pérez et al., 2015)	49
Figura 13. Determinación de la resistencia a la flexión	61
Figura 14. Deseccación de tejas.	62
Figura 15. Curvas granulométricas para las arcillas sin moler	66
Figura 16. Curvas granulométricas para las arcillas molidas.	68
Figura 17. Curva granulométrica para la pasta.....	69
Figura 18. Diagrama de casagrande. Fuente: (FAO, s. f.).....	73
Figura 19. Superficie de respuesta para el Índice de plasticidad.	82
Figura 20. Gráfica de contornos para el índice de plasticidad.....	82
Figura 21. Superficie de respuesta para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C.....	85
Figura 22. Gráfica de contorno para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C.....	85
Figura 23. Superficie de respuesta para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C.....	88
Figura 24. Gráfica de contornos para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C.....	88

Figura 25. Superficie de respuesta para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C.....	91
Figura 26. Gráfica de contornos para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C.....	91
Figura 27. Superficie de respuesta para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C	94
Figura 28. Gráfica de contorno para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C	94
Figura 29. Superficie de respuesta para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C	96
Figura 30. Gráfica de contorno para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C	97
Figura 31. Superficie de respuesta para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C	100
Figura 32. Gráfica de contorno para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C	100

Índice de tablas

Tabla 1. Zonas críticas que se desarrollan durante la cocción	30
Tabla 2. Temperaturas de descomposición de compuestos presentes en las arcillas.	36
Tabla 3. Requisitos de absorción de agua y resistencia a la flexión para tejas según la Norma INEN 990.....	38
Tabla 4. Clasificación granulométrica de las arcillas.....	41
Tabla 5. Ciclo de cocción para vidriar a 850°C	56
Tabla 6. Ciclo de cocción para vidriar a 900°C	56
Tabla 7. Ciclo de cocción para vidriar a 950°C	56
Tabla 8. Ciclo de quema del bizcocho de 850°C	60
Tabla 9. Resultados del análisis químico de cada arcilla.....	63
Tabla 10. Resumen del análisis mineralógico racional	63
Tabla 11. pHs de las arcillas.....	64
Tabla 12. Humedad de las arcillas	64
Tabla 13. Distribución granulométrica para la arcilla x_1 sin moler	65
Tabla 14. Distribución granulométrica para la arcilla x_2 sin moler	65
Tabla 15. Distribución granulométrica para la arcilla x_3 sin moler	66
Tabla 16. Distribución granulométrica para la arcilla x_1 molida	67
Tabla 17. Distribución granulométrica para la arcilla x_2 molida	67
Tabla 18. Distribución granulométrica para la arcilla x_3 molida	68
Tabla 19. Distribución granulométrica para la pasta.....	69
Tabla 20. Porcentajes retenidos de las arcillas sin moler y molidas.....	70
Tabla 21. Promedio del límite líquido, plástico e índice de plasticidad de las arcillas sin moler.	70
Tabla 22. Promedio del límite líquido, plástico e índice de plasticidad de las arcillas molidas.	70
Tabla 23. Promedio del límite líquido, plástico e índice de plasticidad de la pasta.....	71
Tabla 24. Resultados de la contracción al secado, a la quema y total a diferentes ciclos de cocción del vidriado	71
Tabla 25. Resultados de la absorción de agua y espacio poroso de las materias primas y pasta quemadas a diferentes ciclos de cocción.....	72
Tabla 26. Restricciones de los componentes.....	75
Tabla 27. Dosificación de los componentes.....	76
Tabla 28. Resultados de placas quemadas con el ciclo de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 850°C	77

Tabla 29. Resultados de placas quemadas con el ciclo de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 900°C	78
Tabla 30. Resultados de placas quemadas con el ciclo de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 950 °C	79
Tabla 31. Análisis de los posibles modelos para el índice de plasticidad.	80
Tabla 32. Coeficientes del modelo cuadrático ajustado para la plasticidad	81
Tabla 33. ANOVA para el modelo cuadrático ajustado para el índice de plasticidad.	81
Tabla 34. Análisis de los posibles modelos para contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 850°C	83
Tabla 35. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 850°C	84
Tabla 36. ANOVA para el modelo cuadrático ajustado para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 850°C.	84
Tabla 37. Análisis de los posibles modelos para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 900°C	86
Tabla 38. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 900°C	87
Tabla 39. ANOVA del modelo cuadrático ajustado para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 900°C.	87
Tabla 40. Análisis de los posibles modelos para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 950°C	89
Tabla 41. Coeficientes para el modelo cúbico ajustado para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 950°C.	90
Tabla 42. ANOVA para el modelo cúbico ajustado para la contracción total con ciclo de cocción del vidriado de 950°C.	90
Tabla 43. Análisis de los posibles modelos para el porcentaje de absorción de agua con ciclo de cocción del vidriado de 850°C	92
Tabla 44. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la absorción de agua con ciclo de cocción del vidriado de 850°C	93
Tabla 45. ANOVA del modelo cuadrático para la absorción de agua con ciclo de cocción del vidriado de 850°C	93
Tabla 46. Análisis de los posibles modelos para el porcentaje de absorción de agua con ciclo de cocción del vidriado de 900°C	94
Tabla 47. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la absorción de agua con ciclo de cocción del vidriado de 900°C	95
Tabla 48. ANOVA del modelo cuadrático para la absorción de agua con ciclo de cocción del vidriado de 900°C	96

Tabla 49. Análisis de los posibles modelos para el porcentaje de absorción de agua con ciclo de cocción del vidriado de 950°C	98
Tabla 50. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la absorción de agua con un ciclo de cocción del vidriado de 950°C.....	99
Tabla 51. ANOVA del modelo cuadrático para la absorción de agua con un ciclo de cocción del vidriado de 950°C	99
Tabla 52. Parámetros justificados para la mezcla óptima.....	101
Tabla 53. Posibles soluciones óptimas para y_1 , y_4 y y_5	102
Tabla 54. Solución óptima para y_1 , y_4 y y_5	102
Tabla 55. Resultados de las temperaturas alcanzadas por el horno artesanal para la primera cocción	104
Tabla 56. Temperaturas alcanzadas por el horno artesanal para la segunda cocción.....	104
Tabla 57. Condiciones actuales de las tejas elaboradas en el taller artesanal	103
Tabla 58. Resultados de resistencia a la flexión y absorción de agua de tejas curvas obtenidas con la dosificación óptima.....	167
Tabla 59. Resultados de la resistencia a la flexión y absorción de agua de tejas planas obtenidas con la dosificación óptima.....	167
Tabla 60. Promedios de resistencia a la flexión y absorción de agua de tejas planas y curvas vidriadas obtenidas con la dosificación óptima	105

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Compacidad en función del volumen del sólido, volumen del producto moldeado y la porosidad.....	24
Ecuación 2. Compacidad en función de la densidad aparente y la densidad real	24
Ecuación 3. Restricción para un diseño de mezclas.....	48
Ecuación 4. Sumatoria de los componentes de un diseño de mezclas	48
Ecuación 5. Diseño con restricciones.....	49
Ecuación 6. Posibles tratamientos para un diseño de vértices extremos.....	49
Ecuación 7. Modelo matemático canónico de primer orden o modelo lineal.....	50
Ecuación 8. Modelo canónico de segundo orden o modelo cuadrático	50
Ecuación 9. Modelo canónico de tercer orden o modelo cúbico especial	50
Ecuación 10. Modelo cúbico completo	50
Ecuación 11. Determinación del porcentaje retenido.....	53
Ecuación 12. Determinación de Índice de plasticidad.....	54
Ecuación 13. Determinación del porcentaje de contracción al secado	57
Ecuación 14. Determinación del porcentaje de contracción a la quema	57
Ecuación 15. Determinación del porcentaje de contracción total	57
Ecuación 16. Determinación de la absorción de agua.....	58
Ecuación 17. Determinación del espacio poroso	58

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación a mí querida madre, Eliana Morales, pues sin su apoyo incondicional y sus palabras de aliento, que siempre fueron las más adecuadas no lo habría conseguido. Mamá gracias a ti soy todo lo que soy hoy en día, gracias por todo. Te amo.

A mi padre y hermanos, Víctor, Gabriel y Darío Andrade, pues con su ejemplo me han servido de ayuda para conseguir esta meta en mi vida, siempre apoyándome y dándome el impulso para seguir adelante.

A mi mejor amigo, Alex Belduma, pues siempre ha estado para mí a lo largo de esta larga trayectoria que se hacía cada día más difícil de culminar, sin embargo, el tener un gran amigo a mi lado que sabe dar los mejores consejos me llenaron de fuerza para luchar hasta el final.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo a mi persona, pues me agradezco por seguir adelante frente a todos problemas que se fueron presentando a lo largo de la realización de este trabajo, por ser valiente y paciente, esas veces que lo único que quería es salir corriendo. Por seguir intentando sin rendirme cada vez que pensaba que la situación estaba perdida, por todo ello me agradezco, me valoro y sobretodo me felicito.

Karen Andrade

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Josefina Tuapante y Luis Pintado, quienes con su amor, cariño y paciencia me han impulsado siempre a cumplir mis sueños. Los admiro y quiero mucho. Sin ustedes, nada de esto sería posible.

A mi hermana, Tatiana Pintado. Has llenado mi vida de alegría y amor. Gracias por ser mi compañera de aventuras, por alentarme a dar siempre lo mejor de mí y por confiar en mis talentos y capacidades. Te quiero infinitamente.

A mis amigas, especialmente a Doménica y Brenda quienes me han brindado su cariño, confianza y apoyo desde los inicios de nuestra amistad.

A todas aquellas personas que han sido una guía en mi proceso de autodescubrimiento y en mi crecimiento personal y profesional. Las enseñanzas que me han dejado han sido un punto de inflexión clave en mi vida.

A mis compañeros de cuatro patitas, que han estado junto a mí por más de ocho años, llenado mi vida de huellitas y felicidad. Son un claro ejemplo de lealtad y amor incondicional.

A todas mis versiones pasadas, por no rendirse nunca. Su fuerza, valentía, constancia y determinación viven latentes en mí.

A todas aquellas personas que han hecho posible aquello que creían imposible.

Gabriela Pintado

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a nuestros padres por apoyarnos e incentivarnos a alcanzar nuestras metas personales y profesionales, a nuestros familiares y amigos por cada palabra de apoyo y consejo que nos impulsaban a seguir adelante. De manera especial queremos agradecer a nuestra directora de tesis, Ing. Catalina Peñaherrera por su paciencia y entrega total, por brindarnos sus conocimientos que contribuyeron al desarrollo de este trabajo. Del mismo modo, agradecemos a la Ing. Daniela Albuja quien supo resolver nuestras dudas y ayudarnos en la gestión de este proyecto. Finalmente, agradecemos al dueño del taller artesanal por abrirnos las puertas de su taller para llevar a cabo este trabajo de titulación.

Karen Andrade y Gabriela Pintado

Introducción

La elaboración artesanal de tejas cerámicas en la ciudad de Cuenca es una actividad que ha ido evolucionando con el paso de los años, desde la adquisición de la materia prima hasta la obtención del producto terminado. En el cantón Cuenca existen alrededor de 499 ladrilleras artesanales y 40 semi-mecanizadas productoras de tejas y ladrillos ubicadas en diferentes sectores, uno de ellos es el sector de Racar, donde los artesanos carecen de información técnica relacionada con la calidad del producto final y no poseen ningún tipo de control de materias primas o producto terminado (Maza Quishpi, 2011; Ortiz & Aucapiña, 2021). En consecuencia, los productos elaborados son más propensos a presentar problemas en su consistencia física y durabilidad tales como trizaduras, deformaciones o irregularidades (Guerrero Gómez et al., 2017). Específicamente, las tejas al no cumplir con el parámetro de absorción de agua se ven sujetas al ingreso del agua y su principal funcionalidad (proporcionar impermeabilidad) se ve limitada. Además, se pueden generar cambios de volumen que producen inconvenientes en la dilatación térmica y la generación de poros no deseados que disminuyen la resistencia de las tejas debida a la alta permeabilidad (Ariza, s.f.).

Mediciones previas realizadas en el taller artesanal productor de tejas dieron valores altos de absorción de agua comprendidos entre los 16,16% - 18,10% para tejas planas vidriadas, y entre 15,24% - 17,47% para tejas curvas vidriadas que difieren significativamente de lo establecido en la norma INEN 990, la cual establece que este parámetro debe ser como máximo de 14% y 16% para tejas curvas vidriadas y tejas planas vidriadas respectivamente. Otros estudios reportados por Picón Sibri (2022) en donde se determinó del rango de temperaturas para la cocción de ladrillos y tejas artesanales del cantón Cuenca, muestran que las tejas curvas vidriadas deben cocerse a 1150°C y las tejas planas vidriadas deben cocerse a los 1025°C, para asegurar que estas cumplan con los requisitos establecidos en la normativa. Considerando que los hornos artesanales no alcanzan temperaturas tan elevadas, el estudio de la influencia de las características de las materias primas en la reducción de la absorción de agua y la optimización de pastas en base a estas características, resulta una alternativa viable para la obtención de productos que cumplan con la normativa vigente a temperaturas que los hornos puedan alcanzar.

Es importante que los productos que van a ser comercializados cumplan con los requisitos de calidad establecidos en la norma ya que de este modo se asegura la satisfacción de las necesidades y exigencias de los consumidores. Es por ello, que se han venido realizando proyectos en conjunto entre la Universidad Politécnica Salesiana y la Universidad de Cuenca con el fin de mejorar la calidad de los productos, su proceso productivo y reducir la

contaminación producida en el proceso de cocción. Este trabajo de titulación que se realiza en un taller en el sector de Racar pretende mejorar la calidad de tejas cerámicas vidriadas a partir de la reducción de absorción de agua, a condiciones de quema inferiores a 1000°C; buscando el cumplimiento del valor requerido en la norma INEN 990. Para ello, se caracterizó la materia prima y se propuso una dosificación óptima que permita reducir la absorción de agua de las tejas.

Objetivos

Objetivo general

Mejorar la absorción de agua de las tejas cerámicas vidriadas de un taller artesanal del sector Racar a temperaturas de cocción inferiores a 1000°C, buscando el cumplimiento del valor requerido en la norma INEN 990.

Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar la materia prima cruda mediante pruebas de granulometría, plasticidad, humedad, absorción de agua, contracción, pH y composición química.
- ✓ Realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de granulometría y plasticidad de la materia prima y las pastas tras el proceso de reducción de tamaño.
- ✓ Formular diferentes mezclas variando la dosificación y la relación de grueso y finos de la pasta sin modificar significativamente los parámetros de plasticidad y contracción, determinando en cada caso la absorción de agua correspondiente.
- ✓ Realizar una corrida en el taller con la dosificación óptima encontrada y determinar en las tejas planas y curvas vidriadas tanto absorción de agua como la resistencia a la flexión.

Capítulo 1

1. Marco teórico

1.1. Definición de teja

En la actualidad existen innumerables tipos de tejas que varían de acuerdo a la forma y material usados para su elaboración. Este estudio se centra específicamente en tejas vidriadas, las cuales son conocidas como: teja árabe, común, española, colonial, lomada, entre otras (Tormo & García, 2019).

La definición de teja varía; según la Real Academia Española (R.A.E) esta se define como “1. f. Pieza de barro cocido hecha en forma acanalada, para cubrir por fuera los techos y recibir y dejar escurrir el agua de lluvia, que hoy se hace también de forma plana”. La enciclopedia Banrepcultural (2015) define la teja de barro como “Una pieza de este material hecha en forma de canal; usada para cubrir exteriormente los techos y no permitir la entrada de agua de lluvia a un espacio, dejándola escurrir. Las tejas son delgadas placas (planas o curvas) de tierra arcillosa mezcladas habitualmente con arena, que se endurecen por cocción”.

La norma INEN 986 (1982) define la teja como una pieza acanalada o plana, de poco espesor, hecha de arcilla o tierra arcillosa, adecuadamente quemada. Esta puede o no llevar en su cara exterior o interior una capa de material impermeable que reduce notablemente la absorción de humedad, en caso de llevar dicho material, se le denomina teja vidriada.

1.2. Geometría de la teja

La teja curva vidriada posee una forma paraboloides hiperbólica lo cual describe ser una superficie que se obtiene por el desplazamiento de una parábola generatriz que se dirige paralelamente a sí misma a lo largo de otra parábola directriz de curvatura opuesta colocada en el mismo plano de simetría (Tormo & García, 2019).

Por otra parte, la teja plana vidriada posee una forma de paralelepípedo regular que consta de dos superficies diagonales unidas a una superficie lisa central (INEN 986, 1982; Tormo & García, 2019).

1.3. Clasificación de las tejas

La norma INEN 986 (1982) clasifica las tejas en dos grandes grupos:

Teja curvada: es aquella que posee una forma acanalada en el sentido longitudinal con una disminución de su ancho hacia un extremo.

Teja plana: es aquella que posee una forma de paralelepípedo regular de espesor muy reducido en relación a sus demás dimensiones.

1.4. Materias primas usadas para la producción artesanal de tejas

La materia prima principal para la elaboración de tejas cerámicas es la arcilla, un mineral constituido por aluminosilicatos hidratados, comúnmente acompañados de otros minerales como hierro, calcio, magnesio y titanio (Muñoz Chaves et al., 2007). La arcilla se usa ampliamente para la elaboración de productos de mampostería debido a su bajo costo y a sus propiedades, entre las cuales destacan la plasticidad y el endurecimiento al ser sometidas a un tratamiento térmico.

1.4.1. Características de las arcillas

- Las arcillas están compuestas por una serie de minerales alumino-silicatos provenientes de rocas mineralizadas feldespáticas.
- El tamaño de partícula es microscópico menor a 2 μm en forma de escama (morfología laminar), lo que le confiere una capacidad de almacenar agua por adherencia es decir presenta una alta plasticidad por lo cual es fácil de moldear (Osorio, 2005).
- Presenta resistencia a la compresión, tensión y cizallamiento.
- Tienden a contraerse durante la etapa de secado y de quema.
- El color que adquieren después de la quema se debe principalmente a la presencia de óxidos de hierro.
- Presentan capacidad de intercambio catiónico debido a las sustituciones isomórficas (Ramos, 2010).

1.5. Absorción de agua en tejas vidriadas

La absorción de agua es la cantidad máxima de agua que puede entrar a los poros accesibles de una pieza cerámica a presión atmosférica y temperatura ambiente. Es un valor que representa una medida de su porosidad. En la elaboración de productos de mampostería es de gran importancia la determinación de este parámetro, ya que permite verificar la calidad de un producto terminado, debido a que las normas que rigen dichos productos cerámicos se basan en este parámetro y en el de resistencia mecánica.

Esta propiedad está íntimamente influenciada por la mineralogía de la arcilla, su composición química, distribución granulométrica, temperatura de cocción y el grado de vitrificación alcanzado (Gelves Diaz et al., 2009). La vitrificación es una reacción que se da en el proceso de cocción de los materiales cerámicos, que consiste en la formación de un vidrio líquido que

fluye hacia los poros y en parte llena su volumen, dando lugar a una reducción de porosidad. El grado de vitrificación, entendido como la capacidad de la arcilla o pasta para vitrificarse, está influenciada por la composición de la pasta, temperatura y tiempos de cocción. Puesto que el grado de vitrificación de la pasta condiciona la porosidad de los materiales cocidos cerámicos, ejerce una marcada influencia en la resistencia, durabilidad y densidad de las piezas, siendo estas propiedades mayores a medida que se incrementa el grado de vitrificación (Callister, 2020). Así pues, la absorción de agua tiene una relación directa con la porosidad, propiedades mecánicas, densidad aparente y compactación del producto final (Manco Jaraba et al., 2020).

Al ser las tejas cerámicas productos elaborados a partir de pastas arcillosas permeables y posteriormente quemadas a bajas temperaturas, suelen ser materiales porosos con altas absorciones de agua. Esto puede generar un efecto negativo en la durabilidad de las piezas, haciéndolas más propensas a cambios volumétricos significativos o permeabilidad alta. En consecuencia, con el fin de mejorar la absorción de agua y obtener piezas con mejores propiedades mecánicas, suele colocarse un vidrio impermeable en la cara de la teja que queda expuesta a la intemperie (Fernandez, 2019).

1.5.1. Factores que influyen a la absorción de agua de las tejas

1.5.1.1. Composición química y mineralógica de las arcillas

La composición química y mineralógica de las arcillas constituyen dos de las propiedades más importantes en la industria cerámica, ya que influyen en los cambios que se producen durante el secado y la cocción; y en las características de los productos finales, entre ellos la absorción de agua.

Florez Arenas (2016) menciona los efectos que pueden tener sobre la pasta y el producto final la presencia de ciertos componentes:

- Los óxidos alcalinos (K_2O y Na_2O) y los alcalinotérreos (CaO y MgO) actúan como fundentes, es decir facilitan una cocción a menor temperatura (ya que bajan el punto de fusión del material) e introducen los elementos necesarios para la formación de nuevas fases (Galán & Aparicio, 2006). La reducción de la temperatura de fusión del material se fundamenta en que el material fundente una vez líquido, engloba a la parte de la masa que está sin fundir a la temperatura de cocción, produciendo combinaciones líquidas para cerrar los poros existentes (Pérez Martínez, 2015). Sin embargo, debido a las bajas temperaturas de cocción de las tejas, apenas se

manifiesta su efecto. Estos intensifican su acción fundente a temperaturas de cocción cercanas a los 1050°C o más (Avgustinik, 1983).

- El Na_2O da más fluidez a la fase vítrea, pero aumenta la deformación de las piezas cerámicas.
- El Fe_2O_3 intensifica la generación de fase vítrea, proporciona colores rojos a las piezas durante la cocción y permite obtener piezas de buena resistencia mecánica con baja absorción de agua. Según Boukili et al (2021) la presencia de Fe_2O_3 junto a otros fundentes como CaO , K_2O y MgO favorecen a la formación de la fase vítrea pues reducen la temperatura de fusión, misma que puede comenzar a 850°C. Sin embargo, el Fe_2O_3 también puede generar hinchamiento.
- La sílice reduce la contracción de secado y de cocción debido a su baja plasticidad, lo que a su vez da lugar a una mejor trabajabilidad. Por su granulometría también influye positivamente en la permeabilidad y empaquetamiento de la pasta, por lo que se mejora la compacidad y, en consecuencia, la absorción de agua en las piezas cerámicas. Funde entre 1610°C y 1763°C, y aumenta el punto de fusión de los cuerpos cerámicos. Sin embargo, en presencia de feldespatos ésta funde formando un vidrio a temperaturas más bajas, cercanas a 1250°C ya que la sílice tiende a disolverse en este último (Álvarez Rozo et al., 2018; Vázquez Malagón, 2005). Considerando que las tejas se cuecen a temperaturas inferiores a 1000°C, para su producción la sílice no se emplea como material fundente sino como material desengrasante.
- El CaO al actuar como fundente proporciona al producto quemado resistencia a la flexión y menor porosidad (Tenesaca Zhagui, 2019).

Varios autores proponen ciertos rangos de contenidos en sílice y alúmina que debe tener una arcilla para poder ser usada como materia prima en la elaboración de productos de mampostería. Manco Jaraba et al (2020) mencionan que un contenido de SiO_2 entre 50 y 60%, y entre 20 y 30 % de Al_2O_3 es adecuado para considerar que la arcilla es apta para la fabricación de cerámicos de construcción. Afanador García et al (2013) proponen también una composición química de las arcillas para su uso en cerámica de alfarería común, en donde el SiO_2 debe encontrarse en un rango de 64-83 % y el Al_2O_3 en un rango entre el 21-27%. El contenido de alúmina es importante ya que aporta a la resistencia de las fases cristalinas que se forman al sinterizar las piezas. Si el contenido de Al_2O_3 es elevado (> 30%) se podría utilizar como semirrefractario, pero si la arcilla presenta deficiencias en Al_2O_3 (<20%) el producto tendrá una menor resistencia mecánica (Afanador García et al., 2013; Florez Arenas, 2016). Las arcillas que contienen poca alúmina, pero son abundantes en óxidos alcalinos y alcalinotérreos son de fácil fusión y se emplean en la cerámica de construcción (Avgustinik, 1983).

En cuanto a la composición mineralógica, la presencia de caolinita es importante cuando se quiere elaborar productos refractarios, de coloración clara y alta resistencia mecánica. Por el contrario, la presencia de illita y montmorillonita dan como resultado pastas cerámicas de alta plasticidad y de fácil conformado, pero de gran contracción. Este último puede ocasionar la formación de grietas en las piezas, por lo que es común adicionar materiales desengrasantes como la sílice o arenas para ajustar la plasticidad de las pastas (Santos Amado et al., 2011) y fundentes (generalmente feldespatos) con el fin de reducir las temperaturas de quema. Cabe destacar que el uso de feldespatos no es muy común en la producción artesanal de tejas, ya que al trabajar a bajas temperaturas a penas se manifiesta un efecto fundente.

Las arcillas, sin cocer, caoliníticas se caracterizan por su baja capacidad de absorción de agua, mientras que las arcillas montmorilloníticas absorben grandes cantidades de agua debido a su plasticidad. Por otro lado, en cuanto a las arcillas illíticas, la presencia de potasio en su estructura le genera cierto poder fundente en el proceso cerámico (Cáceres et al., 2021). Finalmente, la presencia de minerales como la hematita y anatasa en las arcillas otorgan color rojo en la cocción a las pastas cerámicas y disminuyen la absorción de agua debido a que la hematita (Fe_2O_3) actúa como fundente (Picón Sibri, 2022).

1.5.1.2. Granulometría

La granulometría es la medida y análisis de la distribución de tamaños de las partículas que constituyen un lote de muestra. Al separar dichas partículas a través del uso de una serie de tamices se está realizando un análisis granulométrico, que es una forma de representar estadísticamente los diferentes tamaños de material que forma parte de la muestra. Esto es de gran importancia ya que al separar las partículas gruesas de las finas y conocer las proporciones de estas fracciones, se puede inferir el comportamiento mecánico y su influencia en la compactación de las arcillas (Arízaga, 2014).

Este factor influye en el comportamiento de las arcillas al ser sometidas a procesos de secado y cocción, afectando también a propiedades tales como plasticidad, microestructura y propiedades mecánicas de los productos terminados (Lema, 2018). Si la arcilla presenta un tamaño de partícula muy fino se genera una mayor superficie específica, que provoca una mayor contracción al secado ya que existe un mayor porcentaje de humedad retenida en las arcillas. Además, los diámetros de los capilares en la pieza verde (pieza recién formada que aún no se seca) serán mucho más delgados generando complicaciones en el proceso de secado (Uribe et al., 2021).

Por otro lado, para una superficie específica mayor, el proceso de vitrificación se dará con mayor rapidez y a menores temperaturas obteniéndose una pieza con mayor resistencia mecánica y menor porosidad (Uribe et al., 2021). También, un mejor grado de compacidad de las partículas conlleva una menor sección de poros y un aumento en el contacto entre las partículas de arcilla, dando lugar a mejores propiedades físico mecánicas (Afanador García et al., 2013).

1.5.1.3. Compacidad

La compacidad (ϕ) se define como la relación entre el volumen del sólido (V_s) y el volumen total del producto moldeado (V_T). Se relaciona con la porosidad (ϵ), ya que ésta determina los espacios libres en el interior del producto. Esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 1. *Compacidad en función del volumen del sólido, volumen del producto moldeado y la porosidad*

$$\phi = \frac{V_s}{V_T} = 1 - \epsilon \quad (1)$$

Debido a la complejidad de la determinación de los parámetros antes mencionados, a nivel industrial resulta más sencillo determinar la densidad aparente (p). Existe una relación directamente proporcional entre esta propiedad y la compacidad, de modo que una mayor densidad implica una mayor compacidad de la pieza moldeada. Esta relación se muestra en la siguiente expresión, en donde p_R es la densidad real del sólido.

Ecuación 2. *Compacidad en función de la densidad aparente y la densidad real.*

$$\phi = \frac{p}{p_R} \quad (2)$$

La compacidad o compactabilidad es una propiedad de gran importancia que se debe tener en consideración durante el proceso cerámico, ya que influye en propiedades como la resistencia mecánica y permeabilidad de la pieza cruda, absorción de agua, resistencia mecánica y tamaño de la pieza cocida. También ejerce una marcada influencia en la velocidad de secado y la descomposición y oxidación de algunos de los compuestos de la pieza durante la etapa de precalentamiento, de tal modo que estos disminuyen a medida que aumenta la compacidad, debido a que el coeficiente de difusión efectivo decrece con la reducción de la porosidad (Bedoya Castaño, 2019; Corredor Méndez, 2020).

La compacidad de las mezclas debe ser adecuada ya que, de otro modo, valores bajos de compacidad conllevan una baja resistencia mecánica de las piezas, elevada contracción de secado y de cocción, deformaciones y elevada absorción de agua. Por el contrario, valores elevados de compacidad repercuten en la permeabilidad de la pieza afectando la velocidad de secado, la facilidad para eliminar desgasificaciones y para la oxidación de la materia orgánica (Pérez Martínez, 2015).

Por otro lado, para ciertas condiciones de cocción, la contracción lineal y la capacidad de absorción de agua disminuyen con la compacidad de la pieza siendo ésta una relación lineal. Debido a ello, las variaciones de compacidad en una misma pieza o entre piezas distintas, producen variabilidad en las dimensiones o deformación de las piezas (Barba et al., 2002).

La compacidad de las piezas conformadas se puede modificar si se varía la distribución de tamaño de partículas de una determinada materia prima. Tal es el caso de la arcilla de cocción roja, en donde a medida que aumenta el residuo sobre el tamiz de 63 μm (malla N° 230 de la serie ASTM) se obtiene una mayor densidad aparente y compacidad en las piezas. En este contexto, la relación de tamaños entre las diferentes partículas y la proporción relativa en la que estas se encuentran en la mezcla, son factores que se deben tener en consideración ya que influyen significativamente en la compacidad (Pérez Martínez, 2015).

Barba et al. (2002) explican de manera cuantitativa la influencia de la proporción de partículas gruesas sobre la compacidad en la Figura 1. Se puede apreciar que existe un porcentaje de partículas grandes óptimo que permite obtener una máxima compacidad y que un exceso o déficit de partículas pequeñas dan como resultado una baja compacidad.

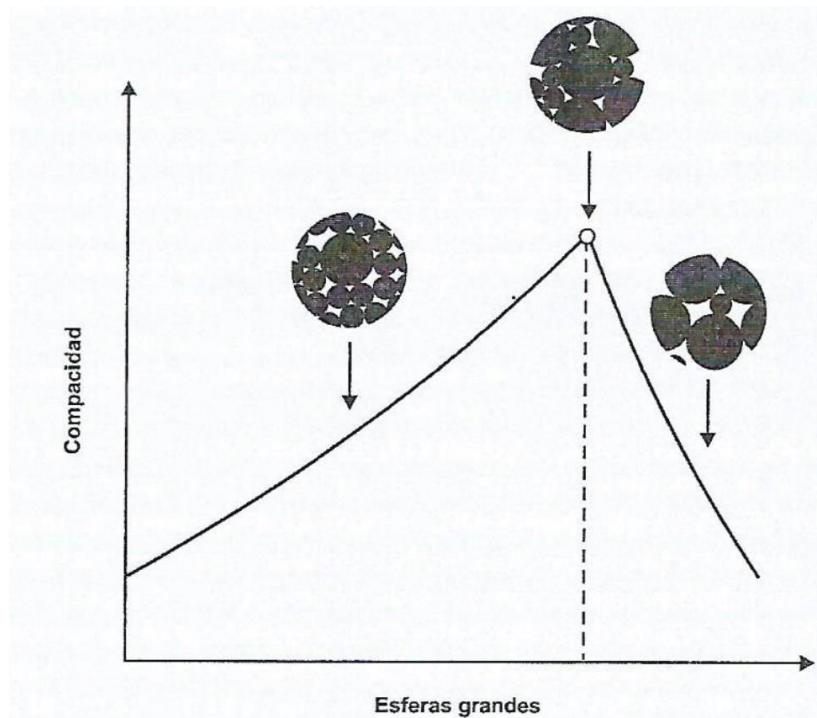


Figura 1. Variación de la compactación de mezclas de partículas de dos tamaños en función de la proporción de esferas o partículas grandes. Fuente: (Barba et al., 2002)

En la Figura 2 se representa la variación de la compactación de mezclas de partículas de dos tamaños en función de la proporción de partículas de tamaño grande en la mezcla, para distintos valores de la relación de diámetros (R_D). Aquí se puede ver que existe una tendencia al aumento de compactación en todas las composiciones, conforme aumenta la relación de diámetros. No obstante, a partir de valores de la relación de diámetros superior a 10 el aumento de compactación es menos acusado (Barba et al., 2002).

