



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ANÁLISIS DE CINCO FORMULACIONES DE MEZCLAS DE ARCILLAS MEDIANTE LA
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BALDOSAS EN LA ETAPA DE PRENSADO Y
COCCIÓN PARA MINIMIZAR LA VARIABILIDAD EN LAS ESPECIFICACIONES DE UN
PRODUCTO CERÁMICO**

Carlos André Hernández Ambrosio

Asesorado por el Ing. Kelinton Ottoniel Sic Cajbón

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE CINCO FORMULACIONES DE MEZCLAS DE ARCILLAS MEDIANTE LA
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BALDOSAS EN LA ETAPA DE PRENSADO Y
COCCIÓN PARA MINIMIZAR LA VARIABILIDAD EN LAS ESPECIFICACIONES DE UN
PRODUCTO CERÁMICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS ANDRÉ HERNÁNDEZ AMBROSIO
ASESORADO POR EL ING. KELINTON OTTONIEL SIC CAJBÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Julio David Vargas García
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE CINCO FORMULACIONES DE MEZCLAS DE ARCILLAS MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BALDOSAS EN LA ETAPA DE PRENSADO Y COCCIÓN PARA MINIMIZAR LA VARIABILIDAD EN LAS ESPECIFICACIONES DE UN PRODUCTO CERÁMICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 6 de febrero de 2020.



Carlos André Hernández Ambrosio

Guatemala 21 de abril de 2022

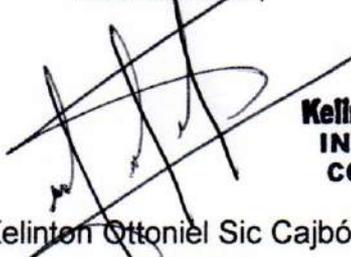
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "**ANÁLISIS DE CINCO FORMULACIONES DE MEZCLAS DE ARCILLAS MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BALDOSAS EN LA ETAPA DE PENSADO Y COCCIÓN PARA MINIMIZAR LA VARIABILIDAD EN LAS ESPECIFICACIONES DE UN PRODUCTO CERÁMICO.**", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Carlos André Hernández Ambrosio, quien se identifica con el registro académico 2014-04239 y con el CUI 2724 58112 01 01.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Kelinton Ottoniel Sic Cajbón
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 2164

Kelinton Ottoniel Sic Cajbón
INGENIERO QUIMICO
COLEGIADO No. 2164



Guatemala, 10 de octubre de 2022.
Ref. EIQ.TG-IF.030.2022.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **091-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos André Hernández Ambrosio**.
Identificado con número de carné: **2724581120101**.
Identificado con registro académico: **201404239**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**ANÁLISIS DE CINCO FORMULACIONES DE MEZCLAS DE ARCILLAS
MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE BALDOSAS EN LA
ETAPA DE Prensado Y COCCIÓN PARA MINIMIZAR LA VARIABILIDAD EN
LAS ESPECIFICACIONES DE UN PRODUCTO CERÁMICO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Kelinton Ottoniel Sic Cajbón, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


INGENIERO QUÍMICO
WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ
COL. 1734


William Eduardo Fagiani Cruz
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

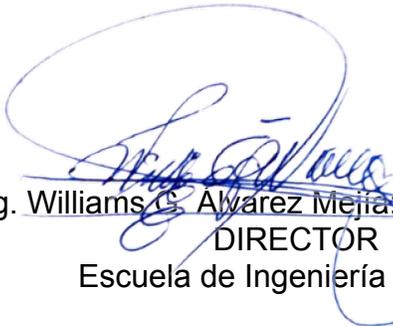
C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.031.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE CINCO FORMULACIONES DE MEZCLAS DE ARCILLAS MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BALDOSAS EN LA ETAPA DE PRENSADO Y COCCIÓN PARA MINIMIZAR LA VARIABILIDAD EN LAS ESPECIFICACIONES DE UN PRODUCTO CERÁMICO**, presentado por: **Carlos André Hernández Ambrosio**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams C. Álvarez Mejía, U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2023.



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.192.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE CINCO FORMULACIONES DE MEZCLAS DE ARCILLAS MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE BALDOSAS EN LA ETAPA DE PRENSADO Y COCCIÓN PARA MINIMIZAR LA VARIABILIDAD EN LAS ESPECIFICACIONES DE UN PRODUCTO CERÁMICO**, presentado por: **Carlos André Hernández Ambrosio**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, febrero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser una importante influencia en mi carrera.
Mis padres	Nora Ambrosio y Hugo Hernández. Por darme su apoyo desde el inicio hasta el final de mi carrera.
Mis hermanos	Jetro y Aida. Hernández Mis ejemplos y amigos de toda la vida.
Mis tíos	Por estar siempre pendiente y presente.
Mi abuelo	Ramiro Hernández, por compartir conmigo el anhelo de culminar la carrera.
Mi novia	Sofia Coronado, por entenderme en todo y demostrarme su apoyo todos los días.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por formarme académicamente.
Facultad de Ingeniería	Por enseñarme los conocimientos necesarios para poder desempeñarme profesionalmente.
Mis amigos de la Facultad	Tiffany Martínez, Fredy Morales, Sergio Velásquez y Fernanda Mendizábal. Por su apoyo y momentos únicos.
Mi asesor	Kelinton Sic, por su paciencia y tiempo dedicado en su asesoría.
Personal de laboratorio	Felipe Palencia, por su apoyo en pruebas realizadas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Antecedentes:.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Arcillas	5
2.2. Pasta	6
2.3. Materias primas de la pasta.....	7
2.3.1. Sílice (<i>SiO₂</i>)	7
2.3.2. Carbonatos	8
2.3.3. Alúmina (<i>Al₂O₃</i>).....	8
2.3.4. Hidróxidos minerales	9
2.4. Molienda	9
2.5. Características de polvos para prensado	11
2.6. Prensado	13
2.7. Características de polvos prensados.....	14
2.8. Cocción.....	16

2.8.1.	Las transformaciones que se desarrollan en la cocción	17
2.8.2.	Ciclo de cocción	19
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	21
3.1.	Variables	21
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	22
3.3.	Recurso humano disponible.....	22
3.4.	Recurso material disponible	22
3.4.1.	Equipo	22
3.4.2.	Cristalería	23
3.4.3.	3Reactivos.....	23
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	23
3.6.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	24
3.7.	Análisis estadístico.....	28
3.7.1.	Número de repeticiones	29
3.7.2.	Análisis de varianza	29
4.	RESULTADOS.....	33
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	43
	CONCLUSIONES.....	49
	RECOMENDACIONES	51
	BIBLIOGRAFÍA.....	53
	APÉNDICES.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva de gresificación de arcilla 1 realizado por empresa externa.	2
2.	Densidad aparente de las 5 formulas analizadas.....	34
3.	Resistencia a la flexión en crudo de las 5 formulas analizadas	35
4.	Resistencia a la flexión en cocido de las 5 formulas analizadas.	35
5.	Curva de gresificación de fórmula 1	37
6.	Curva de gresificación de fórmula 2.....	38
7.	Curva de gresificación de fórmula 3.....	39
8.	Curva de gresificación de fórmula 4.....	40
9.	Curva de gresificación de fórmula 5.....	41

TABLAS

I.	Análisis Químico de las arcillas	1
II.	Carbonato, plasticidad y comportamiento en la cocción de arcilla 1 y 2 según empresa externa.....	3
III.	Tamaño de grano en operaciones básicas de molturación	10
IV.	Definición operacional de variables cuantificables.	21
V.	Carbonato de calcio en arcillas.	24
VI.	Índice de plasticidad de las arcillas.	24
VII.	Contracción lineal de las arcillas.	25
VIII.	Resistencia en crudo de arcillas.....	26
IX.	Densidad aparente de las fórmulas.....	26
X.	Distribución granulométrica.	26

XI.	Curva de gresificación para fórmula 1.....	27
XII.	Organización de datos para método ANOVA.....	29
XIII.	Características de arcilla 1,2 y 3	33
XIV.	Características de la arcilla cocida.....	33
XV.	Porcentaje de adición de arcilla en la formulación de la pasta cerámica.	34
XVI.	Distribución granulométrica de las 5 formulaciones	36
XVII.	Contracción lineal y absorción de fórmula 1	36
XVIII.	Contracción lineal y absorción de fórmula 2	37
XIX.	Contracción lineal y absorción de fórmula 3	38
XX.	Contracción lineal y absorción de fórmula 4	39
XXI.	Contracción lineal y absorción de fórmula 5	40

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CaCO₃	Carbonato de calcio
cm	Centímetro
C.L	Contracción lineal
ρ	Densidad
H₁	Hipótesis alterna
H₀	Hipótesis nula
ITC	Instituto de tecnología cerámica
kg	Kilogramo
μm	Micrómetros
% m/m	Porcentaje masa
% v/v	Porcentaje volumen
T	Temperatura en °C
t	Tiempo en segundos, s
U	Unidades
μ	Viscosidad

GLOSARIO

Abrasión	Es la forma común de desgaste. Es causada por cuerpos externos moviéndose sobre una superficie. En general son partículas generales de arena y óxido.
Arcilla	Rocas extremadamente variables, constituidas por diferentes minerales, generalmente de naturaleza silicatada, sedimentadas en forma de láminas, fibras, bandas, entre otros.
Calibres	Intervalo que el fabricante define para agrupar las baldosas de una misma medida nominal, porque siempre existen diferencias de tamaño propias del proceso de producción.
Cocción	Consiste en la transmisión de energía al producto seco hasta una temperatura establecida y durante un tiempo determinado, para que se puedan desarrollar las transformaciones químicas y físicas que llevan a la pasta a adquirir las propiedades requeridas.
Corazón negro	Defecto de coloración oscura que aparece en el interior de las piezas cerámicas después de la cocción.

Descarbonización	Liberación de dióxido de carbono de las baldosas en la etapa de cocción.
Engobe	Producto que precede la aplicación de esmalte que da adherencia al soporte y es capaz de uniformizar la absorción de agua de las sucesivas aplicaciones.
Esmalte	El esmalte es un compuesto en suspensión formado de materiales fundentes y cuarzo que se aplica sobre una pieza cerámica antes de ponerse en el horno.
Gresificación	La gresificación de una pasta, es llevarla a una temperatura donde el porcentaje de absorción de agua es mínimo, coincidiendo con el máximo de contracción de la pasta en la cocción.
Impresión digital	Sistema mediante inyectores de tinta que funcionan de acuerdo con el principio físico eléctrico por el cual, en un conducto flexible, se genera un campo magnético que lo obliga a expulsar la tinta sobre la superficie cerámica.
Indentación	Método que consiste en determinar la fuerza necesaria para introducir un punzón con terminación cónica en masas preparadas a distintos contenidos en humedad.

Molino de bolas	Molino que funciona por el principio de impacto y fricción. La reducción de tamaño se logra cuando los medios de molienda característicos de ese equipo impactan entre ellas y contra las partículas del material a fraccionar.
Pasta	Mezcla equilibrada de materias primas que aportan plasticidad, es decir, permiten su modelado, y de materias primas no plásticas o desengrasantes. Las materias primas plásticas empleadas son las arcillas y los caolines y los desengrasantes frecuentemente empleados son los feldespatos, carbonatos, cuarzo y talco.
Pasta roja	Pasta con contenidos en óxido de hierro que oscilan entre el 4 % y 9 % en masa.
Prensado	Operación de conformada basada en la compactación de un polvo contenido en un molde rígido o flexible, mediante la aplicación de presión.
Resistencia mecánica	La resistencia que ofrece la acción de fuerzas mecánicas, tanto internas como externas se mide mediante su módulo de rotura y se expresa frecuentemente en kg/cm ² .

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal analizar cinco formulaciones de mezclas de tres diferentes arcillas, para la reducción en la variabilidad en las especificaciones del producto cerámico en una fábrica con proceso de monococción.

Fueron caracterizadas la arcilla 1, arcilla 2 y arcilla 3 a nivel laboratorio, considerando propiedades relacionadas en las etapas de prensado y primera cocción.

Para empezar, se evaluaron las propiedades de la arcilla molturada: índice de plasticidad con el método de *Pfefferkorn* y calcimetría con el método de Bernard. Luego se evaluaron las propiedades en la etapa de prensado: resistencia a la flexión de piezas cocidas a una misma presión representativa al parámetro de producción de la fábrica de estudio. Por último, se analizaron las propiedades de arcilla cocida: contracción lineal en función de la temperatura desde 1 100 °C hasta 1 160 °C en intervalos de 20 °C, en un horno de laboratorio. Con los valores obtenidos de cada arcilla, se determinó el porcentaje de adición para 5 fórmulas.

Se evaluó la distribución granulométrica de cada una de las 5 formulas con tamices utilizados para vía seca, la molturación se realizó con un molino de bolas de laboratorio. Se evaluó la densidad aparente mediante inmersión en mercurio y también se evaluó la resistencia a la flexión en función de 160 a 220 bar en una prensa hidráulica manual a intervalos de 20 bar. Se realizó la curva de

gresificación en un intervalo de 1 100 °C hasta 1 160 °C en intervalos de 20 °C para estimar la temperatura máxima de cocción.

Según los resultados, la arcilla 3 posee la mayor plasticidad de las 3 arcillas, por lo que se agregó un 12,00 % constante en las 5 formulaciones. La arcilla 1 contiene la mayor cantidad de carbonato de calcio de las 3 arcillas, por lo que se agregó en un porcentaje mayor al 47,00 % en todas las formulaciones y la arcilla 2, con valores intermedios de plasticidad y carbonato de calcio entre las 3 arcillas, se agregó entre un 40,00 % y 0,00 % en las 5 formulaciones. La presión óptima de las fórmulas 1,3,4 y 5 es 180 bar y de la fórmula 2 es 220 bar debido a los resultados inferiores al valor mínimo exigido por la fábrica de estudio de densidad aparente, resistencia a la flexión en crudo y al alto contenido de gruesos que pueden afectar los punzones. La temperatura máxima de cocción para las 5 formulas analizadas es 1 120 °C, a temperaturas superiores de 1 120 °C, las baldosas sufren una contracción lineal que afecta considerablemente en la dimensión de las piezas.

OBJETIVOS

General

Evaluar cinco formulaciones de mezclas de arcillas para la reducción en la variabilidad en las especificaciones del producto cerámico, en base a la caracterización fisicoquímica de las arcillas y las pastas en una industria de baldosa cerámica.

Específicos

1. Determinar el porcentaje de adición de tres arcillas en la formulación de la pasta cerámica a partir del índice de plasticidad, calcimetría, comportamiento en el prensado, contracción lineal y temperatura máxima de cocción.
2. Determinar la presión óptima en la etapa de prensado a partir de la densidad aparente, distribución granulométrica y de la resistencia mecánica del material crudo y cocido en las cinco formulaciones de mezclas de arcillas.
3. Determinar la temperatura máxima de cocción de las cinco formulaciones de mezclas de arcillas a partir de la curva de gresificación.

HIPÓTESIS

- Hipótesis estadística

Hipótesis nulas

H_{0,1}: No existe diferencia significativa entre la contracción lineal y la temperatura máxima de cocción en las arcillas.