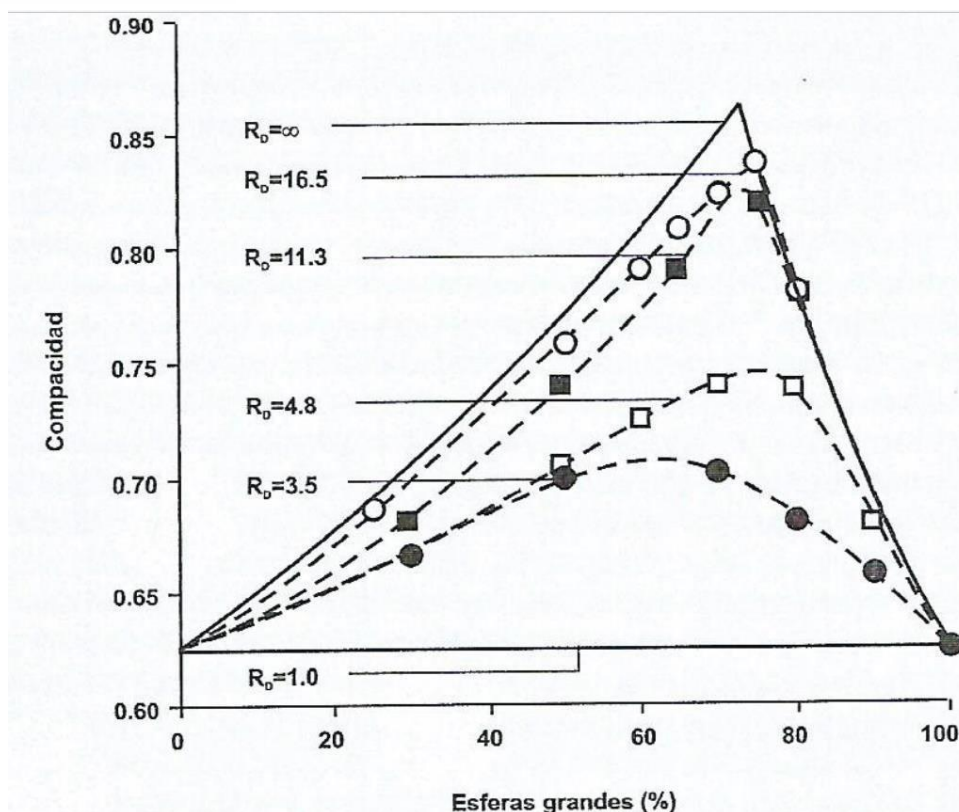


Figura 2. Variación de la compacidad de mezclas de partículas de dos tamaños en función de la proporción de partículas de tamaño grande y la relación de diámetros. Fuente: (Barba et al., 2002)

1.5.1.3.1. Factores que determinan la compacidad

La compacidad depende del proceso de conformado empleado y de las características de las materias primas, tales como su distribución de tamaño y forma. En este sentido, partiendo del hecho de que las arcillas están formadas por una mezcla de distintos minerales (arcillosos propiamente dichos, sílice, feldespatos y carbonatos), presentarán una distribución de tamaños correspondiente a los diferentes componentes que poseen; es decir, la distribución de tamaños más grande corresponde a las partículas de materiales no plásticos (cuarzo y feldespato fundamentalmente) y la distribución de tamaños más pequeños corresponden al mineral arcilloso. Las arcillas naturales se caracterizan por presentar una elevada proporción de partículas de pequeño tamaño (inferiores a 2 μm), lo que no favorece la obtención de elevados valores de la compacidad. La compacidad proporcionada por estos materiales aumentará a medida que se incremente el contenido en partículas gruesas (principalmente de cuarzo o feldespato) presentes en la arcilla (Bedoya Castaño, 2019).

Barba et al. (2002) mencionan que se puede alcanzar una compacidad máxima para cierto contenido de partículas gruesas, a partir de la cual, si se sigue aumentando dicho contenido,

se genera un efecto contrario y se reducirá la compacidad. Este fenómeno se puede apreciar en la Figura 3, la cual representa la compacidad de probetas conformadas a partir de arcillas de cocción blanca en función de su contenido en cuarzo. Se observa que con el aumento de contenido en cuarzo de las arcillas se incrementa la compacidad de las probetas, siendo dicho incremento menor a medida que aumenta el contenido en cuarzo. Para este caso, es probable que la máxima compacidad se alcance con un contenido en cuarzo cercano al 65%, ya que es aquí en donde el incremento de la compacidad se vuelve poco apreciable. En consecuencia, las arcillas con mayores contenidos en cuarzo proporcionarán una menor densidad aparente.

De lo dicho anteriormente es importante recalcar que, si se agregan desengrasantes a la mezcla, se debe considerar el tamaño de los mismos ya que influyen significativamente en la compacidad.

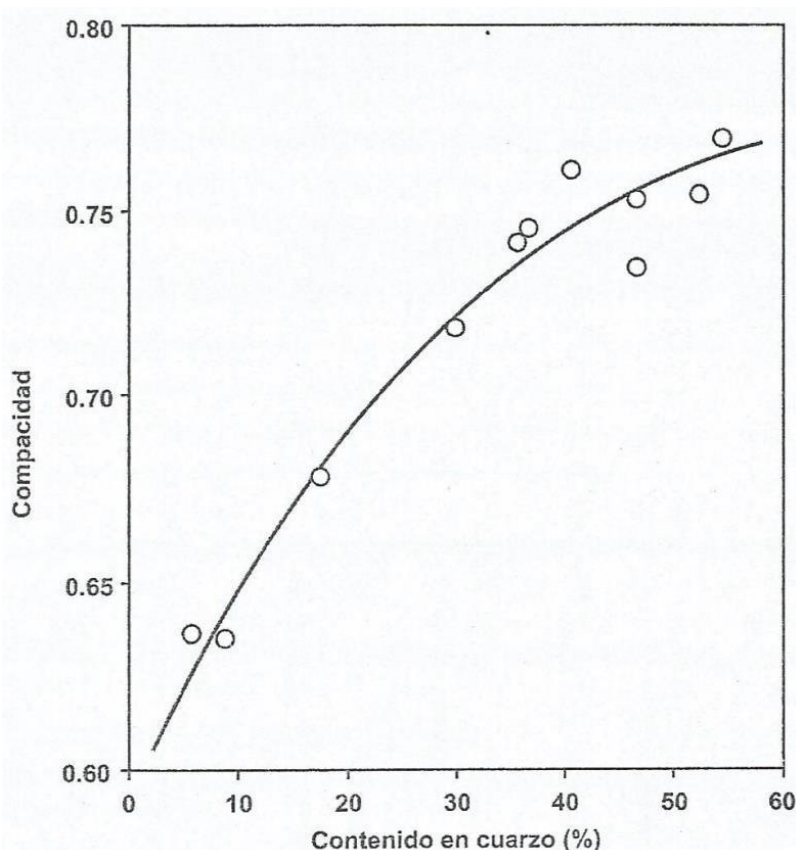


Figura 3. Compacidad de probetas conformadas a partir de arcillas frente a su contenido en cuarzo. Fuente: (Barba et al., 2002)

En general, las arcillas que presentan una amplia distribución de tamaños de partículas, es decir aquellas en las que coexistan partículas grandes y pequeñas darán lugar a una mayor compacidad. Por el contrario, si las arcillas presentan una distribución estrecha de partículas, darán como resultado piezas con compacidades deficientes (Pérez Martínez, 2015).

1.5.1.4. Condiciones de cocción

En el proceso de cocción se dan una serie de reacciones químicas que generan cambios en las propiedades de las materias primas y pastas moldeadas generando un producto final cristalino y vítreo que posee propiedades tales como: resistencia mecánica, impermeabilidad, resistencia química, insolubilidad, dureza, entre otras. Es decir, la pieza durante el proceso de cocción sufre una disminución de la porosidad y un incremento de su resistencia mecánica por lo que la misma tiende a encogerse (León & Cordero, 2011).

La cocción consiste en transferir energía, en forma de calor hasta una temperatura determinada durante un tiempo establecido a una pasta y esmalte, que provocan que estos adquieran propiedades deseadas en un producto cerámico. Para establecer los parámetros técnicos de cocción hay que tener en cuenta el comportamiento de las arcillas que se va a utilizar las cuales dependen del tipo de producto a elaborar, y de ciertos conocimientos químicos (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004; Medina Jiménez & Jaramillo, 2019).

1.5.1.4.1. Ciclo de cocción

Se conoce como ciclo de cocción a una serie de valores de temperatura que se van a desarrollar en un tiempo adecuado sobre una pasta moldeada. Este ciclo consta de al menos tres fases que son:

1. La temperatura se eleva desde el valor ambiental hasta el valor máximo fijado, donde se obtienen las características deseadas del producto cerámico, por lo que se le conoce como el valor óptimo.
2. Tiempo de mantención de las piezas cerámicas a temperatura máxima. que depende del tamaño del horno y del producto. Es importante tener un tiempo de mantención suficiente para asegurarnos que se distribuya de forma homogénea la temperatura y así se generen las transformaciones físicas y químicas deseadas.
3. La temperatura debe disminuir hasta alcanzar valores ambientales respetando la sensibilidad que puede presentar una pieza cerámica a los gradientes de temperatura con el fin de mejorar el proceso de cristalización y evitar rupturas de las piezas (Asociación Española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004)

Al elaborar un ciclo de cocción hay que tener en cuenta las reacciones fisicoquímicas de carácter endotérmico o exotérmico que se generan durante la cocción, donde este debe

presentar el adecuado tiempo de aumento o disminución de la temperatura para evitar tensiones en el producto. Es decir, para elaborar un ciclo de cocción adecuado es necesario tomar en cuenta las transformaciones que se generan en la pasta, las temperaturas a las que se desarrollan, el tipo de arcilla, el tamaño de las piezas, su densidad, conductividad térmica, cantidad de la carga y la difusividad térmica (Picón Sibri, 2022).

Existe la cocción rápida y lenta, donde en ambos casos es necesario mantener una temperatura máxima por un cierto tiempo para provocar que el calor se distribuya uniformemente y se dé el desarrollo de las reacciones (Benítez Pecino, 2015).

1.5.1.4.2. Transformaciones que suceden durante la cocción

Cuando una arcilla o una pasta es sometida a un proceso de cocción ésta sufre unos cambios físico-químicos de forma permanente e irreversible (Aparicio & Galán, 2006).

Las piezas durante el proceso de cocción sufren un incremento en la amplitud de las vibraciones de los átomos que forman parte de su estructura, dependiendo de la naturaleza química de la arcilla, su estructura cristalina o vítrea y de sus propiedades relativas (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004). Dentro del horno se desarrollan una serie de reacciones químicas que se pueden identificar como zonas críticas:

Tabla 1. Zonas críticas que se desarrollan durante la cocción.

Temperaturas	Descripción
Poco por encima de 100°C	Eliminación del agua higroscópica o humedad residual o reabsorbida.
≤200°C	Eliminación del agua zeolítica o de cristalización
350°C a 650°C	Combustión de las sustancias orgánicas
450°C a 650°C	Eliminación del agua de constitución y del retículo cristalino arcilloso
573°C	Transformación alotrópica del cuarzo α en β
800°C a 950°C	Descarbonatación de la caliza y la dolomita
≥700°C	Formación de nuevas estructuras cristalinas conformadas por SiO ₂
a partir de los 900°C	Disociación térmica de otras sales como sulfatos y fluoruros
>1000°C	Evaporación de ciertos compuestos como óxidos alcalinos, óxido de plomo, óxido de zinc y el anhídrido bórico.

Nota. Fuente: (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004).

Cambios Físicos

◦ Dilatación

Aquellos compuestos de estructura cristalina presentan una mayor dilatación al igual que las estructuras compactas en comparación de aquellas con estructuras vítreas y porosas, todo esto ocurre debido a que durante el proceso de cocción se desarrollan una serie de reacciones que provocan la desaparición de ciertos compuestos y la formación de nuevos.

La dilatación térmica que sufren los materiales va a depender de la constitución inicial de la pasta, los cambios que se generen y de la temperatura utilizada para el proceso de cocción. Es por ello que la pasta durante la primera cocción adquiere un comportamiento dilatométrico el cual es diferente cuando alcanza la máxima temperatura a comparación de los que se obtendrían a las otras temperaturas sucesivas a las cuales es sometida. La dilatación que se obtiene en la primera cocción resulta irreversible, mientras que aquella generada en una pasta previamente cocida y calentada es reversible (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004; Di Prado et al, 2022).

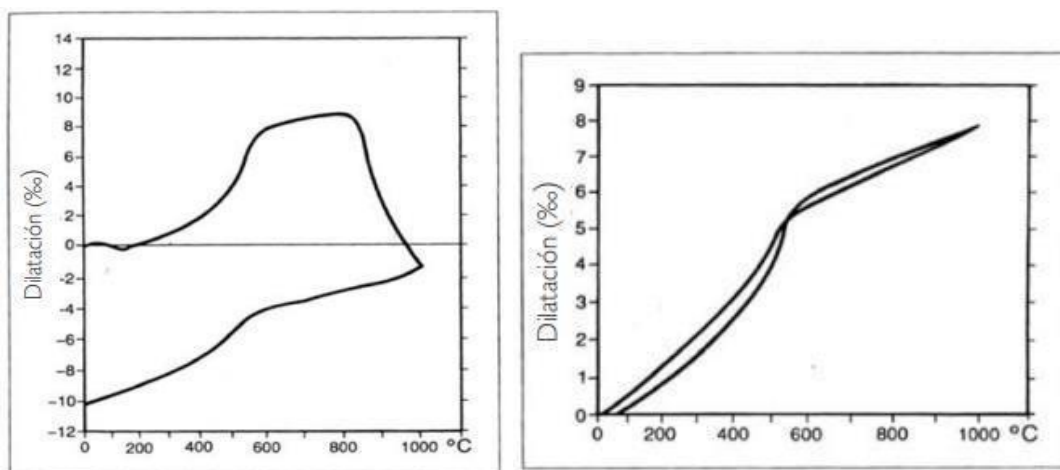


Figura 4. Curva dilatométrica de la pieza cruda y cocida. Fuente: (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004)

◦ Sinterización

Durante la sinterización se produce la disminución de la porosidad del material dando lugar a una mayor densidad y una alta resistencia mecánica. Es decir, permite que un cuerpo poroso cambie y adquiera una máxima compactación con una porosidad baja. En esta etapa se generan transportes de masa que resultan de gran importancia para el incremento de la densidad de la pieza cruda (Huaccha Holguín, 2021; Chaves et al., 2007).

Al principio de la sinterización se generan cuellos entre partículas en contacto como consecuencia de los mecanismos de difusión superficial y evaporación-condensación, por lo tanto, durante esta etapa no se da una densificación de la pieza. A medida que aumenta la temperatura de la pieza, dentro del cuello se forma un límite de grano y cada intersticio entre partículas se convierte en un poro. En ese momento hay un transporte de masa por medio del volumen y el borde del grano hacia el cuello. Al pasar el tiempo los poros se vuelven más pequeños y esféricos. La causa para el desarrollo de la sinterización es la disminución del área total de la superficie de las partículas (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004; Balaguer et al, 2020).

El proceso de sinterización provoca una serie de cambios ya que, la pieza pierde de forma definitiva su plasticidad y se genera una estructura de propiedades definidas. La máxima velocidad de sinterización de una pieza se da aproximadamente a los 800°C. Como ya se mencionó, durante el desarrollo de la sinterización se produce una disminución de la cantidad de poros, pero también se da un incremento del tamaño de los mismos debido a que existen gradientes de concentración generados por las distintas solubilidades que se desarrollan en la fase líquida (mayor solubilidad en los poros pequeños) provocando que la densidad decrezca cuando se somete la pieza a tiempos largos de sinterización (Muñoz Chaves et al., 2007).

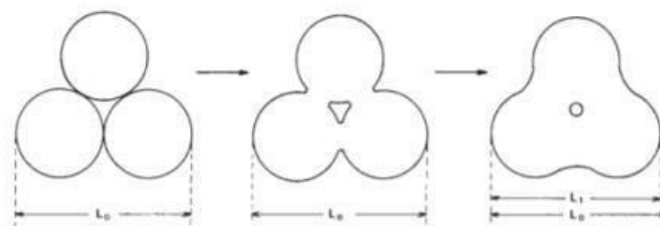


Figura 5. Proceso de sinterización. Fuente: (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004)

◦ Cambios alotrópicos o de inversión

Estos cambios alotrópicos son en teoría reversibles, pero desencadenan ciertas transformaciones pequeñas de carácter estructural en las que no se dan rupturas ni formaciones de nuevos enlaces que provocan cambios irreversibles. Un claro ejemplo de ello es el cuarzo ya que es un mineral que presenta este tipo de transformaciones siendo a 573°C la inversión más brusca que este presenta. Por ello, si en una curva dilatométrica se observa una pendiente grande dentro de este intervalo es debido a la presencia del cuarzo donde pasa de α a β incrementado su tamaño (Benlloch et al., 1977).

La transformación del cuarzo inicia de cuarzo α en cuarzo β para después transformarse en tridimita y cristobalita a temperaturas más elevadas. Donde, dichas transformaciones provocan comportamientos expansivos durante el calentamiento y de contracción al momento del enfriamiento. Durante el cambio de cuarzo α a β la pieza o bizcocho es lo suficientemente plástica para lograr soportar todas aquellas dilataciones o expansiones que esta sufre, sin embargo, cuando, durante el enfriamiento se da el cambio β a α presentándose el proceso de contracción se generan inconvenientes debido a que la pieza ya se encuentra rígida con nuevas fases frágiles (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004; López, 2021).

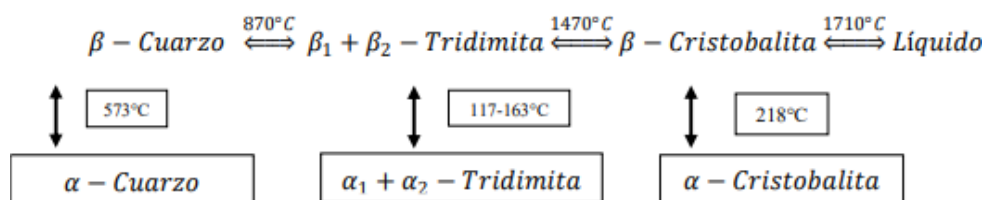


Figura 6. Inversión del Cuarzo a distintas temperaturas. Fuente: (Barba et al., 2002).

Cambios químicos

0 Fusión de fundentes o vitrificación

En la industria cerámica existe la fusión de mezclas eutécticas que permiten el desarrollo de una fase líquida a temperaturas bajas en comparación de aquellas requeridas para fundir los materiales individuales, aquellas pastas que poseen una mayor cantidad y una mayor complejidad de eutécticos entre los óxidos aportados por las materias primas poseen una mayor capacidad de fundirse. Esto provoca una serie de cambios en cadena iniciando con la disminución de la porosidad, aumento de la densidad, reacciones sólido-sólido y sólido-líquido y aumento de las características tecnológicas (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004). Como ya se mencionó anteriormente, mientras mayor sea la superficie específica de las partículas la vitrificación se dará con mayor rapidez y a temperaturas más bajas, donde se desarrollan cambios de estado de sólido a líquido de ciertos compuestos como: feldespatos, carbonatos y óxidos de hierro (Uribe et al., 2021).

Al incrementar la temperatura aumenta la cantidad de fundido y disminuye la viscosidad, debido a que el líquido va hacia poros de la masa, se genera una disolución de las partículas, una propagación del material que se disolvió en la fase líquida y una cristalización del soluto después de que ha alcanzado su saturación con el solvente (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004).

Al trabajar con esmalte este se vuelve casi completamente líquido debido a su composición rica en fundentes. Pueden quedar sin diluir ciertos compuestos que fueron aplicados para conferir características de coloración u opacidad a la pieza terminada. Durante el proceso de enfriamiento la pasta y el esmalte adquieren solidez y cohesión, donde en función de los constituyentes químicos y de las formas de enfriamiento se puede llegar a formar la estructura vítrea y/o cristalina. Estas estructuras se desarrollan conjuntamente debido a que las pastas están elaboradas de diferentes constituyentes donde los iones de algunos compuestos que no lograron solubilizarse se colocaron en función de la geometría de su estructura cristalina, mientras que la parte líquida restante conforma la zona vítrea debido a que el tiempo de enfriamiento es insuficiente para la cristalización total del producto. Al hablar de esmaltes es necesario saber que a temperaturas elevadas estos adquieren una consistencia pastosa, donde empiezan a contraerse lo cual contribuye a su adaptación con las tensiones que se llegan a generar en el bizcocho cuando se ha alcanzado las temperaturas a las que se genera la transición vítrea. Cuando la contracción del esmalte no se compagina con la de la pieza base, se generan inconvenientes que dan lugar al cuarteo durante su enfriamiento o pueden desarrollarse después de un cierto tiempo (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004; Garzón et al, 2022).

0 Oxidación de la materia orgánica

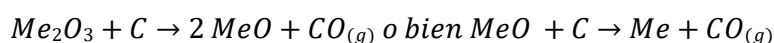
Todas las arcillas que forman parte de una pasta cerámica poseen cierta cantidad de compuestos orgánicos diferentes, los cuales se encuentran distribuidos sobre la superficie de las partículas o combinados en las redes de los silicatos, así como también partículas de carbono. A todas ellas se las conoce como materia orgánica. Este tipo de impurezas generan inconvenientes en la fabricación de piezas cerámicas ya que se encuentran directamente vinculadas con la aparición de ciertos defectos en los productos terminados tales como la aparición de manchas negras (Lores et al., 1997; Uribe et al., 2021). Los procesos de carbonización de la materia vegetal son los responsables de la presencia de materia orgánica en las arcillas, donde esta puede encontrarse en forma de ácidos húmicos y carbón de tamaños de partícula muy pequeños; siendo su presencia útil cuando sirve de combustible o muy perjudicial cuando se encuentra en grandes cantidades, en cuyo caso se deberá alargar la duración de la cochura u oxidar completamente el carbono para evitar los inconvenientes mencionados (Negre Medall, 1989; Pereira Báez et al., 2021)

El contenido máximo de materia orgánica que debe encontrarse presente en una arcilla va a depender del ciclo de cocción, del tamaño, forma y porosidad de las piezas cerámicas, de la composición, propiedades de la pasta y condiciones del horno. Como por ejemplo para la

elaboración de baldosas cerámicas el contenido de materia orgánica no debe superar el 0,3% (Lores et al., 1997).

La materia orgánica presente se quema en un rango de temperatura entre los 300 y 450°C, produciendo dióxido de carbono y vapor acuoso. Donde, al aumentar de forma progresiva la temperatura, sí la circulación de oxígeno es la adecuada y no se desarrolla una vitrificación en la superficie, la combustión se completa a 600°C, dejando muy pocos residuos y una porosidad fina. Sin embargo, si no se cumplen las condiciones mencionadas anteriormente la materia orgánica sufre una destilación seca que provoca la generación de carbono y otros compuestos, que dan lugar a un oscurecimiento de la pasta a lo que se lo conoce como defecto de “corazón negro” (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004; Molina, 2020).

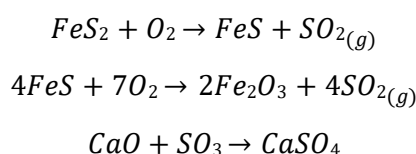
El defecto de corazón negro se desarrolla debido a que el carbono reacciona con los óxidos metálicos (Me) presentes a temperaturas elevadas.



Donde, se da la formación de óxido de carbono que conlleva a un ennegrecimiento de la masa, un desarrollo alveolar, y una sobrecocción de la zona (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004).

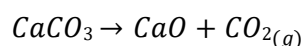
◦ **Descomposición de compuestos que poseen oxígeno**

Dentro del rango de temperatura comprendido entre 350-450°C se desarrolla la oxidación de la pirita la cual culminará a temperaturas más elevadas. En una atmósfera oxidante el SO₃ reacciona con los óxidos básicos (CaO) presentes en la pasta o los esmaltes generando sulfatos. Donde específicamente, el CaSO₄ provoca una eflorescencia salina en la superficie de la pieza o a largo plazo la separación del esmalte de la pieza.



En el rango de temperatura de 650 a 950°C, se da lugar a la descomposición de los carbonatos de metales alcalinotérreos generando dióxido de carbono y óxido del metal. Los primeros carbonatos en descomponerse son los de magnesio seguidos por los de calcio y al hablar de estructuras primero se descomponen los no cristalizados o aquellos que poseen estructuras cristalinas defectuosas. Al ser una reacción reversible, la descomposición se ve

favorecida por la eliminación de los productos del ambiente de la cocción: una buena circulación del aire y al estar presentes minerales arcillosos se da la formación de silicatos y silicoaluminatos de calcio que ayudan a la disociación de los carbonatos desarrollando su acción fundente y con ello provocan una dilatación antes que una contracción durante el proceso de cocción de la pieza (Asociación española de Técnicos Cerámicos & SACMI, 2004).



Los diferentes compuestos que presentan oxígeno en su estructura se descomponen a diferentes temperaturas durante el ciclo de cocción.

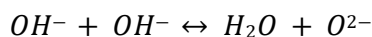
Tabla 2. Temperaturas de descomposición de compuestos presentes en las arcillas.

Reacción	Temperatura °C
$FeS_2 + O_2 \rightarrow FeS + SO_2$	350-450
$4 FeS + 7O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4SO_2$	500-800
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	350
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	250-920
$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	650-950
$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$	400-900
$4FeCO_3 + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + CO_2$	800
$CaSO_4 \rightarrow CaO + SO_3$	1250-1300

Nota. Fuente: (Barba et al., 2002)

0 Deshidroxilación del mineral arcilloso

El material arcilloso sufre reacciones de descomposición de los cristales del mineral que conllevan a la formación de una estructura amorfa y/o desorganizada que provoca la pérdida de grupos OH⁻ en forma de agua.



A temperaturas comprendidas entre los 550 y 650°C se genera una contracción de la pasta debido a que la caolinita pasa a ser metacaolín por un proceso de deshidroxilación, sin embargo, esta contracción no es notada debido a que dentro de ese mismo rango se genera la modificación del cuarzo provocando la dilatación del material. Dentro de la deshidroxilación de la arcilla se generan estructuras tales como metacaolín, espinela y mullita (Barba et al., 2002; Cáceres et al., 2021).

El proceso de deshidroxilación de la caolinita donde se obtiene el metacaolín, apoya a la formación de mullita, su proceso inicia con el desarrollo de los núcleos de los cristales por la difusión de sílice sobre los granos de alúmina, donde su formación depende de la temperatura y naturaleza física y química de los componentes (diámetro de partículas, forma cristalográfica, catalizadores, etc.) (Cáceres et al., 2021; Picón Sibri, 2022).

◦ **Cristalización y soluciones sólidas**

Este tipo de reacciones van de la mano de las reacciones de deshidroxilación ya que, al generarse una estructura amorfa esta comienza a cristalizarse a medida que aumenta la temperatura donde, al existir estructuras iguales de diferentes compuestos reaccionan entre sí y forman una estructura sólida. Este tipo de reacciones provocan grandes cambios exotérmicos. A temperaturas comprendidas entre 900 y 1000°C se genera la formación de la mullita y se da una nueva organización de los aluminosilicatos (Cáceres et al., 2021).

1.5.2. Relación entre absorción de agua y resistencia mecánica

Existe una relación inversamente proporcional entre la absorción de agua y la resistencia mecánica, de tal modo que a medida que aumenta la absorción de agua disminuye la resistencia de las piezas. Este fenómeno se fundamenta en una alta porosidad o espacios existentes entre partículas, que dan lugar a una insuficiente compactación de la pasta cerámica durante el proceso de sinterización. Se debe tomar en consideración que la porosidad también se ve influenciada por otros factores como la cantidad de fundente presente, la temperatura de trabajo y de la dosificación de la pasta (Manco Jaraba et al., 2020).

La resistencia de los materiales cerámicos se ve afectada mayormente por defectos estructurales, tales como grietas internas o externas y porosidad excesiva, que hacen que el producto resista menos carga antes de la fractura. La absorción de agua por otro lado, está influenciada por los factores que ya se han mencionado anteriormente. Valores bajos de absorción de agua indican que el producto tiene menor porosidad abierta; y esto es ventajoso para el producto puesto que su capacidad para absorber agua será menor y tendrá una mayor resistencia mecánica (Rozo Rincón et al., 2014).

La absorción de agua y resistencia mecánica son dos parámetros muy importantes ya que reflejan la calidad de los productos cerámicos, según lo estipulado en la norma INEN 990. Su determinación realizada en las materias primas o pastas usadas en el proceso de producción, puede interpretarse también como un indicador de la capacidad de vitrificación (Alvarez Rozo et al., 2018).

1.5.2.1. Requisitos para tejas de acuerdo a normativa

La norma INEN 990 (1982) establece los requisitos de absorción de agua y resistencia a la flexión (Tabla 3) que deben cumplir las tejas cerámicas para asegurar su calidad, según la siguiente clasificación:

- Tipo A: Teja Común Curva
- Tipo B: Teja Común Plana
- Tipo C: Teja tipo Curva Vidriada
- Tipo D: Teja tipo Plana Vidriada

Tabla 3. Requisitos de absorción de agua y resistencia a la flexión para tejas según la Norma INEN 990

Tipo de teja	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)		Absorción de agua	
	Promedio de cinco tejas	Mínimo para una teja cualquiera	Promedio de cinco tejas	Una teja cualquiera como máximo
A	100	80	18%	20%
B	70	55	20%	22%
C	100	80	12%	14%
D	70	55	14%	16%

1.5.3. Problemas en tejas asociados a una alta absorción de agua

Las tejas cerámicas porosas y con valores de absorción de agua que se encuentran fuera de los rangos de calidad son propensas a presentar deficiencias en su impermeabilidad. Es por ello que es importante cumplir con los parámetros de absorción de agua establecidos en la normativa ecuatoriana pues de este modo las tejas presentarán buenas características en lo que respecta a su impermeabilidad, durabilidad y consistencia física.

El agua es considerada un agente agresivo y perjudicial para los cerámicos de construcción. Las tejas que no cumplen con los requisitos de calidad pueden adquirir cambios de volumen cuando el agua ingresa por sus poros; el agua en su recorrido por las piezas disuelve y arrastra sales solubles, creando depósitos de sales en lugares no deseados y aumentando la porosidad inicial. El agua también puede producir erosión mecánica y es indispensable para

el desarrollo de organismos vivos que agravan la erosión, así como para que se produzcan algunas reacciones químicas corrosivas (Ariza, 2012).

La durabilidad de las tejas también puede verse afectada por acción de hielo en zonas donde las condiciones climáticas son relativamente bajas, ya que el agua cuando se congela aumenta su volumen en un 9% aproximadamente. Esta expansión generada por la absorción de agua en las tejas provoca daños en su estructura debido a que estará sujeta a esfuerzos internos que pueden ocasionar rupturas, desconchamientos u otras lesiones (Benítez Pecino, 2015; García González, 2011).

1.6. Caracterización de las materias primas y la pasta

La caracterización física y química de las mismas es importante para inferir el comportamiento de la pasta y en el presente trabajo para poder establecer las restricciones del diseño de vértices extremos y con ello, las proporciones de los componentes para cada experimento.

1.6.1. Propiedades químicas

Análisis químico

El análisis químico se expresa como porcentaje de óxidos que contiene la arcilla en cantidades significativas, tales como sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), óxido de potasio (K_2O) y óxido de sodio (Na_2O). A partir de estos datos se puede realizar un análisis mineralógico racional para conocer la composición mineralógica de las materias primas.

Según Velesaca Mora (2020) a partir de la composición química de las arcillas y el análisis mineralógico racional se puede inferir lo siguiente:

- Sílice: indica el porcentaje de sílice libre o cuarzo que tiene la muestra.
- Alúmina: su valor está relacionado con la cantidad de arcilla y feldespato.
- Óxido de Calcio: se encuentra generalmente en forma de carbonatos alcalinotérreos.
- Óxido de magnesio: se asocia a la presencia de dolomita y clorita.
- Óxido de potasio: indica la presencia de feldespato potásico, illita o mica.
- Óxido de sodio: indica la presencia de feldespato sódico.
- Pérdidas al fuego: se debe a la descomposición de las arcillas y carbonatos, también a la combustión de materia orgánica.

De lo anteriormente expuesto, Colbeck (1989) y Afanador García et al. (2013) recalcan la importancia de estos análisis a la hora de definir las mezclas que se van a utilizar para la fabricación de piezas de mampostería ya que influyen significativamente en las propiedades mecánicas y físicas del producto final.

pH

La determinación del pH permite identificar el valor de acidez o de alcalinidad que presenta cada arcilla analizada. Es un parámetro que puede resultar favorable o no durante la elaboración de diferentes materiales cerámicos, debido a que todo depende del tipo de arcilla que se llegue a utilizar. Existen arcillas que absorben una gran cantidad de agua por lo que tienden a ser alcalinas, ya que al retener mayor cantidad de agua esta se disocia y se genera una mayor cantidad de iones OH^- lo que indica un pH elevado. Por otro lado, la presencia de sustancias ácidas tales como los sulfatos en las arcillas tienden a disociarse generando una disminución del pH (Bermeo et al., 2020). Los cambios de pH ejercen una marcada influencia en la plasticidad, muchas arcillas rojas para ladrillos, arcillas grasas y otras arcillas plásticas presentan acidez (Singer & Singer 1976; Tenesaca Zhagui 2019).

Las arcillas por lo general tienen pH ácidos que se encuentran dentro del rango de 4,5 a 6,5. Aquellas que presenten pH muy ácidos tienden a flocular con facilidad y resulta muy complicado su desfloculación; mientras que las arcillas alcalinas se comportan de manera opuesta facilitando la desfloculación, pero provocando inconvenientes para las pastas destinadas a trabajo manual, o en torno y en especial de trabajo plástico (Guerrero 2007; Bermeo et al., 2020).

El pH se encuentra relacionado con la capacidad de intercambio catiónico ya que mientras más bajo es el valor del pH en las arcillas causan electropositividad que provoca que un átomo o molécula ceda electrones, y por el contrario si el pH es elevado mejora su capacidad de atraer cationes presentes en el agua circundante que tienden a afectar la manipulación de la arcilla (Bermeo et al., 2020; Gori 1994).

1.6.2. Propiedades físicas

Humedad porcentual

La humedad se puede entender como la cantidad de agua que tiene un determinado cuerpo, y puede expresarse en base húmeda o en base seca. Este parámetro se debe considerar al momento de preparar las pastas cerámicas, puesto que las arcillas al ser higroscópicas tienden a absorber la humedad del medio ambiente y se hinchan. El contenido de agua es

importante en la industria cerámica pues influye significativamente en algunas propiedades como la contracción, plasticidad y trabajabilidad de la arcilla, densidad aparente, porosidad y consistencia (Tenesaca Zhagui, 2019).

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico consiste en una representación de la distribución de tamaños de un determinado material. Güeto (2012) y Florez Arenas (2016) mencionan que este parámetro es de gran importancia en la elaboración de productos de mampostería pues influye en la plasticidad, contracción y velocidad de sinterización en la cocción; así como también en las características físico mecánicas de las piezas obtenidas, tales como la porosidad, permeabilidad, absorción de agua y resistencia mecánica. La distribución granulométrica también permite predecir el carácter plástico o desengrasante de las arcillas; tomando en consideración que el tamaño del material arcilloso se encuentra en un rango de micras mientras que la fracción arenosa se caracteriza por presentar partículas de tamaño mucho mayores (Manco Jaraba et al., 2020).

Existen varias formas de clasificar a las arcillas, siendo la clasificación de Seger y la mineralógica las más utilizadas en el área de la cerámica.

Tabla 4. Clasificación granulométrica de las arcillas.

Clasificación de Seger		Clasificación mineralógica	
De 0 a 0,01 mm	Arcillas	De 0 a 0,0039 mm	Arcillas
De 0,001mm a 0,025 mm	Polvo extrafino	De 0,0039 mm a 0,0625 mm	Limos
De 0,025 mm a 0,04 mm	Polvo impalpable	De 0,0625 mm a 2 mm	Arenas
De 0,04 mm a 0,333 mm	Arena fina	De 2 mm o más	Gravas
De 0,333 mm o más	Arena gruesa		

Nota. Fuente: (Benítez Pecino, 2015)

En general, se puede considerar que las partículas de arcilla se caracterizan por su tamaño inferior a 1 micra de diámetro y por lo tanto presentan gran superficie específica.

La determinación de la distribución granulométrica se realiza mediante el método húmedo seco a partir de una serie de tamices de número y abertura conocida que se colocan en orden decreciente, sobre los cuales las partículas constitutivas de una muestra se separan de acuerdo a su tamaño. Como resultado se obtienen los pesos de cada tamaño, mismos que

se pueden expresar como porcentajes retenidos, acumulados y pasantes en cada malla con respecto al total de la muestra (Cáceres et al., 2021).

Índice de plasticidad

La plasticidad es un parámetro importante en la industria cerámica, que se define como la propiedad que poseen las arcillas para formar piezas al mezclarse con agua, ya que al estar en su estado sólido no es plástica y se disgrega con facilidad (Alvarez & Chacho, 2015). Su determinación se puede realizar a partir de diferentes métodos siendo el más sencillo el de los límites de Atterberg, que comprenden separar el límite líquido el cual representa el porcentaje de humedad que contiene una arcilla cuando se encuentra entre el estado líquido y plástico del límite plástico el cual representa la menor humedad a la cual una arcilla resulta fácil de moldear y el índice de plasticidad que es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (Santos et al., 2011).

La plasticidad es una propiedad que se ve afectada por ciertos factores físico-químicos generados entre partículas coloidales de arcilla y agua, tales como: composición mineralógica, tamaño de partículas, compacidad, capacidad de intercambio catiónico, pH y tensión superficial (Singer & Singer, 1976; Tenesaca Zhagui, 2019).

Contracción

Esta determinación permite conocer el tamaño final de la pieza después de haber sufrido una reducción de volumen provocado por el secado y la quema (Maza Quishpi, 2011). Durante este proceso se disminuye el espacio poroso intermedio, donde el porcentaje contraído va a depender del tipo de arcilla a trabajar. Esta determinación permite conocer o predecir la contracción que sufrirá la teja, por lo que es necesario conocer la contracción tanto de la pasta como de las arcillas que forman parte de la pasta. Aquellas arcillas que poseen mayor cantidad de partículas finas con una alta capacidad de absorción de agua y buena plasticidad tienden a contraerse más en comparación de aquellas arcillas magras que poseen una baja plasticidad (Tenesaca Zhagui, 2019; Maza Quishpi, 2011).

La contracción al secado se encuentra influenciada por la cantidad de agua de trabajo contenida en la pasta y la plasticidad del material, es por ello que el proceso de contracción inicia con la evaporación del agua contenida en la pasta provocando que las partículas tiendan a acercarse entre sí, mientras que la contracción a la quema depende de la capacidad de la pasta para sinterizar y vitrificar (Vázquez, 2005).

La rotura o fisuras de tejas o piezas cerámicas se genera principalmente debido a la contracción, donde resulta muy arriesgado trabajar con arcillas que tienden a contraerse con valores superiores al 7%, por ello es recomendable trabajar con arcillas magras para mezclarlas con aquellas que presentan cierto riesgo de ruptura por su alta contracción. Aunque el porcentaje de contracción de ciertas arcillas puede alcanzar hasta el 10% sin presentar ningún tipo de deformación, trizadura o ruptura, esto solo sucede cuando dichas arcillas presentan una capilaridad ideal; por lo que se debe trabajar a porcentajes de contracción inferiores a este valor (Tenesaca Zhagui, 2019; Zea, 2005).

Absorción de agua y espacio poroso

La medida de la absorción de agua expresada en porcentaje, indica el aumento de peso que experimenta una arcilla o una pasta cocida con referencia al peso del material seco, cuando se sumerge totalmente en agua. La absorción de agua se relaciona con la porosidad, de tal manera que mientras más porosa sea la pieza cocida, mayor será su capacidad de absorber agua, debido a la disponibilidad de espacios por donde puede penetrar la misma.

Porosidad

La porosidad se define como la relación que existe entre el volumen total de poros (abiertos y cerrados) y el volumen total ocupado por el sólido (Bruguera, 1986). Entendiéndose en este contexto a los poros abiertos como aquellos que están interconectados entre sí y, generalmente con el exterior por medio de capilares, por lo que pueden rellenarse de agua al sumergir la pieza en agua; y a los poros cerrados como aquellos a los que no se puede acceder desde el exterior puesto que al estar ocluidos en sí mismos, no siempre se podrán rellenar con agua (Vázquez Malagón, 2005). La porosidad está íntimamente relacionada con el empaquetamiento de las partículas e indica el posible grado de absorción de agua y también la permeabilidad del material a los fluidos. La porosidad también se ve afectada por las reacciones que se dan durante la cocción, tales como la vitrificación y sinterización ya que estos condicionan la reducción de porosidad del material.

En cerámica se puede distinguir entre porosidad verdadera y porosidad aparente, definiéndose la primera como la relación existente entre el volumen total ocupado por los poros abiertos y cerrados, y el volumen total ocupado por el sólido; y la segunda como la relación existente entre el volumen ocupado por los poros abiertos y el volumen total ocupado por el sólido. Con frecuencia, esta última es la que más se utiliza debido a su facilidad de determinación (Bruguera, 1986; Tenesaca Zhagui, 2019).

La porosidad también varía según la consistencia más o menos compacta que adopten las piezas después de la cocción. Generalmente, las arcillas sometidas a bajas temperaturas suelen ser más porosas y, en consecuencia, presentan altos valores de absorción de agua (Martínez Fonseca, 2019).

1.7. Proceso de obtención de las tejas

Como primera etapa se realizó el levantamiento de información de las diferentes etapas del proceso de producción de un taller artesanal del sector Racar del cantón Cuenca. Para ello, se realizaron visitas al taller y se recolectó datos en base a la observación del proceso productivo. A continuación, se describen cada una de las etapas de este proceso:

- Obtención de materia prima

Para la producción artesanal de tejas cerámicas se requiere como materia prima la arcilla. En el taller donde se realizó el trabajo de titulación se adquieren tres arcillas diferentes; la arcilla x_1 proveniente de Cumbe, la arcilla x_2 proveniente de sectores cercanos a Racar (Los Lirios, Buenos Aires y San Miguel), y la arcilla x_3 de San Miguel. Las arcillas proceden de canteras y son entregadas en volquetas. Una vez entregadas, se almacenan cerca del taller artesanal, a la intemperie. En épocas de lluvia se las cubre con un plástico con el objetivo de tratar de mantener su humedad.

Cabe destacar que las arcillas entregadas por los proveedores no siempre tienen las mismas características.



Figura 7. Almacenamiento de las arcillas.

- Dosificación de la materia prima

El artesano realiza la dosificación de acuerdo a su experiencia, colocando diferentes proporciones de cada materia prima en una zona de preparación. Para ello, se hace uso de una minicargadora Bobcat. En esta etapa, si se observa que la mezcla presenta una consistencia seca, se añade el agua usando baldes, la cantidad de agua agregada depende

de la experticia del artesano. La dosificación usada para la elaboración de tejas planas y curvas es de 0,33 de la arcilla x_1 , 0,33 de la arcilla x_2 , y 0,33 de la arcilla x_3 .

- Reducción de tamaño

La mezcla dosificada se hace pasar desde una tolva que lleva el material a una laminadora (un tipo de molino de rodillos) con el fin de disminuir el tamaño de las partículas más gruesas y disgregar los trozos de arcillas aglomeradas en partículas más pequeñas. Posteriormente, la masa formada descende a una máquina mezcladora en donde se obtiene una masa más homogénea.



Figura 8. Laminadora y mezcladora.

- Moldeo por extrusión

La masa homogénea procedente de la mezcladora es conducida por medio de una banda transportadora a una extrusora, cuya finalidad es moldear la pasta a la forma deseada de la teja, sea esta plana o curvada. La extrusora está equipada con una bomba de vacío. Una vez formadas las tejas, éstas se cortan mediante una cuchilla de acero al final de la extrusión. Dado que la máquina permite obtener un buen acabado de las piezas, no es necesario realizar un perfilado posterior.



Figura 9. Extrusión de las tejas.

- Secado

Las tejas moldeadas se colocan en galpones destinados a esta acción. Aquí, se genera la pérdida del agua de contracción de las piezas, por acción de las condiciones ambientales debidas al sol y al viento. Como primera etapa se realiza un pre secado, colocando las tejas debajo de un galpón construido con un techo de zinc, por un periodo de 8 días. Culminado este tiempo, las tejas se trasladan a un galpón de paredes y cubierta plástica (tipo invernadero) y se secan por un tiempo de 8 días más.



Figura 10. Secado de tejas planas.

- Primera cocción

Para la cocción se utiliza un horno artesanal tipo volcán que tiene una capacidad de carga por lote de 9000 tejas, y se emplea como combustible leña para su funcionamiento. Según la información levantada por el proyecto “Mejoramiento de la Eficiencia energética y reducción de contaminantes en hornos de ladrilleras artesanales del Cantón Cuenca” las temperaturas que alcanza el horno oscilan entre 650 y 850°C.

Para la primera cocción, las tejas se colocan de forma vertical lo suficientemente distanciadas para asegurar una adecuada distribución de calor, y se someten a temperaturas cercanas a 850°C por un periodo de 5 horas. Finalizada la primera cocción, el horno se apaga y se deja enfriar por 24 horas. Las piezas que se obtienen se conocen como tejas bizcochadas y han adquirido una consistencia dura.

- Vidriado

Tras la primera cocción, se coloca manualmente una capa de vidrio en la superficie de las tejas mediante el uso de un recipiente. El vidrio que emplea el artesano es adquirido a un proveedor local y se prepara antes de su aplicación como suspensión en agua.

El vidrio tiene como objetivo dar un poco de impermeabilidad a la teja y conferirle un aspecto agradable y un acabado brillante; así como incrementar su resistencia mecánica.



Figura 11. Vidriado de tejas.

- Segunda cocción

En este proceso se va a cocer el vidrio aplicado a las tejas, las temperaturas del horno correspondientes a esta etapa pueden variar de 750 °C a 1000 °C, dura aproximadamente de 12 horas. Transcurrido este tiempo el horno se apaga y se deja enfriar por 36 horas, después del cual, las tejas están listas para su comercialización.

- Almacenamiento y comercialización

Una vez que el horno se enfría se procede a retirar las tejas vidriadas y se almacenan para su posterior venta a comerciantes.

1.8. Diseño experimental

Un diseño de experimentos consiste en una metodología estadística que pretende planificar, ejecutar y analizar experimentos con el fin de obtener conclusiones válidas y objetivas para dar una solución a una problemática particular (Gil Rodríguez et al., 2020; Bhardwaj, S, & Panchal, P., 2021).

Según Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2008) para que un diseño experimental sea exitoso se deben llevar a cabo las etapas de planeación, realización, análisis, interpretación, control y conclusiones finales. La etapa de planeación es una de las más importantes y se le debe dedicar especial atención ya que comprende aspectos tales como la delimitación del problema, elección de las variables de respuesta, determinación de los factores a estudiarse,

selección de los niveles de cada factor y del diseño experimental adecuado, planeación y organización del trabajo experimental.

1.8.1. Diseño de experimentos con mezclas

El diseño de experimentos aplicado específicamente a mezclas tiene por objeto estudiar el comportamiento de una variable de respuesta que depende de la proporción de los componentes de una mezcla, manteniendo constante la cantidad total de la misma. Esta metodología se aplica en el área cerámica cuando se quiere optimizar las formulaciones de las pastas, ya que a partir del mismo se puede predecir los efectos que los cambios en las materias primas o en sus proporciones pueden tener sobre las variables del proceso y cómo estos afectan al producto final (Gil Rodríguez et al., 2020). En el caso de los materiales de construcción como las tejas cerámicas, se puede aplicar este tipo de diseño cuando se quiere optimizar las mezclas de las pastas y así obtener productos que cumplan con los requisitos de calidad exigidos en la normativa.

En este tipo de diseño los componentes de una mezcla se consideran como factores y las variables de respuesta dependen de las proporciones de cada uno de los componentes de la mezcla mas no de la cantidad total de mezcla (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Si se considera que una mezcla tiene q componentes, que cada tratamiento consiste en una combinación particular de estos componentes y que X_1, X_2, \dots, X_q corresponden a las proporciones en las que participan los componentes de la mezcla, deben cumplirse dos restricciones:

Ecuación 3. Restricción para un diseño de mezclas

$$0 \leq X_i \leq 1, \text{ para cada componente } i \quad (3)$$

Ecuación 4. Sumatoria de los componentes de un diseño de mezclas

$$\sum_{i=1}^q X_i = X_1 + X_2 + \dots + X_q = 1 \quad (4)$$

Los puntos experimentales de un diseño de mezclas se pueden representar en simplejos, que son figuras geométricas que permiten graficar los q componentes de la mezcla en $(q - 1)$ dimensiones. Los modelos estadísticos que se pueden emplear para encontrar dichos puntos pueden ser de tipo simplex reticular, simplex centroide y simplex aumentado. También se pueden emplear diseños con restricciones cuando las proporciones de los componentes que forman las mezclas no varían de 0 a 1 si no que deben mantenerse dentro de ciertos límites

ya sea por cuestiones económicas o técnicas (Lema & Castillo, 2018). Cuando se presenta esta situación se tiene la siguiente restricción:

Ecuación 5. *Diseño con restricciones*

$$0 \leq a_i \leq X_i \leq b_i \leq 1 \quad (5)$$

En donde a_i es la restricción inferior (mínima proporción) para el componente X_i de la mezcla, y b_i es la restricción superior (proporción máxima) del componente X_i (Lema & Castillo, 2018).

1.8.2. Diseño de vértices extremos

Cuando se presentan restricciones en las mezclas uno de los diseños más útiles es el de vértices extremos, el cual se define como una metodología que permite estudiar mezclas con restricciones superiores e inferiores en sus componentes. Se basa en encontrar los vértices definidos por las restricciones, tomando en cuenta que los vértices deben caer en el límite formado por las restricciones superiores e inferiores de los $(q-1)$ componentes (Lema & Castillo, 2018). La región experimental para este diseño no es regular (Figura 12) sino más bien consiste en un polígono irregular, ya que su forma está en función de los límites superiores e inferiores.

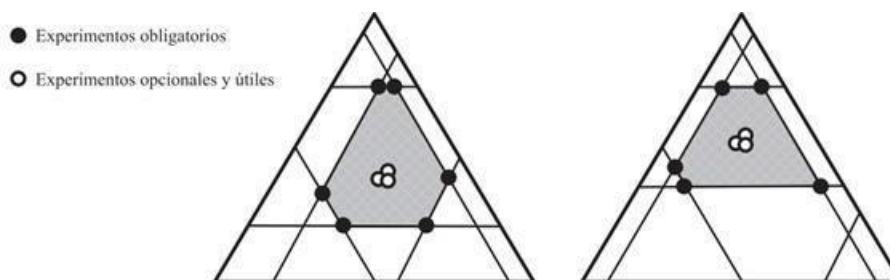


Figura 12. Ejemplos de diseños de vértices extremos. Fuente: (Ortega Pérez et al., 2015)

Las posibles combinaciones o tratamientos se pueden determinar a partir de la ecuación que se muestra a continuación, en donde q representa el número de componentes en la mezcla (Lema & Castillo, 2018; Yang et al., 2020)

Ecuación 6. *Posibles tratamientos para un diseño de vértices extremos*

$$\text{Posibles tratamientos} = q * 2^{q-1} \quad (6)$$

1.8.3. Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos son formas de expresión racionales usadas para explicar el desarrollo de un fenómeno que se da de forma real (Cervantes Gómez, 2015). Para explicar matemáticamente un fenómeno es necesario conocer las componentes del modelo matemático y sus relaciones que conformarán las ecuaciones. Los modelos matemáticos poseen parámetros que serán reemplazados por valores numéricos a medida que se dé la modelación (De Torres Curth, 2015; Zhou et al.,2021). Para poder analizar el efecto que los factores ejercen sobre las variables de respuesta es necesario ajustar un modelo matemático. Los modelos matemáticos utilizados para interpretar los resultados obtenidos en el diseño de mezclas son:

Ecuación 7. Modelo matemático canónico de primer orden o modelo lineal

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad (7)$$

Ecuación 8. Modelo canónico de segundo orden o modelo cuadrático

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

Ecuación 9. Modelo canónico de tercer orden o modelo cúbico especial

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j} \sum_{j < k} \sum_{k=3}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (9)$$

Ecuación 10. Modelo cúbico completo

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i < j} \sum_{j < k} \sum_{k=3}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (10)$$

(Lema & Castillo, 2018).

Capítulo 2

2. Metodología

2.1. Caracterización de materias primas y la pasta

Con el fin de realizar el diagnóstico de las condiciones actuales tras la reducción de tamaño, se efectuaron pruebas fisicoquímicas en las materias primas crudas sin moler y en las materias primas pasadas por el molino que se usa en el taller artesanal.

Las propiedades químicas que se analizaron fueron el pH y el análisis químico, mismas que se realizaron sobre las materias primas crudas. Las propiedades físicas que se llevaron a cabo para este estudio fueron la humedad, granulometría, plasticidad, contracción, absorción de agua y espacio poroso. Las pruebas de humedad se efectuaron sobre las materias primas sin moler. Finalmente, los análisis de granulometría, plasticidad, contracción, absorción de agua y espacio poroso se realizaron sobre las materias primas sin moler, las materias primas molidas y la pasta obtenida tras el proceso de extrusión, cuyas propiedades no difieren significativamente de la pasta obtenida tras el proceso de reducción de tamaño.

2.1.1. Propiedades químicas

- **Análisis químico**

En este estudio, los análisis químicos de las materias primas se efectuaron en el laboratorio CESEMIN a partir de los métodos de fusión con hidróxidos, extracción ácida y espectroscopia de absorción atómica de llama.

Este análisis se realizó con la finalidad de determinar la composición química de las materias primas usadas para la producción de tejas, a partir del cual, se realizó un análisis mineralógico racional para estimar mediante cálculos los minerales presentes en la muestra e inferir algunas de las propiedades que las arcillas pueden tener. La información proporcionada por el laboratorio y los cálculos realizados pueden verse a detalle en el ANEXO 1.

- **pH**

Se realizó una determinación por duplicado siguiendo el procedimiento empírico recomendado por Singer y Singer (1976).

1. Pesar 20 g netos de arcilla a analizar después de haber pasado por el tamiz de malla N° 20 y colocarlo sobre la placa de vidrio.
2. Adicionar 20 ml de agua destilada poco a poco y con la espátula homogeneizar hasta llegar a obtener una consistencia brillante y de superficie clara.
3. Agregar nuevamente agua y mezclar hasta observar que la muestra se haya vuelto mucho más fluida, pero que se mantenga dentro de la placa de vidrio.
4. Pasar toda la muestra a un vaso de precipitación y color agua destilada hasta completar los 50 ml.
5. Homogeneizar con la ayuda de una varilla de vidrio y determinar el valor del pH a través del potenciómetro.

2.1.2. Propiedades físicas

- **Humedad porcentual**

Esta determinación se efectuó por duplicado mediante un analizador de humedad High performance moisture analyzer WBA-110M a partir del siguiente procedimiento:

1. Colocar aproximadamente 2g de muestra en el analizador de humedad. Cuyo principio de funcionamiento se basa en la pérdida de peso por la evaporación de manera continua del agua presente en la muestra, y el registro continuo de la pérdida de peso, restándolo hasta que la muestra se sitúe a peso constante.
2. Una vez que el analizador ha emitido un pitido como señal de la finalización del análisis se procede a registrar el valor obtenido.

- **Análisis granulométrico**

Para la determinación granulométrica se aplicó el método húmedo-seco haciendo uso de la serie de tamices ASTM N° 8, 20, 40, 60, 80, 100, 200 y 325. El procedimiento se realizó por duplicado siguiendo el proceso que se describe a continuación:

1. Medir el contenido de humedad de las muestras colocando aproximadamente 2g de material en el analizador de humedad.
2. Pesar 200 g netos de cada una de las muestras y realizar un deslamado del material usando el tamiz de malla más fina (ASTM #365).
3. Pasar el material retenido en el tamiz a un recipiente metálico para secarlo en una hornilla.

4. Colocar el juego de tamices de arriba hacia abajo por orden decreciente de abertura de malla y distribuir la muestra en el tamiz superior.
5. Someter el conjunto de tamices a un movimiento vibratorio durante 10 minutos, dejar reposar por dos minutos y pesar el material retenido en cada tamiz. El peso del material pasante del tamiz más fino debe sumarse al peso del material perdido en el deslamado. El análisis se realiza por duplicado para cada una de las muestras.

Ecuación 11. Determinación del porcentaje retenido

$$\%retenido = \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \times 100 \quad (11)$$

En donde:

Po: peso inicial de la muestra

Pi (1,2..n): peso de la muestra en cada uno de los tamices

Los cálculos realizados para el duplicado pueden verse a detalle en el ANEXO 2.

- **Índice de plasticidad**

La determinación del límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad se realizó por duplicado a partir del método de Atterberg y el ensayo Casagrande, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación en base a la norma ASTM D4318-05.

→ **Procedimiento para determinar el límite líquido**

1. Tomar 200 g de una muestra de arcilla y molerla hasta que pase a través de la malla 40 ASTM, colocar los 200g en un recipiente y agregar agua destilada hasta alcanzar una pasta homogénea.
2. Colocar una cantidad de pasta sobre la cuchara formando una especie de círculo y alisar con la espátula.
3. Realizar una incisión con la herramienta acanaladora de forma vertical para separar la pasta en dos partes iguales.
4. Golpear la cuchara contra la base a través de una manivela hasta que la masa dividida se una de 10 a 13 mm.
5. Anotar el número de golpes y tomar 2 g de pasta de la cuchara y colocarlos en un porta muestras para determinar su humedad.

6. Realizar este procedimiento por triplicado donde: la primera se encuentre entre 35 y 35 golpes, la segunda entre 20 y 30 golpes y la última entre 15 a 25 golpes. Cuando se realiza la prueba en cada punto debe repetirse tres veces la determinación y no puede variar más de ± 1 golpe para que se acepte ese valor para ese punto. Entre cada punto debe existir como mínimo 5 golpes de diferencia. No puede tomarse el valor de 25 golpes.

→ **Procedimiento para determinar el límite plástico**

1. Moler una muestra de arcilla y tamizar por la malla 40 ASTM. Agregar agua destilada poco a poco hasta formar una pasta homogénea
2. Tomar de 1,5 a 3 g de la masa y formar un rollo de aproximadamente 3mm sobre la placa de vidrio hasta observar trizaduras.
3. Cuando se obtienen las trizaduras, cortar un pedazo de muestra y colocarla en un porta muestras para determinar su humedad. La cantidad de agua expresada en porcentaje, es el límite plástico.

Ecuación 12. Determinación de Índice de plasticidad

$$I_p = Ll - Lp \quad (12)$$

En donde:

I_p = Índice de plasticidad

Ll = Límite líquido

Lp = Límite plástico

Los cálculos realizados para el duplicado pueden verse a detalle en el ANEXO 3.

- **Contracción**

Para la determinación de la contracción al secado, contracción a la quema y la contracción total se realizaron seis placas con cada arcilla y la pasta.

→ **Procedimiento para determinar la contracción al secado**

1. Triturar cada una de las muestras de arcilla seca y hacerlas pasar por la malla 20.
2. Agregar agua a cada muestra hasta que estas hayan adquirido su máxima plasticidad.

3. Formar placas, para esto colocar la pasta en un molde de yeso, compactar en el molde y eliminar el exceso de pasta usando el hilo nylon humedecido, emparejar la placa y eliminar los excesos usando una espátula.
4. Con un pie de rey hacer dos marcas en forma de cruz de 5cm cada sobre la arcilla a analizar. Rotular las placas.
5. Sacar la placa del molde y dejar secar por 2 o 3 días. En esta etapa es necesario voltear las placas cada cierto tiempo para asegurar la uniformidad del secado y evitar deformaciones. Transcurrido este tiempo llevar las placas a una estufa y someterlas a un tratamiento de 105°C por 2 horas.
6. Medir nuevamente las marcas y determinar la cantidad de contracción obtenida.

→ Contracción a la quema

Para determinar la contracción a la quema de las materias primas y la pasta se emplearon las temperaturas de cocción del vidriado de 850°C, 900°C y 950°C propuestos por Picón Sibri (2022) para la quema del bizcocho. Se escogieron las temperaturas de cocción del vidriado ya que durante este proceso se alcanzan temperaturas más elevadas, lo que conlleva a que se desarrollen características en la pasta, que a temperaturas más bajas, como las de cocción del bizcocho, todavía no se dan, pero que en la segunda cocción con el vidriado si se producen.

Las temperaturas propuestas por Picón Sibri (2022) se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas en los hornos artesanales mediante termocuplas. Su investigación formó parte del proyecto “Mejoramiento de la eficiencia energética y reducción de contaminantes en hornos de ladrilleras artesanales del cantón Cuenca” efectuado con el apoyo de la Comisión de Gestión Ambiental (CGA) del GAD municipal del cantón Cuenca y sirvió como una base para este trabajo de titulación.

Las temperaturas de cocción del bizcocho pueden verse a detalle en las Tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5. Ciclo de cocción para vidriar a 850°C

Ciclo de cocción para vidriar a 850°C			
Tramo	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Tiempo (min)
1	20	150	110
2	150	550	160
3	550	600	45
4	600	750	45
5	750	850	30
6	850	850	30
Tiempo en horas			420 (7h)

Tabla 6. Ciclo de cocción para vidriar a 900°C

Ciclo de cocción para vidriar a 900°C			
Tramo	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Tiempo (min)
1	20	200	120
2	200	550	150
3	550	600	45
4	600	800	45
5	800	900	30
6	900	900	30
Tiempo en horas			420 (7h)

Tabla 7. Ciclo de cocción para vidriar a 950°C

Ciclo de cocción para vidriar a 950°C			
Tramo	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Tiempo (min)
1	20	150	110
2	150	550	175
3	550	600	45
4	600	800	30
5	800	950	30
6	950	950	30
Tiempo en horas			420 (7h)

Fuente: (Picón Sibri, 2022)

El procedimiento llevado a cabo para la determinación de la contracción a la quema se describe a continuación:

1. Quemar las placas de prueba de la contracción al secado usando las temperaturas de vidriado de 850°C, 900°C y 950°C.
2. Una vez realizada la quema, medir la distancia entre las marcas. La contracción total será la merma de secado más la merma por contracción a la quema.

Ecuación 13. Determinación del porcentaje de contracción al secado

$$\%CS = \frac{(Lo - Ls)}{Lo} * 100 \quad (13)$$

Ecuación 14. Determinación del porcentaje de contracción a la quema

$$\%CQ = \frac{(Ls - Lq)}{Ls} * 100 \quad (14)$$

Ecuación 15. Determinación del porcentaje de contracción total

$$\%CT = \frac{(Lo - Lq)}{Lo} * 100 \quad (15)$$

Donde:

% CS = porcentaje de contracción al secado

%CQ = porcentaje de contracción a la quema

%CT = porcentaje de contracción total

longitud inicial de la marca (5 cm o 50 mm).

Lq = Longitud de la marca después de la quema

Ls = Longitud de la marca tras el secado

Los cálculos realizados para cada placa pueden verse a detalle en el ANEXO 4.

- **Absorción de agua y espacio poroso**

La determinación de la absorción de agua y espacio poroso se realizó en las mismas placas empleadas para la determinación de la contracción. El procedimiento empleado se describe a continuación:

1. Colocar las placas quemadas en la estufa por 1h a 60°C. Transcurrido este tiempo, enfriar hasta temperatura ambiente y pesar cada placa.

2. Introducir en un recipiente plástico con agua las placas de forma vertical de manera que el agua ingrese a la misma a través de capilaridad. Este proceso tiene una duración aproximada de 2 horas.
3. Sumergir completamente la pieza y dejar reposar por 24 horas, o se puede colocar las piezas en agua a ebullición por 2 horas.
4. Extraer las piezas del agua, con una franela retirar el exceso de agua de la superficie y pesarlas nuevamente.
5. Inmediatamente determinar el volumen de cada placa, para ello introducir cada placa en una probeta de 1000ml con un volumen de agua conocido (700ml). Medir el volumen de agua desplazada con una pipeta serológica.

Ecuación 16. Determinación de la absorción de agua

$$\% AA = \frac{(Ph - Ps) * 100}{Ps} \quad (16)$$

Ecuación 17. Determinación del espacio poroso.

$$\% EP = \frac{(Ph - Ps) * 100}{V} \quad (17)$$

En donde:

Ph = Peso de la placa húmedo.

Ps = Peso de la placa seca

V = Volumen de la placa

% AA = Porcentaje de absorción de agua

% EP = Porcentaje de espacio poroso

Los cálculos realizados para cada placa pueden verse a detalle en el ANEXO 5.

2.2. Diseño experimental

2.2.1. Aplicación del diseño experimental

Una pasta cerámica es una mezcla de varios minerales, en el caso de esta investigación se usan tres arcillas, por lo que el diseño a aplicarse es el diseño de mezclas debido a que las materias primas analizadas en el capítulo anterior presentan propiedades diferentes, que influyen significativamente en el comportamiento de la pasta durante los procesos de formación, secado y cocción, y por ende en las propiedades finales. El diseño de vértices

extremos es el más adecuado para este estudio ya que de ese modo se trabaja dentro de una zona factible en donde se pueden aprovechar las características que aporta cada materia prima, así como limitar su uso por los efectos negativos que puedan causar en la pieza final. Para el diseño experimental se empleó la herramienta STATGRAPHICS (Diseño de Mezclas), específicamente el diseño de vértices extremos y para la obtención de las mezclas óptimas se usó el programa Minitab.

2.2.1.1. Componentes y variables de respuesta

Se emplearon tres componentes correspondientes a las arcillas que se usan en el taller, denominadas como x_1 , x_2 y x_3 . Como variables de respuesta se estudiaron la plasticidad (y_1), contracción al secado (y_2), contracción a la quema (y_3), contracción total (y_4) y la absorción de agua (y_5).

La plasticidad debe ser similar a la de la pasta con la que trabajaba el artesano inicialmente en el proceso de producción, ya que al trabajar a través de un proceso de extrusión para el conformado de tejas es necesario que la pasta nueva tenga la misma consistencia para no generar ningún tipo de inconveniente con respecto al comportamiento o desempeño de la pasta durante el extrusionado o la formación, debido a que si se obtiene una pasta muy plástica se pegaría a las paredes del equipo y no se formaría la teja y si por el contrario si está muy seca, esta no se desplazaría de forma adecuada a través de la extrusora y tampoco se formaría la teja correctamente.

Además, es importante mantener los valores de contracción, pues si estos son elevados se puede generar una rotura de piezas y si no hay una contracción adecuada no se disminuye la porosidad.