H_{0,2}: No existe diferencia significativa entre la presión y la densidad aparente, resistencia a la flexión de las piezas de las arcillas.

H_{0,3}: No existe diferencia significativa entre la contracción lineal y la temperatura máxima de cocción de las fórmulas determinadas.

H_{0,4}: No existe diferencia significativa entre la presión y la densidad aparente, resistencia a la flexión de las piezas de las fórmulas determinadas.

H_{0,5}: No existe diferencia significativa entre la absorción y la temperatura máxima de cocción en las fórmulas determinadas.

Hipótesis alternas

H_{a,1}: Existe diferencia significativa entre la contracción lineal y la temperatura máxima de cocción en las arcillas.

H_{a,2}: Existe diferencia significativa la densidad aparente, resistencia a la flexión de las piezas de las arcillas y la presión en las arcillas.

H_{a,3}: Existe diferencia significativa entre la contracción lineal y la temperatura máxima de cocción de las fórmulas determinadas.

H_{a,4}: Existe diferencia significativa entre densidad aparente, resistencia a la flexión y la presión de las fórmulas determinadas.

H_{a,5}: Existe diferencia significativa entre la absorción y la temperatura máxima de cocción en las fórmulas determinadas.

INTRODUCCIÓN

En la producción de piso y azulejo cerámico, la caracterización de las arcillas y el porcentaje de adición de arcillas, si se trabaja con más de una arcilla, es muy importante porque define los parámetros que se trabajarán en diferentes etapas de producción.

Si una arcilla es muy abrasiva, puede desgastar con mayor frecuencia los péndulos del molino de rodillos y también puede desgastar los punzones en la etapa de prensado. Una plasticidad elevada de una arcilla puede afectar directamente en la contracción lineal de la pieza y afectar los calibres del producto final. Una pieza con calibre diferente en un mismo lote de producción puede que dificulte en la instalación o que no se pueda instalar. La contracción lineal variable en una producción continua también puede afectar en cambiar constantemente los parámetros de cocción en los hornos. La resistencia a la flexión en crudo es un factor interno que favorece el transporte de las piezas antes de la cocción y la resistencia a la flexión en cocido también es un factor interno que favorece en el transporte después de la primera cocción, y externo porque le da resistencia ante agresiones de cualquier naturaleza en la instalación y después de instalado. Una fórmula con absorción de agua baja puede afectar en el secado después de la aplicación de engobe, esmalte e impresión digital, lo que puede causar defectos superficiales que afecten la calidad en producción, también puede afectar en la instalación, ya que los adhesivos utilizados para la instalación se mezclan con agua y dicha agua es absorbida por la pieza luego de instalarla.

Es por ello por lo que este estudio buscó dejar los parámetros ideales de trabajo en la etapa de prensas y cocción de cada una de las 5 fórmulas analizadas para lograr estabilidad en las características del producto a fabricar.

1. ANTECEDENTES

1.1. Antecedentes:

En noviembre de 2014, una empresa externa presentó un estudio de materias primas y polvo atomizado de la composición actual en ese año, debido a que se tuvo un desgaste importante en los moldes de la prensa en la fabricación de baldosas de pasta roja. El estudio no menciona el tiempo de desgaste de los punzones. Se realizó un análisis químico de la arcilla 1 y 2 de la industria cerámica demostrando que la presencia de cuarzo es la que predomina en un 65,20 % para la arcilla 1 y en un 55,85 % para la arcilla 2.

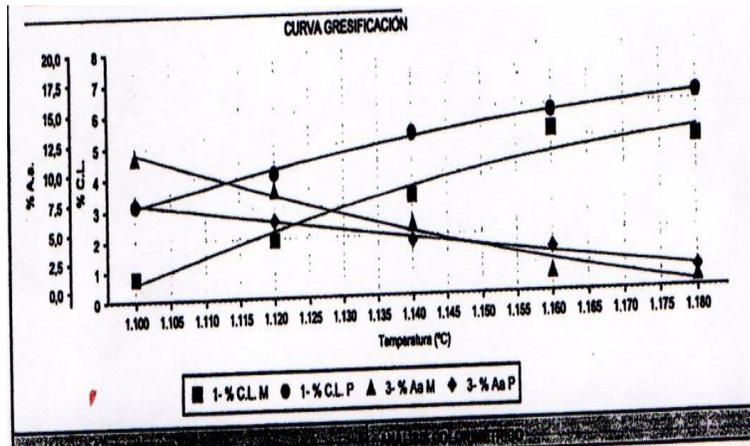
Tabla I. **Análisis Químico de las arcillas**

Compuesto en %	Arcilla 1	Arcilla 2
SiO ₂	65,20	55,85
Al ₂ O ₃	10,24	9,76
Na ₂ O	0,64	0,81
K ₂ O	2,03	2,38
Fe ₂ O ₃	6,72	4,99
TiO ₂	0,77	0,66
CaO	0,87	5,35
MgO	1,64	1,69

Fuente: elaboración propia, con base en el Informe No. H1014 realizado en fábrica. p. 7.

Según la curva de gresificación en la ilustración 1 de la arcilla 1, la porosidad disminuye del 5,49 % al 0,2 % de 1 140 °C a 1 160 °C; por lo que se recomendó no introducir elevados porcentajes de dicha materia prima ya puede ocasionar inestabilidad.

Figura 1. **Curva de gresificación de arcilla 1 realizado por empresa externa**



Fuente: elaboración propia, con base en el Informe No. H1014. p. 13.

En función de las pruebas de granulometría, contenido de carbonatos, compactación, plasticidad, se determinó que la arcilla 2 es la responsable del comportamiento plástico, y en consecuencia de que tenga un buen comportamiento en prensado y una buena resistencia mecánica en seco.

En el estudio se aconsejó no introducir elevados porcentajes de dicha materia prima ya que puede causar inestabilidad.

De la arcilla 2 se determinó que es de comportamiento plástico y en consecuencia de que tenga un buen comportamiento en prensado y una buena resistencia mecánica en seco.

En abril de 2019, otra empresa externa realizó un estudio para caracterizar la arcilla 1, 2 Y 3 mediante el contenido de carbonatos, comportamiento en la cocción e índice de plasticidad. El contenido de carbonatos lo determinaron

mediante un calcímetro de Bernard y el comportamiento en la cocción mediante probetas cilíndricas de 4 cm de diámetro y 7 mm de espesor, prensadas a una humedad del 5,5 % y 300 bar de presión, la contracción de cocción se evaluó por diferencia entre el diámetro en crudo y en cocido. La plasticidad se calculó por el método de indentación a partir de las muestras molturadas con tamiz de salida de 500 μm .

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla II. **Carbonato, plasticidad y comportamiento en la cocción de arcilla 1 y 2 según empresa externa**

Propiedad	Arcilla 1	Arcilla 2	Arcilla 3
Carbonato en %	8,8	9,4	1,17
Plasticidad en unidades	16,0	19,0	29,0
Contracción lineal a 1 100 °C en %	0,4	1,7	9,0
Contracción lineal a 1 150 °C en %	3,4	3,2	10,5
Absorción de agua a 1 100 °C en %	12,7	11,2	5,6
Absorción de agua a 1 150 °C en %	5,8	8,4	0,5

Fuente: elaboración propia, con base en el Informe C191115. p. 5.

Se indicó que las dos arcillas presentan contenidos de carbono orgánico bajos, por lo que no deberían generar problemas de corazón negro.

Se determinó que la arcilla 1 presenta una plasticidad media y buen comportamiento en el prensado. En cocción, su contenido en carbonatos hace que no sea la alternativa más adecuada para obtener una baja absorción de agua

en las baldosas. La arcilla 2 puede formar parte de las propuestas de fórmulas, para baldosas con baja absorción de agua. Se recomendó eliminar la arcilla 3 por su elevada plasticidad y ejercer un contrapuesto al aporte del carbonato de calcio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Arcillas

Según la Asociación Española de Técnicos cerámicos, las arcillas se definen como: rocas extremadamente variables, constituidas por diferentes minerales, generalmente de naturaleza silicatada, sedimentadas en forma de láminas, fibras, bandas, entre otros.

Predominantemente asociadas a otros minerales de origen detrítico, que a menudo desempeñan un papel clave. La variedad es extremadamente amplia, ya que son innumerables las combinaciones de roca inicial, condiciones morfológicas y climáticas, tipo de erosión y alteración, condiciones de transporte y sedimentación, estado y tiempo de yacimiento.

Las formaciones arcillosas pueden ser muy distintas en cuanto a su composición, grado de consolidación, edad, entre otros. Los materiales arcillosos se encuentran agrupados en función de:

- Cohesión y contenido de agua: diferenciando así las arcillas plásticas de las litificadas.
- Composición: diferenciando las arcillas puras de las carbonáticas y de las arenosas.

2.2. Pasta

Es la mezcla equilibrada de materias primas que aportan plasticidad, es decir, que permiten el modelado, y de materias primas no plásticas o desengrasantes. Las materias primas plásticas empleadas son las arcillas y los caolines, y los desengrasantes frecuentemente empleados son los feldespatos, carbonatos, cuarzo y talco. En algunas composiciones se emplean también pigmentos, colorantes y fritas. Para su tratamiento en el proceso de fabricación se emplean aditivos, como los defloculantes. La pasta cerámica debe cumplir una serie de exigencias que la hacen útil y rentable para la fabricación de baldosas. La pasta conforma lo que se denomina el soporte del producto, que puede ir esmaltado o no.

Según su color tras la cocción se consideran dos tipos de pastas:

Pasta blanca: es una mezcla equilibrada de baja proporción de óxido de hierro, normalmente inferior al 1 % y de otros materiales como cuarzo, feldespatos, talco o carbonatos.

Pasta roja: se obtiene empleando arcillas con contenidos en óxido de hierro que oscilan entre el 4 % y el 9 %.

No existen diferencias técnicas importantes entre los productos fabricados con ambas pastas, aunque sí, en su comportamiento en el proceso de fabricación.

2.3. Materias primas de la pasta

La pasta cerámica es un tipo de mezcla constituida por arcilla, desengrasante y fundente. El desengrasante disminuye la plasticidad natural de las arcillas. El fundente permite conseguir una mejor vitrificación.

2.3.1. Sílice (SiO_2)

La estructura mineralógica de la sílice está formada por un tetraedro con aniones de oxígeno en los vértices y, en el centro, el átomo de silicio, en su conjunto, por lo tanto, un tetraedro individual posee cuatro cargas negativas.

La sílice anhídrida se presenta en tres formas cristalinas: cuarzo, tridimita y cristobalita y una fase amorfa vítrea. Cada especie fundamental presenta unas variedades que resultan estables dentro de determinados intervalos de temperatura.

En el sector cerámico, el principal objetivo es el desengrasado de las mezclas, favoreciendo la desgasificación de las eventuales impurezas presentes en las materias primas, sustancias orgánicas y la eliminación del agua durante el proceso del secado.

Se originan por deposición de tipo químico, a partir de soluciones salinas sobresaturadas y por acumulación de residuos minerales de organismos marinos muertos.

2.3.2. Carbonatos

- Calizas $CaCO_3$

Se originan por deposición de tipo químico, a partir de soluciones salinas sobresaturadas y por acumulación de residuos minerales de organismos marinos muertos.

- Dolomitas $CaMg(CO_3)_2$

Se produce una sustitución por intercambio iónico del calcio por magnesio en la roca caliza ($CaCO_3$).

- Magnesitas: $MgCO_3$

Es un mineral de composición química fundamentalmente carbonato de magnesio con impurezas de Fe, Mn, Ca, Co o Ni, que le dan sus variadas coloraciones.

2.3.3. Alúmina (Al_2O_3)

Junto con la sílice, es el componente más importante en la constitución de las arcillas y los esmaltes, confiriéndoles resistencia y aumentando su temperatura de maduración.

2.3.4. Hidróxidos minerales

Se caracterizan por importantes fracciones coloidales y representan un problema durante la fase de secado y precalentamiento, ya que, debido a su alto contenido de hidroxilos, provocan ajustes dimensionales en las piezas.

2.4. Molienda

Según Galindo Renau, cuando se habla de molienda de sólidos, se entiende toda una serie de operaciones tendentes a la reducción de las dimensiones de los materiales que va desde la pretituración gruesa hasta la pulverización extrema. La molienda no pretende solamente obtener pequeñas partículas de un tamaño de partida aproximado, sino más bien de producir un material con un determinado diámetro de partícula y una distribución granulométrica adecuada para el producto que se desea obtener.

El trabajo de reducción granulométrica puede ser subdividido en dos fases principales:

Trituración: se extiende desde los bloques gruesos de material de la cantera hasta las dimensiones del orden de algún milímetro.

Molienda: se extiende hasta dimensiones micrónicas. Se distingue, aquí la molienda primaria, hasta 0,5 mm.

Tabla III. **Tamaño de grano en operaciones básicas de molturación**

	Entrada	Salida
Trituración	30 a 20 mm	5 a 10 mm
Molienda	5 a 10 mm	<50 μm

Fuente: SACMI. *Tecnología de la cerámica aplicada, Volumen II*. p. 24.

Molienda vía seca: es una reducción de tamaño mecánica en la que los materiales se molturan con un grado de humedad inferior al 10 % según el tipo de máquina empleado. El resultado es un material pulverulento en el que predominan las partículas y agregados, con una pequeña proporción de aglomerados.

Existen diferentes alternativas tecnológicas para realizar la molienda en seco. Los equipos más viables para molturar las composiciones para baldosas cerámicas son los molinos verticales de rodillos y los molinos pendulares.

En el molino vertical de rodillos el material se deposita sobre una pista de molienda sobre la que giran unos rodillos que son presionados mediante pistones hidráulicos. En el borde de la pista, el material molido desborda por un anillo de contención y es impulsado por una corriente de aire hacia el separador. La fracción fina se eleva hacia el separador dinámico, situado en la parte superior del molino y las fracciones gruesas son devueltas a la pista de molienda donde son de nuevo molturadas.

2.5. Características de polvos para prensado

Los gránulos de polvo para prensado deben poseer una densidad, forma, distribución granulométrica y humedad que permitan la carga homogénea de los alveolos del molde y la formación de una microestructura uniforme que confiera a las baldosas las características técnicas.

- **Humedad:** el agua es el ligante empleado en la compactación de baldosas cerámicas. Influye en la compacidad de las baldosas en verde y en seco, de manera que, en el rango de humedades de trabajo habituales y manteniendo la presión y la granulometría constantes, cuanto mayor sea la humedad de trabajo, mayor es la densidad aparente obtenida.
- **Distribución granulométrica:** la distribución granulométrica de un material nos indica la distribución de tamaños de sus componentes. Cuando se hace referencia a la distribución granulométrica de un polvo para prensado debe diferenciarse entre la distribución granulométrica de las partículas y agregados que forman el polvo y la de los gránulos formados en el proceso de granulado.

El método más sencillo para medir la distribución de tamaños de una muestra es el tamizado. Se usa ampliamente en medidas de distribuciones granulométricas a causa de la simplicidad de operación y de interpretación de la técnica, de su bajo coste y de su buena fiabilidad. El tamizado consiste en la separación mecánica de las diferentes fracciones granulométricas cuando se pasan a través de series de tamices cuya abertura exacta es conocida. La fracción del material que queda retenida en cada tamiz se denomina residuo y son partículas de diámetro superior o igual a la abertura del tamiz, La fracción que pasa a través de cada tamiz se denomina cernido.