2.2.1.2. Restricciones en los componentes

Las restricciones o límites tanto superiores como inferiores se establecieron en función de las propiedades que aporta cada componente (Tabla 26).

2.2.1.3. Planteamiento de dosificaciones

A través del programa Statgraphics y según las restricciones de la Tabla 26 se obtuvieron puntos experimentales que se muestran en la Tabla 27.

Los experimentos se efectuaron según las dosificaciones propuestas en la Tabla 27. Para la quema del bizcocho se utilizó la temperatura de cocción de 850°C que se muestra en la Tabla 8 debido a que a estas condiciones se efectúa comúnmente la primera quema en el taller artesanal. Tras el proceso de vidriado, la segunda quema se realizó utilizando las

temperaturas de cocción de vidriado de 850 °C, 900 °C y 950 °C detallados en el apartado 2.2.2 (Tablas 5,6 y 7), en la sección de contracción a la quema.

Tabla 8. Ciclo de quema del bizcocho de 850°C

Ciclo de quema del bizcocho a 850°C			
Tramo	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Tiempo (min)
1	20	200	120
2	200	550	120
3	550	650	60
4	650	800	120
5	800	850	60
6	850	850	60
Tiempo en horas			540 (9h)

Fuente: (Picón Sibri, 2022)

2.2.1.4. Ajuste de modelo y caracterización de la superficie respuesta

Los datos obtenidos para la plasticidad, contracción total y absorción de agua se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados en regresión múltiple. La selección del modelo matemático más adecuado se realizó en función del análisis de varianza, los coeficientes de determinación R^2 y Ra^2 y la prueba de utilidad para cada modelo ajustado. Adicionalmente, una vez seleccionado el modelo se realizaron gráficas de superficie y de contorno utilizando el programa Minitab.

A partir de las gráficas de superficie y de contorno se obtuvo posibles mezclas óptimas que sirvieron de base para determinar la mezcla idónea final.

2.3. Pruebas en campo

En el taller artesanal, se elaboraron 40 tejas, 20 curvas y 20 planas con la mezcla idónea encontrada $x_1=0,30$; $x_2=0,20$; $x_3=0,50$ bajo las condiciones del taller artesanal, luego de la dosificación se procedió al proceso de reducción de tamaño, moldeado, secado, primera cocción, vidriado y segunda cocción.

2.3.1. Determinación de las temperaturas del horno artesanal

Durante la primera cocción se realizaron controles de temperatura cada 20 minutos a través del uso de una termocupla tipo K, la cual se colocó en tres partes diferentes del horno artesanal. Estos controles también se realizaron durante la segunda cocción en intervalos de tiempo de 30 minutos. Se decidió realizar estas mediciones de temperatura para saber si las

tejas elaboradas en el taller artesanal iban a pasar por un proceso de primera y segunda cocción similar a los propuestos en la parte experimental y con ello obtener un análisis mucho más certero de los resultados obtenidos en absorción de agua como resistencia a la flexión.

2.3.2. Determinación de las condiciones actuales de las tejas

Se realizaron mediciones de absorción de agua de cuatro lotes diferentes de tejas planas y curvadas elaboradas en el taller artesanal. Se analizaron los valores de absorción de agua y se descartaron ciertos datos atípicos del resto para obtener un promedio más representativo. La resistencia a la flexión se determinó únicamente en el lote 5 mediante la máquina para ensayos de flexión ACCU-TEK touch 350. Las mediciones de absorción de agua y resistencia a la flexión se encuentran detallados en el ANEXO 6.

Para la determinación de la absorción de agua se tomó en consideración los criterios establecidos en la norma INEN 989 y para la determinación de la resistencia a la flexión los criterios establecidos en la norma INEN 988, las cuales describen los métodos de ensayo de tejas cerámicas para estas determinaciones.

2.3.3. Determinación de absorción de agua y resistencia a la flexión de tejas elaboradas con la dosificación óptima

Las mediciones de absorción de agua se realizaron en el laboratorio de Cerámica de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca según lo especificado en la norma INEN 989. La determinación de la resistencia a la flexión se realizó en el laboratorio de Construcciones y Aplicaciones Bioclimáticas de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca, para ello se empleó la máquina para ensayos de flexión ACCU-TEK touch 350 y se siguieron los lineamientos establecidos en la norma INEN 988.



Figura 13. Determinación de la resistencia a la flexión



Figura 14. Deseccación de tejas.

Capítulo 3

3. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presenta los resultados y el análisis de caracterización de las materias primas y la pasta, el diseño experimental, las condiciones iniciales de las tejas y las pruebas de campo con la dosificación óptima.

3.1. Resultados de la caracterización de las materias primas y la pasta

- Análisis Químico y mineralógico

El resumen de los resultados del análisis químico y mineralógico de las arcillas se presenta a continuación en las tablas 9 y 10 respectivamente, el informe de laboratorio se muestra en el ANEXO 1.

Tabla 9. Resultados del análisis químico de cada arcilla

% Óxido	Arcilla x ₁	Arcilla x ₂	Arcilla x ₃
SiO ₂	60,06	67,34	71,13
Al ₂ O ₃	18,07	13,84	13,38
Fe ₂ O ₃	8,8	6,08	3,79
CaO	0	0	0,16
MgO	0,42	0,31	0,29
Na ₂ O	0,59	0,6	1,16
K ₂ O	2,53	1,57	1,45
P. Fuego	9,54	10,25	8,63
Total	100,01	99,99	99,99

Tabla 10. Resumen del análisis mineralógico racional

Composición mineralógica	Arcilla x ₁	Arcilla x ₂	Arcilla x ₃
Feldspatos	19,97	14,37	18,40
Sustancia arcillosa	36,33	28,22	25,05
Sílice libre	30,02	44,70	47,16
Fe ₂ O ₃	8,80	6,08	3,79
Materia Orgánica	4,47	6,31	5,14

- **pH**

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. pHs de las arcillas

Material	pH	Promedio
Arcilla x ₁	5,09	5,235
	5,38	
Arcilla x ₂	6,67	6,510
	6,35	
Arcilla x ₃	8,21	8,065
	7,92	

- **Humedad porcentual**

Los resultados de humedad se presentan en la siguiente Tabla 12.

Tabla 12. Humedad de las arcillas

Material	Humedad	Promedio
Arcilla x ₁	2,90%	2,88%
	2,86%	
Arcilla x ₂	3,39%	3,34%
	3,28%	
Arcilla x ₃	3,49%	3,45%
	3,41%	

- **Análisis granulométrico**

Los resultados obtenidos de esta determinación para las materias primas y la pasta se presentan a continuación:

Distribución granulométrica de las arcillas sin moler (Tablas 13, 14 y 15)

Tabla 13. Distribución granulométrica para la arcilla x_1 sin moler

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	4,60	2,30	2,30	97,70
20	0,85	3,20	1,60	3,90	96,10
40	0,425	2,80	1,40	5,30	94,70
60	0,25	6,60	3,30	8,60	91,40
80	0,18	6,30	3,15	11,75	88,25
100	0,15	7,10	3,55	15,30	84,70
200	0,075	19,40	9,70	25,00	75,00
325	0,045	12,20	6,10	31,10	68,90
< 325		137,70	68,85	99,95	0,00

Tabla 14. Distribución granulométrica para la arcilla x_2 sin moler

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	4,20	2,10	2,10	97,90
20	0,85	4,20	2,10	4,20	95,80
40	0,425	4,80	2,40	6,60	93,40
60	0,25	7,60	3,80	10,40	89,60
80	0,18	4,10	2,05	12,45	87,55
100	0,15	3,60	1,80	14,25	85,75
200	0,075	6,80	3,40	17,65	82,35
325	0,045	6,30	3,15	20,80	79,20
<325		158,10	79,05	99,85	0,00

Tabla 15. Distribución granulométrica para la arcilla x₃ sin moler

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	6,80	3,40	3,40	96,60
20	0,85	10,00	5,00	8,40	91,60
40	0,425	9,40	4,70	13,10	86,90
60	0,25	10,60	5,30	18,40	81,60
80	0,18	6,90	3,45	21,85	78,15
100	0,15	6,50	3,25	25,10	74,90
200	0,075	14,70	7,35	32,45	67,55
325	0,045	4,30	2,15	34,60	65,40
< 325		130,60	65,30	99,90	0,00

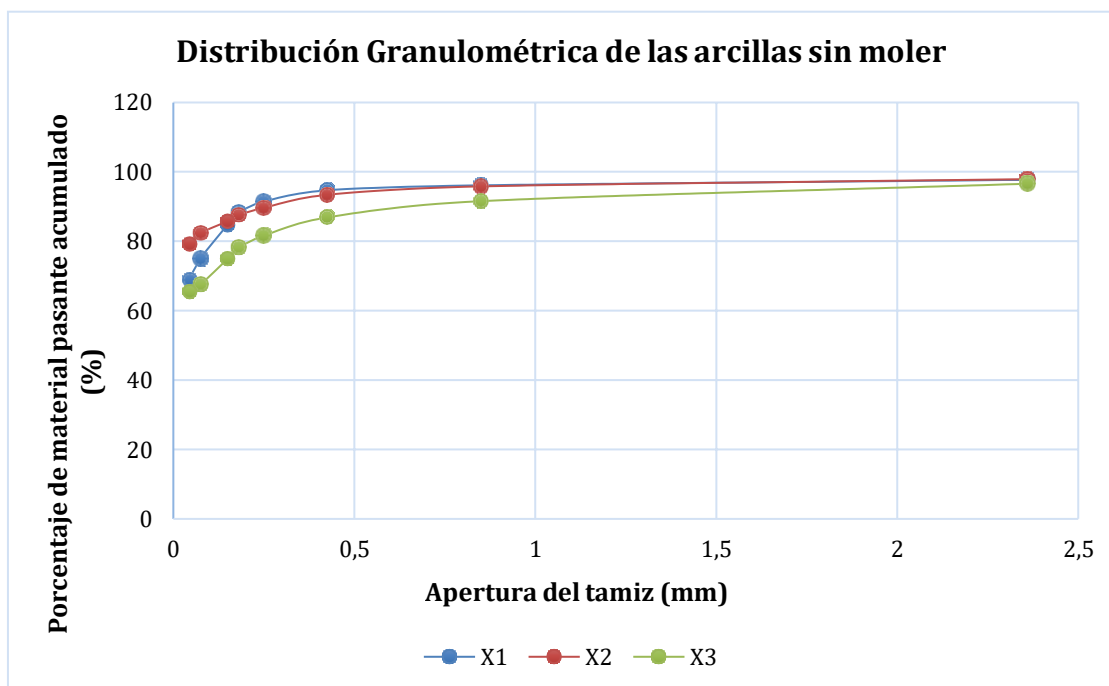


Figura 15. Curvas granulométricas para las arcillas sin moler.

Distribución granulométrica de las arcillas molidas (Tablas 16, 17 y18).

Tabla 16. Distribución granulométrica para la arcilla x_1 molida

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	1,20	0,60	0,60	99,40
20	0,85	5,30	2,65	3,25	96,75
40	0,425	3,40	1,70	4,95	95,05
60	0,25	5,90	2,95	7,90	92,10
80	0,18	5,20	2,60	10,50	89,50
100	0,15	5,90	2,95	13,45	86,55
200	0,075	14,80	7,40	20,85	79,15
325	0,045	12,30	6,15	27,00	73,00
< 325		146,00	73,00	100,00	0,00

Tabla 17. Distribución granulométrica para la arcilla x_2 molida

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	0,50	0,25	0,25	99,75
20	0,85	5,30	2,65	2,90	97,10
40	0,425	4,90	2,45	5,35	94,65
60	0,25	4,90	2,45	7,80	92,20
80	0,18	3,60	1,80	9,60	90,40
100	0,15	4,20	2,10	11,70	88,30
200	0,075	8,90	4,45	16,15	83,85
325	0,045	8,20	4,10	20,25	79,75
< 325		159,30	79,65	99,90	0,00

Tabla 18. Distribución granulométrica para la arcilla x₃ molida

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	5,90	2,95	2,95	97,05
20	0,85	9,20	4,60	7,55	92,45
40	0,425	9,90	4,95	12,50	87,50
60	0,25	12,30	6,15	18,65	81,35
80	0,18	7,80	3,90	22,55	77,45
100	0,15	4,40	2,20	24,75	75,25
200	0,075	9,80	4,90	29,65	70,35
325	0,045	4,90	2,45	32,10	67,90
< 325		135,40	67,70	99,80	0,00

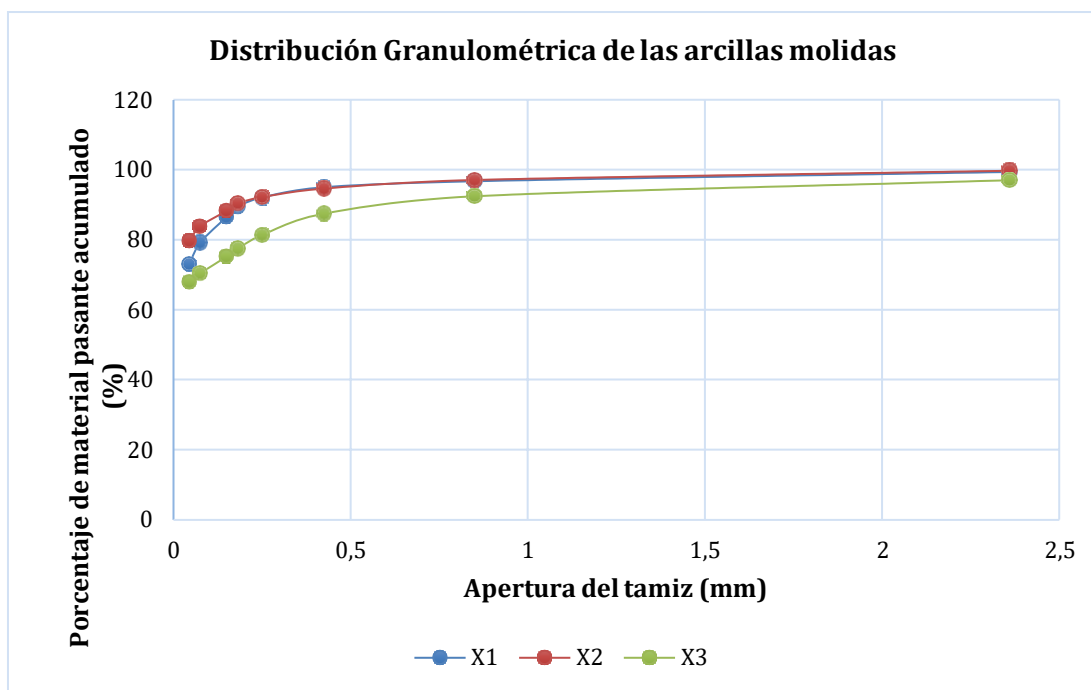


Figura 16. Curvas granulométricas para las arcillas molidas.

Distribución granulométrica de la pasta (Tabla 19)

Tabla 19. Distribución granulométrica para la pasta

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	0,80	0,40	0,40	99,60
20	0,85	5,80	2,90	3,30	96,70
40	0,425	6,00	3,00	6,30	93,70
60	0,25	7,50	3,75	10,05	89,95
80	0,18	4,90	2,45	12,50	87,50
100	0,15	4,90	2,45	14,95	85,05
200	0,075	11,90	5,95	20,90	79,10
325	0,045	10,40	5,20	26,10	73,90
< 325		147,70	73,85	99,95	0,00

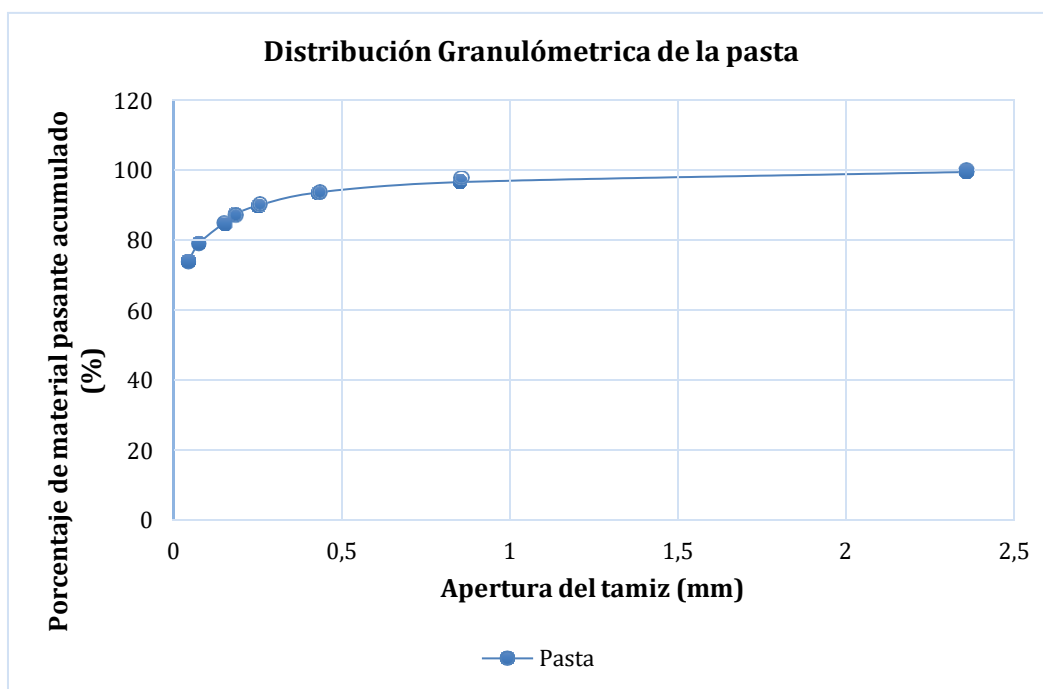


Figura 17. Curva granulométrica para la pasta.

En la Tabla 20 se muestra los porcentajes retenidos tanto de las arcillas sin moler como de las molidas.

Tabla 20. Porcentajes retenidos de las arcillas sin moler y molidas.

Malla	Arcilla x ₁ sin moler	Arcilla x ₁ molida	Arcilla x ₂ sin moler	Arcilla x ₂ molida	Arcilla x ₃ sin moler	Arcilla x ₃ molida
8	2,30	0,60	2,10	0,25	3,40	2,95
20	1,60	2,65	2,10	2,65	5,00	4,60
40	1,40	1,70	2,40	2,45	4,70	4,95
60	3,30	2,95	3,80	2,45	5,30	6,15
80	3,15	2,60	2,05	1,80	3,45	3,90
100	3,55	2,95	1,80	2,10	3,25	2,20
200	9,70	7,40	3,40	4,45	7,35	4,90
325	6,10	6,15	3,15	4,10	2,15	2,45
< 325	68,85	73,00	79,05	79,65	65,30	67,70

- **Índice de plasticidad**

Los promedios de resultados obtenidos para el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para las arcillas sin moler, molidas y la pasta se presentan en las Tablas 21, 22 y 23 respectivamente, los datos obtenidos en la determinación están en el ANEXO 3.

Tabla 21. Promedio del límite líquido, plástico e índice de plasticidad de las arcillas sin moler.

Tipo de arcilla	Límite líquido	Límite plástico	Índice plástico
x ₁	32,25	22,77	9,48
x ₂	32,96	20,68	12,28
x ₃	25,96	16,57	9,39

Tabla 22. Promedio del límite líquido, plástico e índice de plasticidad de las arcillas molidas.

Tipo de arcilla	Límite líquido	Límite plástico	Índice plástico
x ₁	32,87	22,92	9,96
x ₂	34,76	21,80	12,95
x ₃	25,44	15,75	9,68

Tabla 23. Promedio del límite líquido, plástico e índice de plasticidad de la pasta.

Material	Límite líquido	Límite plástico	Índice plástico
Pasta	34,39	22,66	11,72

- **Contracción**

Los resultados obtenidos para la contracción al secado, contracción a la quema y contracción total se muestran en la siguiente Tabla resumen 24, los datos completos están en el ANEXO 4.

Tabla 24. Resultados de la contracción al secado, a la quema y total a diferentes temperaturas de cocción del vidriado.

Material	Temperatura de cocción de 850°C			Temperatura de cocción de 900°C			Temperatura de cocción de 950°C		
	C.S (%)	C. Q (%)	C.T (%)	C.S (%)	C. Q (%)	C.T (%)	C.S (%)	C. Q (%)	C.T (%)
A. x ₁ sin moler	6,41	0,74	7,10	6,53	0,76	7,24	6,96	0,82	7,73
A. x ₂ sin moler	8,35	1,48	9,71	8,79	1,22	9,91	8,89	1,27	10,04
A. x ₃ sin moler	6,35	0,79	7,09	6,40	1,14	7,47	6,80	0,82	7,56
A. x ₁ molida	6,40	0,97	7,31	6,86	0,80	7,60	6,99	1,13	8,05
A. x ₂ molida	9,24	0,83	10,00	9,20	0,99	10,10	9,60	1,11	10,60
A. x ₃ molida	6,47	1,40	7,78	6,71	1,12	7,75	6,82	1,49	8,21
Pasta	7,55	1,43	8,87	7,23	1,54	8,66	8,70	0,61	9,26

Nota. C.S representa la contracción al secado, C.Q representa la contracción a la quema y C.T representa la contracción total

- **Absorción de agua y espacio poroso**

Los resultados obtenidos de la absorción de agua y espacio poroso de las materias primas y la pasta se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Resultados de la absorción de agua y espacio poroso de las materias primas y pasta quemadas a diferentes temperaturas de cocción.

Material	Temperatura de Cocción de 850°C		Temperatura de Cocción de 900°C		Temperatura de Cocción de 950°C	
	A.A (%)	E. P (%)	A.A (%)	E. P (%)	A.A (%)	E. P (%)
A. x ₁ sin moler	25,63	39,91	25,47	39,25	24,35	37,35
A. x ₂ sin moler	19,61	32,21	19,56	31,17	18,13	31,86
A. x ₃ sin moler	14,89	24,95	15,43	26,42	14,57	27,75
A. x ₁ molida	23,59	36,78	23,06	36,68	22,03	37,81
A. X ₂ molida	18,83	29,59	19	31,17	18,18	31,8
A. X ₃ molida	15,34	27,9	16,73	27,12	15,74	26,16
Pasta	16,15	27,52	16,38	29,09	16,6	28

Nota. AA representa la absorción de agua y E.P representa el espacio poroso

3.2. Análisis de los resultados de la caracterización de las materias primas y de la pasta

Los análisis de pH realizados en las materias primas indican que la arcilla x₁ y x₂ presentan carácter ácido, lo que concuerda con lo establecido por Singer y Singer (1976) que indica que las arcillas usadas en la producción de ladrillos y productos afines presentan acidez. La arcilla x₃ presenta carácter ligeramente básico. En cuanto a la humedad, la arcilla que presentó el menor valor fue la arcilla x₁, seguida de la arcilla x₂ y finalmente la arcilla x₃.

El análisis de plasticidad a través del uso del diagrama de casagrande que se muestra en la Figura 18, permite separar las arcillas en baja, mediana y alta plasticidad, por lo que se estableció que las arcillas x₁ y x₃ sin moler son arcillas de baja plasticidad y la arcilla x₂ sin moler es una arcilla de mediana plasticidad. Una vez molidas, las arcillas x₁ y x₂ se clasifican como arcillas de mediana plasticidad mientras que la arcilla x₃ es una arcilla de baja plasticidad, lo que favorece la formación de las tejas. La pasta que resulta ser una mezcla de

las arcillas roja, fina y arenosa presenta una plasticidad media, que es lo deseado para que sea fácil moldear las tejas.

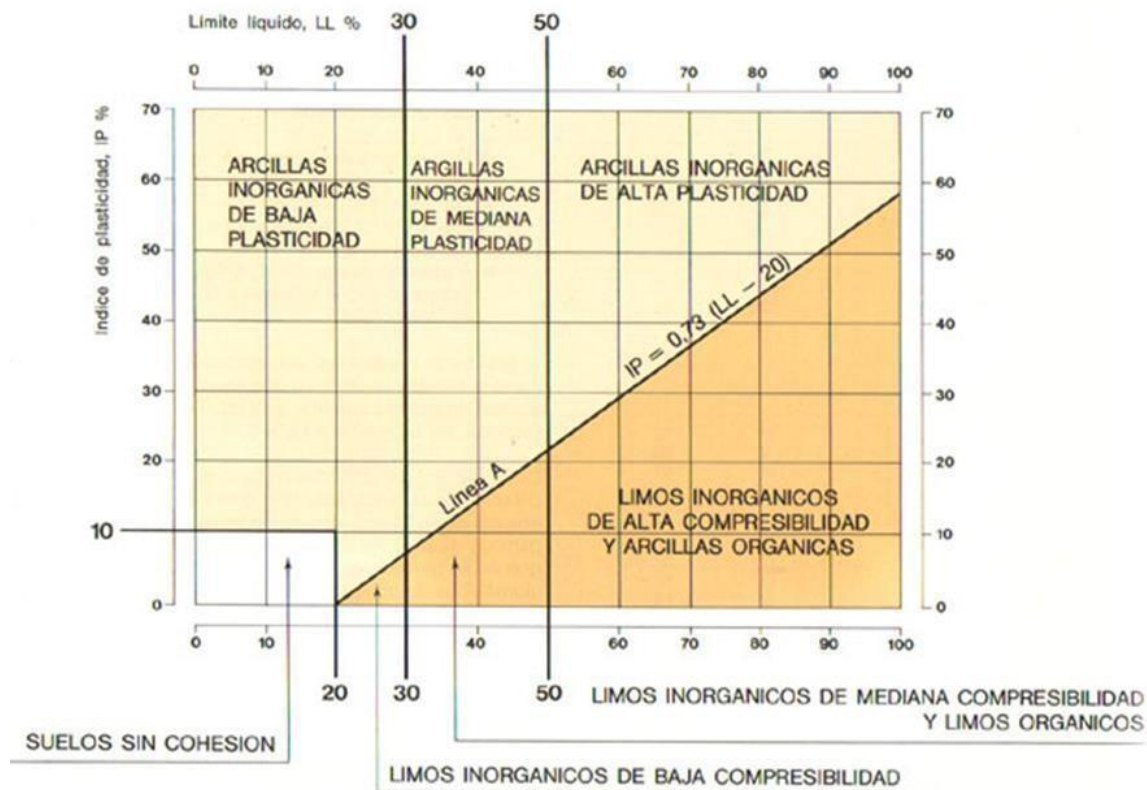


Figura 18. Diagrama de Casagrande. Fuente: (FAO, s. f.)

Los análisis de distribución granulométrica realizados en las materias primas sin moler indican que en general las arcillas usadas para la producción artesanal de tejas presentan granulometrías finas. La arcilla x_2 sin moler presenta el mayor porcentaje de finos (79,05%) retenidos en el fondo (y que se pierde en el lavado). La arcilla x_1 sin moler presenta un porcentaje de retenidos de 68,85% y la arcilla x_3 sin moler presenta un porcentaje de retenidos de 65,30%. Al comparar estos porcentajes con los de las arcillas molidas se observa un leve incremento de partículas finas retenidas, presentando valores de 79,65% para la arcilla fina, 73,00% para la arcilla x_1 y 67,70% para la arcilla x_3 . Con el incremento de partículas finas también se observa una mayor plasticidad.

Al analizar los valores de contracción de las arcillas sin moler y molidas, se observa que en general la arcilla que más se contrae es la arcilla x_2 , lo que es de esperarse debido a su plasticidad y granulometría fina. Los valores de contracción total de las arcillas x_3 y x_1 son similares y menores a los de la arcilla x_2 . Esto se cumple para los tres ciclos de cocción a los que fueron sometidas las placas. Por otro lado, los análisis de absorción de agua muestran que esta variable generalmente disminuye conforme aumenta la temperatura, sin embargo,

se observa un incremento a temperaturas de 900 °C, lo cual puede deberse a la presencia de compuestos de hierro y altos contenidos de materia orgánica (Vieira et al., 2008).

Finalmente, los análisis realizados en la pasta indican que esta presenta un porcentaje de partículas finas de 73,90% y tiene una plasticidad media (IP=11,72). También se observa un incremento en la contracción a medida que aumentan las temperaturas de los ciclos de cocción. Los valores de absorción de agua son similares para los tres ensayos realizados, siendo de 16,15%, 16,38% y 16,60% para las temperaturas de 850°C, 900°C y 950°C respectivamente. Dicho valor es superior a lo establecido en la norma INEN 990 mencionado en el capítulo 1.

En síntesis, se observa que el proceso de reducción de tamaño influye positivamente en las características de las materias primas, ya que al incrementarse las partículas finas se mejora levemente la contracción y la absorción de agua, pues un menor tamaño de partícula también favorece el desarrollo de las reacciones de sinterización. De este modo, al trabajar con arcillas molidas se observa un incremento leve en la contracción total y una disminución en la absorción de agua, dando como resultado piezas con porosidad más baja. Sin embargo, es importante mencionar que la reducción de tamaño no influye de manera significativa en los parámetros mencionados.

3.3. Resultados del diseño experimental

En base a los resultados de la caracterización de las materias primas y la pasta, se establecieron las restricciones para el planteamiento del diseño experimental, las mismas que se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Restricciones de los componentes

Componentes	Límites inferior y superior	Motivo
X ₁	15	Tiene un índice de plasticidad medio y brinda el color característico a la teja.
	30	Perjudica la absorción de agua.
X ₂	20	Proporciona una mayor cantidad de partículas finas que favorecen a la plasticidad y conformado de las piezas.
	40	Si se usa en exceso genera altas contracciones que producen trizaduras en las piezas. Su uso también se ve limitado por su alto contenido de materia orgánica.
X ₃	30	Mejora la compacidad y la absorción de agua al aportar con partículas gruesas. Su alto contenido de sílice permite reducir la contracción al secado y a la quema.
	50	El exceso de partículas gruesas produce una disminución de compacidad

y de plasticidad que dificulta la formación de las piezas.

Considerando estas restricciones, se obtuvieron las dosificaciones para los experimentos, los cuales se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Dosificación de los componentes.

Experimento	X ₁	X ₂	X ₃
1	30,00	40,00	30,00
2	30,00	20,00	50,00
3	15,00	40,00	45,00
4	15,00	35,00	50,00
5	26,25	36,88	36,88
6	26,25	26,88	46,88
7	18,75	36,88	44,38
8	18,75	34,38	46,88
9	30,00	30,00	40,00
10	22,50	40,00	37,50
11	22,50	27,50	50,00
12	15,00	37,50	47,50
13	22,50	33,75	43,75

En las Tablas 28, 29 y 30 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos realizados según los ciclos de cocción a los que fueron sometidos.

Tabla 28. Resultados de placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 850°C

Experimento	Plasticidad (y ₁)	C.S (%) (y ₂)	C.Q (%) (y ₃)	C.T (%) (y ₄)	A.A (%) (y ₅)
1	12,95	8,00	0,43	8,40	17,33
2	11,80	7,50	1,30	8,70	15,63
3	12,31	7,60	1,08	8,60	16,48
4	10,97	6,90	0,75	7,60	15,90
5	12,55	7,80	0,98	8,70	18,07
6	12,00	7,50	1,19	8,60	17,24
7	12,19	7,70	0,76	8,40	17,82
8	11,94	7,60	0,65	8,20	14,87
9	12,57	7,90	0,87	8,70	18,21
10	12,68	8,80	0,55	9,30	18,39
11	10,84	6,80	1,18	7,90	15,38
12	11,00	7,20	1,19	8,30	14,57
13	12,23	8,00	0,54	8,50	18,16

Tabla 29. Resultados de placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 900°C

Experimento	C.S (%) (y ₂)	C.Q (%) (y ₃)	C.T (%) (y ₄)	A.A (%) (y ₅)
1	7,80	0,54	8,30	17,40
2	7,30	1,51	8,70	15,47
3	7,60	1,19	8,70	16,78
4	7,20	0,86	8,00	16,28
5	8,00	1,09	9,00	18,17
6	7,30	1,29	8,50	17,02
7	8,00	0,87	8,80	17,34
8	7,60	0,76	8,30	14,61
9	7,80	1,08	8,80	18,01
10	8,70	0,66	9,30	18,51
11	6,70	1,29	7,90	15,01
12	7,80	1,19	8,90	14,97
13	7,70	0,65	8,30	17,91

Tabla 30. Resultados de placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 950 °C

Experimento	C.S (%) (y_2)	C.Q (%) (y_3)	C.T (%) (y_4)	A.A (%) (y_5)
1	7,60	0,65	8,20	17,23
2	7,60	1,62	9,10	15,03
3	7,40	1,30	8,60	16,41
4	6,80	0,86	7,60	15,81
5	8,00	1,20	9,10	18,00
6	7,40	1,30	8,60	16,91
7	7,50	0,97	8,40	17,20
8	7,20	0,86	8,00	14,52
9	7,90	1,19	9,00	17,93
10	8,40	0,76	9,10	18,24
11	7,00	1,40	8,30	14,90
12	7,30	1,29	8,50	14,18
13	7,60	0,87	8,40	17,69

3.4. Análisis del diseño experimental

Para el realizar el análisis de varianza se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El valor p , que muestra si el modelo es significativo o aporta elementos al compararlo con el modelo anterior de un orden más bajo (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Con este criterio, se elige el modelo con un p menor a 0,05.
- El criterio de los coeficientes de determinación para la selección del modelo que brinda información sobre la proporción explicada por el modelo (R^2) y la proporción explicada por el modelo ajustado al número de experimentos realizados (Ra^2) (Lema Tamay, 2015). Se recomienda que Ra^2 sea de al menos 70 % (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

3.4.1. Índice de Plasticidad (y_1)

Ajuste del modelo

Se realizaron dos análisis, uno que explica el aporte individual y un ANOVA final que representa el modelo ajustado, donde el primero sirve para valorar los aportes en función de p , el cual representa un valor de probabilidad e indica la relevancia de una respuesta. Es importante mencionar que p es sólo una probabilidad de que la diferencia obtenida se deba al azar, y el ANOVA se suma los aportes del modelo elegido (Molina Arias, 2017).