El tamizado vía seca se emplea básicamente para la determinación de distribuciones granulométrica de polvos. Se usan batería de tamices de diferente luz de malla ordenados de mayor a menor, perfectamente encajados y montados en un soporte dotado de movimiento vibratorio regulado a voluntad. Debe mantenerse un estricto control sobre el tiempo y la intensidad de vibración.

Para caracterizar un tamiz debe definirse un parámetro que nos informe sobre el tamaño de la abertura.

Número de malla: número de aberturas del tamiz por unidad de longitud o de superficie. Este parámetro nos permite conocer exactamente la abertura del orificio, puede inducir a la confusión ya que su valor dependerá del espesor del hilo utilizado.

Luz de malla: es la distancia entre dos hilos consecutivos.

- Plasticidad

Albert Atterberg definió como plasticidad a la capacidad que tenía un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni producir rebote elástico. A su vez observó que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado, y que las arenas son desmenuzables en condiciones sueltas y secas. También observó que existían arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad.

- Índice de plasticidad

Indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica.

2.6. Prensado

El prensado es una operación de conformado, basada en la compactación de un polvo contenido en un molde rígido o flexible, mediante la aplicación de la presión.

Los objetivos de la operación de prensado son conformar productos con las dimensiones deseadas y sin defectos ni mermas inaceptables en la calidad y configurar una microestructura apropiada para los requerimientos de las etapas del proceso de fabricación, que permita conseguir las características de calidad exigidas el producto acabado.

Durante el proceso tienen lugar tres operaciones al mismo tiempo: la formación, por la que se da forma geométrica al producto, la compactación, que le da la consistencia que le permite resistir en crudo todas las acciones mecánicas y fisicoquímicas a que será expuesto durante el proceso de fabricación (secado, transporte, aplicación de esmaltes, decoración) y la densificación mediante la cual se reducen los huecos existentes entre los gránulos y entre las partículas de la pasta y la densificación mediante el cual se reducen los huecos existentes entre los gránulos y entre las partículas de la pasta. Los factores que influyen en la operación de prensado son: el ciclo de prensado y las características del polvo a prensar.

2.7. Características de polvos prensados

- Compactación

Es el empaquetamiento, por efecto de la presión, de partículas no deformables que inicialmente estaban unidas entre sí formando gránulos que se deforman completamente durante el prensado.

- Densidad aparente

Es el peso por unidad de volumen de polvo, incluyendo la fase sólida, la porosidad, huecos interiores, de los granos individuales y el aire entre las partículas individuales del polvo.

- Densidad aparente por inmersión en mercurio

Este método fue desarrollado y patentado por la Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas y se ha venido empleado de forma mayoritaria en el sector de fabricación de baldosas cerámicas para determinar la densidad aparente de probetas a partir de la medida del empuje hidrostático experimentado por una pieza o probeta cerámica sumergida en mercurio. De acuerdo con el principio de Arquímedes, la muestra, sumergida en mercurio, desplaza un volumen igual a su volumen aparente y experimenta un empuje igual al peso del mercurio desplazado, por lo que la densidad aparente puede determinarse de acuerdo con la expresión:

$$\rho_a = \frac{W_S}{W_L} * \rho_{Hg} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

En donde:

W_S : Peso de la muestra en g

W_L : Peso de la muestra sumergida en mercurio en g. Es la suma del peso de la propia muestra en el aire más la fuerza necesaria para sumergirla en mercurio.

ρ_{Hg} : Densidad del mercurio en g/cm^3

- Resistencia mecánica en crudo

Por resistencia mecánica de un material puede entenderse, de modo muy genérico, la resistencia, medida en unidades de fuerza por unidad de superficie, que ofrece a la acción de fuerzas mecánicas, tanto internas como externas. Se mide mediante su módulo de rotura de diferentes maneras, como por ejemplo mediante tensión, compresión, flexión, torsión o cizalla.

Un material cerámico crudo se rompe cuando la carga aplicada excede de un valor crítico denominado carga de rotura. Según los modelos clásicos, las partículas que forman el material se encuentran en contacto unas con otras por lo que es lógico pensar que la resistencia a la rotura dependerá directamente de las fuerzas de unión que operen entre ellas.

La resistencia mecánica de las baldosas cerámicas tanto crudas como cocidas, se evalúa habitualmente mediante la resistencia a la flexión, por ser el procedimiento que ofrece una mayor sencillez y precisión de los resultados frente a los métodos uniaxiales de determinación del módulo de rotura, como la resistencia a la compresión.

La resistencia a la flexión se determina midiendo la fuerza necesaria para romper una probeta de geometría paralelepípedica y de dimensiones conocidas, apoyada en dos rodillos separados por una distancia que es también conocida.

Suposiciones durante el ensayo:

Las secciones transversales de la probeta permanecen planas después de que esta sea flexionada.

- La curvatura de la pieza antes de romperse es despreciable frente a su longitud.
- No se produce pandeo de los lados de la pieza ni concavidad de la superficie de la misma como consecuencia de la presión aplicada.
- La probeta es homogénea e isotrópica.

Para el control de la resistencia mecánica de baldosas crudas puede emplearse el equipo para la determinación de la resistencia a la flexión de baldosas cocidas según la norma UNE-EN-ISO 10545-4:2014.

2.8. Cocción

La cocción es la operación fundamental del proceso tecnológico, ya que da origen al material cerámico, transformando las materias primas de la pasta en nuevos compuestos cristalinos y vítreos que confieren al producto cocido unas propiedades concretas: la insolubilidad y la solidez que garantizan el mantenimiento de la forma, la resistencia mecánica, la porosidad o la impermeabilidad, la resistencia química, entre otros.

La cocción consiste en el calentamiento, por lo tanto, en la transmisión de energía al producto seco hasta una temperatura establecida y durante un tiempo determinado, para que se puedan desarrollar las transformaciones químicas y

físicas que llevan a la pasta adquirir las propiedades requerida del producto cerámico. En el pasado la temperatura a alcanzar, el tiempo y las modalidades de cocción se decidieron en función de la experiencia, actualmente, los mismos parámetros operativos se establecen en función de los conocimientos químicos y del comportamiento técnico de las materias primas empleadas y a través de los análisis preliminares realizados sobre las mismas especialmente mediante los análisis térmicos. Los equipos actualmente disponibles permiten reproducir de modo cada vez más preciso, las condiciones de operación, realizando cocciones extremadamente controladas, la base indispensable de cualquiera producción normalizada y serial.

2.8.1. Las transformaciones que se desarrollan en la cocción

La cocción se realiza a través de la propagación del calor dentro del horno. El calor provoca la dilatación de los productos, a causa del aumento de la amplitud de las vibraciones de los átomos que los compone. La magnitud de este fenómeno depende de la naturaleza química del material, de su estructura cristalina o vítrea y de sus proporciones relativas, de las transformaciones que se desarrollan durante el calentamiento.

Ya que los materiales que componen los productos sufren, en el transcurso de la cocción, transformaciones que conducen a la desaparición de determinados compuestos y a la formación de otros nuevos, la dilatación refleja esta evolución con un desarrollo en función de la composición inicial de la pasta, de las transformaciones que se producen y de la temperatura alcanzada, la dilatación de la pieza es irreversible.

La cocción provoca una serie de transformaciones estrechamente correlacionadas entre sí: disminución de la porosidad, aumento de la densidad, reacciones sólido-sólido y sólido-líquido.

En el interior del horno, durante el proceso de cocción, se pueden identificar zonas térmicas críticas, a causa de las reacciones de tipo genéricamente químico que se puedan desarrollar:

Las transformaciones en la etapa de cocción son las siguientes:

- Por encima de 100 °C: eliminación del agua higroscópica, o la humedad residual después de un secado no perfecto.
- Hasta 200 °C: eliminación del agua zeolítica o de cristalización, cuyas moléculas están ligadas por absorción a estructuras cristalinas.
- Entre 350 °C y 650 °C: combustión de las sustancias orgánicas, que pueden estar presentes en diferentes proporciones en las arcillas, y la disociación oxidante de los sulfuros minerales con la liberación de anhídrido sulfuroso.
- Entre 450 °C y 650 °C: eliminación del agua de constitución y consiguiente destrucción del retículo cristalino arcilloso.
- A 573 °C transformación alotrópica del cuarzo α en β , que genera un brusco aumento de volumen.
- Entre 800 °C y 980 °C: descarbonización de la caliza y la dolomita con la liberación de CO_2

- A partir de 700 °C: formación de nuevas fases cristalinas constituidas por el SiO_2 de los silicatos y silicoaluminatos complejos.
- A partir de 900 °C: disociación térmica de las otras sales presentes, como los sulfatos y fluoruros.
- Temperaturas superiores a 1 000 °C, se pueden evaporar algunos componentes de las pastas y los revestimientos como los óxidos alcalinos, el óxido de plomo, el óxido de cinc, el anhídrido bórico.

2.8.2. Ciclo de cocción

- Pre-horno

Es la zona de entrada de las baldosas en el horno, destinada a la eliminación del agua higroscópica residual después del proceso de secado principal, después del esmaltado y después de la estancia en un ambiente higroscópicamente desfavorable: es aceptable una humedad máxima no superior al 2 % en peso. Se inicia también la eliminación del agua zeolítica de las arcillas.

- Precalentamiento

Es la fase del proceso de cocción dedicada a la desgasificación del cuerpo cerámico. El precalentamiento acaba donde empieza la fusión, la porosidad superficial de las baldosas se reduce, perdiendo rápidamente permeabilidad de los gases. El intervalo de temperatura del precalentamiento puede estar entre 500 °C a 700 °C. Otra función del precalentamiento es la de acompañar a la transformación alotrópica del cuarzo, sin que se produzca roturas por un exceso de tensiones durante el fuerte aumento de volumen del cuerpo cerámico.

- Cocción

Se trata de las zonas de las máximas temperaturas, a partir de aproximadamente 1 000 °C. Es casi exclusivamente en la zona de cocción donde la baldosa adquiere las características finales de dimensión, planaridad, gresificación y desarrollo del esmalte. Por lo tanto, es indispensable el control particularmente ajustado de las temperaturas.

- Enfriamiento rápido

Se trata de la zona de temperatura entre la máxima temperatura de cocción y los 600 °C. Sirve para enfriar las baldosas lo más rápidamente posible hasta temperaturas netamente por encima de la transformación alotrópica del cuarzo. Esta fase del proceso de cocción, por la impresionante velocidad de reducción de temperatura es crítica para las baldosas.

- Enfriamiento lento

Es la fase de proceso de cocción dedicada a la delicada retransformación alotrópica del cuarzo. El acontecimiento comporta una fuerte disminución volumétrica del cuerpo cerámica, debe desarrollarse con la debida lentitud y gradación para que la transformación se desarrolle con suficiente simultaneidad en toda la baldosa.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Durante la investigación, recopilación y estudio de la información presente en libros de texto y artículos científicos será necesario contar con variables dependientes e independientes para evaluar a escala laboratorio el tema planteado.

Tabla IV. Definición operacional de variables cuantificables

No.	Variable	Unidad	Factor potencial de diseño		Tipo de Variable	
			Constante	No constante	Independiente	Dependiente
1	Resistencia mecánica de las piezas crudas.	kg/cm ²		X		X
2	Resistencia mecánica de las piezas cocidas.	kg/cm ²		x		X
3	Carbonato de calcio	% m/m		X	X	
4	Humedad	% m/m		X	X	
5	Presión	Bar		X	x	
6	Plasticidad	Unidades		X		x
7	Contracción lineal	%		X		x
8	Absorción de agua	% m/m		X		x
9	Densidad aparente	g/cm ³		X		x
10	Temperatura de cocción	°C	X		X	
11	Ciclo de cocción	min	x		x	
12	Distribución granulométrica	%		X		x

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio.

- Campo de estudio: fábrica de piso cerámico en Guatemala.
- Área de investigación: etapa de prensado y cocción para vía seca.
- Línea de investigación: construcción.
- Localización: el estudio se realizó en una industria de baldosa cerámica en Guatemala.

3.3. Recurso humano disponible

La fase experimental, recolección de datos e interpretación de resultados estará a cargo del estudiante Carlos André Hernández Ambrosio bajo la asesoría del ingeniero químico Kelinton Sic Cajbón.

3.4. Recurso material disponible

El equipo de laboratorio disponible en laboratorio de la industria cerámica fue el siguiente:

3.4.1. Equipo

- Calcímetro de Bernard
- Plásticimetro Pfefferkorn
- Balanza analítica
- Medidor de Humedad
- Molino de Bolas de 6 L

- Molino de martillos
- Flexímetro
- Prensa hidráulica
- Vernier Digital
- Horno
- Estufa

3.4.2. Cristalería

- Probetas 10 mL
- Beakers 50 y 100 mL
- Earlenmeyer 100 mL

3.4.3. Reactivos

- Ácido clorhídrico
- Agua
- Arcillas
- Carbonato de calcio

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La investigación para realizar se desarrolla a través de técnicas cuantitativas con base en las variables descritas, utilizando parámetros cualitativos como apoyo en la interpretación del estudio

3.6. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Luego de obtener todos los datos necesarios para la elaboración del presente estudio de investigación extraídos de la parte experimental, se procede a tabular de forma ordenada y a procesar los datos de interés.