En la Tabla 31 se observa como el modelo lineal tiene una significancia muy alta, su valor p es muy bajo, mientras que el aporte del cuadrático y cúbico no lo es en gran medida. La diferencia radica en los coeficientes de determinación múltiple, donde los modelos cuadrático y cúbico son los que más aportan con valores superiores a 85%; también el modelo lineal está sobre los 70% de explicación de la variación de los resultados, que es un buen aporte. En cuanto a los valores de Ra^2 el modelo cuadrático posee un valor de 75,30%, por lo que da una explicación más real de los datos. Aun cuando el valor p del modelo cuadrático en el análisis de aportes no es muy significativo no quiere decir que no contribuya a tener más significancia.

Tabla 31. Análisis de los posibles modelos para el índice de plasticidad.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
Regresión	5,01	7	0,72	6,97	0,004
Lineal	4,02	3	1,34	13,06	0,008
Cuadrático	0,91	3	0,30	2,95	>0,1
Cúbico	0,08	1	0,08	0,77	>0,1
Error	0,62	6	0,10		
Total	5,63	13			

Modelo	σ^2 (estimado de la varianza)	R^2	Ra^2
Lineal	0,16	71,49	61,98
Cuadrático	0,10	87,65	75,30

Cúbico	0,10	89,05	73,73
---------------	------	-------	-------

Se elige el modelo cuadrático ya que es el que mejor se ajusta a las respuestas. Se obtienen los coeficientes del modelo y el ANOVA del modelo cuadrático ajustado como se muestra en las Tablas 32 y 33.

Tabla 32. Coeficientes del modelo cuadrático ajustado para la plasticidad

Variabes	Coeficientes	Valores
X ₁	b ₁	9,56
X ₂	b ₂	22,08
X ₃	b ₃	-15,58
X ₁ X ₂	b ₁₂	-44,06
X ₁ X ₃	b ₁₃	76,23
X ₂ X ₃	b ₂₃	35,04

Tabla 33. ANOVA para el modelo cuadrático ajustado para el índice de plasticidad.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
SCR	4,93	6	0,822	8,279	0,009
SCE	0,70	7	0,099		
SCT	5,63	13			
σ²	0,10				
R²	87,65				
Ra²	75,30				

Como se observa en la tabla 33, con el aporte del modelo cuadrático el valor p disminuye a 0,009 que es mucho más bajo que 0.05, lo que indica que el modelo cuadrático si aporta para que el modelo sea significativo.

Caracterización de la superficie de respuesta

Con los estimadores o coeficientes se obtienen las gráficas de la superficie de respuesta y la de contornos como se muestran en las Figuras 19 y 20 respectivamente.

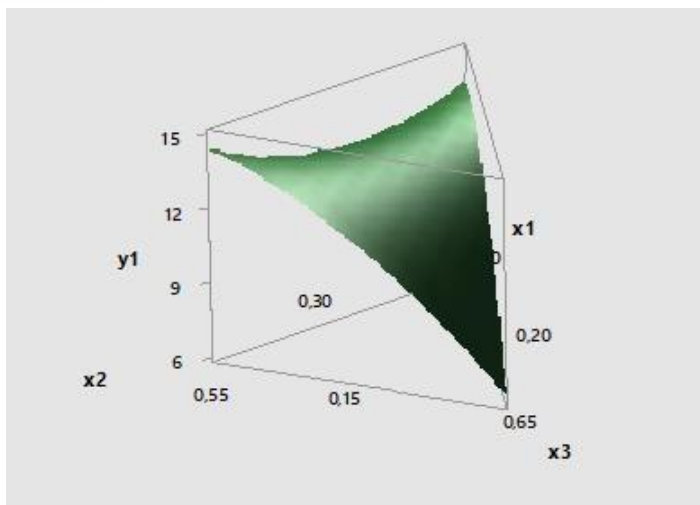


Figura 19. Superficie de respuesta para el Índice de plasticidad.

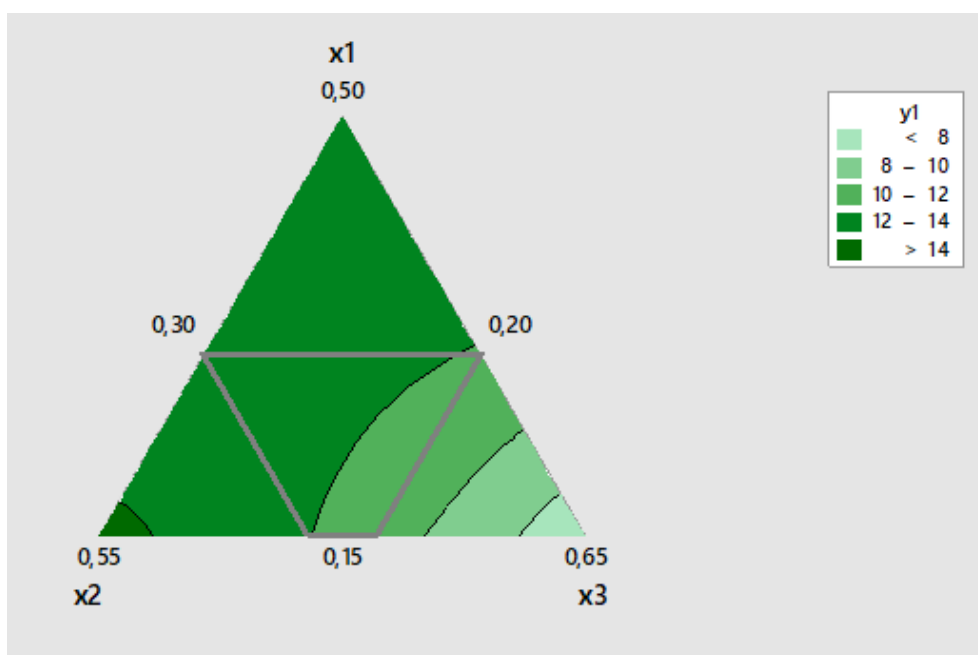


Figura 20. Gráfica de contornos para el índice de plasticidad.

Como se aprecia en la Figura 20, mientras más cerca esté del vértice $x_3=0,65$ el valor del índice de plasticidad disminuye hasta llegar a valores menores a 8%, esto quiere decir que la x_3 es una arcilla de bajo índice de plasticidad y contribuye en la mezcla a disminuir la respuesta. Si se amplía el simplex es muy probable que exista un valor mínimo de índice de plasticidad en $x_3=1$, mientras que cerca del vértice x_2 existe el valor máximo de índice de plasticidad donde los valores son superiores al 14%, y en el vértice x_1 el valor del índice de plasticidad también es alto y está comprendido entre el 12% y 14%. La caída hacia el vértice x_3 es muy marcada, esta es la zona donde los coeficientes lineales parecen tener mayor predominancia. La gráfica correspondiente a la superficie de respuesta también muestra que existiría un máximo cerca de la arcilla x_2 , la cual contribuye a que la respuesta sea mayor. En

la zona experimental marcada por los vértices extremos existe una zona donde cae el valor del índice igualmente que en el análisis anterior cerca de x_3 .

3.4.2. Contracción total (y_4)

Este parámetro de respuesta se aplicó a los experimentos sometidos a una temperatura de cocción de bizcocho de 850°C y a temperaturas de cocción del vidriado de 850°C, 900°C y 950°C.

Placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850° C y de vidriado de 850°C.

Ajuste de modelo.

Con los resultados de la contracción total a estas temperaturas de cocción se obtiene la Tabla 34 del análisis de los posibles modelos para la contracción total (y_4).

Tabla 34. Análisis de los posibles modelos para contracción total con temperaturas de cocción del vidriado de 850°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
Regresión	1,94	7	0,28	12,84	0,006
Lineal	0,62	3	0,21	9,63	0,01
Cuadrático	1,30	3	0,43	20,12	0,003
Cúbico	0,01	1	0,01	0,61	>0,1
Error	0,13	6	0,02		
Total	2,07	13			

Modelo	σ^2 (estimado de la varianza)	R ²	Ra ²
Lineal	0,14	30,14	9,18
Cuadrático	0,02	93,10	87,19
Cúbico	0,02	93,74	86,44

En la Tabla 34 se observa que el modelo con mayor grado de significancia es el cuadrático con el valor p más bajo (0,003). El modelo lineal también da un buen aporte con valor p de 0,01, en contraste el modelo cúbico aporta muy poco a disminuir el valor p . En cuanto a los coeficientes de determinación múltiple, los modelos que más contribuyen son el cuadrático y el cúbico, siendo el modelo cuadrático el que más aporta a la explicación de los datos con $Ra^2=87,19\%$, con ello se demuestra que el modelo cuadrático se ajusta mejor que el modelo lineal. Los coeficientes del ajuste cuadrático y el ANOVA correspondiente se muestran en las Tablas 35 y 36 respectivamente.

Tabla 35. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 850°C.

Variable	Coeficientes	Valores
x_1	b_1	-9,81
x_2	b_2	27,60
x_3	b_3	-14,98
x_1x_2	b_{12}	-46,99
x_1x_3	b_{13}	103,83
x_2x_3	b_{23}	9,16

Tabla 36. ANOVA para el modelo cuadrático ajustado para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 850°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
SCR	1,93	6	0,322	15,741	<0.001
SCE	0,14	7	0,020		
SCT	2,07	13			
σ^2	0,02				
R^2	0,93				
Ra^2	0,87				

Se puede observar en la tabla ANOVA que el valor p es menor a 0,001 lo que indica que el modelo es significativo, con un Ra^2 de 87,19% de explicación de los datos.

Caracterización de la superficie de respuesta.

Con los coeficientes se procedió a graficar el modelo tal como se muestra en las Figuras 21 y 22.

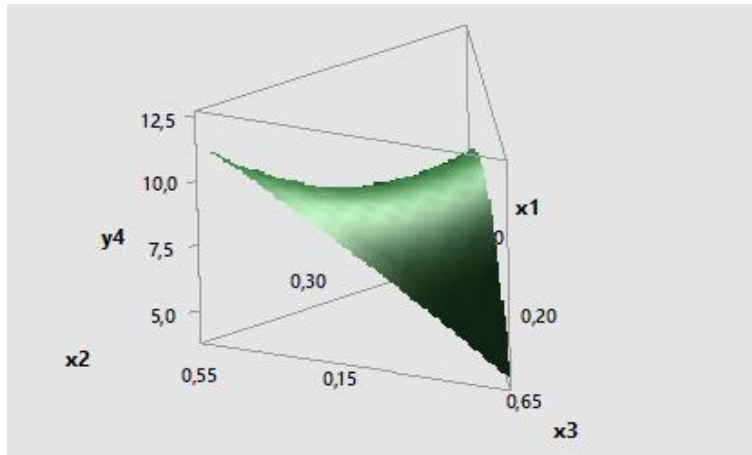


Figura 21. Superficie de respuesta para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C.

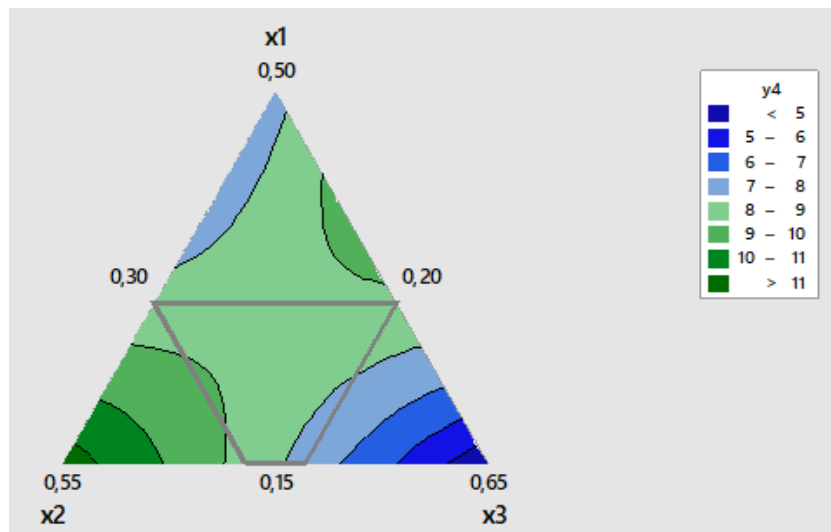


Figura 22. Gráfica de contorno para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C.

En la gráfica de superficie de respuesta como en la gráfica de contorno se observa como la contracción total a estas temperaturas de cocción disminuye hacia el vértice x_3 , también disminuye hacia el lado superior de x_1x_2 y su vértice x_1 . Tanto la arcilla x_1 como la arcilla x_3 disminuyen la respuesta, mientras que la arcilla x_2 aumenta la respuesta. En la zona delimitada por las restricciones del diseño experimental se observa los valores mínimos de contracción total en el lado de este polígono cerca del vértice x_3 , en donde las respuestas son las más bajas de la zona experimental (7%-8%).

Placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 900°C

Ajuste del modelo

Con los resultados de la contracción total a estas temperaturas de cocción se obtiene la Tabla 37 del análisis de los posibles modelos para la contracción total (y_4).

Tabla 37. Análisis de los posibles modelos para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 900°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
Regresión	30,39	7	4,34	60,71	<0.001
Lineal	21,23	3	7,08	98,97	<0.001
Cuadrático	9,16	3	3,05	42,68	<0.001
Cúbico	0,00	1	0,00	0,00	>0,1
Error	0,43	6	0,07		
Total	30,82	13			

Modelo	σ^2 (estimado de la varianza)	R^2	Ra^2
Lineal	0,96	68,89	52,67
Cuadrático	0,06	98,61	83,33
Cúbico	0,07	98,61	80,55

Los valores p de la Tabla 37 son menores a 0,001 que coadyuvan a este aporte tanto en el modelo lineal como el cuadrático, mientras el modelo cúbico no parece aportar a ningún nivel de significancia. El menor valor del estimado de la varianza lo da el modelo cuadrático con 0,06. En cuanto al coeficiente de determinación múltiple R^2 , los valores que aportan los modelos cuadrático y cúbico son iguales y mayores al valor que aporta el modelo lineal. El Ra^2 del modelo cuadrático posee un mayor aporte real a la explicación de los datos, por lo que es el más adecuado para este estudio. A continuación, se presentan los coeficientes cuadráticos y el ANOVA de este modelo.

Tabla 38. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 900°C.

Variables	Coeficientes	Valores
X ₁	b ₁	9,39
X ₂	b ₂	24,93
X ₃	b ₃	-15,64
X ₁ X ₂	b ₁₂	-76,01
X ₁ X ₃	b ₁₃	72,33
X ₂ X ₃	b ₂₃	24,29

Tabla 39. ANOVA del modelo cuadrático ajustado para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 900°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
SCR	30,39	6	5,07	82,59	<0.001
SCE	0,43	7	0,06		
SCT	30,82	13			
σ^2	0,06				
R ²	98,61				
Ra ²	83,33				

En el ANOVA del modelo cuadrático presentado en la Tabla 39 se puede observar un bajo valor de p , indicando que el modelo es significativo y que existe un buen ajuste entre el modelo y sus datos. El Ra² indica que el modelo cuadrático se explica en más de un 83,33%.

Caracterización de la superficie de respuesta

A partir del modelo matemático cuadrático se puede graficar la respuesta en la gráfica de diseño experimental de vértices extremos y obtener las Figuras 23 y 24, en donde se puede observar los valores de las respuestas a la contracción total para esta temperatura de quema.

Se aprecia que x_3 tiene el efecto de minimizar la contracción total; por el contrario, cerca al vértice x_2 la contracción aumenta a valores superiores al 11%, y existe un término medio en el vértice x_1 donde los valores de la contracción total varían de 9% a 10%, cerca del vértice x_3 donde se delimita una zona de 7% a 8% de contracción, este se encuentra cerca de uno de los lados del polígono formado por el diseño de vértices extremos. En el centro del simplex, en la zona experimental creada por los vértices extremos existe un porcentaje de contracción total que varía desde 8% a 9%, la gráfica de superficie de respuesta muestra en esa zona una forma de silla de montar típica de las zonas de inflexión donde hay cambios de un máximo a un mínimo.

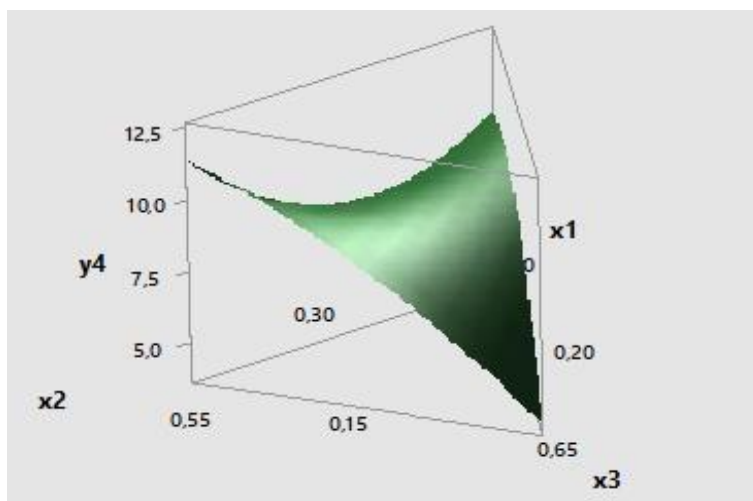


Figura 23. Superficie de respuesta para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C.

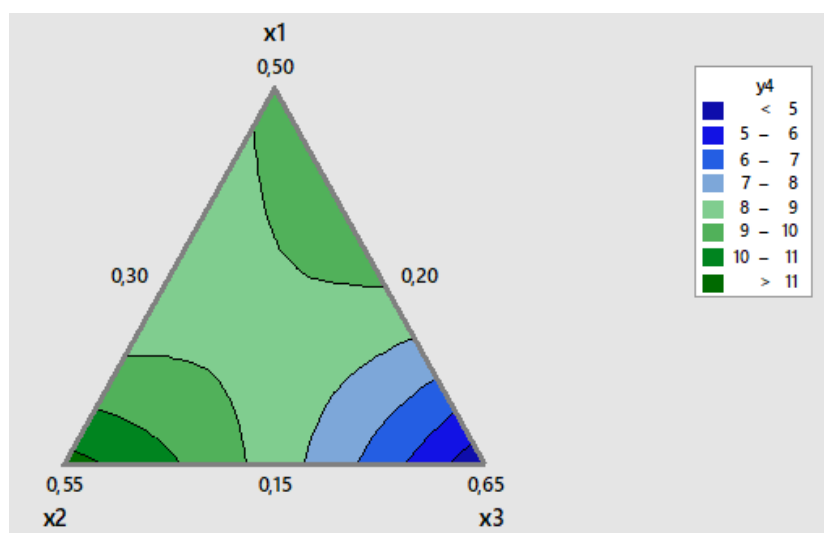


Figura 24. Gráfica de contornos para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C.

Placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 950°C

Ajuste del modelo.

En la Tabla 40 se muestra el análisis de los posibles modelos para la contracción total a estas temperaturas de cocción. Se puede observar el aporte de cada modelo en el análisis de la regresión, con valores p bajos que indican un nivel de significancia bueno. Los modelos que más aportan al grado de significancia son el lineal y cuadrático, siendo el cúbico el que menos aporta.

Tabla 40. Análisis de los posibles modelos para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 950°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
Regresión	2,22	7	0,32	5,90	0,033
Lineal	0,73	3	0,24	4,52	0,058
Cuadrático	1,41	3	0,47	8,72	0,052
Cúbico	0,09	1	0,09	1,62	>0,1
Error	0,32	6	0,05		
Total	2,55	13			

Modelo	σ^2 (estimado de la varianza)	R ²	Ra ²
Lineal	0,18	28,64	7,24
Cuadrático	0,06	83,90	70,11
Cúbico	0,05	87,32	72,52

En cuanto al estimado de la varianza, el menor valor lo da el modelo cúbico con 0,05. Los coeficientes de regresión múltiple son muy bajos para el modelo lineal, pero para los modelos cuadrático y cúbico son altos, siendo el modelo cúbico el de mejor valor de Ra² con un 72,52% de explicación real de los datos. En referencia a los coeficientes de determinación, el modelo cúbico es el más apropiado para este estudio. En las Tablas 41 y 42 se presentan los coeficientes de regresión del modelo cúbico ajustado y el ANOVA del mismo.

Tabla 41. Coeficientes para el modelo cúbico ajustado para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 950°C.

Variables	Coeficientes	Valores
X ₁	b ₁	145,877
X ₂	b ₂	118,823
X ₃	b ₃	45,895
X ₁ X ₂	b ₁₂	-597,293
X ₁ X ₃	b ₁₃	-328,109
X ₂ X ₃	b ₂₃	-296,556
X ₁ X ₂ X ₃	b ₁₂₃	1111,296

Tabla 42. ANOVA para el modelo cúbico ajustado para la contracción total con temperatura de cocción del vidriado de 950°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
SCR	2,22	7	0,32	5,90	0,033
SCE	0,32	6	0,05		
SCT	2,55	13			
σ^2	0,05				
R ²	87,32				
Ra ²	72,52				

En el ANOVA presentado en la Tabla 42 se observa que el coeficiente cúbico aporta a que el valor p baje a 0,033, que es menor a 0,05. Este valor es aceptable para dar la suficiente significancia al modelo.

Caracterización de la superficie de respuesta.

A partir del modelo cúbico se obtienen los gráficos de la superficie de respuesta y de contornos que se muestran en las Figuras 25 y 26 respectivamente. En la Figura 25 se

observa que los valores de los experimentos caen en una zona donde la superficie de respuesta es mínima, la superficie crece hacia el vértice de x_1 y x_2 , y decrece a x_3 ; en la gráfica de contornos se puede observar de manera más clara este fenómeno, además se observa el contorno de contracción total menor de 8% dando una zona de valores mínimos que no cae en un vértice, esta zona está cerca donde los valores de x_3 son la mitad de la proporción de la mezcla y los valores de y_4 son los más bajos (8 a 10%).

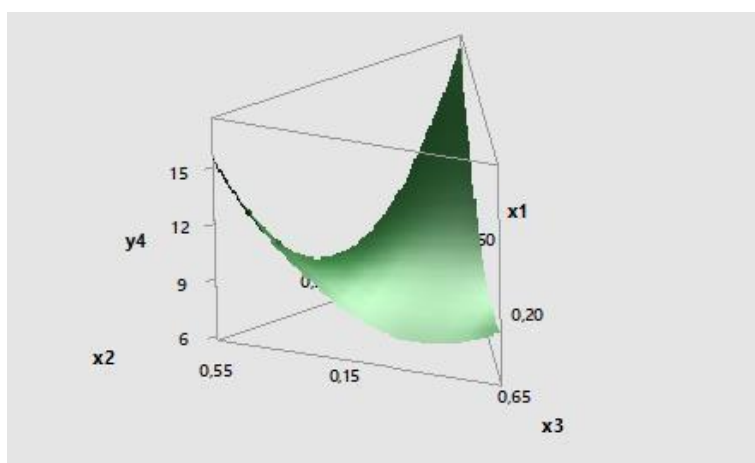


Figura 25. Superficie de respuesta para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C.

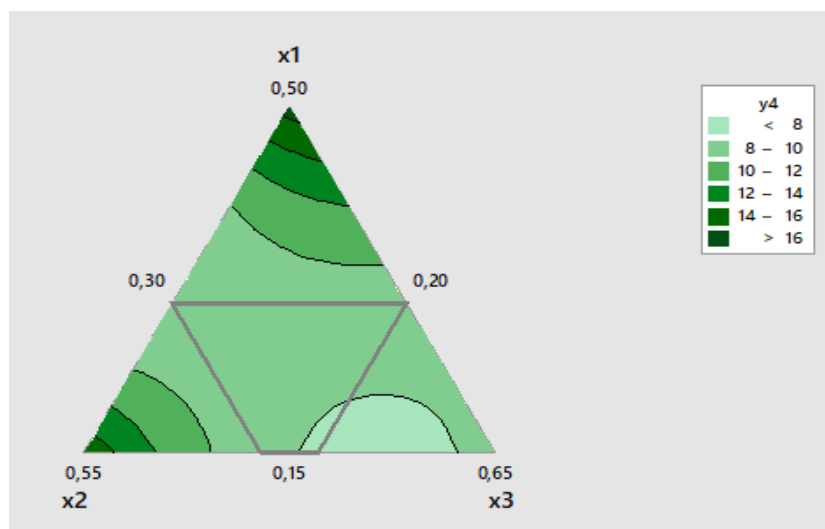


Figura 26. Gráfica de contornos para la contracción total de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C.

3.4.3. Porcentaje de absorción de agua (y_5)

Este parámetro de respuesta se aplicó a los experimentos sometidos a una temperatura de cocción de bizcocho de 850°C y a temperaturas de cocción del vidriado de 850°C, 900°C y 950°C.

Placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 850°C

Ajuste del modelo

En la Tabla 43 se observa el análisis de varianza de aportes de los modelos, así como la desviación estándar, R^2 y Ra^2 para la absorción de agua de las placas quemadas a estas temperaturas de cocción.

Tabla 43. Análisis de los posibles modelos para el porcentaje de absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 850°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
Regresión	162,65	7	23,24	22,76	<0.001
Lineal	69,93	3	23,31	22,83	0,0020
Cuadrático	92,72	3	30,91	30,28	<0.001
Cúbico	0,00	1	0,00	0,00	>0,1
Error	6,13	6	1,02		
Total	168,78	13			

Modelo	σ^2 (estimado de la varianza)	R^2	Ra^2
Lineal	9,88	41,43	19,72
Cuadrático	0,88	96,37	79,49
Cúbico	1,02	96,37	76,07

En la Tabla 43 se observa los aportes de cada modelo tanto en la regresión como en el error. Los modelos matemáticos lineal y cuadrático tienen p bajos. En cuanto a los coeficientes de determinación, el modelo matemático que más aporte tiene es el cuadrático, con valores de R^2 de 96,37%, Ra^2 de 79,49% y un estimado de la varianza de 0,88, siendo este último el menor valor de los tres modelos. Este modelo también tiene un valor p menor a 0,001, lo que indica un alto grado de significancia y un buen ajuste. En consecuencia, el modelo cuadrático es el más idóneo. En las Tablas 44 y 45 se muestran los coeficientes del modelo cuadrático y el ANOVA respectivamente.

Tabla 44. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 850°C.

Variables	Coeficientes	Valores
x_1	b_1	-41,64
x_2	b_2	-13,17
x_3	b_3	-54,09
x_1x_2	b_{12}	71,87
x_1x_3	b_{13}	239,37
x_2x_3	b_{23}	176,32

Tabla 45. ANOVA del modelo cuadrático para la absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 850°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
SCR	162,65	6	27,11	30,97	<0.001
SCE	6,13	7	0,88		
SCT	168,78	13			
σ^2	0,88				
R^2	96,37				
Ra^2	79,49				

Caracterización de la superficie de respuesta.

A partir de los coeficientes de regresión múltiple se puede graficar la superficie de respuesta en el simplex, como se muestra en la Figura 27. En esta gráfica se puede observar que en los valores cercanos a x_1 hay una respuesta de mezclas con porcentajes de absorción de agua de 10% a 12,5 %, mientras que cerca de x_2 los porcentajes de absorción de agua varían de 15% a 17,5 %. Finalmente, cerca de x_3 la absorción de agua para este ciclo de cocción tiende a disminuir drásticamente a valores inferiores a 5%. Como se observa en las figuras 27 y 28, también existe un valor máximo de absorción de agua cerca del centro del simplex donde los valores de absorción de agua son superiores a 17,5%.

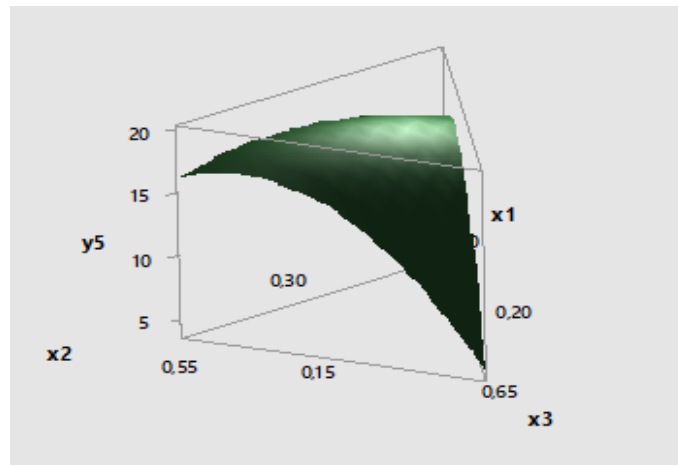


Figura 27. Superficie de respuesta para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C.

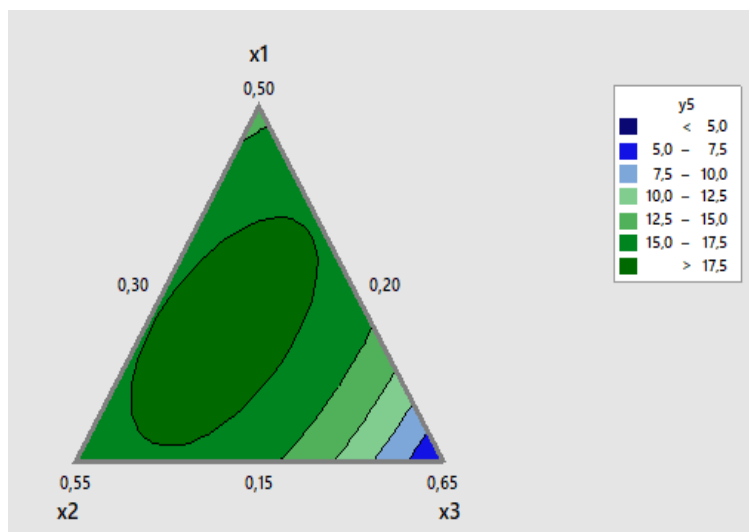


Figura 28. Gráfica de contorno para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 850°C.

Placas quemadas con las temperaturas de cocción de bizcocho de 850° C y de vidriado de 900°C

Ajuste del modelo

Con los resultados de la absorción de agua a estas condiciones de cocción se obtiene la Tabla 46 del análisis de los posibles modelos.

Tabla 46. Análisis de los posibles modelos para el porcentaje de absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 900°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
Regresión	155,75	7	22,25	20,57	<0.001
Lineal	97,48	3	32,49	30,04	<0.001
Cuadrático	58,26	3	19,42	17,95	0,005
Cúbico	0,01	1	0,01	0,01	>0,1
Error	6,49	6	1,08		
Total	162,24	13			

Modelo	σ^2 (estimado de la varianza)	R ²	Ra ²
Lineal	6,48	60,09	42,10
Cuadrático	0,93	96,00	78,85
Cúbico	1,08	96,00	75,33

En la Tabla 46 se observa los aportes de cada modelo tanto en la regresión como en el error. El modelo lineal y el modelo cuadrático son los que más aporte tienen en la significancia del modelo, con valores p muy bajos, siendo el modelo cúbico el que menos aporta. En cuanto a R², el valor de 96,00% coincide para el modelo cúbico y cuadrático, siendo este último el que mayor Ra² presenta (78,85%) comparado con el modelo cúbico. El valor p del modelo cuadrático es menor a 0,005 lo que indica un alto grado de significancia del modelo, por esto el modelo cuadrático es el que mejor se ajusta a los datos. En las Tablas 47 y 48 se muestran los coeficientes del modelo cuadrático y el ANOVA respectivamente.

Tabla 47. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 900°C.

Variables	Coeficientes	Valor
X ₁	b ₁	-9,09
X ₂	b ₂	-1,18
X ₃	b ₃	-49,25
X ₁ X ₂	b ₁₂	2,34

x_1x_3	b_{13}	181,92
x_2x_3	b_{23}	157,19

Tabla 48. ANOVA del modelo cuadrático para la absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 900°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
SCR	155,74	6	25,96	27,97	<0.001
SCE	6,50	7	0,93		
SCT	162,24	13			
σ^2	0,93				
R^2	96,00				
Ra^2	78,85				

Caracterización de la superficie de respuesta.

En la Figura 29 obtenida a partir del modelo cuadrático se puede observar como la absorción de agua crece hacia los vértices x_1 y x_2 , y decrece notablemente a x_3 . En la Figura 30 se corrobora el fenómeno antes mencionado y se observa que cerca de x_3 la absorción de agua es menor al 5%, siendo esta la zona en donde la respuesta es mínima. De esta manera, se puede ver que la arcilla arenosa influye en el resultado minimizando la respuesta.