Tabla V. **Carbonato de calcio en arcillas**

Arcilla	Repetición	% CaCO ₃	Promedio
1	1	8,45	8,50
	2	8,57	
	3	8,47	
2	1	4,33	4,23
	2	4,27	
	3	4,09	
3	1	1,22	1,23
	2	1,21	
	3	1,25	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Índice de plasticidad de las arcillas**

Arcilla	Repetición	Plasticidad
1	1	12,82 %
	2	12,54 %
	3	12,57 %
2	1	21,26 %
	2	21,90 %
	3	22,22 %
3	1	28,24 %
	2	28,37 %
	3	28,38 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Contracción lineal de las arcillas**

Temperatura máxima de cocción en °C	Arcilla 1		Arcilla 2		Arcilla 3	
	C.L en %	Promedio	C.L en %	Promedio	C.L en %	Promedio
1 100 °C	0,20 %	0,23 %	1,89 %	2,14 %	9,29 %	9,34 %
	0,21 %		2,07 %		9,30 %	
	0,17 %		2,03 %		9,20 %	
	0,20 %		2,15 %		9,38 %	
	0,24 %		2,28 %		9,37 %	
	0,23 %		2,23 %		9,31 %	
	0,27 %		2,15 %		9,34 %	
	0,22 %		2,20 %		9,35 %	
	0,27 %		2,18 %		9,29 %	
	0,28 %		2,21 %		9,42 %	
	0,27 %		2,18 %		9,49 %	
	0,23 %		2,12 %		9,37 %	
	1 120 °C		0,33 %		0,35 %	
0,31 %		2,35 %	10,84 %			
0,36 %		2,37 %	10,83 %			
0,32 %		2,37 %	10,76 %			
0,33 %		2,35 %	10,75 %			
0,33 %		2,26 %	10,77 %			
0,32 %		2,36 %	10,73 %			
0,32 %		2,34 %	10,72 %			
0,31 %		2,25 %	10,73 %			
0,39 %		2,42 %	10,76 %			
0,42 %		2,45 %	10,71 %			
0,45 %		2,39 %	10,68 %			
1 140 °C		0,60 %	0,62 %	2,88 %		2,78 %
	0,54 %	2,84 %		11,46 %		
	0,58 %	2,87 %		11,35 %		
	0,65 %	2,79 %		11,48 %		
	0,69 %	2,75 %		11,51 %		
	0,69 %	2,80 %		11,59 %		
	0,59 %	2,84 %		10,82 %		
	0,59 %	2,72 %		11,52 %		
	0,67 %	2,77 %		11,55 %		
	0,64 %	2,67%		11,85 %		
	0,61 %	2,76 %		11,48 %		
	0,56 %	2,73 %		11,62 %		
	1 160 °C	4,06 %		3,86 %	3,98 %	
3,92 %		4,01 %	12,67 %			
3,82 %		4,05 %	12,76 %			
3,78 %		4,27 %	12,74 %			
3,96 %		4,16 %	12,71 %			
3,89 %		4,22 %	12,82 %			
3,84 %		4,14 %	12,89 %			
3,84 %		4,04 %	12,90 %			
3,73 %		4,03 %	12,94 %			
4,07 %		3,98 %	12,87 %			
3,67 %		4,65 %	13,01 %			
3,69 %		4,22 %	12,95 %			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resistencia en crudo de arcillas**

Arcilla	Presión en bar	Resistencia a la flexión en kg/cm ²	Promedio en kg/cm ²
1	200	8,63	8,57
		8,66	
		8,43	
2	200	8,02	7,93
		7,80	
		7,97	
3	200	0,67	0,64
		0,62	
		0,63	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Densidad aparente de las fórmulas**

Presión en bar	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	Fórmula 4	Fórmula 5
160	1,911	1,863	1,862	1,885	1,880
180	1,929	1,880	1,880	1,907	1,901
200	1,946	1,895	1,895	1,905	1,924
220	1,951	1,908	1,908	1,907	1,926

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Distribución granulométrica**

Fórmula	Grano	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
1	Gruesos	3,3 %	3,3 %	3,2 %
1	Medios	23,6 %	23,6 %	23,6 %
1	Polvos	73,2 %	73,2 %	73,2 %
2	Gruesos	5,9 %	6,0 %	5,9 %
2	Medios	23,5 %	23,4 %	23,5 %
2	Polvos	70,6 %	70,6 %	70,7 %
3	Gruesos	7,5 %	7,5 %	7,5 %
3	Medios	23,1 %	23,1 %	23,1 %

Continuación de la tabla X.

3	Polvos	69,4 %	69,4 %	69,4 %
4	Gruesos	8,3 %	8,4 %	8,4 %
4	Medios	23,1 %	23,0 %	23,1 %
4	Polvos	68,6 %	68,6 %	68,5 %
5	Gruesos	8,4 %	8,5 %	8,3 %
5	Medios	24,1 %	24,1 %	24,2 %
5	Polvos	67,5 %	67,4 %	67,5 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Curva de gresificación para fórmula 1**

Temperatura máxima de cocción en °C	Repetición	Pieza	Ancho crudo en mm	Ancho cocido en mm	C.L en %	Peso seco en kg	Peso húmedo en kg	Absorción en %
1 100 °C	1	1	100,43	100,62	-0,19 %	0,229	0,182	20,30 %
		2	100,48	100,74	-0,26 %	0,218	0,175	19,88 %
		3	100,49	100,85	-0,36 %	0,211	0,168	20,33 %
		4	100,72	101,05	-0,33 %	0,211	0,167	21,07 %
	2	1	100,40	100,68	-0,28 %	0,227	0,181	19,92 %
		2	100,52	100,91	-0,39 %	0,223	0,179	19,88 %
		3	100,26	100,01	0,25 %	0,224	0,179	20,01 %
		4	100,28	100,54	-0,26 %	0,209	0,167	20,00 %
	3	1	100,38	100,58	-0,20 %	0,210	0,168	20,10 %
		2	100,43	100,60	-0,17 %	0,219	0,175	20,02 %
		3	100,47	100,67	-0,20 %	0,222	0,177	19,92 %
		4	100,48	100,65	-0,17 %	0,205	0,164	19,74 %
1 120 °C	1	1	100,36	99,97	0,38 %	0,207	0,168	18,96 %
		2	100,59	100,25	0,34 %	0,206	0,168	18,33 %
		3	100,71	100,42	0,29 %	0,219	0,178	18,45 %
		4	100,52	100,20	0,32 %	0,219	0,178	18,77 %
	2	1	100,70	100,37	0,33 %	0,213	0,172	19,20 %
		2	100,50	100,10	0,40 %	0,216	0,175	18,99 %
		3	100,30	99,87	0,43 %	0,218	0,177	18,88 %

Continuación de la tabla XI.

	3	4	100,44	100,09	0,35 %	0,219	0,178	18,55 %
		1	100,29	99,90	0,39 %	0,209	0,171	18,32 %
		2	100,54	100,21	0,33 %	0,211	0,170	19,23 %
		3	100,70	100,35	0,34 %	0,222	0,179	19,15 %
		4	100,63	100,29	0,34 %	0,210	0,170	19,20 %
1140 °C	1	1	100,64	98,27	2,36 %	0,221	0,188	14,88 %
		2	100,67	98,23	2,42 %	0,207	0,176	14,96 %
		3	100,46	98,11	2,34 %	0,214	0,182	14,86 %
		4	100,56	98,21	2,34 %	0,212	0,180	15,03 %
	2	1	100,46	97,95	2,50 %	0,205	0,174	15,00 %
		2	100,40	97,99	2,40 %	0,205	0,174	15,10 %
		3	100,49	98,20	2,28 %	0,204	0,173	15,20 %
		4	100,51	98,18	2,32 %	0,226	0,191	15,21 %
	3	1	100,54	98,22	2,30 %	0,228	0,194	14,88 %
		2	100,72	98,42	2,28 %	0,212	0,182	14,30 %
		3	100,61	98,27	2,33 %	0,227	0,192	15,44 %
		4	100,41	98,16	2,24 %	0,215	0,182	15,29 %
1160 °C	1	1	100,46	94,63	5,80 %	0,215	0,203	5,40 %
		2	100,65	94,73	5,88 %	0,228	0,215	5,48 %
		3	100,61	94,65	5,92 %	0,215	0,202	5,70 %
		4	100,32	94,43	5,88 %	0,227	0,214	5,88 %
	2	1	100,72	94,68	5,99 %	0,216	0,203	6,20 %
		2	100,49	94,42	6,04 %	0,204	0,191	6,43 %
		3	100,57	94,58	5,96 %	0,221	0,207	6,52 %
		4	100,60	94,53	6,03 %	0,221	0,207	6,24 %
	3	1	100,40	94,33	6,05 %	0,222	0,209	6,02 %
		2	100,67	94,63	6,00 %	0,207	0,195	5,98 %
		3	100,35	94,35	5,98 %	0,212	0,200	5,90 %
		4	100,69	94,71	5,94 %	0,210	0,198	5,76 %

Fuente: elaboración propia.

3.7. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos cuantitativos se utilizará las medidas de tendencia central para analizar la representatividad de los datos.

3.7.1. Número de repeticiones

El horno utilizado para el experimento tardó un día para alcanzar cada temperatura máxima de cocción, debido al tiempo se realizaron 3 réplicas por cada temperatura en las arcillas y en la formulas, haciendo uso del horno 36 veces.

3.7.2. Análisis de varianza

La prueba de hipótesis se realizó por medio de análisis de varianza, a partir de la diferencia entre medias. Se asume una significancia del 5 % y se utilizó la Tabla de ANOVA.

Tabla XII. Organización de datos para método ANOVA

Repeticiones Tratamientos	1	2	3	Media tratamiento
1	X_{11}	X_{12}	3	\bar{X}_1
2	X_{21}	X_{22}	3	\bar{X}_2
3	X_{31}	X_{32}	3	\bar{X}_3
4	X_{41}	X_{42}	3	\bar{X}_4

Fuente: NAVIDI, William. *Estadística para ingeniero y científicos*. p. 625.

Para el análisis de varianza, los 4 tratamientos utilizados para el objetivo 1 y 3 fueron las temperaturas 1 100 °C, 1 120 °C, 1 140 °C y 1 160 °C con 3 repeticiones. Los tratamientos utilizados para el objetivo 2 fueron las presiones 160 bar, 180 bar, 200 bar y 220 bar con 3 repeticiones.

Con los resultados de la densidad aparente, resistencia a la flexión en crudo, resistencia a la flexión en cocido en cada presión se calculó la gran media

muestral para el objetivo 2 y con los resultados de contracción lineal y porosidad en cada temperatura se calculó la gran media muestral para el objetivo 3:

$$\bar{X} = [\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c x_{ij}] / n \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Con el diseño de la Tabla XXI, se calcularon los siguientes factores:

$$SCTR = r_j \sum (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Se calculó

$$SCE = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad \text{[Ecuación 7]}$$

$$CMTR = \frac{SCE}{c-1} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$CME = \frac{CMTR}{n-c} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

$$F = \frac{CMTR}{CME} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

\bar{X} : gran media de todas las observaciones del experimento

n : número total de observaciones

SCT: suma de cuadrados total

r : número de repeticiones

c : número de tratamientos

i : fila

j : columna

SCTR: suma de cuadrados de los tratamientos

r_j : número de observaciones o filas en cada tratamiento

\bar{X}_j : media de cada tratamiento

SCE: suma del cuadrado del error

CMTR: cuadrado medio del tratamiento

CME: cuadrado medio del error

F : estadístico F de Fisher-Snedecor

Con los valores obtenidos de F , se acepta H_0 con valores F cercanos a 1 y se rechazó H_0 , con valores mayores a 1. El intervalo de confianza del 95 % se calculó con la siguiente ecuación:

$$\bar{X}_i \pm t_{N-1, \alpha/2} \sqrt{\frac{MSE}{J_i}} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

El valor t se obtiene de la tabla t de Student con $t_{16, 0,025}$ y los demás valores con las ecuaciones mencionadas anteriormente.

4. RESULTADOS

La tabla XXII muestran las características consideradas para el porcentaje de adición de las 5 formulas analizadas. La resistencia a la flexión representa el comportamiento en la etapa de prensado.

Tabla XIII. **Características de arcilla 1,2 y 3**

	Arcilla 1	Arcilla 2	Arcilla 3
Carbonato de calcio	8,50 %	4,23 %	1,23 %
Índice de plasticidad	15,42	23,79	31,26
Resistencia a la flexión en kg/cm ²	8,57	7,93	0,64

Fuente: elaboración propia.

La Tabla XXVII muestra las contracciones lineales de cada arcilla, realizadas en un rango de temperatura máxima de cocción de 1 100 °C a 1 160°. Se establecieron esas temperaturas debido a que es un rango aproximado al que se trabaja en la fábrica de estudio. Característica considerada para el porcentaje de adición en la propuesta de las 5 fórmulas.

Tabla XIV. **Características de la arcilla cocida**

	Arcilla 1	Arcilla 2	Arcilla 3
Temperatura en °C	% CL	% CL	% CL
1 100	0,23 %	2,14 %	9,34 %
1 120	0,35 %	2,35 %	10,76 %
1 140	0,62 %	2,78 %	11,47 %
1 160	3,86 %	4,15 %	12,84 %

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXIV, muestra el porcentaje de adición de cada arcilla según los resultados obtenidos en las tablas XXVII y XVII.

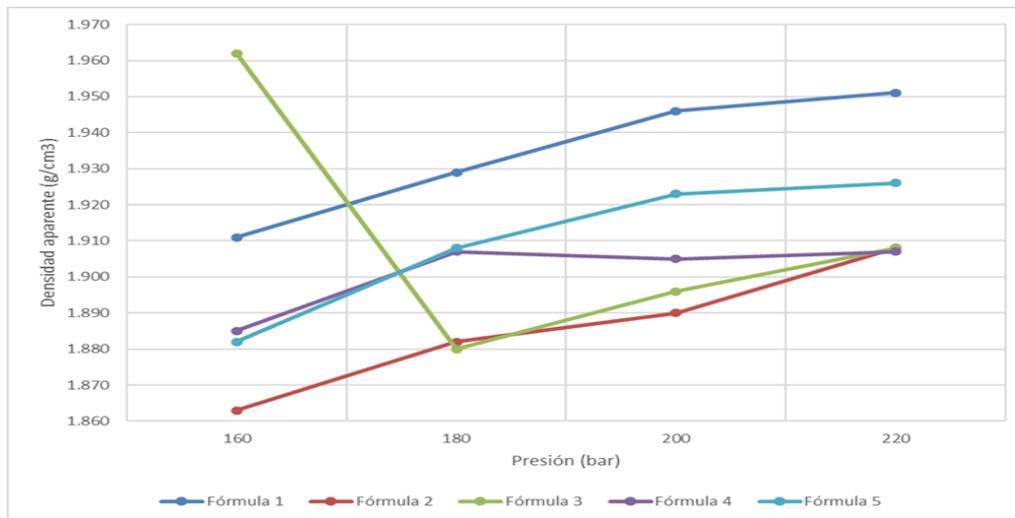
Tabla XV. **Porcentaje de adición de arcilla en la formulación de la pasta cerámica**

Arcilla	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	Fórmula 4	Fórmula 5
Arcilla 1	88,00 %	78,00 %	68,00 %	58,00 %	48,00 %
Arcilla 2	0,00 %	10,00 %	20,00 %	30,00 %	40,00 %
Arcilla 3	12,00 %	12,00 %	12,00 %	12,00 %	12,00 %

Fuente: elaboración propia.

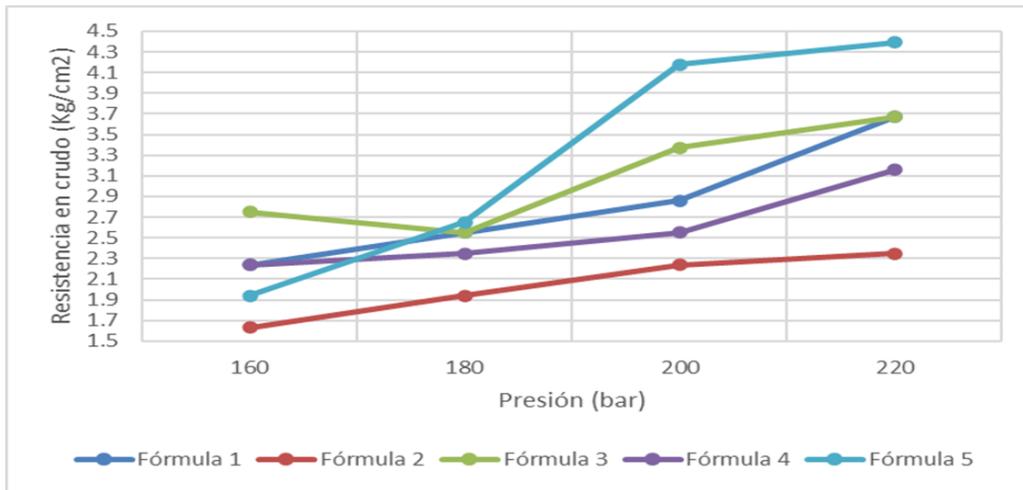
Las figuras 3, 4 y 5 muestran la densidad aparente de las piezas prensadas, la resistencia a la flexión de las piezas crudas y la resistencia a la flexión de las piezas cocidas para determinar la presión óptima de cada fórmula.

Figura 2. **Densidad aparente de las 5 formulas analizadas**



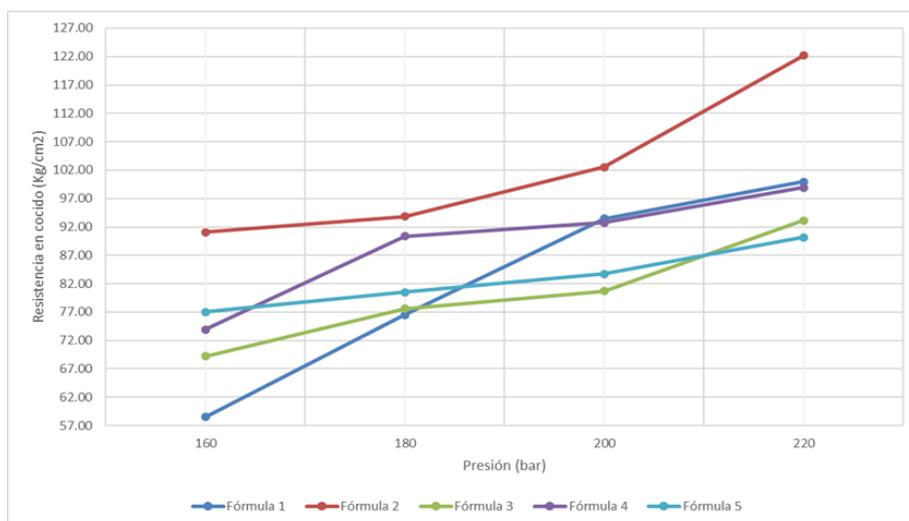
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Resistencia a la flexión en crudo de las 5 fórmulas analizadas



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Resistencia a la flexión en cocido de las 5 fórmulas analizadas



Fuente: elaboración propia.

La tabla XXV muestra los resultados de la distribución granulométrica de las 5 formulaciones analizadas, los gruesos representan los tamices de 300 μm y 250 μm , los medios representan 180 μm y 125 μm y los finos 75 μm y el cernido. Se establecieron esos tamices debido a que son los utilizados en la industria cerámica de estudio.

Tabla XVI. **Distribución granulométrica de las 5 formulaciones**

Grano	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	Fórmula 4	Fórmula 5
Gruesos	3,24 %	5,93 %	7,52 %	8,34 %	8,37 %
Medios	23,57 %	23,45 %	23,09 %	23,10 %	24,13 %
Finos	73,19 %	70,62 %	69,39 %	68,56 %	67,50 %

Fuente: elaboración propia.

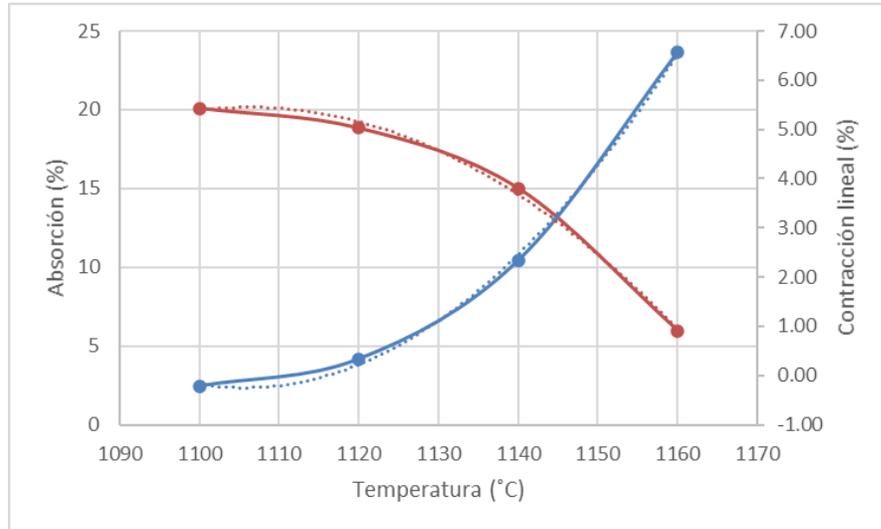
Las tablas de la XVII a la XX muestran la contracción lineal y absorción necesaria para realizar la curva de gresificación de las 5 formulaciones analizadas.

Tabla XVII. **Contracción lineal y absorción de fórmula 1**

Temperatura en °C	Contracción lineal en %	Absorción en %
1 100	-0,21	20,1
1 120	0,34	18,84
1 140	2,34	15,01
1 160	6,57	5,96

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Curva de gresificación de fórmula 1**



Gráfica	F	Fc	Intervalo de validez
Absorción	7 598	4,06	[1 100 -1 160 °C]
Contracción lineal	1 989	4,06	[1 100 -1 160 °C]

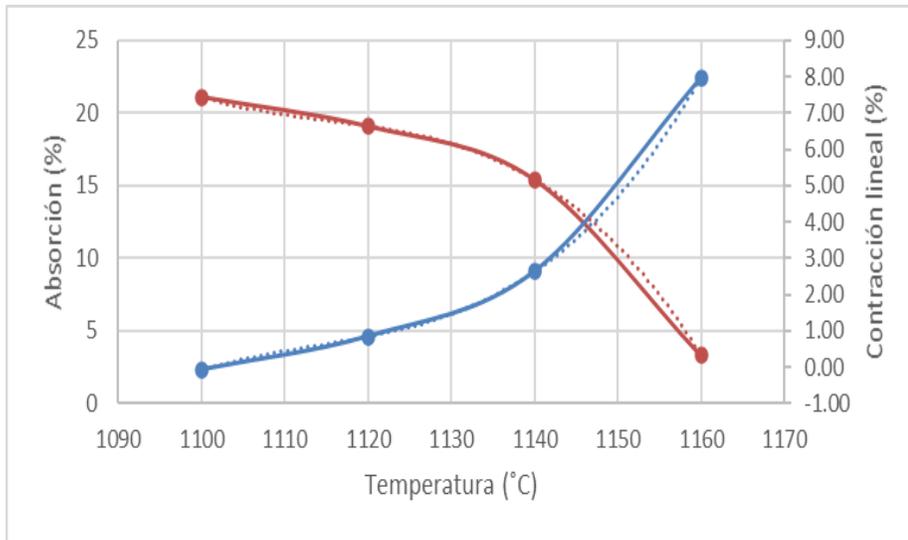
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Contracción lineal y absorción de fórmula 2**

Temperatura en °C	Contracción lineal en %	Absorción en %
1 100	-0,08	21,11
1 120	0,84	19,10
1 140	2,63	15,43
1 160	7,98	3,32

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Curva de gresificación de fórmula 2**



Gráfica	F	Fc	Intervalo de validez
Absorción	7 598	4,06	[1 100 -1 160 °C]
Contracción lineal	6 329	4,06	[1 100 -1 160 °C]

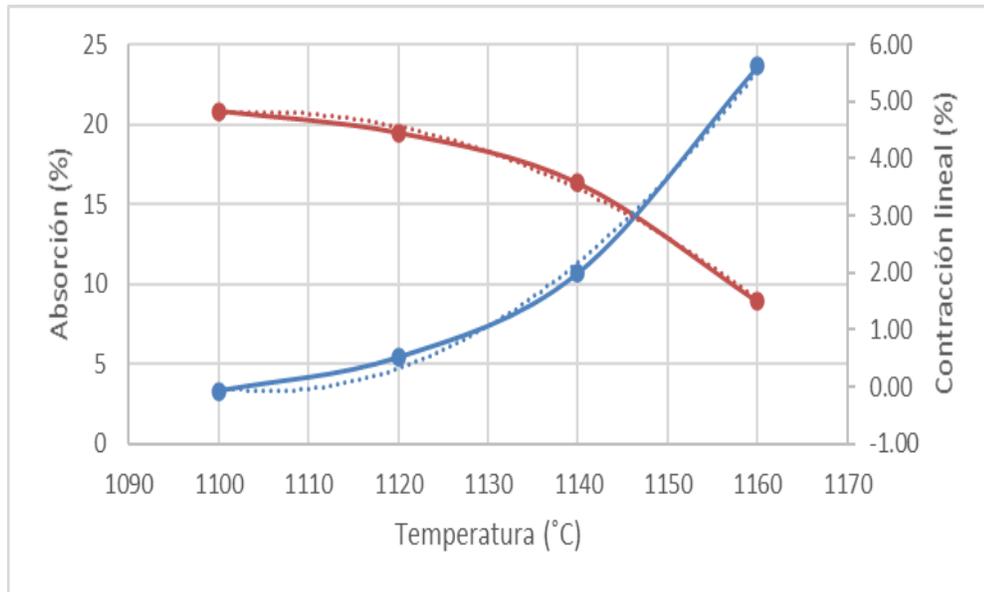
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Contracción lineal y absorción de fórmula 3**

Temperatura en °C	Contracción lineal en %	Absorción en %
1 100	-0,08	20,84
1 120	0,51	19,49
1 140	1,99	16,35
1 160	5,62	8,92

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Curva de gresificación de fórmula 3**



Gráfica	F	Fc	Intervalo de validez
Absorción	1 354	4,06	[1 100 -1 160 °C]
Contracción lineal	5 221	4,06	[1 100 -1 160 °C]

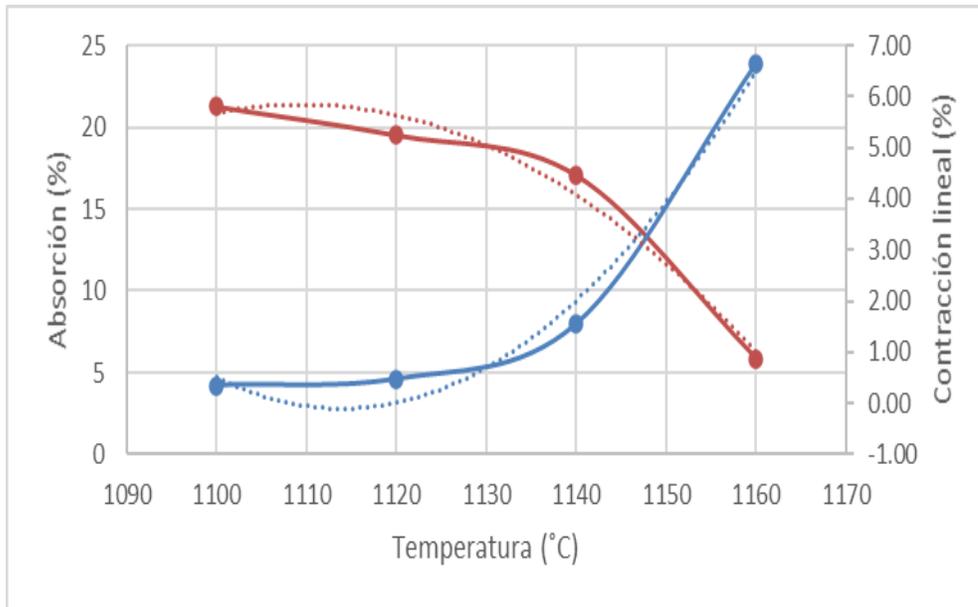
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Contracción lineal y absorción de fórmula 4**

Temperatura en °C	Contracción lineal en mm	Absorción en %
1 100	0,35	21,27
1 120	0,47	19,52
1 140	1,55	17,07
1 160	6,64	5,87

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Curva de gresificación de fórmula 4**



Gráfica	F	Fc	Intervalo de validez
Absorción	1 267	4,06	[1 100 -1 160 °C]
Contracción lineal	20 230	4,06	[1 100 -1 160 °C]

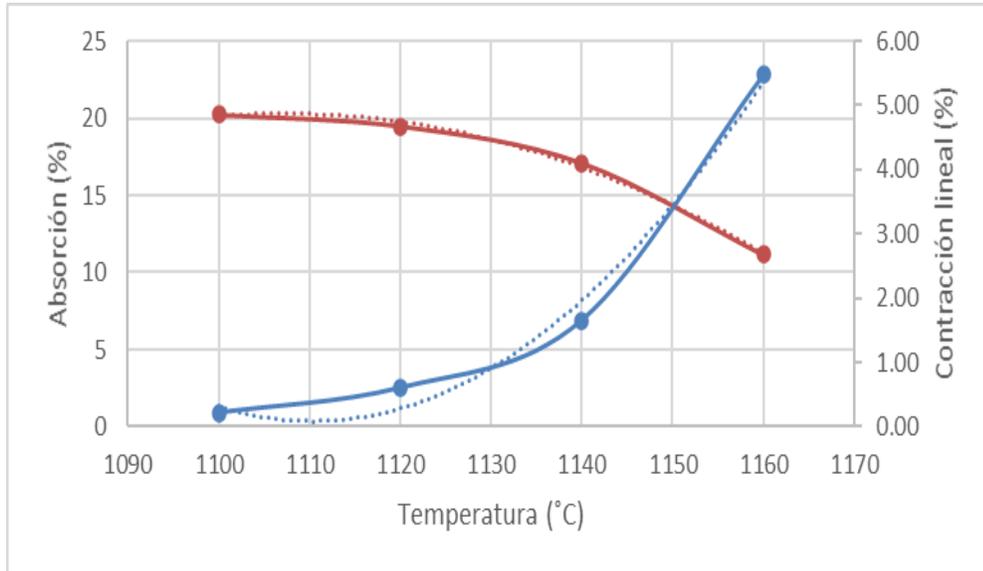
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Contracción lineal y absorción de fórmula 5**

Temperatura en °C	Contracción lineal en mm	Absorción en %
1 100	0,21	20,22
1 120	0,60	19,48
1 140	1,65	17,1
1 160	5,47	11,15

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Curva de gresificación de fórmula 5



Gráfica	F	Fc	Intervalo de validez
Absorción	9 685	4,06	[1 100 -1 160 °C]
Contracción lineal	26 345	4,06	[1 100 -1 160 °C]

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El porcentaje de adición de cada arcilla se basó en el contenido de carbonato de calcio, plasticidad, resistencia a la flexión, contracción lineal y temperatura máxima de cocción de cada arcilla indicados en las tablas XXII y XXIII. El aporte de carbonato de calcio en la formulación favorece la estabilidad en calibres debido a la descarbonización producida a los 800 °C; evitando la variación de la longitud de las baldosas cocidas. La arcilla 1, es la arcilla con mayor porcentaje de carbonato de calcio de las 3 arcillas analizadas, se considera agregar entre un 48,00 % y 88,00 % en las formulaciones debido a la estabilidad que puede aportar en los calibres en la cocción. La arcilla 2 posee un valor intermedio de carbonato de calcio entre la arcilla 1 y 3, por lo que se considera agregar como máximo un 40 % de la arcilla 2 en las formulaciones, la arcilla 3 es la arcilla con menos contenido de carbonato de calcio, por lo que se considera agregar como máximo un 12 % en las fórmulas. La plasticidad es una propiedad que favorece en la etapa de prensado, ya que la arcilla tiende a tener mayor adherencia y obtener mayor resistencia en las baldosas prensada, evitando rajadas en esa etapa. Sin embargo, las arcillas plásticas tienden a presentar una mayor contracción lineal. La arcilla 3 posee la mayor plasticidad de las 3 arcillas, la arcilla 2 posee una plasticidad intermedia entre la arcilla 1 y 3; y la arcilla 1 es la que posee menos plasticidad.