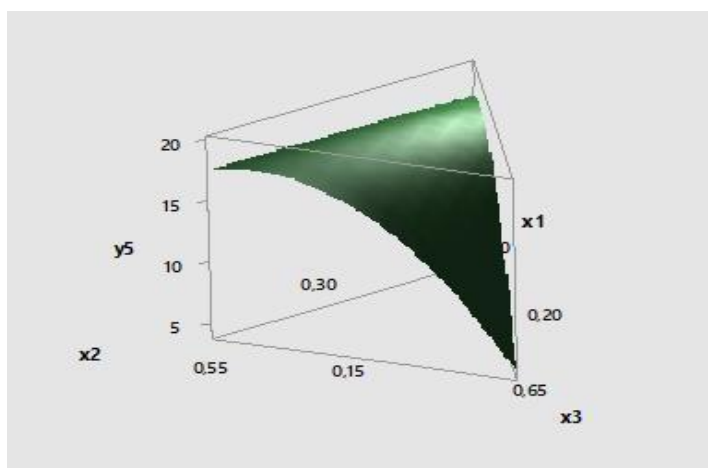


Figura 29. Superficie de respuesta para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C.

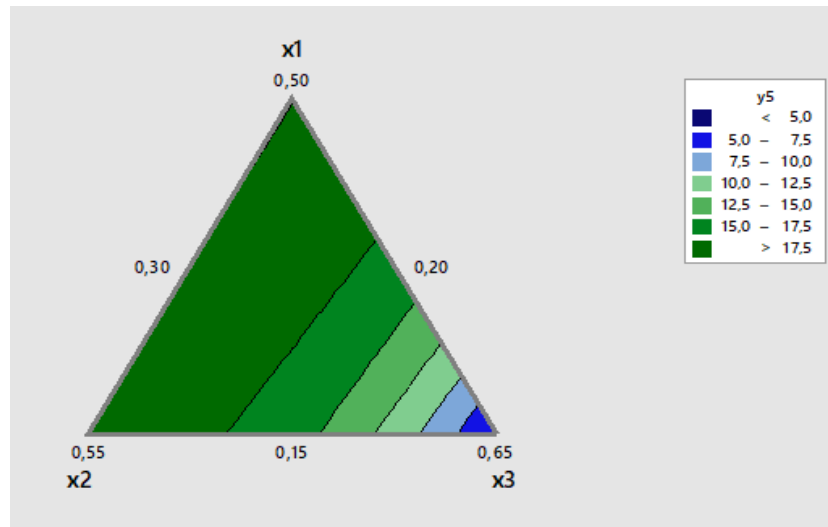


Figura 30. Gráfica de contorno para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 900°C.

Placas quemadas con temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 950°C

Ajuste del modelo

Con los resultados de la absorción de agua a estas condiciones de cocción se obtiene la Tabla 49 del análisis de los posibles modelos.

Tabla 49. Análisis de los posibles modelos para el porcentaje de absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 950°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
Regresión	165,76	7	23,68	21,41	<0.001
Lineal	85,41	3	28,47	25,74	<0.001
Cuadrático	80,34	3	26,78	24,22	<0.001
Cúbico	0,01	1	0,01	0,01	>0,1
Error	6,64	6	1,11		
Total	172,39	13			

Modelo	σ^2 (estimado de la varianza)	R²	Ra²
Lineal	8,70	49,54	29,45
Cuadrático	0,95	96,15	79,11
Cúbico	1,11	96,15	75,64

De la Tabla 49 se observa que los modelos que aportan con valores p bajos son el lineal y cuadrático. Sin embargo, los coeficientes de determinación del modelo lineal son muy pobres comparados con los coeficientes de determinación de los modelos cúbico y cuadrático, los cuales explican muy bien la variación de y_5 . Adicionalmente, el modelo cuadrático posee un Ra^2 mayor que el cúbico, tiene la menor varianza estimada, es más sencillo y manejable para la predicción de futuras mezclas, por lo que es el más apropiado para este estudio. En las Tablas 50 y 51 se muestran los coeficientes del modelo cuadrático y el ANOVA para este modelo respectivamente.

Tabla 50. Coeficientes para el modelo cuadrático ajustado para la absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 950°C.

Variables	Coeficientes	Estimación
X_1	b_1	-29,24
X_2	b_2	-11,68
X_3	b_3	-53,50
X_1X_2	b_{12}	53,54
X_1X_3	b_{13}	215,04
X_2X_3	b_{23}	175,41

Tabla 51. ANOVA del modelo cuadrático para la absorción de agua con temperatura de cocción del vidriado de 950°C.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f	valor p
SCR	165,75	6	27,62	29,1	<0.001
SCE	6,64	7	0,95		
SCT	172,39	13			
σ^2	0,95				
R^2	96,15				
Ra^2	79,11				

Caracterización de la superficie de respuesta.

Con los coeficientes de regresión del modelo cuadrático se obtuvieron las gráficas de superficie respuesta y de contornos que se muestran en las Figuras 31 y 32. En la gráfica de contornos se puede observar que para cada contorno existe un rango de absorción de agua y, que al estar cerca de x_1x_2 la absorción de agua tiende a aumentar, pero disminuye significativamente en la zona cercana a x_3 , llegando incluso a valores menores a 5%. También se observa del lado x_1x_2 y del centro del simplex la existencia de un máximo, donde el valor de la absorción es mayor a 17,5%. Aquí, nuevamente se puede observar como la arcilla arenosa tiene un efecto minimizador sobre la respuesta, y como los otros componentes coadyuvan al crecimiento de la superficie de respuesta.

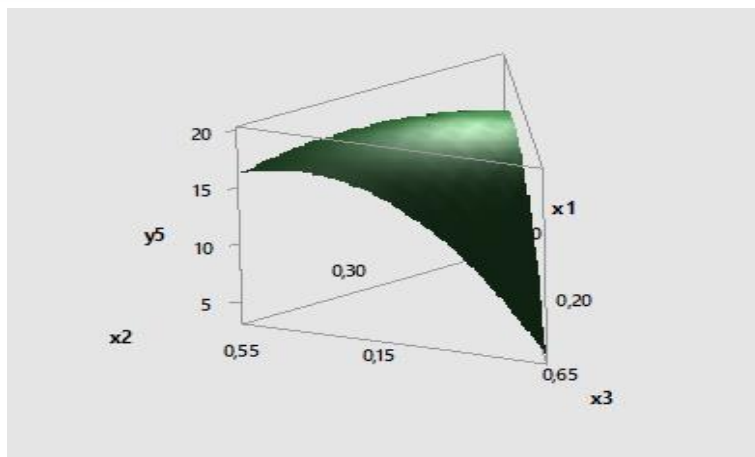


Figura 31. Superficie de respuesta para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C.

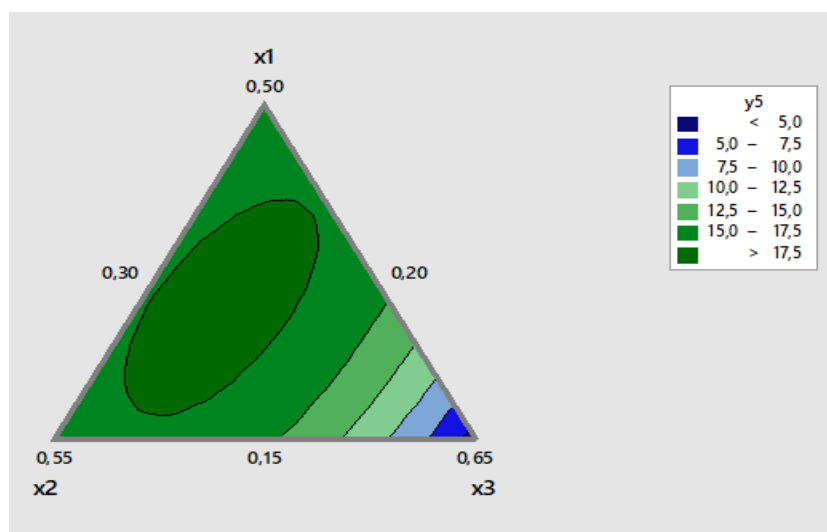


Figura 32. Gráfica de contorno para el porcentaje de absorción de agua de los experimentos quemados a 850°C y vidriados a 950°C.

Tras los análisis realizados se observa que los modelos se ajustaron con Ra^2 mayores a 70%, lo que indica una buena proporción de explicación de variación de los datos obtenidos. Además, las varianzas toman valores cercanos a 1 y los valores p son menores a 0,05 indicando un buen grado de significancia.

3.4.4. Obtención de mezcla óptima

Tomando en consideración que el objetivo principal de este trabajo es que el porcentaje de absorción de agua sea menor al que actualmente presentan las tejas elaboradas en el taller artesanal, es necesario optimizar la formulación de la pasta, misma que debe cumplir los criterios establecidos en la Tabla 52.

Para obtener la mezcla óptima se analizaron los modelos matemáticos y las superficies de respuesta de los tratamientos efectuados bajo las condiciones de cocción de bizcocho de 850°C y de vidriado de 950°C, ya que a estas condiciones se observan los mejores resultados, con una reducción en el porcentaje de absorción de agua.

Tabla 52. Parámetros justificados para la mezcla óptima.

Respuestas	Parámetros		Justificación
	Min	Max	
Índice de plasticidad (y₁)	11,5	12,5	La mezcla debe tener un índice de plasticidad parecido a la pasta actual usada por los artesanos. Se requieren proporciones de los componentes que disminuyan la absorción de agua, pero que no alteren significativamente la plasticidad.
Contracción total (y₄)	8,5%	10%	Se tomaron como referencia estos valores ya que se encuentran cercanos a los de la pasta con la que trabajan los artesanos. La contracción total no debe ser inferior a 8,5% puesto que se puede generar un desequilibrio de fuerzas al momento de acoplarse al vidrio y puede afectar trabajabilidad al momento de la formación en la extrusora, pero tampoco debe ser superior al 10% para evitar roturas o fisuras en las tejas.
% de absorción de agua (y₅)	13%	15,7%	El porcentaje de absorción de agua debe ser inferior al de las tejas elaboradas en el taller artesanal. Sin embargo, no puede ser inferior al 13% puesto que su aplicabilidad práctica no sería factible. Además, se debe considerar que la elaboración de tejas es un proceso artesanal y que al trabajar con condiciones de cocción inferiores a 1000 °C es inevitable obtener productos porosos.

A partir de los coeficientes de los modelos matemáticos y la superficie de respuesta se optimizó las mezclas para los parámetros de plasticidad, contracción y absorción de agua. Se pretende encontrar una mezcla que cumpla con lo establecido en la Tabla 52 o proporcione

valores cercanos a los mismos, obteniéndose así las mezclas que se presentan en la Tabla 53. Estos valores se obtuvieron a partir de las gráficas de contorno que arroja el programa Minitab, donde dichas gráficas son un mapa de respuestas que muestran las interacciones de los componentes de las mezclas y las variaciones que se generan en ellas; de las cuales se buscan las mezclas que cumplan con los requisitos propuestos en la Tabla 52. Esa zona experimental es delimitada y optimizada a partir del programa Minitab el cual proporciona un mínimo de tres mezclas diferentes.

Tabla 53. Posibles soluciones óptimas para y_1 , y_4 y y_5

Superficie de respuesta	Componentes			Respuestas predichas		
Índice de plasticidad	x_1	x_2	x_3	y_1	y_4	y_5
Solución local 1	0,15	0,39	0,45	12,00	8,63	16,08
Solución local 2	0,30	0,20	0,50	11,78	9,10	15,15
Solución global	0,22	0,32	0,44	12,00	8,42	17,00
Contracción total	x_1	x_2	x_3	y_1	y_4	y_5
Solución local 1	0,23	0,28	0,49	11,33	8,25	15,60
Solución local 2	0,15	0,38	0,47	11,64	8,25	15,60
Solución global	0,23	0,27	0,50	11,15	8,25	15,12
% Absorción de agua	x_1	x_2	x_3	y_1	y_4	y_5
Solución local 1	0,15	0,33	0,52	10,42	7,52	13,50
Solución local 2	0,15	0,33	0,52	10,41	7,52	13,48
Solución global	0,27	0,20	0,53	10,90	8,60	13,50

Una vez obtenidos las posibles mezclas óptimas para cada respuesta se procedió a seleccionar una que sea congruente con los objetivos establecidos. Como se muestra en la Tabla 53, no hay una mezcla que se repita o sea exactamente igual entre cada respuesta. Se observa también que existen mezclas que cumplen con los parámetros anteriormente establecidos, pero en cada respuesta respectiva, más no fuera de la misma. Sin embargo, las proporciones de la mezcla de la solución local 2 para el índice de plasticidad correspondiente a $x_1=0,30$; $x_2=0,20$; $x_3=0,50$ cumplen con los parámetros de plasticidad, contracción total y absorción de agua, siendo la mezcla idónea y seleccionada para las pruebas de campo.

Tabla 54. Solución óptima para y_1 , y_4 y y_5

Superficie de respuesta	Componentes			Respuestas predichas		
Índice de plasticidad	x_1	x_2	x_3	y_1	y_4	y_5
Solución local 2	0,30	0,20	0,50	11,78	9,10	15,15

3.5. Resultados de las pruebas de campo

A continuación, se presentan los resultados de las temperaturas del horno artesanal y los parámetros de absorción de agua y resistencia a la flexión de las tejas iniciales y de las tejas elaboradas con la dosificación óptima.

3.5.1. Resultados de las condiciones actuales de las tejas

En la Tabla 55 se muestran los valores máximos, mínimos y el promedio para la resistencia a la flexión y la absorción de agua de las tejas elaboradas en el taller artesanal. Los resultados del informe de laboratorio se muestran en el ANEXO 6.

Tabla 55. Condiciones actuales de las tejas elaboradas en el taller artesanal

Teja	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)			Absorción de agua (%)		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Curvada vidriada	56	70	61,10	15,24	17,47	16,48
Plana vidriada	42	59	49,00	16,16	18,10	17,46

3.5.2. Resultados de las temperaturas del horno artesanal empleado para la cocción

Tras las mediciones de las temperaturas del horno se obtuvieron los resultados de las Tablas 56 y 57.

Tabla 56. Resultados de las temperaturas alcanzadas por el horno artesanal para la primera cocción.

Tiempo (min)	Temperatura °C (T1)	Temperatura °C (T2)	Temperatura °C (T3)
20	27	26	28
40	130	113	101
60	190	130	168
80	276	144	186
100	358	172	252
120	360	208	290
140	377	298	339
160	353	319	360
180	470	428	353
200	500	440	412
220	510	480	470
240	595	537	518
380	636	583	592
300	691	650	646
320	753	720	705

Tabla 57. Temperaturas alcanzadas por el horno artesanal para la segunda cocción.

Tiempo (min)	Temperatura °C (T1)	Temperatura °C (T2)	Temperatura °C (T3)
30	110	93	81
60	183	125	158
90	340	165	239
120	375	215	310
150	390	226	327
180	372	270	373
210	455	326	422
240	490	435	441
270	512	458	473
300	540	627	426
330	550	655	352
360	553	671	360
390	585	718	428
420	597	732	500

450	647	747	587
480	682	752	623
510	690	770	710
540	700	771	755
570	685	780	767
600	698	780	744
630	680	810	745
660	720	790	750
690	780	815	823
720	838	889	902

3.5.3. Resultados de la resistencia a la flexión y absorción de agua de tejas curvas y planas

En la Tabla 58 se muestra el promedio para la resistencia a la flexión y la absorción de agua de las tejas elaboradas en el taller artesanal con la dosificación óptima. Los resultados del informe de laboratorio se muestran en el ANEXO 7.

Tabla 58. Promedios de resistencia a la flexión y absorción de agua de tejas planas y curvas vidriadas obtenidas con la dosificación óptima.

Tipo de teja	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)	Absorción de agua (%)
Teja curva vidriada	81,40	14,19
Teja plana vidriada	74,90	15,22

3.6. Análisis de pruebas de campo

Se esperaba que en las pruebas de campo las temperaturas alcanzadas por los hornos sean similares a las trabajadas a escala de laboratorio. Sin embargo, los datos registrados en las Tablas 56 y 57 difieren de los mismos. Se observa que las temperaturas máximas que se alcanzan son de 753°C para la cocción de bizcocho y de 902°C para la cocción del vidriado. Al trabajar con temperaturas bajas las reacciones químicas que se producen durante la cocción se ven limitadas. Pese a ello, es importante mencionar que las arcillas empleadas en la producción artesanal de tejas aportan Fe₂O₃ y óxidos alcalinos y alcalinotérreos que conjuntamente actúan como fundentes reduciendo la temperatura de fusión y favoreciendo la formación de la fase vítrea, que a su vez implica mejores propiedades fisicomecánicas (Boukili et al, 2021).

Pese a que las temperaturas alcanzadas en la prueba de campo eran más bajas que las propuestas en las pruebas de laboratorio, se obtuvieron resultados favorables de absorción de agua y resistencia mecánica. Además, la mezcla óptima ($x_1=0,30$; $x_2=0,20$; $x_3=0,50$) proporciona partículas gruesas y finas que dan un buen grado de empaquetamiento y en consecuencia, favorecen la reducción de absorción de agua permitiendo obtener tejas con mayor durabilidad.

En la Tabla 55 se establecen los valores máximos y mínimos con el fin de compararlos con los que se muestran en la Tabla 3 para una teja cualquiera. En este sentido, las tejas elaboradas con la dosificación inicial poseen un 30% y un 23,6% por debajo de lo establecido en la normativa con respecto a la resistencia a la flexión en tejas curvas y planas vidriadas respectivamente. En el caso de la absorción de agua las tejas curvas y planas vidriadas poseen 17,7% y 9,1% por encima de lo establecido en la normativa.

Con respecto a los valores mínimos de resistencia a la flexión que puede tener una teja cualquiera, en el caso de las tejas planas no se está cumpliendo con lo establecido, pues el valor más bajo aceptado es de 55 kg/cm² y el encontrado es de 42 kg/cm², valor que está muy por debajo del mínimo requerido y para tejas curvas el mínimo aceptado es de 80 kg/cm² y el obtenido es de 56 kg/cm². Realizando similar comparación para la absorción de agua, no se cumple ni para las tejas curvas ni para las planas vidriadas, en el caso de las primeras el máximo aceptado es 14% y se obtuvo 17,47%, para las tejas planas el mayor valor es 16% y se obtuvo 18,10%.

En el ANEXO 7 se observa que la mayoría de las tejas curvas elaboradas con la dosificación óptima presentan valores de absorción de agua y resistencia a la flexión cercanas a los requisitos descritos en la Norma INEN 990, la cual establece que una teja cualquiera debe tener como máximo 14% de absorción de agua y como mínimo 80 kg/cm² de resistencia a la flexión. En este sentido, las tejas curvas se encuentran en un rango de 13,83 a 14,75% con respecto a la absorción de agua y en un rango de 73 a 90 kg/cm² para la resistencia a la flexión. Por lo tanto, se puede afirmar que se logró mejorar la absorción de agua y por ende la resistencia a la flexión de estas tejas puesto que las tejas elaboradas por los artesanos se encuentran en un rango de 15,24 a 17,47% para la absorción de agua y de 56 a 70 kg/cm² para la resistencia a la flexión como se muestra en la Tabla 55.

Es importante mencionar que durante la determinación de la resistencia a la flexión de tejas curvas los puntos de apoyo son mucho más inestables que para las tejas planas, pues se requiere que el tope de un molde de madera (necesario para la prueba) calce perfectamente

con la curvatura de la teja para obtener un valor más preciso. Así mismo, los bordes de la teja deben acoplarse a la base del equipo para así obtener los cuatro puntos de apoyo necesarios.

En el ANEXO 7 los valores obtenidos de resistencia a la flexión y absorción de agua para las tejas planas elaboradas con la mezcla óptima se encuentran muy cercanos a los valores establecidos en la normativa INEN 990, la cual establece que una teja cualquiera debe tener como máximo 16% de absorción de agua y como mínimo 55 kg/cm² de resistencia a la flexión. En este contexto, las tejas planas presentan rangos de 14,83 a 15,59% de absorción de agua y de 63 a 89 kg/cm² de resistencia a la flexión. Tras el análisis de los datos se observa una mejoría tanto para la absorción de agua y resistencia a la flexión de las tejas planas, puesto que las tejas elaboradas anteriormente por los artesanos presentan un rango 16,16 a 18,10% de absorción de agua y 42 a 59 kg/cm² de resistencia a la flexión.

Es importante mencionar que este análisis está realizado en función de los valores de las tejas individuales, puesto que si se analizan los promedios de estos valores la norma INEN 990 establece otros valores de referencia como se muestra en la Tabla 3. En este sentido, los promedios obtenidos de aquellas tejas elaboradas con la dosificación óptima tanto para la resistencia a la flexión y absorción de agua son de 81,40 kg/cm² y 14,19% para tejas curvas y para tejas planas son de 74,90 kg/cm² y 15,22% respectivamente. Las tejas curvas difieren 18,6% por debajo y 18,25% por encima de la norma con respecto a los valores requisito de resistencia a la flexión y la absorción de agua. Por otro lado, con respecto a la normativa las tejas planas difieren por encima en 7% y 8,71% para los valores requisito para la resistencia a la flexión y la absorción de agua correspondientemente.

Es importante mencionar que las tejas curvas elaboradas con la dosificación de los artesanos presentan valores de 38,9% por debajo de los requisitos de la norma INEN 990 para la resistencia a la flexión y 37,33% por encima; y para tejas planas presentan valores de 30% por debajo y 24,71% por encima de los valores requisito de resistencia a la flexión y absorción de agua respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos entre la dosificación de los artesanos y la dosificación óptima se evidencia que existe para tejas curvas una mejoría del 20,3% para resistencia a la flexión y del 19,08% para absorción de agua de igual manera para tejas planas se observa una mejoría del 23% para resistencia a la flexión y del 16% para absorción de agua.

En síntesis, los resultados obtenidos son bastante favorables. Sin embargo, si se analizan en función del promedio aún no cumplen con la normativa y esto puede deberse a que al trabajar

en la prueba de campo existen factores que no se pueden controlar como las temperaturas del horno, que van de la mano con la cantidad y el tipo de material comburente utilizado (madera), lo que conlleva una falta de uniformidad en la distribución de calor durante la cocción.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

La caracterización física y química de las arcillas x_1 , x_2 y x_3 permitió inferir el comportamiento de cada una de ellas en la elaboración de tejas cerámicas. La arcilla x_1 es de carácter ácido, de baja plasticidad, presenta el mayor contenido de feldespatos, sustancia arcillosa y óxido de hierro; siendo este último el que da el color característico a la teja; genera un efecto negativo en la absorción de agua al aumentar el espacio poroso. La arcilla x_2 es de carácter ácido, tiene una plasticidad media, presenta el mayor contenido de sustancia arcillosa después de la arcilla x_1 , lo que influye en su contenido de partículas finas y el incremento de la contracción. La arcilla x_3 es de carácter ligeramente básico, tiene un alto contenido de sílice libre, por lo que es de baja plasticidad y aporta con partículas gruesas; influye positivamente en la reducción de la absorción de agua pues tiende a disminuir el espacio poroso.

Tras el proceso de reducción de tamaño se incrementa el contenido de partículas finas de las tres arcillas usadas para la producción artesanal de tejas (pasando de 68,85% a 73% para la arcilla x_1 , de 79,05% a 79,65% para x_2 y de 65,30% a 67,70% para x_3). Con ello, se incrementa levemente la plasticidad y la contracción total, y se disminuye levemente la absorción de agua. Estas variables cambian según el ciclo de cocción al que se someta, observándose mejores resultados en la disminución de absorción de agua con la temperatura de cocción del vidriado de 950°C. Pese a ello, los cambios no son significativos.

La pasta empleada por los artesanos tiene una plasticidad media y un contenido de partículas finas de 73,90% y presenta una reducción en la absorción de agua al ser sometida a temperaturas de cocción de 950°C.

Las mezclas planteadas se obtuvieron a partir de los programas Statgraphic y Minitab empleando un diseño de mezclas de vértices extremos. Para ello, se consideraron restricciones según las propiedades fisicoquímicas que aporta cada materia prima. La mezcla óptima encontrada corresponde a $x_1=0,30$; $x_2=0,20$; $x_3=0,50$. Para la quema del bizcocho se empleó condiciones de cocción de 850°C y para la cocción del vidriado se evaluaron las temperaturas de cocción de 850°C, 900°C y 950°C; obteniéndose mejores resultados de absorción de agua a 950°C.

Las pruebas de campo empleando la dosificación óptima dieron como resultado para tejas curvas valores de resistencia a la flexión de 81,40 kg/cm² y de absorción de agua de 14,19%,

que representan una mejoría con respecto a los valores obtenidos con la dosificación inicial ($x_1=0,33$; $x_2=0,33$; $x_3=0,33$) de 20,3% y 19,08% respectivamente. Para tejas planas se obtuvo 74,90 kg/cm² para la resistencia mecánica y 15,22% para la absorción de agua, implicando una mejoría con respecto a las tejas elaboradas con la dosificación inicial de 23% y 16% respectivamente. Estas mejoras representan un acercamiento a los valores establecidos en la norma INEN 990.

4.2. Recomendaciones

- Los resultados presentados en este trabajo son específicos para los tres tipos arcillas usados en la ejecución de este trabajo de titulación (x_1 , x_2 y x_3). Sin embargo, las materias primas entregadas por los proveedores no siempre son las mismas, por lo que un cambio grande en ellas implicaría un nuevo estudio de las propiedades fisicoquímicas de las mismas, por lo que se recomienda que se monitoreen constantemente algunas de sus características, para evidenciar cuando se den cambios sustanciales.
- Se recomienda trabajar con temperaturas de cocción de bizcocho de 850°C y de cocción del vidriado de 950°C para obtener mejores resultados de absorción de agua y resistencia a la flexión.
- Buscar obtener condiciones de trabajo mucho más estables con el fin de tener un proceso más controlado que permita producir tejas de buena calidad y que cumplan con los requisitos exigidos por las normativas.
- Se recomienda que el proceso de reducción de tamaño sea estudiado de forma más meticulosa, ya que según los resultados obtenidos no se evidencia mayor cambio antes y después de la molienda en las arcillas.

Referencias

- Afanador García, N., Ibarra Jaime, A. C., & López Durán, C. A. (2013). Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander. *Epsilon*, 1(20), 101-119.
- Alvarez, A. N., & Chacho, G. M. (2015). Sustitución del vidrio a base de óxido de plomo por uno fritado en la elaboración de tejas en el sector de San José de Balzay y Racar. Universidad de Cuenca.
- Alvarez Rozo, D. C., Sánchez Molina, J., Corpas Iglesias, F. A., & Gelves, J. F. (2018). Características de las materias primas usadas por las empresas del sector cerámico del área metropolitana de Cúcuta (Colombia). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 57(6), 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.04.002>
- Aparicio, P., & Galán, E. (2006). Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla. http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf
- Ariza, M. J. (2012). Absorción de Agua a Presión Atmosférica y por Capilaridad en Materiales Cerámicos de Construcción.
- Arízaga, J. (2014). Análisis geotécnico de las causas por las cuales ocurrió el colapso de la losa de piso de la cancha del pabellón de comunidad terapéutica del Centro de Rehabilitación Social (CRS) Cuenca y solución técnica de la problemática. [Obtención del título de Ingeniero Civil con énfasis en Gerencia de Construcciones, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3632/1/10312.pdf>
- Asociación española de Técnicos Cerámicos, & SACMI. (2004). Tecnología cerámica aplicada (Vol. 2). Faenza Editrice Ibérica, S.L.
- Asociación española de Técnicos Cerámicos, & SACMI. (2004). Tecnología cerámica aplicada: (Vol. I). Faenza Editrice Ibérica, S.L.
- Avgustinik, A. I. (1983). Cerámica. Reverte.
- Barba, A., Beltrán, V., Felú, C., García, J., Ginés, F., Sánchez, E., & Sanz, V. (2002). Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas.
- Balaguer, J., Tiscar, J. M., Saburit, A., Quereda, F., & Aguilera, M. (2020). MODELIZACIÓN DE LA SINTERIZACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS MEDIANTE EL MODELO SOVS.

- Bedoya Castaño, S. (2019). Reformulación de una pasta cerámica de materiales tipo aventino como plan de contingencia en caso de escasez de la materia prima [Medellín, Colombia]. <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/13759>
- Benítez Pecino, L. (2015). Organización y gestión de las operaciones de cocción de productos cerámicos (UF1722). Editorial Elearning, S.L.
- Benlloch, A. E., Navarro, J. E. E., & Marquez, E. R. (1977). Arcillas cerámicas de la región valenciana. Estudio de algunas arcillas empleadas en la fabricación de azulejos en las provincias de Castellón y Valencia". 17(2), 83-90.
- Bermeo, J., Juela, D., & Jumbo, A. (2020). PH de Las Arcillas <https://es.scribd.com/document/407062001/2-pH-de-las-Arcillas-docx>
- Bhardwaj, S., & Panchal, P. (2021). Vertex Component Analysis for Mixture Design. Journal of Quality Technology 53(2), 123-137.
- Boukili, G. E., Lechheb, M., Ouakarrouch, M., Dekayir, A., Kifani-Sahban, F., & Khaldoun, A. (2021). Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clay from Bensmim (Morocco): Suitability for building application. Construction and Building Materials, 280, 122300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122300>
- Bruguera, J. (1986). Manual práctico de cerámica. Omega.
- Callister, W. D. (2020). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Volumen I. Reverte.
- Cervantes Gómez, L. (2015). Modelización matemática Principios y aplicaciones (Primera). Fomento. <https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/publicaciones/Modeliza.pdf>
- Colbeck, J. (1989). Materiales para el ceramista. CEAC.
- Corredor Méndez, K. L. (2020). 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>
- De Torres Curth, M. (2015). Los reyes de la pasarela Modelos matemáticos en las ciencias (1era ed.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación de Historia Félix de Azara. <https://www.fundacionazara.org.ar/img/libros/modelos-matematicos.pdf>
- Di Prado, V. S., Bonomo, M., Conconi, S., Castro, C., Genazzini, C., & Silva, C. (2022). Lo que ganamos con el fuego. Estudio arqueométrico de las temperaturas de cocción en

alfarería prehispánica del Delta Superior del río Paraná (Argentina). Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, 17.

Fernandez, D. (2019). EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS - MECÁNICAS DE LAS TEJAS CERÁMICAS ARTESANALES Y MECANIZADAS MANUFACTURADAS EN PIÑIPAMPA – CUSCO, 2018, SEGÚN PARÁMETROS DE LAS NORMAS NTE INEN. Universidad Andina del Cusco.

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>

Flores Padilla, J. G. (2021). Diseño de un plan de mejora en el proceso de cocido de la empresa cerámicas Rialto SA (Master's thesis, Universidad del Azuay).

Galán, E., & Aparicio, P. (2006). Materias primas para la industria cerámica. Seminarios de la sociedad española de mineralogía, 2, 31-49

García González, M. A. (2011). Análisis de las características físicas y del comportamiento mecánico de las tejas cerámicas curvas antiguas y su evolución en el tiempo. [Masters, E.U. de Arquitectura Técnica (UPM)]. <https://oa.upm.es/10343/>

Garzón, E., Pérez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D., Martínez-Martínez, S., & Sánchez-Soto, PJ (2022). Tasa de vitrificación y estimación de las condiciones óptimas de cocción de materiales cerámicos a partir de arcillas crudas: una revisión. Cerámica Internacional , 48 (11), 15889-15898.

Gelves Diaz, J. F., Sánchez Molina, J., & Peña Rodríguez, G. (2009). Comportamiento de las arcillas del área metropolitana de Cúcuta sometidas a proceso de moldeo por extrusión. Respuestas, 14(2), 32-38. <https://doi.org/10.22463/0122820X.543>

Gil Rodríguez, K. F., Mendoza Ruiz, J., Coba Salcedo, M., Saltarín Jiménez, A., & Roldán Mckinley, J. (2020). Aplicación del criterio D-Óptimo a la fabricación del bloque Samo #4 para proponer una mezcla bajo estándares NTC 4205-1. Scientia et Technica, 25(1), 45-64. <https://doi.org/10.22517/23447214.22271>

Gori, U. (1994). The pH influence on the index properties of clays. Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 50(1), 37-42. <https://doi.org/10.1007/BF02594954>

- Guerrero, J. (2007). Manual del Proceso de Análisis Físico de Arcillas y Pastas. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Bogotá Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.artesanasdecolombia.com.co/bitstream/001/3780/21/INST-D%202007.%2073.20.pdf>
- Guerrero Gómez, G., Espinel Blanco, E., & Sánchez Acevedo, H. G. (2017). Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Tecnura*, 21(51), 118-131. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a09>
- Güeto, J. M. (2012). Materias primas para pastas cerámicas: Tecnología de los materiales cerámicos. Ediciones Díaz de Santos.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (Segunda ed). McGraw-Hill.
- Huaccha Holguín, A. L. (2021). Influencia de la relación caolín/cuarzo/feldespato y temperatura de sinterización sobre la absorción, resistencia a la compresión diametral y densificación de porcelanas. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/18220>
- Lema, G. (2018). ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE MINERALES ARCILLOSOS DEL ECUADOR EN LA ELABORACIÓN DE BARBOTINAS PARA USO EN EL SECTOR CERÁMICO ARTESANAL [Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniera Química, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19769/1/CD-9175.pdf>
- Lema Tamay, W. B. (2015). Obtención de pasta y acople de vidrio que no libere plomo para elaborar tejas artesanales usando horno de tiro invertido [BachelorThesis]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23277>
- Lema, W. B., & Castillo, E. (2018). Relaciones agua-cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. *Maskana*, 9(1), 125-140. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.12>
- Leon, W. R., & Cordero, J. (2011). Estudio de la relación entre la fuerza de prensado y la absorción de agua. [Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/394/1/08117.pdf>
- López, Á. C. (2021). La mina Pastora (Aliseda, Cáceres), un ejemplo sobresaliente del patrimonio geológico-minero de Extremadura. *De re metallica (Madrid): revista de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero*, (37), 105-106.