La resistencia a la flexión en cocido es un factor que favorece en el transporte de la salida del horno al almacenamiento de las baldosas cocida, por lo que se consideró para indicar el porcentaje de adición de cada arcilla. La arcilla 1 y 2 poseen una resistencia a la flexión similar, y la arcilla 3 posee resistencia a la flexión cercana a cero. La contracción lineal indica el porcentaje de contracción

de las piezas después de la cocción, y también es un factor que indica la estabilidad de la longitud de las piezas en la cocción y la temperatura máxima a la que se puede trabajar cada arcilla. La arcilla 1 es estable hasta los 1 140 °C, a temperaturas de 1 160 °C, sufre un aumento de contracción lineal del 522 %. La arcilla 2 posee un aumento de contracción lineal del 49 % los 1 160 °C. La arcilla 3 posee una contracción lineal superior a la arcilla 1 y 2 desde los 1 100 °C. Debido a que la fábrica de estudio únicamente trabaja únicamente con un único calibre, se consideró agregar en mayor porcentaje la arcilla 1, en porcentaje intermedio la arcilla 2 y en menor porcentaje la arcilla 3. El porcentaje de adición de la arcilla 1 fue mayor porque posee el mayor contenido de carbonato de calcio y la menor contracción lineal. El porcentaje de adición de la arcilla 2 fue intermedio porque contiene carbonato y contracción lineal intermedia entre la arcilla 1 y 3. El porcentaje de adición de la arcilla 3 fue menor y constante en las 5 formulaciones debido a su alta plasticidad, baja resistencia a la flexión en cocido y alta contracción lineal. Por las características mencionadas y lo que puede afectar en cada etapa de producción, se determinó el porcentaje de adición de cada arcilla en las cinco formulaciones indicadas en la tabla XXIX.

La presión óptima de cada formulación se determinó a partir de la densidad aparente, resistencia a la flexión en crudo, resistencia a la flexión en cocido indicadas en las figuras 2, 3 y 4. La densidad aparente es una propiedad que indica la compactación de las baldosas después del prensado. En la industria cerámica, trabajar a presiones iguales o superiores a 200 bar puede generar un mayor desgaste en los punzones de las prensas y problemas mecánicos en la máquina, por lo que se evaluaron de 160 a 220 bar para verificar cuál formulación necesita trabajar a altas presiones para poder cumplir los valores mínimos. Las baldosas se transportan de prensas hacia el secadero por medio de fajas de caucho, por lo que la densidad aparente y resistencia en crudo es un parámetro que influye ante las agresiones del transporte, las piezas con baja resistencia en

crudo no soportan los movimientos y se quiebran antes de llegar al secadero. En la industria cerámica de estudio, una densidad de $1,900 \text{ g/cm}^3$ es la densidad aparente mínima requerida para que las baldosas puedan ser manipuladas en el transporte. Según los resultados de densidad aparente indicados en la Figura 2; la fórmula 3 y la fórmula 1, superan el valor mínimo de densidad aparente requerido por la fábrica de estudio a 160 bar, y las fórmulas 2, 4 y 5 requiere someter las baldosas a 180 bar para alcanzar la densidad mínima requerida. Por lo que, según los resultados de densidad aparente, la presión óptima para la fórmula 1 y 3 es 160 bar y la presión óptima para las fórmulas 2, 4 y 5 es 180 bar. La resistencia a la flexión en crudo obtuvo el mismo comportamiento que la densidad aparente. La resistencia en cocido es un parámetro que influye en el transporte del horno hacia el almacenamiento de baldosas, y en el transporte del almacenamiento de baldosas hacia la aplicación de engobe, esmalte e impresión digital. De igual manera, las piezas con baja resistencia en cocido no soportan los movimientos en el transporte y pueden quebrarse en el transporte. La resistencia a la flexión en cocido de las 5 formulaciones se observa en la figura 4, la resistencia mínima exigida en la industria cerámica es 80 kg/cm^2 debido a que es una característica interna y externa. Interna porque las baldosas se almacenan apiladas después de la cocción y al no cumplir con la resistencia mínima indicada se pueden quebrar al momento de almacenarlas. Es una característica externa debido a que las baldosas deben cumplir con la resistencia a la flexión mínima para que no se quiebren al manipular al momento de instalar las piezas. Debido a eso, se buscó la presión mínima para cumplir con la resistencia a la flexión mínima. En la ilustración 4, se observa que la fórmula 1 alcanzó el valor mínimo de resistencia a la flexión a 200 bar de presión, la fórmula 2 alcanzó el valor mínimo de resistencia a la flexión a 160 bar de presión, la fórmula 3 alcanzó el valor mínimo de resistencia a la flexión a 200 bar, La fórmula 4 alcanzó el valor mínimo de resistencia a 180 bar y la fórmula 5 alcanzó el valor mínimo a 180 bar. El factor más importante entre densidad aparente, resistencia

a la flexión en crudo y resistencia a la flexión en cocido es la resistencia a la flexión en cocido debido que es el que tiene mayor impacto en el proceso de fabricación, las piezas antes de la cocción se pueden reutilizar en el proceso de fabricación, sin embargo, las piezas después de la cocción no se pueden reutilizar en ninguna etapa. La densidad aparente y resistencia a la flexión en crudo se consideró para factores internos.

La distribución granulométrica indicada en la tabla XXV es un factor determinante para determinar la presión para cada formulación. Los gruesos representan el material que el molino no pudo molturar y pueden afectar en el desgaste de los punzones de las prensas, por lo que no se recomienda trabajar presiones superiores a 200 bar las fórmulas con gruesos superiores a 7,0 %. La fórmula con mayor contenido de gruesos es la fórmula 5 y la fórmula con menor contenido de gruesos es la fórmula 1. La fórmula 1 cumple con el valor mínimos exigido de densidad aparente a los 160 bar, en crudo y cocido a los 180 bar y según los gruesos de granulometría puede trabajar a altas presiones por lo que la presión óptima es 180 bar. La fórmula 2 cumple con el valor mínimo exigido de densidad aparente a 220 bar y en crudo no se alcanzó el valor mínimo con las presiones analizadas, sin embargo, alcanzó el valor mínimo exigido de resistencia a la flexión a los 160 bar, por lo que la presión óptima es 220 para que pueda cumplir la densidad aparente mínima y resistencia a la flexión en crudo mínima exigido por la fábrica de estudio. La fórmula 3 cumplió con los valores mínimos requeridos de densidad aparente y resistencia a la flexión en crudo a 160 bar, pero en la resistencia a la flexión en cocido cumplió a los 180 bar, por lo que la presión óptima es 180 bar. Las fórmulas 4 y 5 alcanzaron los valores mínimos de densidad aparente y resistencia a la flexión en crudo a los 180 bar, y alcanzó el valor mínimo de resistencia a la flexión en cocido a los 160 bar y contiene alto contenido de gruesos, por lo que la presión recomendada es 180 bar.

La temperatura máxima de cocción de cada fórmula se determinó a partir de la curva de gresificación de cada fórmula. La contracción lineal a 1 100 °C de la fórmula 1 indicado en la tabla XXXI muestra una contracción lineal negativa a 1 100 °C, esto quiere decir que el material se expandió, esto sucede debido a que el cuarzo se transformó de α estructura trigonal en β estructura hexagonal, generando una expansión de su longitud inicial. A 1 120 °C se obtuvo una contracción lineal del 0,34 % con una absorción del 18,84 %. A 1 140 °C se obtuvo el salto de contracción lineal de 0,34 % a 2,34 %, sin embargo, el salto en porosidad se obtuvo a los 1 160 °C La fórmula 1 no puede exceder los 1 140 °C y debe cocerse por temperaturas superiores a 1 100 °C.

La fórmula 2 se comporta de forma similar a la formulación 1 en la curva de gresificación, la expansión fue casi cero a los 1 100 °C y de la misma manera, a los 1 140 °C sufre una contracción del 2,63 %. Esta contracción obliga en el proceso de producción a implementar calibres en el producto terminado. En la industria cerámica, se coloca en la leyenda del producto empacado si las baldosas pertenecen al calibre pequeño, mediano o grande según la longitud del producto, actualmente la fábrica carece de calibres debido a que no es necesario porque la longitud de las baldosas no presenta variación significativa.

La fórmula 3 obtuvo la misma expansión que la fórmula 2 a 1 100 °C. En 1 140 °C la contracción lineal aumenta significativamente. Por lo que la máxima temperatura a la que se puede trabajar es a 1 120 °C.

En la fórmula 4 no se observó la expansión a 1 100 °C que se observó en la fórmula 1,2 y 3; esto indica que la arcilla 2 eleva el coeficiente de dilatación en la formulación. A 1 140 °C y 1 160 °C, las ecuaciones 4 y 5; que son las formulaciones con mayor porcentaje de adición de arcilla 2; fueron las que presentaron menor contracción lineal.

A 1 140 °C, las 5 formulaciones presentaron una contracción lineal que implica la implementación de calibres en la fábrica, por lo que no se recomienda trabajar a esas temperaturas. A 1 160 °C, las 5 formulaciones presentaron una contracción lineal que provoca que las piezas sobrepasen el calibre establecido y se obtengan piezas fuera del rango establecido por la fábrica. No es posible trabajar a esa temperatura.

La absorción de las piezas probablemente afecta en el tiempo de secado, en la etapa de engobado y esmaltado, si el esmalte no logra secar en el transporte desde esmalte hacia impresión digital, puede provocar defectos superficiales en las piezas. La absorción también afecta directamente en la instalación, debido a que los adhesivos utilizan agua y debe absorber agua para poder adherirse a la superficie correctamente. La disminución en la absorción puede presentar los problemas mencionados, por lo que no se recomienda superar los 1 140 °C para las 5 fórmulas propuestas.

CONCLUSIONES

1. El porcentaje de adición de la arcilla 1 fue un 48 % a 88 % debido a su baja contracción lineal y alto contenido de carbonato de calcio. El porcentaje de adición de la arcilla 3 fue 12 % en todas las formulaciones debido a su alta plasticidad, alta contracción lineal y bajo contenido de carbonato de calcio y baja resistencia a la flexión. El porcentaje de adición de la arcilla 3 fue de un 0,0 % a un 40 % debido a sus valores intermedios entre arcilla 1 y 3 obtenidos en contracción lineal, plasticidad y carbonato de calcio.
2. La presión óptima para las ecuaciones 1 y 3 es 180 bar con valores de densidad aparente y resistencia a la flexión en crudo superiores al mínimo exigido, la presión óptima para las ecuaciones 4 y 5 es 180 bar con valores de densidad aparente y resistencia a la flexión en crudo cercanos al mínimo exigido. La presión óptima de la fórmula 2 es 220 bar debido a los resultados inferiores de densidad aparente, resistencia a la flexión en crudo inferiores al valor mínimo exigidos y por el bajo contenido de gruesos en la distribución granulométrica.
3. A partir de 1 140 °C, las 5 fórmulas propuestas sobrepasan el límite de contracción lineal, por lo que la temperatura máxima de cocción es 1 120 °C para las 5 fórmulas analizadas. A 1 160 °C, las 5 formulaciones presentaron una contracción lineal que provoca que las piezas sobrepasen el calibre establecido y se obtengan piezas fuera de rango indicado por la fábrica, por lo que no es posible trabajar a esa temperatura o temperaturas superiores.

4. Las 5 formulaciones analizadas obtuvieron una reducción en la variación de calibres al cocer con temperaturas inferiores de cocción a 1 120 °C. Siendo la fórmula 4, la que presentó mayor estabilidad con una diferencia del 0,12 % de contracción lineal entre 1 100 °C y 1 120 °C.

RECOMENDACIONES

1. Revisar que la distribución de bolas del molino de laboratorio ocupe el 50 % del volumen del recipiente para obtener la granulometría deseada a un menor tiempo de molienda.
2. Realizar la prueba de calcimetría a la misma temperatura para evitar variación en los resultados.
3. Utilizar agua destilada y la misma estufa en todas las pruebas de absorción.

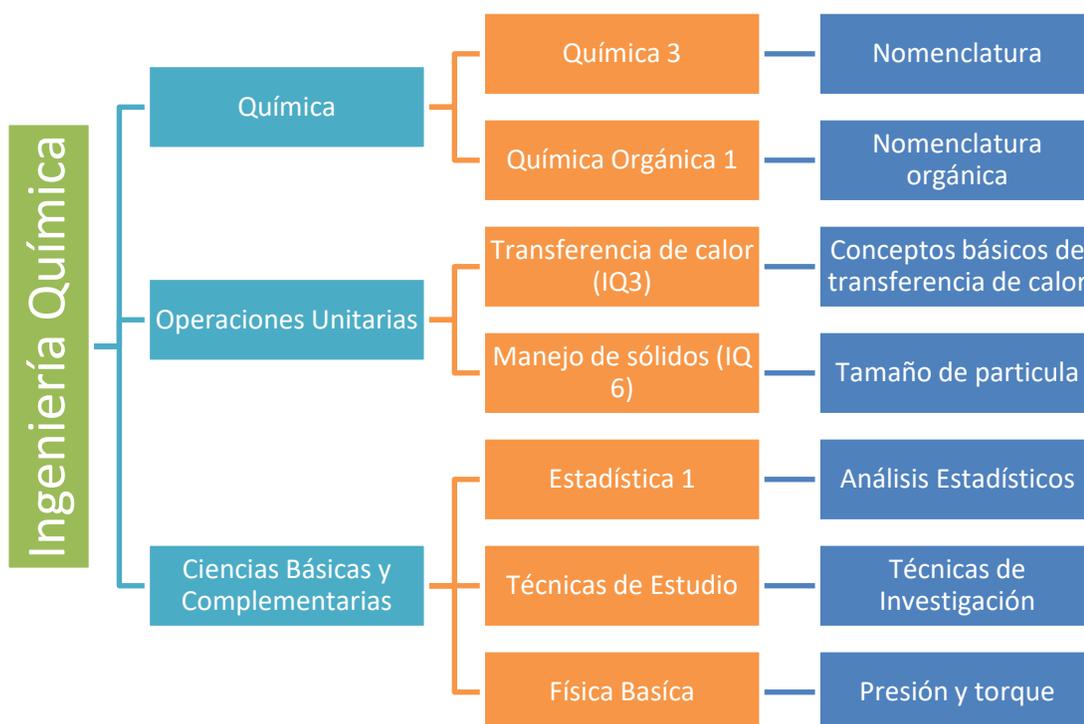
BIBLIOGRAFÍA

1. AENOR. *Baldosas cerámicas, adhesivos para baldosas y materiales de rejuntado*. Génova, Madrid: AENOR. 2008. 472 p.
2. ALCÁNTARA VALLADARES, Juan Ramón. *Diseño práctico de un molino de bolas*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional. 2008. 123 p.
3. BARBA, Antonio. *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. 2a. ed. Castellón, España: Instituto de Tecnología Cerámica. 2006. 291 p.
4. Consejo Cerámico de Norte América. *Instructivo para instalador de recubrimiento cerámicos*. México: TCNA. 2011. 108 p.
5. _____. *Manual TCNA para la instalación de recubrimientos cerámicos*. México: TCNA. 2011. 108 p.
6. ESCARDINO, Benlloch; AMORES, Albaro; NAVARRO. Enrique. *Estudio de pastas de gres para pavimentos*. [en línea]. <<http://boletines.secv.es/upload/198120017.pdf>>. [Consulta: 5 de febrero de 2022].
7. RENAU, Rafael Galindo. *Prensas, moldes y prensado en la fabricación de baldosas cerámicas*. España: MACER. 2008. 381 p.

8. VAN, Gelder. *Tecnología de la Cerámica Aplicada*. Volumen 1. Castellón, España: SACMI. 2004. 446 p.
9. _____. *Tecnología de la Cerámica Aplicada*. Volumen 2. Castellón, España: SACMI. 2004. 432 p.
10. VILLALBA, Querol. *Aplicación del método de Pfefferkorn al control de la plasticidad en pastas de extrusión*. [en línea]. <<http://boletines.secv.es/upload/198322285.pdf>> [Consulta: 12 de enero de 2021].

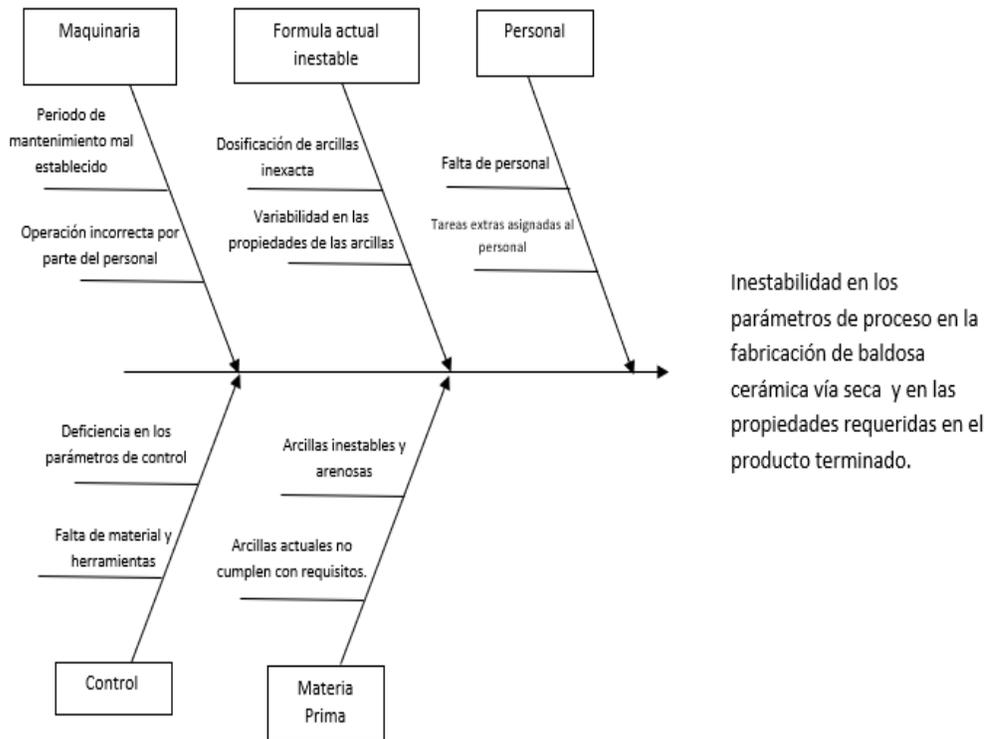
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2019.

Apéndice 3. Características en etapa de prensado

Características de la fórmula 1 en etapa de prensado

Presión en bar	Densidad aparente en g/cm ³	Resistencia a la flexión en crudo kg/cm ²	Resistencia a la flexión en cocido a 1 120 °C
160	1,911	2,24	58,55
180	1,929	2,55	76,5
200	1,946	2,86	93,43
220	1,951	3,67	99,96

Característica de fórmula 2 en etapa de prensado

Presión en bar	Densidad aparente en g/cm ³	Resistencia a la flexión en crudo kg/cm ²	Resistencia a la flexión en cocido a 1 120 °C
160	1,863	1,63	91,07
180	1,882	1,94	93,84
200	1,890	2,24	102,51
220	1,908	2,35	122,2

Características de fórmula 3 en etapa de prensado

Presión en bar	Densidad aparente en g/cm ³	Resistencia a la flexión en crudo kg/cm ²	Resistencia a la flexión en cocido a 1 120 °C
160	1,962	2,75	69,25
180	1,880	2,55	77,62
200	1,896	3,37	80,68
220	1,908	3,67	93,13

Características de fórmula 4 en etapa de prensado

Presión en bar	Densidad aparente en g/cm ³	Resistencia a la flexión en crudo kg/cm ²	Resistencia a la flexión en cocido a 1 120 °C
160	1,885	2,24	73,95
180	1,907	2,35	90,37
200	1,905	2,55	92,72
220	1,907	3,16	98,94

Continuación del apéndice 3.

Características de fórmula 5 en etapa de prensado

Presión en bar	Densidad aparente en g/cm ³	Resistencia a la flexión en crudo kg/cm ²	Resistencia a la flexión en cocido a 1 120 °C
160	1,882	1,94	77,01
180	1,908	2,65	80,48
200	1,923	4,18	83,74
220	1,926	4,39	90,17

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Recolección y ordenamiento de la información

Recolección de datos para carbonato de calcio en arcillas

Arcilla	Repetición	Temperatura en °C	Constante K	Volumen desplazado en mL	% CaCO ₃
1	1	30	0,402	21,0	8,45
	2	30	0,402	21,3	8,57
	3	30	0,402	21,1	8,47
2	1	30	0,402	10,8	4,33
	2	30	0,402	10,6	4,27
	3	30	0,402	10,2	4,09
3	1	30	0,402	3,0	1,22
	2	30	0,402	3,0	1,21
	3	30	0,402	3,1	1,25

Continuación del apéndice 4.

Recolección de datos para plasticidad de arcillas

Arcilla	Repetición	Agua en g	Altura inicial en mm	Altura final en mm	Factor	Peso vaso húmedo en g	Peso vaso seco en g	Diferencia de peso en g	Indice de plasticidad en %
1	1	13	40	31,00	1,29	86,2	78,14	8,06	10,31 %
		14	40	28,00	1,43	84,01	75,51	8,50	11,25 %
		15	40	25,00	1,60	82,43	73,38	9,05	12,33 %
		16	40	21,00	1,90	81,11	71,67	9,44	13,17 %
		17	40	16,00	2,50	80,21	70,05	10,16	14,50 %
	2	18	40	12,00	3,33	79,26	68,70	10,56	15,37 %
		13	40	32,00	1,25	85,4	77,46	7,94	10,25 %
		14	40	27,00	1,48	84,13	75,79	8,34	11,00 %
		15	40	24,00	1,67	82,66	73,88	8,78	11,88 %
		16	40	21,00	1,90	81,42	72,23	9,19	12,72 %
	3	17	40	16,00	2,50	80,75	70,88	9,87	13,92 %
		18	40	12,00	3,33	79,31	68,70	10,61	15,44 %
		13	40	32,00	1,25	85,4	77,33	8,07	10,44 %
		14	40	27,00	1,48	84,13	75,63	8,50	11,24 %
		15	40	24,00	1,67	82,66	73,80	8,86	12,00 %
2	1	16	40	21,00	1,90	81,42	72,16	9,26	12,83 %
		17	40	16,00	2,50	80,75	71,18	9,57	13,45 %
		18	40	12,00	3,33	79,31	68,70	10,61	15,44 %
		21	40	22,5	1,78	76,38	64	12,38	19,34 %
		22	40	20	2,00	75,76	62,94	12,82	20,37 %
	2	23	40	16,5	2,42	74,75	61,59	13,16	21,37 %
		24	40	14	2,86	74,1	60,68	13,42	22,12 %
		25	40	11,5	3,48	73,02	59,32	13,70	23,10 %
		21	40	23	1,74	77,3	64,33	12,97	20,16 %
	3	22	40	19	2,11	76,29	63,01	13,28	21,08 %
		23	40	17	2,35	75,59	62,08	13,51	21,76 %
		24	40	14	2,86	74,67	60,79	13,88	22,83 %
25		40	12	3,33	74,15	59,96	14,19	23,67 %	
21		40	23	1,74	77,6	64,6	13,00	20,12 %	
3	1	22	40	21	1,90	76,79	63,41	13,38	21,10 %
		23	40	18	2,22	76,38	62,58	13,80	22,05 %
		24	40	15	2,67	75,7	61,43	14,27	23,23 %
		25	40	11,5	3,48	73,65	59,11	14,54	24,60 %
	2	30	40	22	1,82	70,31	55,88	14,43	25,82 %
		31	40	20	2,00	69,74	55	14,74	26,80 %
		32	40	17	2,35	69,4	54,08	15,32	28,33 %
		33	40	14	2,86	68,6	53,08	15,52	29,24 %
		34	40	11	3,64	67,17	51,27	15,90	31,01 %
	3	30	40	23	1,74	70,35	55,84	14,51	25,98 %
		31	40	21	1,90	69,84	55,1	14,74	26,75 %
		32	40	18	2,22	69,44	54,00	15,44	28,59 %
33		40	15	2,67	68,66	53,12	15,54	29,25 %	
34		40	10	4,00	67,25	51,24	16,01	31,25 %	
3	30	40	22	1,82	70,28	55,72	14,56	26,13 %	
	31	40	20	2,00	69,8	55,17	14,63	26,52 %	
	32	40	18	2,22	69,45	54,12	15,33	28,33 %	
	33	40	14	2,86	68,7	53,08	15,62	29,43 %	
	34	40	10	4,00	67,32	51,19	16,13	31,51 %	

Continuación de apéndice 4.

Recolección de datos para contracción lineal de arcillas

Temperatura máxima de cocción en °C	Repetición	Pieza	Arcilla 1		Arcilla 2		Arcilla 3		Promedio
			Ancho crudo en mm	Ancho cocido en mm	Ancho crudo en mm	Ancho cocido en mm	Ancho crudo en mm	Ancho cocido en mm	
1 100°C	1,00	1,00	150,10	149,80	150,12	147,29	150,20	136,25	0,09
		2,00	150,13	149,82	150,11	147,00	150,11	136,15	
		3,00	150,10	149,84	150,05	147,00	150,22	136,40	
		4,00	150,07	149,77	150,13	146,90	150,26	136,17	
	2,00	1,00	150,06	149,70	150,22	146,80	150,28	136,20	
		2,00	150,08	149,73	150,04	146,70	150,24	136,25	
		3,00	150,10	149,70	150,03	146,80	150,26	136,22	
		4,00	150,06	149,73	150,12	146,82	150,29	136,24	
	3,00	1,00	150,20	149,80	150,17	146,90	150,23	136,27	
		2,00	150,17	149,75	150,22	146,90	150,42	136,25	
		3,00	150,17	149,77	150,22	146,95	150,32	136,05	
		4,00	150,14	149,80	150,20	147,02	150,24	136,17	
1 120°C	1,00	1,00	150,15	149,66	150,03	146,66	150,30	134,00	0,11
		2,00	150,17	149,70	150,03	146,50	150,24	133,95	
		3,00	150,22	149,68	150,11	146,55	150,29	134,02	
		4,00	150,08	149,60	150,18	146,62	150,32	134,15	
	2,00	1,00	150,14	149,65	150,07	146,55	150,33	134,17	
		2,00	150,15	149,66	150,09	146,70	150,27	134,09	
		3,00	150,02	149,54	150,12	146,58	150,22	134,10	
		4,00	150,00	149,52	150,11	146,60	150,28	134,17	
	3,00	1,00	150,02	149,55	150,04	146,66	150,33	134,20	
		2,00	150,08	149,50	150,25	146,62	150,34	134,17	
		3,00	150,15	149,52	150,27	146,59	150,28	134,19	
		4,00	150,19	149,52	150,09	146,50	150,24	134,20	
1 140°C	1,00	1,00	150,22	149,32	150,22	145,90	150,29	133,20	0,11
		2,00	150,14	149,33	150,24	145,98	150,21	133,00	
		3,00	150,14	149,27	150,28	145,97	150,20	133,15	
		4,00	150,19	149,22	150,08	145,90	150,19	132,95	
	2,00	1,00	150,23	149,19	150,18	146,05	150,18	132,90	
		2,00	150,28	149,25	150,22	146,02	150,27	132,85	
		3,00	150,22	149,33	150,26	146,00	150,24	133,99	
		4,00	150,07	149,19	150,23	146,14	150,33	133,01	
	3,00	1,00	150,22	149,22	150,28	146,11	150,24	132,88	
		2,00	150,18	149,22	150,14	146,13	150,24	132,44	
		3,00	150,19	149,28	150,17	146,02	150,24	132,99	
		4,00	150,17	149,33	150,22	146,12	150,33	132,86	
1 160°C	1,00	1,00	150,13	144,03	150,17	144,20	150,27	131,00	0,13
		2,00	150,11	144,22	150,12	144,10	150,24	131,20	
		3,00	150,10	144,37	150,19	144,10	150,22	131,05	
		4,00	150,12	144,45	150,21	143,80	150,21	131,07	
	2,00	1,00	150,14	144,20	150,24	143,99	150,24	131,15	
		2,00	150,17	144,33	150,26	143,92	150,26	131,00	
		3,00	150,19	144,42	150,24	144,02	150,24	130,88	
		4,00	150,10	144,33	150,22	144,15	150,35	130,95	
	3,00	1,00	150,10	144,50	150,17	144,12	150,34	130,88	
		2,00	150,11	144,00	150,17	144,19	150,29	130,95	
		3,00	150,00	144,50	150,18	143,20	150,24	130,69	
		4,00	150,14	144,60	150,19	143,85	150,28	130,82	

Continuación de apéndice 4.

Recolección de datos para resistencia en crudo de las arcillas

Formula	Presión en bar	Repetición	Espesor en mm	Peso en kg	Largo en mm	Ancho en mm
1	200	1	8,57	0,244	150,12	100,48
		2	8,59	0,25	150,14	100,46
		3	8,45	0,246	150,07	100,76
2	200	1	8,46	0,248	150,22	100,45
		2	8,44	0,247	150,16	100,22
		3	8,52	0,252	150,17	100,29
3	200	1	8,47	0,251	150,05	100,35
		2	8,53	0,25	150,07	100,36
		3	8,62	0,253	150,12	100,42

Continuación de apéndice 4.