- Lores, M. T., Font, S., Torre, J., & Bastida, J. (1997). Estudio de la eliminación de materia orgánica en arcillas mediante tratamiento térmico. Análisis del proceso a diferentes escalas. 36(4), 419-424.
- Manco Jaraba, D. C., Martínez Contreras, C. A., Gómez Jiménez, J. E., Giraes Puerta, D. I., & Molina Arenas, S. I. (2020). Caracterización fisicoquímica de las arcillas utilizadas en la preparación de pastas cerámicas para la producción de los lotes de ladrillo tipo h-10 en la empresa Ladrillera Valledupar s.a.s. (Colombia). Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, 8(3), 54-59.
<https://doi.org/10.15649/2346030X.850>
- Martínez Fonseca, Y. (2019). Caracterización de mezclas para productos de cerámica roja, con el empleo de tobas, en la localidad de Flores [Tesis, Departamento de Minas].
<http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/3800>
- Maza Quishpi, M. E. (2011). Producción más limpia para ladrilleras en la parroquia Sinincay [Universidad del Azuay].
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/167/1/08088.pdf>
- Medina Jiménez, A., & Jaramillo, J. (2019). Recuperación energética y análisis térmico del proceso de cocción en la industria cerámica. 18(1), 81-97.
<https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019007>
- Molina Arias, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? Pediatría Atención Primaria, 19(76), 377-381.
- Molina Martínez, C. (2020). Caracterización de las materias primas utilizadas en los soportes de baldosas cerámicas en la empresa EUROCERÁMICA SA.
- Muñoz Chaves, J. A., Muñoz Menesea, R. A., Mancill, P., & Rodríguez Páez, J. E. (2007). Estudio del procesamiento cerámico de las arcillas de la vereda «La Codicia» (Guapi, Colombia) para potencializar su uso en la elaboración de piezas cerámicas. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 42, 68-78.
- Negre Medall, F. (1989). Mecanismo de la formación y cinética de la oxidación del corazón negro durante la cocción de piezas cerámicas. Tesis doctoral. Universidad de Valencia. Facultad de Química. Departamento de Ingeniería Química. Valencia.
- NTE INEN 0986 (1982).: Tejas cerámicas. Definiciones. Clasificación y condiciones generales. <http://archive.org/details/ec.nte.0986.1984>

NTE INEN 990. (1982). Tejas cerámicas. Requisitos.

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>

Ortiz, Á., & Aucapiña, A. (2021). Propuesta de mejora de la eficiencia energética de un horno artesanal para la quema de ladrillos y tejas—Cámara de secado para leña, tejas o ladrillos [Universidad Politécnica Salesiana].

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21411>

Osorio, N. L. (2005). CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS ARTESANALES [Universidad de San Carlos de Guatemala].

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2549_C.pdf

Pereira Báez, M. J., Pérez García, L. A., García Obregón, L., González Jiménez, H. A., Cuza Fernández, G. R., Ramírez Tamayo, A., & Herrera-Sánchez, C. (2021). Caracterización de las arcillas del depósito La Manteca para la producción de ladrillos cerámicos. Ciencia & Futuro, 11(4), 38-52.

Pérez Martínez, M. R. (2015). Organización y gestión de la fabricación de pastas cerámicas (MF0 666_3). Editorial Elearning, S.L.

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 [Universidad de Cuenca].

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/38706>

RAE. (2001). Teja | Diccionario de la lengua española (2001). «Diccionario esencial de la lengua española». <https://www.rae.es/drae2001/teja>

Ramos, M. (2010). ANÁLISIS DE LA MODIFICACIÓN ORGÁNICA DE LAS ARCILLAS LAMINARES [Centro de investigación en química aplicada].

<https://ciga.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/395/1/Maria%20Eugenia%20Ramos%20Jacobo.pdf>

Rozo Rincón, S. M., Sánchez Molina, J., & Álvarez Rozo, D. C. (2014). PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE BLOQUES H10 FABRICADOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 24(1), 67-78.

- Sánchez Molina, J., Sarabia Guarín, A., & Álvarez Rozo, D. C. (2016). Evaluación de materias primas utilizadas en la fabricación de baldosas de gres en el sector cerámico de Norte de Santander (Colombia). *Respuestas*, 21(2), 48-56.
<https://doi.org/10.22463/0122820X.776>
- 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.
- Singer, F., & Singer, S. (1976). *Cerámica industrial (Primera)*. Urmo.
- Subgerencia Cultural del Banco de la República. (2015). Teja de barro. Recuperado de:
http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/arte/teja_de_barro
- 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.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31735>
- Tormo, S., & Garcia, N. (2019). La teja cerámica. Orígenes, análisis y estudios constructivos en Euskadi y la Comunidad Valenciana [Universidad Politécnica de Valencia].
<http://hdl.handle.net/10251/131914>
- Uribe, R., Camillo, F., & Lascano, L. (2021). Minerales arcillosos protocolo especializado de categorización cerámica: una revisión.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8270036>
- Vázquez Malagón, E. del C. (2005). *Materiales cerámicos: Propiedades, aplicaciones y elaboración*. UNAM.
- Velesaca Mora, A. E. (2020). Generación de un modelo de optimización en la dosificación de pastas cerámicas para porcelanato basado en programación lineal.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/35019>
- Vieira, C. M. F., Sánchez, R., & Monteiro, S. N. (2008). Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Construction and Building Materials*, 22(5), 781-787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.006>

Yang, J., Wu, H., Wang, J., & Yu, G. (2020). A new algorithm for constructing extreme vertices of mixture design and its application in chemical engineering. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120032.

Zea, N. L. (2005). CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS ARTESANALES [Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2549_C.pdf

Zhou, X., Fengg, Y., Yin, W., & Liu, Y. (2021). A new vertex optimization algorithm for mixture design. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 91(12), 2131-2144.

Anexos

Anexo A. Análisis químico y mineralógico racional de las arcillas

 CESEMIN Centro de Servicios y Análisis de Minerales Metálicos y No Metálicos	REPORTE DE RESULTADOS UCUENCA	RMN-011 Hoja 1 de 1
--	--	------------------------

CLIENTE: PVS D. Albuja

MUESTRAS: 1 MUESTRA

FECHA: 2022-10-25

ANÁLISIS QUÍMICO

%ÓXIDO	X ₁
SiO ₂	60,06
Al ₂ O ₃	18,07
Fe ₂ O ₃	8,80
CaO	0,00
MgO	0,42
Na ₂ O	0,59
K ₂ O	2,53
Pérdidas al Fuego	9,54

OBSERVACIONES:

- Método: Fusión con Hidróxidos.
Extracción Ácida
Espectroscopía de Absorción Atómica de llama.
- N.D.: No Detectado



Firma digitalizada por
SONIA MURGOTE
ASTUDILLO OCHOA

Responsable análisis
 Ing. Sonia Astudillo

Firma digitalizada por
ISABEL
CRISTINA LEON
JARAMILLO

Coordinación CESEMIN
 Ing. Isabel León

cc. archivo

 CESEMIN Centro de Servicios y Análisis de Metales Menores y No Metales	REPORTE DE RESULTADOS UCUENCA	RMN-012 Hoja 1 de 1
--	--	------------------------

CLIENTE: PVS D. Albuja
MUESTRAS: 1 MUESTRA
FECHA: 2022-10-25

ANÁLISIS QUÍMICO

%ÓXIDO	X ₂
SiO ₂	67,34
Al ₂ O ₃	13,84
Fe ₂ O ₃	6,08
CaO	0,00
MgO	0,31
Na ₂ O	0,60
K ₂ O	1,57
Pérdidas al Fuego	10,25

OBSERVACIONES:

- Método: Fusión con Hidróxidos.
Extracción Ácida
Espectroscopía de Absorción Atómica de llama.
- N.D.: No Detectado



Firmado digitalmente por
 SONIA MARGOTIS
 ASTUDILLO OCHOA

Responsable análisis
 Ing. Sonia Astudillo

Firmado digitalmente por
 ISABEL CRISTINA LEON
 JARAMILLO

Firmado digitalmente por
 ISABEL CRISTINA
 LEON JARAMILLO
 Fecha: 2022.10.28
 16:13:07 -0500'

Coordinación CESEMIN
 Ing. Isabel León

 CESEMIN Centro de Servicios y Análisis de Minerales Metálicos y No Metálicos	REPORTE DE RESULTADOS UCUENCA	RMN-010 Hoja 1 de 1
--	--	------------------------

CLIENTE: PVS D. Albuja
MUESTRAS: 1 MUESTRA
FECHA: 2022-10-25

ANÁLISIS QUÍMICO

%ÓXIDO	X ₃
SiO ₂	71,13
Al ₂ O ₃	13,38
Fe ₂ O ₃	3,79
CaO	0,16
MgO	0,29
Na ₂ O	1,16
K ₂ O	1,45
Pérdidas al Fuego	8,63

OBSERVACIONES:

- Método: Fusión con Hidróxidos.
 Extracción Ácida
 Espectroscopia de Absorción Atómica de llama.
- N.D.: No Detectado



Firma digitalizada por:
 SONIA MARGOTH
 ASTUDILLO OCHOA

Responsable análisis
 Ing. Sonia Astudillo

Firma digitalizada por:
 ISABEL CRISTINA LEÓN
 JARAMILLO
 Fecha: 2022-10-28
 16:19:29 -05'00'

Coordinación CESEMIN
 Ing. Isabel León

Nota: Debido a la confidencialidad del taller artesanal se omiten el nombre de las arcillas usadas y se las reemplaza por x₁, x₂ y x₃

Análisis mineralógico racional de la x₁			
Feldespatos	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	14,98	19,97
	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	4,99	
Arcilla	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	36,33	36,33
Sílice	SiO_2	30,02	30,02
Impurezas	Fe_2O_3	8,8	9,22
	CaO	0	
	MgO	0,42	
Total			95,54

Análisis mineralógico racional de la x₂			
Feldespatos	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	9,29	14,37
	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	5,08	
Arcilla	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	28,22	28,22
Sílice	SiO_2	44,70	44,70
Impurezas	Fe_2O_3	6,08	6,39
	CaO	0	
	MgO	0,31	
Total			93,68

Análisis mineralógico racional de la x ₃			
Feldespatos	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	8,58	18,40
	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	9,81	
Arcilla	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	25,05	25,05
Sílice	SiO_2	47,16	47,16
Impurezas	Fe_2O_3	3,79	4,24
	CaO	0,16	
	MgO	0,29	
Total			94,85

Anexo B. Determinación de granulometría

Cálculos

Se presentan los cálculos correspondientes al análisis por duplicado

Arcilla X₁ sin moler

- Humedad (%) = 2,88
- Peso inicial (g) = 205,93
- Peso seco (g) = 200
- Peso lavado y seco (g) = 61,7

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
8	2,36	4,40	2,20	2,20	97,80
20	0,85	3,60	1,80	4,00	96,00
40	0,425	3,50	1,75	5,75	94,25
60	0,25	8,10	4,05	9,80	90,20
80	0,18	6,30	3,15	12,95	87,05
100	0,15	6,40	3,20	16,15	83,85
200	0,075	17,40	8,70	24,85	75,15
325	0,045	9,30	4,65	29,50	70,50
< 325		140,80	70,40	99,90	0,00

Arcilla X₂ sin moler

- Humedad (%) = 3,34
- Peso inicial (g) = 206,91
- Peso seco (g) = 200
- Peso lavado y seco (g) = 44,0

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%Pasa
-------	---------------	----------	------------	-------------	-------

8	2,36	0,80	0,40	0,40	99,60
20	0,85	4,90	2,45	2,85	97,15
40	0,425	5,20	2,60	5,45	94,55
60	0,25	5,00	2,50	7,95	92,05
80	0,18	4,10	2,05	10,00	90,00
100	0,15	4,40	2,20	12,20	87,80
200	0,075	9,00	4,50	16,70	83,30
325	0,045	9,00	4,50	21,20	78,80
< 325		156,50	78,25	99,45	0,00

Arcilla X₃ sin moler

- Humedad (%) = 3,45
- Peso inicial (g) = 207,15
- Peso seco (g) = 200
- Peso lavado y seco (g) = 59,1

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%pasa
8	2,36	2,30	1,15	1,15	98,85
20	0,85	10,50	5,25	6,40	93,60
40	0,425	9,00	4,50	10,90	89,10
60	0,25	10,40	5,20	16,10	83,90
80	0,18	6,50	3,25	19,35	80,65
100	0,15	5,30	2,65	22,00	78,00
200	0,075	15,90	7,95	29,95	70,05
325	0,045	8,90	4,45	34,40	65,60
< 325		131,30	65,65	100,05	0,00

Arcilla X₁ molida

- Humedad (%) = 2,88
- Peso inicial (g) = 205,93
- Peso seco (g) = 200
- Peso lavado y seco (g) = 52,2

Malla	Abertura mm	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	%pasa
8	2,36	1,30	0,65	0,65	99,35
20	0,85	5,90	2,95	3,60	96,40
40	0,425	3,00	1,50	5,10	94,90
60	0,25	6,40	3,20	8,30	91,70
80	0,18	5,60	2,80	11,10	88,90
100	0,15	5,90	2,95	14,05	85,95
200	0,075	15,00	7,50	21,55	78,45
325	0,045	12,20	6,10	27,65	72,35
< 325		143,90	71,95	99,60	0,00

Arcilla X₂ molida

- Humedad (%) = 3,34
- Peso inicial (g) = 206,91
- Peso seco (g) = 200
- Peso lavado y seco (g) = 38

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
8	2,36	0,60	0,30	0,30	99,70
20	0,85	5,10	2,55	2,85	97,15
40	0,425	4,60	2,30	5,15	94,85

60	0,25	5,00	2,50	7,65	92,35
80	0,18	3,30	1,65	9,30	90,70
100	0,15	3,10	1,55	10,85	89,15
200	0,075	8,60	4,30	15,15	84,85
325	0,045	7,30	3,65	18,80	81,20
< 325		162,10	81,05	99,85	0,00

Arcilla X₃ molida

- Humedad (%) = 3,45
- Peso inicial (g) = 207,15
- Peso seco (g) = 200
- Peso lavado y seco (g) = 60,6

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
8	2,36	1,60	0,80	0,80	99,20
20	0,85	10,10	5,05	5,85	94,15
40	0,425	8,10	4,05	9,90	90,10
60	0,25	9,10	4,55	14,45	85,55
80	0,18	4,50	2,25	16,70	83,30
100	0,15	5,70	2,85	19,55	80,45
200	0,075	11,30	5,65	25,20	74,80
325	0,045	9,50	4,75	29,95	70,05
< 325		139,70	69,85	99,80	0,00

Pasta

- Humedad (%) = 21,59
- Peso inicial (g) = 255,07
- Peso seco (g) = 200
- Peso lavado y seco (g) = 51,5

Malla	Abertura (mm)	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
8	2,36	0,90	0,45	0,45	99,55
20	0,85	5,90	2,95	3,40	96,60
40	0,425	5,80	2,90	6,30	93,70
60	0,25	4,90	2,45	8,75	91,25
80	0,18	6,60	3,30	12,05	87,95
100	0,15	5,00	2,50	14,55	85,45
200	0,075	11,00	5,50	20,05	79,95
325	0,045	9,40	4,70	24,75	75,25
< 325		150,20	75,10	99,85	0,00

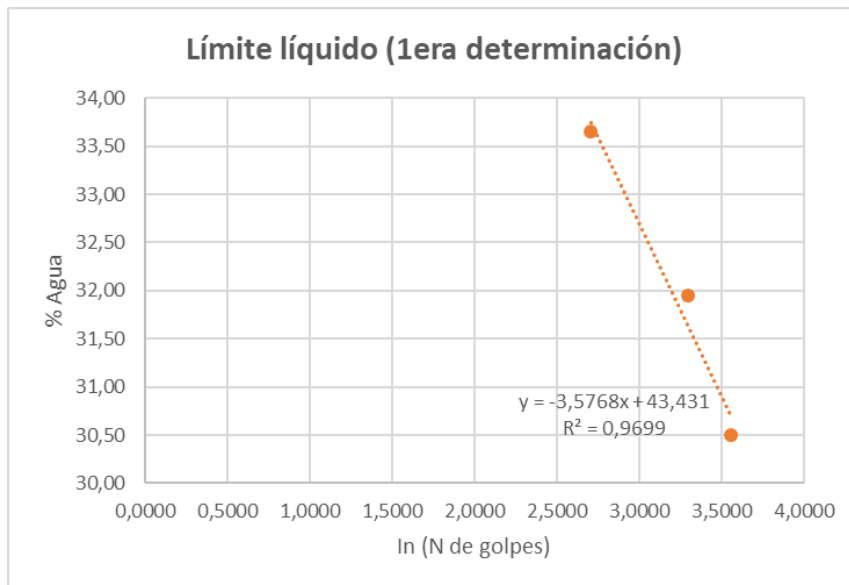
Anexo C. Determinación del límite líquido, limite plástico e índice de plasticidad

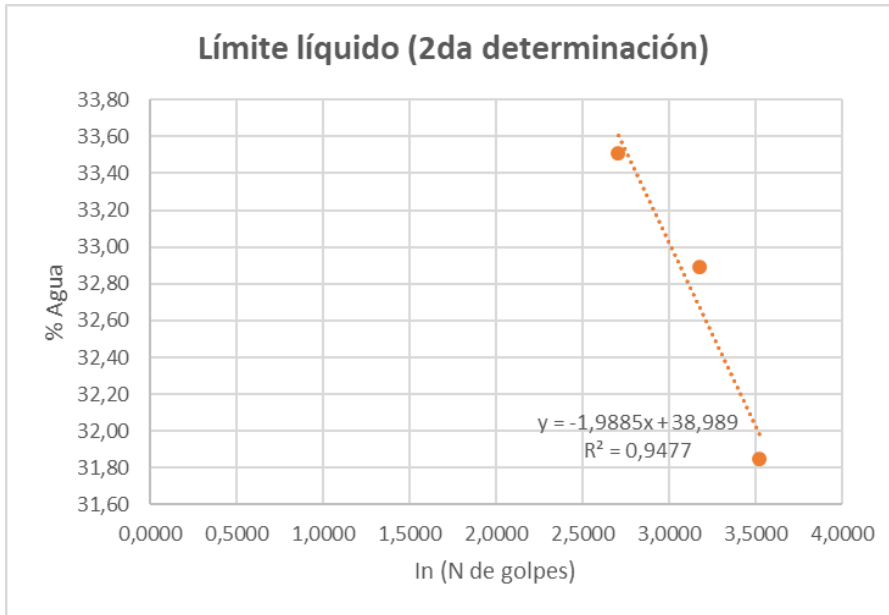
Cálculos

Se presentan los cálculos correspondientes al análisis por duplicado

Arcilla X₁ sin moler

Límite líquido					
Primera determinación			Segunda determinación		
N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)	N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)
35	30,5	3,5553	34	31,85	3,5264
27	31,95	3,2958	24	32,89	3,1781
15	33,65	2,7081	15	33,51	2,7081





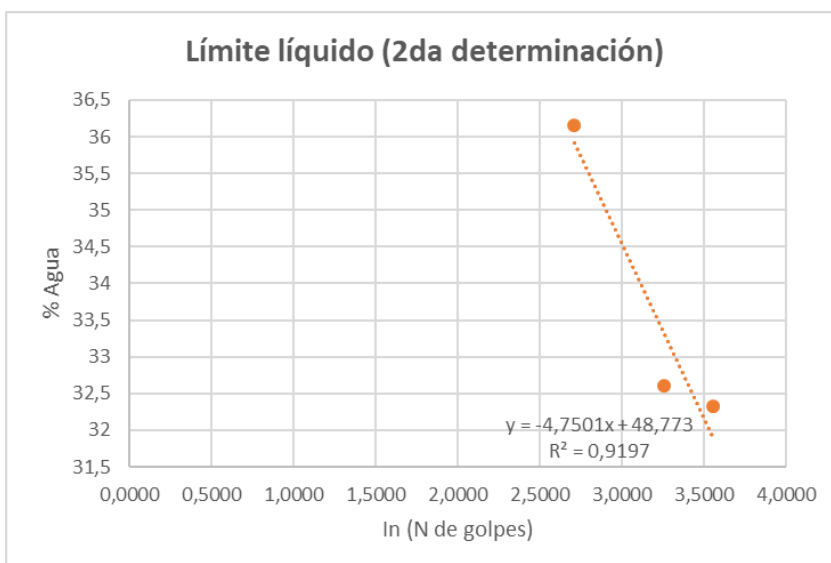
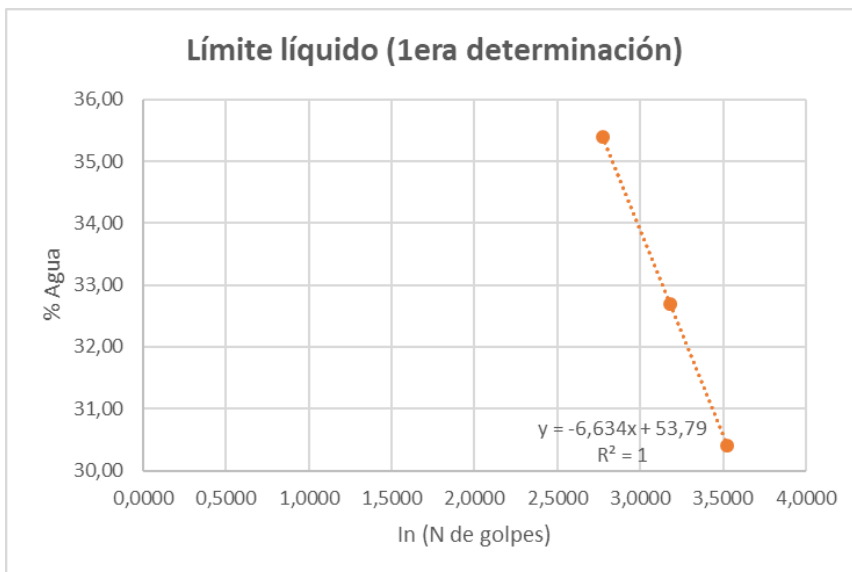
Primera determinación		Segunda determinación	
$y = -3,5768x + 43,431$		$y = -1,9885 x + 38,989$	
$y = -3,5768(\ln(25)) + 43,431$		$y = -1,9885(\ln(25)) + 38,989$	
$y = 31,91$		$y = 32,59$	
Límite líquido	31,91	Límite líquido	32,59

Límite plástico			
Primera determinación		Segunda determinación	
21,74		22,64	
23,12		23,13	
23,15		22,85	
Promedio	22,67	Promedio	22,873

Índice de plasticidad	
Primera determinación	Segunda determinación
9,24	9,72

Arcilla X₂ sin moler

Límite líquido					
Primera determinación			Segunda determinación		
N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)	N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)
34	30,4	3,5264	35	32,33	3,5553
24	32,7	3,1781	26	32,61	3,2581
16	35,4	2,7726	15	36,15	2,7081



Primera determinación		Segunda determinación	
$y = -6,634x + 53,79$		$y = -4,7501x + 48,773$	
$y = -6,634(\ln(25)) + 53,79$		$y = -4,7501(\ln(25)) + 48,773$	
y=32,44		y=33,48	
Límite líquido	32,44	Límite líquido	33,48

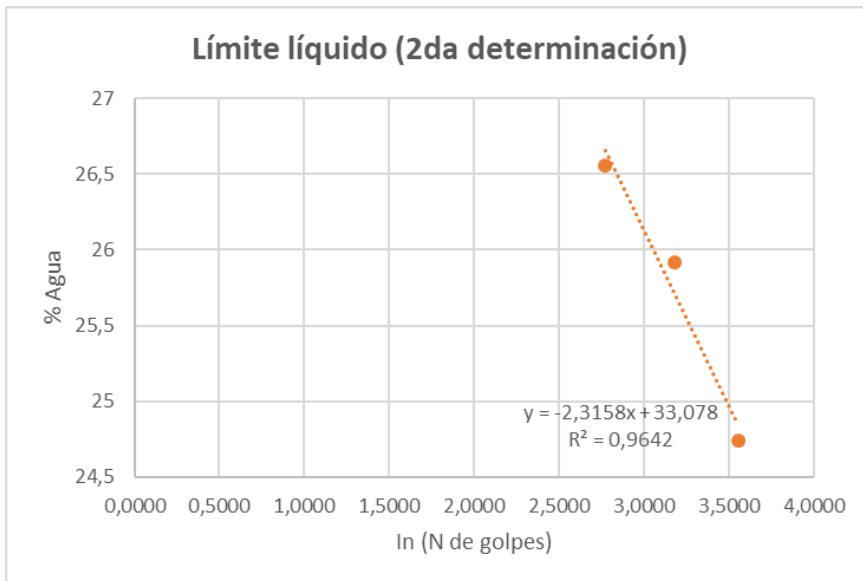
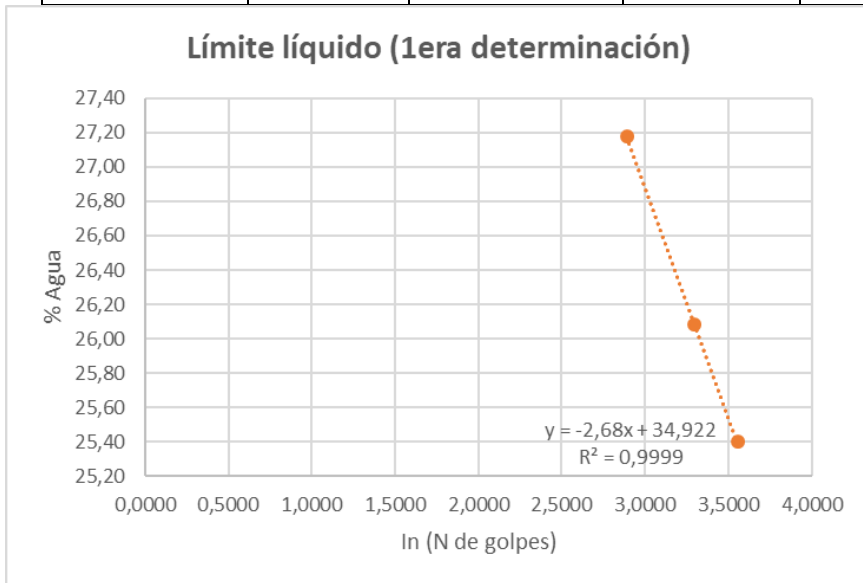
Límite plástico			
Primera determinación		Segunda determinación	
20,53		19,46	
20,34		21,78	
19,92		22,1	
Promedio	20,263	Promedio	21,113

Índice de plasticidad	
Primera determinación	Segunda determinación
12,177	12,367

Arcilla X₃ sin moler

Límite líquido					
Primera determinación			Segunda determinación		
N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)	N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)
35	25,40	3,5553	35	24,74	3,5553
27	26,08	3,2958	24	25,92	3,1781

18	27,18	2,8904	16	26,56	2,7726
----	-------	--------	----	-------	--------



Primera determinación		Segunda determinación	
$y = -2,68x + 34,922$		$y = -2,3158x + 33,078$	
$y = -2,68\ln(25) + 34,922$		$y = -2,3158\ln(25) + 33,078$	
$y=26,30$		$y=25,62$	
Límite líquido	26,30	Límite líquido	25,62

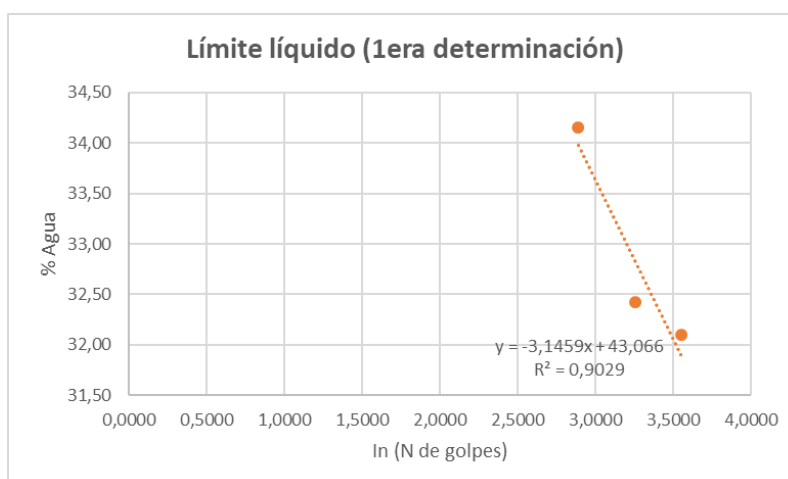
Límite plástico	
Primera determinación	Segunda determinación

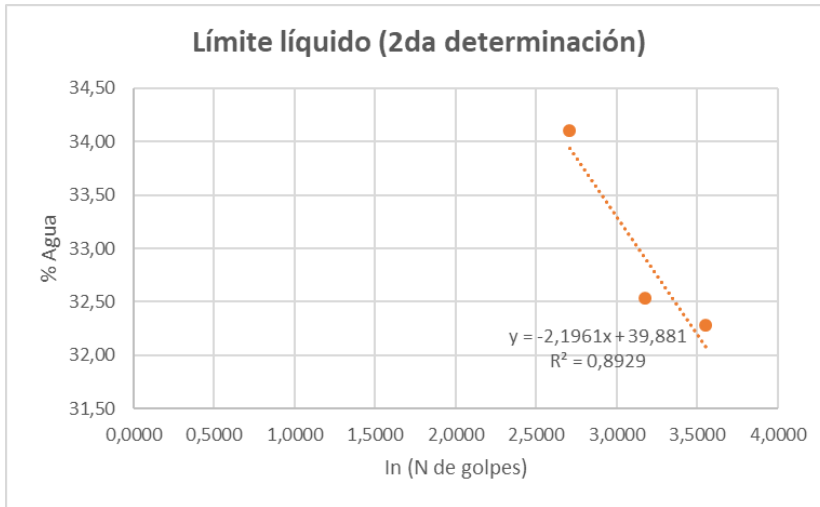
16,89		16,96	
16,02		16,02	
17,49		16,05	
Promedio	16,800	Promedio	16,343

Índice de plasticidad	
Primera determinación	Segunda determinación
9,500	9,277

Arcilla X1 pasada por el molino

Límite líquido					
Primera determinación			Segunda determinación		
N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)	N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)
35	32,10	3,5553	35	32,28	3,5553
26	32,42	3,2581	24	32,53	3,1781
18	34,15	2,8904	15	34,10	2,7081





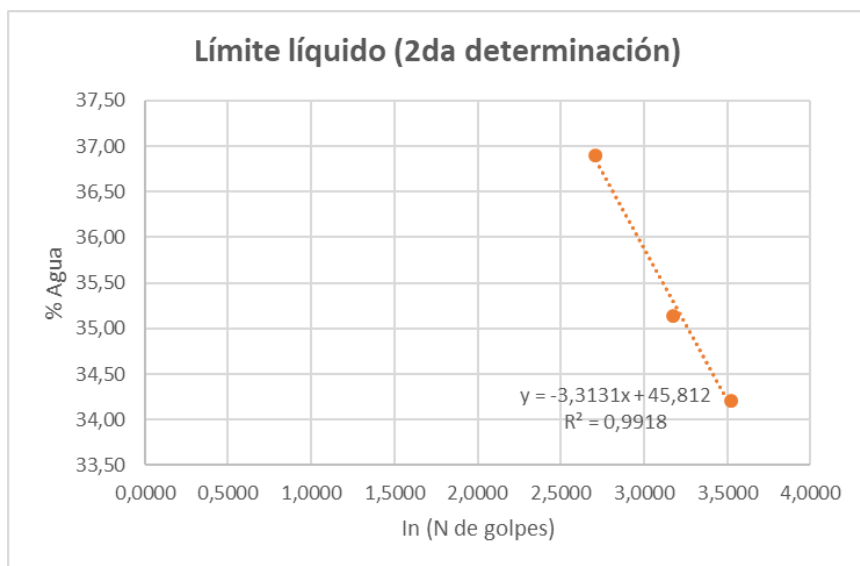
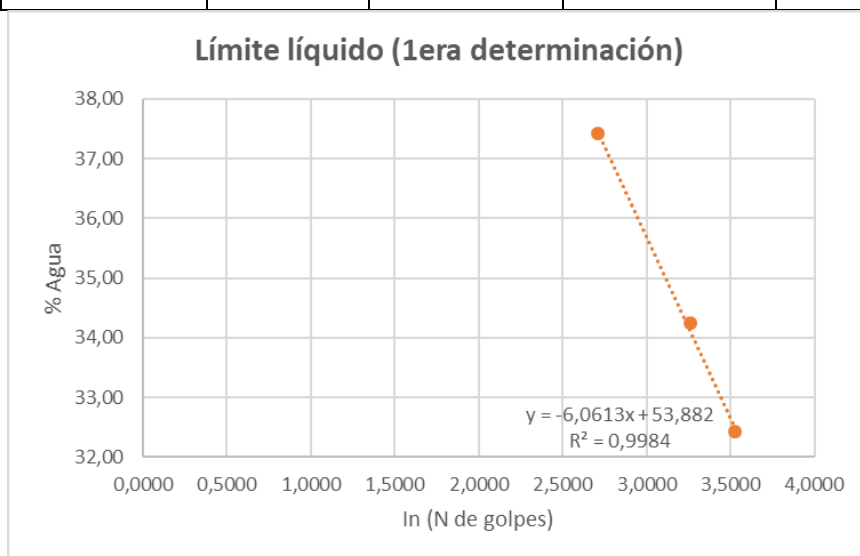
Primera determinación		Segunda determinación	
$y = -3,1459x + 43,066$		$y = -2,1961x + 39,881$	
$y = -3,1459\ln(25) + 43,066$		$y = -2,1961\ln(25 + 39,881)$	
$y=32,93$		$y=32,81$	
Límite líquido	32,93	Límite líquido	32,81

Límite plástico			
Primera determinación		Segunda determinación	
23,23		22,44	
23,56		23,04	
22,1		23,13	
Promedio	22,96	Promedio	22,87

Índice de plasticidad			
Primera determinación		Segunda determinación	
9,98		9,94	

Arcilla X₂ molida

Límite líquido					
Primera determinación			Segunda determinación		
N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)	N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)
34	32,43	3,5264	34	34,21	3,5264
26	34,25	3,2581	24	35,14	3,1781
15	37,43	2,7081	15	36,90	2,7081



Primera determinación	Segunda determinación
$y = -6,0613x + 53,882$	$y = -3,3131x + 45,812$

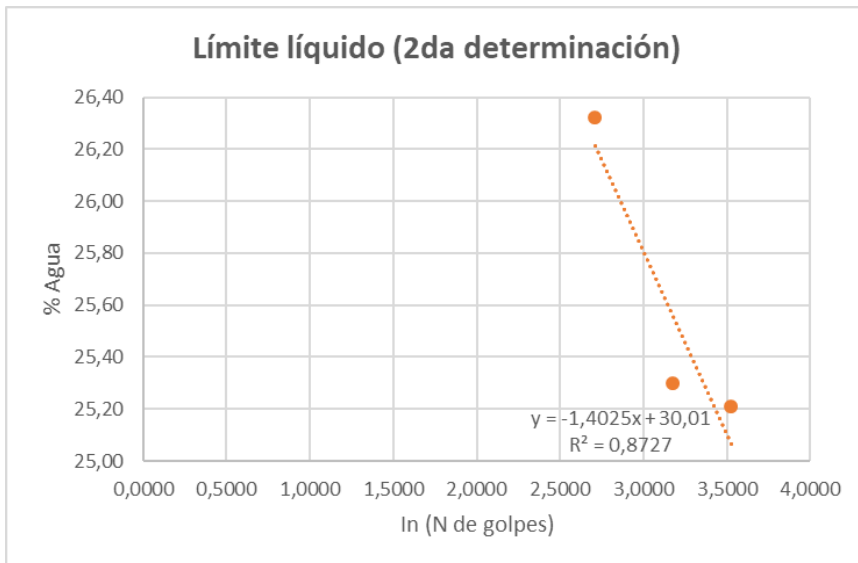
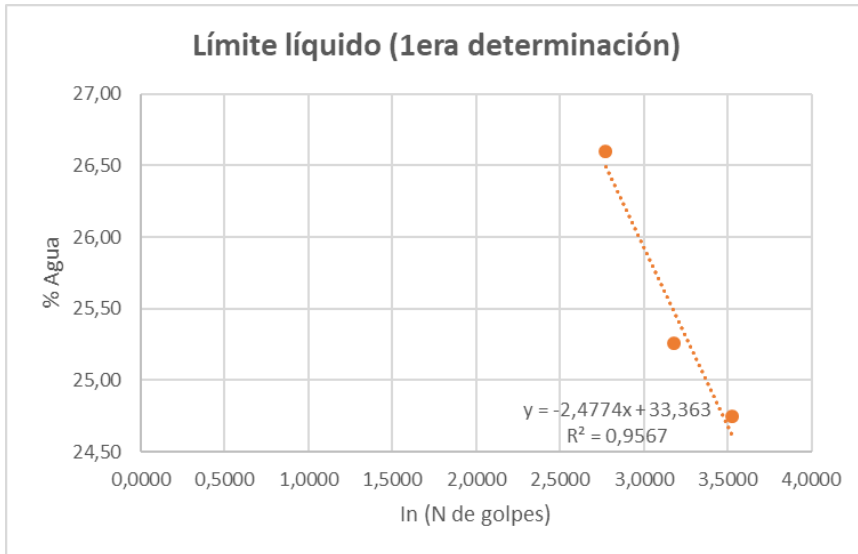
$y = -6,0613\ln(25) + 53,882$		$y = -3,3131\ln(25) + 45,812$	
y=34,37		y=35,15	
Límite líquido	34,37	Límite líquido	35,15

Límite plástico			
Primera determinación		Segunda determinación	
21,35		22,44	
21,56		22,46	
21,24		21,79	
Promedio	21,383	Promedio	22,230

Índice de plasticidad	
Primera determinación	Segunda determinación
12,987	12,920

Arcilla X₃ molida

Límite líquido					
Primera determinación			Segunda determinación		
N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)	N° de golpes	% Agua	ln (N° de golpes)
34	24,75	3,5264	34	25,21	3,5264
24	25,26	3,1781	24	25,30	3,1781
16	26,60	2,7726	15	26,32	2,7081



Primera determinación		Segunda determinación	
$y = -2,4774x + 33,363$		$y = -1,4025x + 30,01$	
$y = -2,4774\ln(25) + 33,363$		$y = -1,4025\ln(25) + 30,01$	
y= 25,39		y=25,49	
Límite líquido	25,39	Límite líquido	25,49

Límite plástico	
Primera determinación	Segunda determinación
16,31	15,79
15,34	15,95

15,53		15,61	
Promedio	15,727	Promedio	15,783

Índice de plasticidad	
Primera determinación	Segunda determinación
9,663	9,707

Anexo D. Determinación de la contracción al secado, contracción a la quema y contracción total

Cálculos

→ Temperatura de cocción de 850°C

Lo: longitud inicial de la marca (5 cm o 50 mm).

Lq: Longitud de la marca después de la quema

Ls: Longitud de la marca tras el secado

Arcilla x ₁ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	47,60	46,40	4,80	2,52	7,20
2	46,80	46,40	6,40	0,85	7,20
3	46,80	46,08	6,40	1,54	7,84
4	47,26	46,56	5,48	1,48	6,88
5	47,60	46,40	4,80	2,52	7,20
6	47,60	46,40	4,80	2,52	7,20

Arcilla x ₁ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,70	46,38	6,60	0,69	7,24
2	46,83	46,38	6,34	0,96	7,24
3	46,70	46,56	6,60	0,30	6,88
4	46,83	46,36	6,34	1,00	7,28
5	46,70	46,28	6,60	0,90	7,44
6	46,83	46,68	6,34	0,32	6,64

Arcilla x ₂ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	45,79	45,01	8,42	1,70	9,98
2	45,79	45,01	8,42	1,70	9,98
3	45,80	45,01	8,40	1,72	9,98
4	45,90	45,11	8,20	1,72	9,78
5	45,90	45,21	8,20	1,50	9,58
6	45,76	45,01	8,48	1,64	9,98

Arcilla x ₂ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	45,01	44,78	9,98	0,51	10,44
2	45,79	45,08	8,42	1,55	9,84
3	44,97	44,70	10,06	0,60	10,60
4	45,30	45,08	9,40	0,49	9,84
5	45,35	45,08	9,30	0,60	9,84
6	45,08	44,77	9,84	0,69	10,46

Arcilla x ₃ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,81	46,08	6,38	1,56	7,84
2	46,70	46,08	6,60	1,33	7,84
3	46,84	46,48	6,32	0,77	7,04
4	47,62	46,81	4,76	1,70	6,38
5	46,70	45,80	6,60	1,93	8,40

6	47,62	47,00	4,76	1,30	6,00
---	-------	-------	------	------	------

Arcilla x ₃ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,81	46,08	6,38	1,56	7,84
2	46,80	46,58	6,40	0,47	6,84
3	46,84	46,58	6,32	0,56	6,84
4	46,83	46,40	6,34	0,92	7,20
5	46,83	46,40	6,34	0,92	7,20
6	46,83	46,68	6,34	0,32	6,64

Pasta					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,81	46,08	6,38	1,56	7,84
2	46,81	46,08	6,38	1,56	7,84
3	46,81	46,08	6,38	1,56	7,84
4	45,78	45,01	8,44	1,68	9,98
5	46,08	45,6	7,84	1,04	8,80
6	46,81	46,08	6,38	1,56	7,84

Tipos de arcilla o pasta	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
Arcilla roja molida	6,40	0,97	7,31
Arcilla fina molida	9,24	0,83	10,00
Arcilla arenosa molida	6,47	1,40	7,78
Arcilla roja sin moler	6,41	0,74	7,10

Arcilla fina sin moler	8,35	1,48	9,71
Arcilla arenosa sin moler	6,35	0,79	7,09
Pasta	7,55	1,43	8,87

→ Temperatura de cocción de 900°C

Arcilla x ₁ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,78	46,33	6,44	0,96	7,34
2	46,43	46,08	7,14	0,75	7,84
3	46,48	46,30	7,04	0,39	7,40
4	46,78	46,33	6,44	0,96	7,34
5	46,58	46,08	6,84	1,07	7,84
6	46,38	46,08	7,24	0,65	7,84

Arcilla x ₁ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,58	46,18	6,84	0,86	7,64
2	46,28	45,98	7,44	0,65	8,04
3	46,80	46,48	6,40	0,68	7,04
4	46,08	45,90	7,84	0,39	8,20
5	46,30	45,90	7,40	0,86	8,20
6	46,83	46,48	6,34	0,75	7,04

Arcilla x ₂ molida

Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	45,78	45,10	8,44	1,27	9,80
2	45,60	45,40	8,80	1,10	9,20
3	45,60	45,05	8,80	1,14	9,90
4	45,28	44,52	9,44	0,80	10,96
5	45,76	45,18	8,48	1,05	9,76
6	45,60	45,08	8,80	0,92	9,84

Arcilla x ₂ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	45,20	44,78	9,60	0,93	10,44
2	45,30	45,02	9,40	0,62	9,96
3	45,10	44,68	9,80	0,93	10,64
4	45,70	45,08	8,60	1,36	9,84
5	45,70	45,20	8,60	1,09	9,60
6	44,95	44,60	10,10	0,78	10,80

Arcilla x ₃ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,88	46,30	6,24	1,24	7,40
2	46,88	46,28	6,24	1,28	7,44
3	46,18	45,79	7,64	0,84	8,42
4	45,60	45,48	8,80	0,26	9,04
5	45,80	45,58	8,40	0,48	8,84
6	46,08	45,90	7,84	0,39	8,20

Arcilla x ₃ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,81	46,48	6,38	0,70	7,04
2	46,81	46,28	6,38	1,13	7,44
3	47,00	46,83	6,00	0,36	6,34
4	46,70	45,80	6,60	1,93	8,40
5	46,48	46,10	7,04	0,82	7,80
6	47,00	46,10	6,00	1,91	7,80

Pasta					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,38	46,06	7,24	0,69	7,88
2	46,38	45,58	7,24	1,08	8,84
3	46,38	45,79	7,24	0,26	7,42
4	46,40	45,33	7,20	1,77	9,34
5	46,50	46,06	7,00	0,95	7,88
6	46,38	45,58	7,24	1,34	8,48

Tipos de arcilla o pasta	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
Arcilla roja molida	6,86	0,80	7,60
Arcilla fina molida	9,20	0,99	10,10
Arcilla arenosa molida	6,71	1,12	7,75
Arcilla roja sin moler	6,53	0,76	7,24
Arcilla fina sin moler	8,79	1,22	9,91

Arcilla arenosa sin moler	6,40	1,14	7,47
Pasta	7,23	1,54	8,66

→ Temperatura de cocción de 950°C

Arcilla x ₁ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,28	46,00	7,44	0,61	8,00
2	46,38	46,00	7,24	0,82	8,00
3	46,70	46,00	6,60	1,50	8,00
4	46,18	45,78	7,64	0,87	8,44
5	46,90	46,00	6,20	1,92	8,00
6	46,58	46,08	6,84	1,07	7,84

Arcilla x ₁ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	46,40	46,14	7,20	0,26	7,72
2	46,30	46,15	7,40	0,26	7,70
3	46,38	46,10	7,24	0,22	7,80
4	46,38	46,05	7,24	0,65	7,90
5	46,58	46,12	6,84	0,64	7,76
6	46,58	46,15	6,84	0,43	7,70

Arcilla x ₂ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)

1	45,30	44,52	9,40	1,59	10,96
2	45,60	45,18	8,80	0,66	9,64
3	45,30	45,10	9,40	0,26	9,80
4	45,78	45,45	8,44	0,44	9,10
5	45,28	44,43	9,44	1,55	11,14
6	46,08	45,50	7,84	0,61	9,00

Arcilla x ₂ sin moler					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1,00	45,20	44,38	9,60	1,81	11,24
2,00	44,72	44,58	10,56	0,31	10,84
3,00	44,70	44,30	10,60	0,89	11,40
4,00	45,10	45,00	9,80	0,22	10,00
5,00	44,80	44,60	10,40	0,45	10,80
6,00	45,30	44,72	9,40	1,28	10,56

Arcilla x ₃ molida					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1,00	46,70	46,00	6,60	1,50	8,00
2,00	46,08	45,80	7,84	0,61	8,40
3,00	45,60	45,40	8,80	0,44	9,20
4,00	46,28	46,00	7,44	0,61	8,00
5,00	46,88	46,00	6,24	1,88	8,00
6,00	46,50	45,58	7,00	1,98	8,84

Arcilla x ₃ sin moler					
----------------------------------	--	--	--	--	--

Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1,00	46,70	46,30	6,60	0,86	7,40
2,00	46,10	45,86	7,80	0,52	8,28
3,00	46,58	46,28	6,84	0,64	7,44
4,00	46,28	46,08	7,44	0,43	7,84
5,00	46,10	45,80	7,80	0,65	8,40
6,00	46,42	46,08	7,16	0,73	7,84

Pasta					
Número de placa	Ls (mm)	Lq (mm)	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
1	45,58	45,40	8,84	0,39	9,20
2	45,58	45,28	8,84	0,66	9,44
3	45,60	45,38	8,80	0,48	9,24
4	45,50	45,28	9,00	0,48	9,44
5	45,68	45,30	8,64	0,83	9,40
6	45,80	45,48	8,40	0,70	9,04

Tipos de arcilla o pasta	Contracción al secado (%)	Contracción a la quema (%)	Contracción total (%)
Arcilla x_1 molida	6,99	1,13	8,05
Arcilla x_2 molida	9,60	1,11	10,60
Arcilla x_3 molida	6,82	1,49	8,21
Arcilla x_1 sin moler	6,96	0,82	7,73
Arcilla x_2 sin moler	8,89	1,27	10,04
Arcilla x_3 sin moler	6,80	0,82	7,56

Pasta	8,70	0,61	9,26
-------	------	------	------

Anexo E. Determinación de la absorción de agua y espacio poroso

Cálculos

→ Placas correspondientes al ciclo de quema de 850°C

Arcillas pasadas por el molino

Arcilla x ₁ molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	45,9	71,20	87,96	23,54	36,51
2	52,8	82,26	101,70	23,63	36,82
3	46,1	73,99	91,55	23,73	38,09
4	47,6	74,95	92,37	23,24	36,60
5	47,1	72,37	89,54	23,73	36,45
6	44,4	67,99	84,07	23,65	36,22

Arcilla x ₂ molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	38,8	61,72	73,29	18,75	29,82
2	36,4	58,68	69,71	18,80	30,30
3	39,8	61,27	72,76	18,75	28,87
4	35,6	55,64	66,19	18,96	29,63
5	39,4	60,44	71,82	18,83	28,88
6	35,8	56,92	67,68	18,90	30,06

Arcilla x ₃ molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	33,7	62,51	72,05	15,26	28,31
2	38,0	72,51	83,04	14,52	27,71
3	61,4	104,97	121,17	15,43	26,38
4	35,3	64,73	74,70	15,40	28,24
5	38,6	69,08	80,01	15,82	28,32

6	39,4	71,87	83,08	15,60	28,45
---	------	-------	-------	-------	-------

Arcillas sin moler

Arcilla x ₁ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	44,5	62,05	78,08	25,83	36,02
2	41,1	64,65	81,3	25,75	40,51
3	46,3	74,44	93,47	25,56	41,10
4	43,5	65,62	82,62	25,91	39,08
5	45,7	74,99	94,05	25,42	41,71
6	50,9	82,44	103,32	25,33	41,02

Arcilla x ₂ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	35,5	56,71	68,06	20,01	31,97
2	32,8	52,68	62,84	19,29	30,98
3	32,7	55,00	65,78	19,60	32,97
4	35,7	56,48	67,53	19,56	30,95
5	35,4	60,18	71,84	19,38	32,94
6	33,4	56,49	67,67	19,79	33,47

Arcilla x ₃ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	53,0	81,45	93,40	14,67	22,55
2	55,6	84,36	96,91	14,88	22,57
3	49,6	78,27	89,90	14,86	23,45
4	58,2	106,07	121,90	14,92	27,20
5	48,4	81,17	93,43	15,10	25,34
6	39,3	75,21	86,44	14,93	28,59

Pasta					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	41,9	70,22	81,58	16,18	27,11
2	38,4	63,07	73,20	16,06	26,38
3	38,2	66,97	77,85	16,25	28,48
4	41,4	69,55	80,73	16,07	27,00
5	38,1	65,18	75,64	16,05	27,45
6	38,8	68,24	79,37	16,31	28,69

Promedios de absorción de agua y espacio poroso de las materias primas y la pasta

Tipos de arcilla o pasta	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
Arcilla x ₁ molida	23,59	36,78
Arcilla x ₂ molida	18,83	29,59
Arcilla x ₃ molida	15,34	27,90
Arcilla x ₁ sin moler	25,63	39,91
Arcilla x ₂ sin moler	19,61	32,21
Arcilla x ₃ sin moler	14,89	24,95
Pasta	16,15	27,52

→ **Placas correspondientes a la temperatura de quema de 900°C**

Arcillas pasadas por el molino

Arcilla x ₁ molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	38,0	59,86	73,76	23,22	36,58
2	36,8	57,81	70,71	22,31	35,05
3	40,1	64,48	79,56	23,39	37,61
4	32,9	52,99	64,95	22,57	36,35
5	44,1	70,12	86,70	23,65	37,60
6	42,0	66,70	82,19	23,22	36,88

Arcilla x ₂ molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	35,4	59,85	70,99	18,61	31,47
2	34,8	55,35	65,92	19,10	30,37
3	33,0	53,27	63,24	18,72	30,21
4	32,9	55,03	65,51	19,04	31,85
5	34,0	54,31	64,76	19,24	30,74
6	31,7	53,18	63,44	19,29	32,37

Arcilla x ₃ molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	37,7	59,62	69,94	17,31	27,37
2	40,2	61,79	72,11	16,70	25,67
3	34,3	58,89	68,60	16,49	28,31
4	40,5	67,70	78,93	16,59	27,73
5	40,1	61,79	72,02	16,56	25,51
6	41,7	70,26	82,00	16,71	28,15

Arcillas sin moler

Arcilla x ₁ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	43,5	66,18	82,97	25,37	38,60
2	40,3	64,14	80,45	25,43	40,47
3	45,3	68,13	85,43	25,39	38,19
4	39,1	61,59	77,33	25,56	40,26
5	45,6	69,47	87,00	25,23	38,44
6	40,6	62,10	78,15	25,85	39,53

Arcilla x ₂ sin moler					

Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	30,9	50,74	60,73	19,69	32,33
2	30,0	47,60	57,07	19,89	31,53
3	31,7	51,67	61,85	19,70	32,16
4	31,0	47,91	57,21	19,41	30,04
5	32,8	50,25	60,09	19,58	29,98
6	33,1	53,76	64,02	19,08	31,01

Arcilla x ₃ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	37,3	62,78	72,47	15,43	25,98
2	39,2	67,18	77,40	15,21	26,07
3	39,1	67,07	77,62	15,73	26,98
4	37,2	64,13	74,05	15,47	26,67
5	43,2	72,68	83,87	15,40	25,90
6	35,7	62,75	72,37	15,33	26,95

Pasta					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	37,5	65,00	75,66	16,40	28,39
2	36,0	62,07	73,38	18,22	31,38
3	37,5	67,19	78,08	16,21	29,02
4	32,6	56,33	65,62	16,49	28,51
5	35,7	62,15	72,22	16,20	28,20
6	35,5	62,27	72,59	16,57	29,07

Promedios de absorción de agua y espacio poroso de las materias primas y la pasta

Tipos de arcilla o pasta	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
Arcilla x_1 molida	23,06	36,68
Arcilla x_2 molida	19,00	31,17
Arcilla x_3 molida	16,73	27,12
Arcilla x_1 sin moler	25,47	39,25
Arcilla x_2 sin moler	19,56	31,17
Arcilla x_3 sin moler	15,43	26,42
Pasta	16,38	29,09

→ Placas correspondientes a la temperatura de quema de 950°C

Arcillas pasadas por el molino

Arcilla x_1 molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	36,9	63,46	77,50	22,12	38,05
2	36,6	64,60	78,98	22,26	39,29
3	35,1	58,02	70,48	21,48	35,50
4	37,7	63,33	77,58	22,50	37,80
5	36,5	62,32	76,26	22,37	38,19
6	34,3	60,92	73,97	21,42	38,05

Arcilla x_2 molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	35,6	61,34	72,62	18,39	31,69

2	34,3	60,66	71,75	18,28	32,33
3	35,7	60,27	71,33	18,35	30,98
4	34,3	61,34	72,43	18,08	32,33
5	36,5	62,60	73,75	17,81	30,55
6	36,6	66,20	78,24	18,19	32,90

Arcilla x ₃ molida					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	41,9	67,56	78,00	15,45	24,92
2	39,2	63,61	73,39	15,37	24,95
3	37,6	63,23	73,63	16,45	27,66
4	32,7	54,47	62,94	15,55	25,90
5	36,4	62,34	72,25	15,90	27,23
6	38,35	64,15	74,24	15,73	26,31

Arcillas sin moler

Arcilla x ₁ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	38,3	58,20	72,50	24,57	37,34
2	40	60,67	75,44	24,34	36,93
3	36,2	55,93	69,66	24,55	37,93
4	36,6	56,53	70,25	24,27	37,49
5	37,2	59,50	73,96	24,30	38,87
6	41,95	61,98	76,90	24,07	35,57

Arcilla x ₂ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	36,2	60,93	72,03	18,22	30,66
2	33,7	58,87	69,5	18,06	31,54

3	33,9	61,38	72,49	18,10	32,77
4	35,4	65,27	77,16	18,22	33,59
5	33,8	58,71	69,27	17,99	31,24
6	34,1	58,87	69,57	18,18	31,38

Arcilla x ₃ sin moler					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	35,1	66,06	75,67	14,55	27,38
2	35,0	66,71	76,47	14,63	27,89
3	34,1	66,11	75,75	14,58	28,27
4	35,9	65,37	74,82	14,46	26,32
5	38,5	73,58	84,41	14,72	28,13
6	36,7	72,23	82,70	14,50	28,53

Pasta

Pasta					
Número de placa	Volumen de la placa	Ps (g)	Ph (g)	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
1	37,6	63,89	74,56	16,70	28,38
2	37,4	61,05	71,24	16,69	27,25
3	37,1	62,30	72,53	16,42	27,57
4	38,6	67,23	78,32	16,50	28,73
5	35,7	60,44	70,38	16,45	27,84
6	39	65,47	76,48	16,82	28,23

Promedios de absorción de agua y espacio poroso de las materias primas y la pasta

Tipos de arcilla o pasta	Absorción de agua (%)	Espacio poroso (%)
Arcilla x ₁ molida	22,03	37,81
Arcilla x ₂ molida	18,18	31,80
Arcilla x ₃ molida	15,74	26,16
Arcilla x ₁ sin moler	24,35	37,35

Arcilla x_2 sin moler	18,13	31,86
Arcilla x_3 sin moler	14,57	27,75
Pasta	16,60	28,00

Anexo F. Mediciones de absorción de agua y resistencia a la flexión de tejas planas y curvadas elaboradas en el taller artesanal con su dosificación inicial.

Absorción de agua de tejas planas				
Lote 1	Muestra	Peso seco	Peso húmedo	Absorción de agua
	L13 (1)	943,49	1090,31	15,56%
	L13 (2)	916,85	1073,21	17,05%
	L13 (3)	911,69	1071,16	17,49%
	L13 (4)	929,21	1087,51	17,04%
	L13 (1*)	915,77	1074,01	17,28%
	L13 (2*)	929,10	1080,81	16,33%
	L13(3*)	922,19	1086,73	17,84%
	L13 (4*)	948,87	1095,18	15,42%
	L13 (5*)	915,98	1075,02	17,36%
	L13 (6*)	911,03	1073,94	17,88%
	L12 (1)	885,66	1044,18	17,90%
	L12 (2)	907,15	1068,30	17,76%
	L12 (3)	920,41	1099,06	19,41%
	L12 (4)	918,27	1083,01	17,94%
	L12 (5)	958,92	1117,62	16,55%

	L12 (6)	947,99	1114,06	17,52%
	L12 (7)	945,36	1106,2	17,01%
	L12 (8)	916,40	1071,65	16,94%
	L12 (9)	948,54	1101,90	16,17%
	L12 (10)	903,21	1062,25	17,61%
Lote 2	M1L2 (1)	901,39	1073,89	19,14%
	M1L2 (2)	921,19	1086,45	17,94%
	M1L2 (3)	906,28	1073,69	18,47%
	M1L2 (4)	955,16	1107,07	15,90%
	M1L2 (5)	951,66	1115,80	17,25%
	M1L2 (6)	909,34	1070,05	17,67%
	M1L2 (7)	917,24	1069,04	16,55%
	M1L2 (8)	918,48	1083,80	18,00%
	M1L2 (9)	925,50	1085,95	17,34%
	M1L2 (10)	921,39	1085,14	17,77%
	M2L2 (1)	909,28	1099,67	20,94%
	M2L2 (2)	941,95	1070,44	13,64%
	M2L2 (3)	945,33	1110,21	17,44%
	M2L2 (4)	961,83	1133,32	17,83%

	M2L2 (5)	936,02	1095,10	17,00%
	M21L2 (6)	932,62	1091,96	17,09%
	M2L2 (7)	923,41	1081,92	17,17%
	M2L2 (8)	951,74	1118,51	17,52%
	M2L2 (9)	905,40	1064,83	17,61%
	M2L2 (10)	917,18	1077,48	17,48%
Lote 3	M1L3 (1)	942,66	1099,10	16,60%
	M1L3 (2)	913,39	1071,82	17,35%
	M1L3 (3)	897,93	1050,64	17,01%
	M1L3 (4)	932,36	1094,68	17,41%
	M1L3 (5)	949,95	1067,95	12,42%
	M1L3 (6)	914,56	1090,45	19,23%
	M1L3 (7)	935,44	1091,40	16,67%
	M1L3 (8)	914,73	1081,54	18,24%
	M1L3 (5*)	915,35	1109,06	21,16%
	M1L3 (6*)	929,65	1071,05	15,21%
	M2L3 (1)	925,16	1086,70	17,46%
	M2L3 (2)	909,98	1071,42	17,74%
	M2L3 (3)	925,93	1087,10	17,41%

	M2L3 (4)	921,29	1080,23	17,25%
	M2L3 (5)	907,23	1074,98	18,49%
	M2L3 (6)	911,03	1070,08	17,46%
	M2L3 (7)	939,62	1093,97	16,43%
	M2L3 (8)	907,56	1067,81	17,66%
	M2L3 (9)	924,13	1091,76	18,14%
	M2L3 (10)	912,80	1076,91	17,98%
Lote 4	M1L4 (1)	944,72	1105,94	17,07%
	M1L4 (2)	909,40	1067,28	17,36%
	M1L4 (3)	955,58	1122,40	17,46%
	M1L4 (4)	946,92	1106,41	16,84%
	M1L4 (5)	925,82	1080,08	16,66%
	M1L4 (6)	939,18	1097,42	16,85%
	M1L4 (7)	948,46	1105,14	16,52%
	M1L4 (8)	903,96	1046,72	15,79%
	M1L4 (9)	962,96	1123,00	16,62%
	M1L4 (10)	960,24	1116,91	16,32%
	M2L4 (1)	946,29	1119,15	18,27%
	M2L4 (2)	949,43	1115,62	17,50%

	M2L4 (3)	952,78	1121,15	17,67%
	M2L4 (4)	949,95	1107,86	16,62%
	M2L4 (5)	953,21	1117,34	17,22%
	M2L4 (6)	950,76	1115,08	17,28%
	M2L4 (7)	948,57	1116,14	17,67%
	M2L4 (8)	927,34	1082,84	16,77%
	M2L4 (9)	930,87	1089,87	17,08%
	M2L4 (10)	928,24	1081,90	16,55%

Absorción de agua de tejas curvadas				
Lote 1	Muestra	Peso seco	Peso húmedo	Absorción de agua
	L11 (1)	923,15	1065,13	15,38%
	L11 (2)	991,48	1144,89	15,47%
	L11 (3)	919,30	1068,33	16,21%
	L11 (4)	882,17	1014,53	15,00%
	L11 (6)	929,07	1071,41	15,32%
	L11 (7)	996,83	1140,96	14,46%
	L11 (8)	914,59	1062,17	16,14%
	L11 (9)	1021,49	1164,10	13,96%
	L11 (10)	886,76	1028,66	16,00%
	L11 (11)	887,17	1026,06	15,66%

Lote 2	M3L2 (1)	923,96	1075,10	16,36%
	M3L2 (2)	891,21	1042,64	16,99%
	M3L2 (3)	909,15	1060,45	16,64%
	M3L2 (4)	892,7	1042,73	16,81%
	M3L2 (5)	861,3	1038,45	20,57%
	M3L2 (6)	891	1002,69	12,54%
	M3L2 (7)	919,34	1071,99	16,60%
	M3L2 (8)	888,16	1030,94	16,08%
	M3L2 (9)	634,53	746,07	17,58%
	M3L2 (10)	612,61	717,28	17,09%
Lote 3	M3L2 (1)	923,66	1081,26	17,06%
	M3L2 (1*)	889,66	1037,91	16,66%
	M3L2 (2)	855,32	981,98	14,81%
	M3L2 (3)	897,45	1044,26	16,36%
	M3L2 (4)	904,55	1037,17	14,66%
	M3L2 (5)	881,02	1020,81	15,87%
	M31L2 (6)	924,98	1089,5	17,79%
	M3L2 (7)	924,88	1063,9	15,03%
	M3L2 (8)	911,84	1073,44	17,72%
	M3L2 (9)	919,95	1067,72	16,06%
Lote 4	M3L4 (1)	898,42	1059,01	17,87%
	M3L4 (2)	951,29	1111,77	16,87%
	M3L4 (3)	911,47	1064,7	16,81%

M3L4 (4)	913,53	1050,15	14,96%
M3L4 (5)	891,26	1043,27	17,06%
M3L4 (6)	911,41	1062,8	16,61%
M3L4 (7)	909,29	1064,05	17,02%
M3L4 (8)	903,64	1062,01	17,53%
M3L4 (9)	920,17	1080,57	17,43%
M3L4 (9)	898,43	1046,15	16,44%

Resistencia a la flexión de tejas planas obtenidas con la dosificación inicial del taller artesanal lote 5.

Muestra	Resistencia a la flexión (Kgf)
1	46
2	42
3	47
4	59
5	42
6	55
7	44
8	50
9	52
10	52

Resistencia a la flexión de tejas curvas obtenidas con la dosificación inicial de los artesanos lote 5.

Muestra	Resistencia a la flexión (Kgf)
1	56
2	59
3	58
4	61
5	64

6	56
7	64
8	58
9	70
10	65

Anexo G. Mediciones de absorción de agua y resistencia a la flexión de tejas planas y curvadas elaboradas en el taller artesanal con la dosificación óptima.

Resultados de resistencia a la flexión y absorción de agua de tejas curvas obtenidas con la dosificación óptima.

Muestra	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)	Absorción de agua (%)
1	73	14,73
2	82	14,04
3	85	13,98
4	77	14,26
5	73	14,75
6	85	13,97
7	87	13,92
8	74	14,59
9	90	13,83
10	88	13,87

Resultados de la resistencia a la flexión y absorción de agua de tejas planas obtenidas con la dosificación óptima

Muestra	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)	Absorción de agua (%)
1	63	15,59
2	79	15,10
3	86	14,95
4	69	15,41
5	81	15,07
6	72	15,32
7	89	14,83
8	75	15,18
9	72	15,25
10	63	15,48