Recolección de datos para densidad aparente de fórmulas

Formula	Presión en bar	Repetición	Densidad aparente g/cm ³	Promedio en g/cm ³
1	160	1	1,911	1,911
		2	1,911	
		3	1,912	
	180	1	1,922	1,929
		2	1,930	
		3	1,936	
	200	1	1,952	1,946
		2	1,944	
		3	1,943	
	220	1	1,952	1,951
		2	1,954	
		3	1,948	
2	160	1	1,860	1,863
		2	1,866	
		3	1,863	
	180	1	1,880	1,880
		2	1,880	
		3	1,881	
	200	1	1,890	1,895
		2	1,900	
		3	1,894	
	220	1	1,908	1,908
		2	1,908	
		3	1,909	
3	160	1	1,852	1,862
		2	1,869	
		3	1,864	
	180	1	1,878	1,880
		2	1,885	
		3	1,876	
	200	1	1,912	1,895
		2	1,880	
		3	1,894	
	220	1	1,910	1,908
		2	1,904	
		3	1,909	

Continuación de apéndice 4.

4	160	1	1,885	1,885
		2	1,893	
		3	1,878	
	180	1	1,907	1,907
		2	1,908	
		3	1,907	
	200	1	1,900	1,905
		2	1,923	
		3	1,893	
	220	1	1,910	1,907
		2	1,912	
		3	1,900	
5	160	1	1,882	1,882
		2	1,882	
		3	1,883	
	180	1	1,912	1,908
		2	1,908	
		3	1,905	
	200	1	1,930	1,924
		2	1,935	
		3	1,907	
	220	1	1,928	1,926
		2	1,928	
		3	1,923	

Recolección de datos para distribución granulométrica

Fórmula	Luz malla de μm	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
		Distribución en %	Distribución en %	Distribución en %	Distribución en %
1	300	0,47	0,56	0,37	0,47
	250	2,81	2,71	2,81	2,78
	180	7,84	7,86	7,76	7,82
	125	15,73	15,72	15,81	15,75
	75	17,50	17,49	17,49	17,49
	63	5,44	5,43	5,52	5,46
	45	9,46	9,54	9,54	9,51
	<45	40,77	40,69	40,69	40,72
2	300	1,67	1,71	1,61	1,66
	250	4,26	4,27	4,27	4,27
	180	8,95	8,92	9,02	8,96
	125	14,51	14,52	14,43	14,49
	75	16,10	16,03	16,05	16,06
	63	5,33	5,41	5,41	5,38

Continuación de apéndice 4.

	45	10,64	10,72	10,54	10,63
	<45	38,55	38,43	38,65	38,54
3	300	2,15	2,23	2,14	2,17
	250	5,37	5,29	5,39	5,35
	180	8,97	9,00	9,01	8,99
	125	14,09	14,10	14,11	14,10
	75	15,85	15,86	15,78	15,83
	63	5,32	5,38	5,39	5,36
	45	8,94	9,00	8,91	8,95
	<45	39,31	39,15	39,28	39,24
4	300	3,20	3,29	3,28	3,25
	250	5,10	5,08	5,08	5,08
	180	10,10	10,07	10,15	10,11
	125	13,02	12,98	12,97	12,99
	75	18,41	18,44	18,42	18,42
	63	7,31	7,24	7,33	7,30
	45	8,39	8,47	8,37	8,41
	<45	34,48	34,43	34,40	34,44
5	300	4,82	4,88	4,81	4,84
	250	3,55	3,57	3,49	3,54
	180	9,54	9,58	9,62	9,58
	125	14,56	14,55	14,53	14,55
	75	15,46	15,49	15,38	15,44
	63	4,85	4,88	4,91	4,88
	45	8,39	8,36	8,40	8,38
	<45	38,84	38,69	38,87	38,80

Recolección de datos para resistencia en crudo de las fórmulas

Fórmula	Presión en bar	Repetición	Resistencia a la flexión en kg/cm ²	Resistencia a la flexión en kg/cm ²
1	160	1	0,20	0,210
		2	0,22	
		3	0,21	
	180	1	0,22	0,226
		2	0,24	
		3	0,22	
	200	1	0,29	0,290
		2	0,28	
		3	0,30	
	220	1	0,35	0,360
		2	0,36	

Continuación de apéndice 4.

		3	0,37	
2	160	1	0,15	0,157
		2	0,16	
		3	0,16	
	180	1	0,18	0,187
		2	0,19	
		3	0,19	
	200	1	0,21	0,217
		2	0,22	
		3	0,22	
	220	1	0,23	0,230
		2	0,23	
		3	0,23	
3	160	1	0,26	0,267
		2	0,27	
		3	0,27	
	180	1	0,25	0,257
		2	0,25	
		3	0,27	
	200	1	0,34	0,333
		2	0,33	
		3	0,33	
	220	1	0,34	0,350
		2	0,36	
		3	0,35	
4	160	1	0,23	0,223
		2	0,22	
		3	0,22	
	180	1	0,24	0,240
		2	0,23	
		3	0,25	
	200	1	0,24	0,243
		2	0,25	
		3	0,24	
	220	1	0,33	0,317
		2	0,31	
		3	0,31	
5	160	1	0,19	0,190
		2	0,19	
		3	0,19	
	180	1	0,27	0,260
		2	0,26	
		3	0,25	
	200	1	0,42	0,407

Continuación de apéndice 4.

		2	0,41	0,440
		3	0,39	
		1	0,46	
	220	2	0,43	
	3	0,43		

Recolección de datos para resistencia en cocido de las fórmulas

Formula	Presión en bar	Repetición	Largo en mm	Ancho en mm	Peso en kg	Espesor en mm	Resistencia a la flexión en kg/cm ²
1	160	1	150,10	100,35	0,250	9,10	5,84
1	160	2	150,13	100,38	0,233	9,00	5,74
1	160	3	150,15	100,33	0,246	9,05	5,80
1	180	1	150,03	100,40	0,208	8,32	7,53
1	180	2	150,04	100,46	0,212	8,23	7,50
1	180	3	150,07	100,42	0,203	8,32	7,40
1	200	1	150,21	100,27	0,224	8,38	9,20
1	200	2	150,19	100,39	0,228	8,42	9,16
1	200	3	150,20	100,29	0,232	8,47	9,12
1	220	1	150,12	100,40	0,242	8,75	9,87
1	220	2	150,17	100,44	0,237	8,69	9,80
1	220	3	150,10	100,50	0,239	8,74	9,75
2	160	1	148,80	99,63	0,215	8,42	9,00
2	160	2	148,88	99,68	0,213	8,35	8,93
2	160	3	148,82	99,64	0,210	8,28	8,87
2	180	1	148,95	99,60	0,202	8,07	9,32
2	180	2	148,90	99,65	0,207	8,02	9,20
2	180	3	148,97	99,70	0,210	8,10	9,12
2	200	1	149,17	99,68	0,207	7,87	10,00
2	200	2	149,07	99,75	0,204	7,84	10,05
2	200	3	149,10	99,71	0,200	7,77	10,15
2	220	1	148,95	99,52	0,210	7,70	11,07
2	220	2	148,90	99,68	0,203	7,76	11,00
2	220	3	148,80	99,75	0,208	7,81	11,15
3	160	1	148,85	100,13	0,212	8,52	6,68
3	160	2	149,80	100,07	0,219	8,61	6,79
3	160	3	149,93	100,02	0,220	8,67	6,84
3	180	1	149,70	100,16	0,232	8,82	7,54
3	180	2	149,63	100,08	0,229	8,74	7,61
3	180	3	149,63	100,02	0,235	8,60	7,75
3	200	1	149,70	100,08	0,220	8,33	8,10
3	200	2	149,65	100,18	0,216	8,29	7,91
3	200	3	149,77	100,20	0,215	8,18	7,97

Continuación de apéndice 4.

3	220	1	149,80	100,19	0,217	8,12	9,17
3	220	2	149,73	100,09	0,211	8,02	9,13
3	220	3	149,80	100,08	0,220	8,07	9,11
4	160	1	149,67	100,12	0,235	9,00	7,27
4	160	2	149,64	100,02	0,229	8,94	7,25
4	160	3	149,58	100,09	0,240	8,88	7,17
4	180	1	149,48	100,10	0,225	8,96	8,96
4	180	2	149,52	100,04	0,233	8,92	8,86
4	180	3	149,40	100,07	0,213	8,90	8,92
4	200	1	149,40	100,04	0,201	8,88	9,25
4	200	2	149,50	100,00	0,229	8,77	9,09
4	200	3	149,46	100,03	0,213	8,62	9,14
4	220	1	149,30	100,05	0,225	8,72	9,73
4	220	2	149,60	100,07	0,234	8,80	9,70
4	220	3	149,45	100,03	0,230	8,74	9,66
5	160	1	149,45	99,95	0,210	8,49	7,66
5	160	2	149,39	99,89	0,220	8,45	7,55
5	160	3	149,45	99,95	0,210	8,50	7,44
5	180	1	149,60	100,12	0,226	8,17	7,96
5	180	2	149,53	100,00	0,216	8,26	7,89
5	180	3	149,62	100,03	0,205	8,29	7,93
5	200	1	149,63	100,12	0,225	8,39	8,33
5	200	2	149,55	100,02	0,222	8,34	8,21
5	200	3	149,60	100,15	0,227	8,40	8,15
5	220	1	149,63	100,08	0,232	8,46	8,89
5	220	2	149,57	100,02	0,220	8,37	8,84
5	220	3	149,62	100,06	0,218	8,42	8,80

Recolección de datos para curva de gresificación

Temperatura máxima de cocción en °C	Repetición	Pieza	Ancho crudo en mm	Ancho cocido en mm	C.L en %	Peso seco en kg	Peso húmedo en kg	Absorción en %	Promedio
1 100 °C	1	1	100,43	100,62	-0,19 %	0,229	0,182	20,30 %	20,10 %
		2	100,48	100,74	-0,26 %	0,218	0,175	19,88 %	
		3	100,49	100,85	-0,36 %	0,211	0,168	20,33 %	
		4	100,72	101,05	-0,33 %	0,211	0,167	21,07 %	
	2	1	100,40	100,68	-0,28 %	0,227	0,181	19,92 %	
		2	100,52	100,91	-0,39 %	0,223	0,179	19,88 %	
		3	100,26	100,01	0,25 %	0,224	0,179	20,01 %	
		4	100,28	100,54	-0,26 %	0,209	0,167	20,00 %	
	3	1	100,38	100,58	-0,20 %	0,210	0,168	20,10 %	
		2	100,43	100,60	-0,17 %	0,219	0,175	20,02 %	
		3	100,47	100,67	-0,20 %	0,222	0,177	19,92 %	
		4	100,48	100,65	-0,17 %	0,205	0,164	19,74 %	

Continuación de apéndice 4.

1 120 °C	1	1	100,36	99,97	0,38 %	0,207	0,168	18,96 %	18,84 %
		2	100,59	100,25	0,34 %	0,206	0,168	18,33 %	
		3	100,71	100,42	0,29 %	0,219	0,178	18,45 %	
		4	100,52	100,20	0,32 %	0,219	0,178	18,77 %	
	2	1	100,70	100,37	0,33 %	0,213	0,172	19,20 %	
		2	100,50	100,10	0,40 %	0,216	0,175	18,99 %	
		3	100,30	99,87	0,43 %	0,218	0,177	18,88 %	
		4	100,44	100,09	0,35 %	0,219	0,178	18,55 %	
	3	1	100,29	99,90	0,39 %	0,209	0,171	18,32 %	
		2	100,54	100,21	0,33 %	0,211	0,170	19,23 %	
		3	100,70	100,35	0,34 %	0,222	0,179	19,15 %	
		4	100,63	100,29	0,34 %	0,210	0,170	19,20 %	
1 140 °C	1	1	100,64	98,27	2,36 %	0,221	0,188	14,88 %	15,01 %
		2	100,67	98,23	2,42 %	0,207	0,176	14,96 %	
		3	100,46	98,11	2,34 %	0,214	0,182	14,86 %	
		4	100,56	98,21	2,34 %	0,212	0,180	15,03 %	
	2	1	100,46	97,95	2,50 %	0,205	0,174	15,00 %	
		2	100,40	97,99	2,40 %	0,205	0,174	15,10 %	
		3	100,49	98,20	2,28 %	0,204	0,173	15,20 %	
		4	100,51	98,18	2,32 %	0,226	0,191	15,21 %	
	3	1	100,54	98,22	2,30 %	0,228	0,194	14,88 %	
		2	100,72	98,42	2,28 %	0,212	0,182	14,30 %	
		3	100,61	98,27	2,33 %	0,227	0,192	15,44 %	
		4	100,41	98,16	2,24 %	0,215	0,182	15,29 %	
1 160 °C	1	1	100,46	94,63	5,80 %	0,215	0,203	5,40 %	5,96 %
		2	100,65	94,73	5,88 %	0,228	0,215	5,48 %	
		3	100,61	94,65	5,92 %	0,215	0,202	5,70 %	
		4	100,32	94,43	5,88 %	0,227	0,214	5,88 %	
	2	1	100,72	94,68	5,99 %	0,216	0,203	6,20 %	
		2	100,49	94,42	6,04 %	0,204	0,191	6,43 %	
		3	100,57	94,58	5,96 %	0,221	0,207	6,52 %	
		4	100,60	94,53	6,03 %	0,221	0,207	6,24 %	
	3	1	100,40	94,33	6,05 %	0,222	0,209	6,02 %	
		2	100,67	94,63	6,00 %	0,207	0,195	5,98 %	
		3	100,35	94,35	5,98 %	0,212	0,200	5,90 %	
		4	100,69	94,71	5,94 %	0,210	0,198	5,76 %	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Análisis de varianza de contracción lineal de fórmula 1

Análisis de varianza de un factor						
Fórmula 1			Contracción lineal			
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100	3	-0,0064	-0,002133	3,90833E-07		
1 120	3	0,0106	0,0035333	5,14583E-08		
1 140	3	0,070275	0,023425	2,29375E-07		
1 160	3	0,178675	0,0595583	5,56458E-07		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0069985	3	0,0023328	7598,003506	3,72827E-14	4,066180551
Dentro de los grupos	2,456E-06	8	3,07E-07			
Total	0,0070009	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Análisis de varianza de contracción lineal de fórmula 2

Análisis de varianza de un factor						
Formula 2			Contracción lineal			
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100 °C	3	-0,002475	-0,000825	1,225E-07		
1 120 °C	3	-0,025325	-0,008441667	3,3583E-07		
1 140 °C	3	0,078975	0,026325	9,5313E-07		
1 160 °C	3	0,239375	0,079791667	1,6133E-06		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,014360032	3	0,004786677	6329,92676	7,73706E-14	4,066180551
Dentro de los grupos	6,04958E-06	8	7,56198E-07			
Total	0,014366082	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Análisis de varianza de contracción lineal de fórmula 3

Análisis de varianza de un factor				
Formula 3 Contracción lineal				
RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1 100 °C	3	-0,0024	-0,0008	9E-08
1 120 °C	3	0,0154	0,0051333	1,227E-07
1 140 °C	3	0,05955	0,01985	6,975E-07
1 160 °C	3	0,168525	0,056175	5,931E-07

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0058868	3	0,0019623	5221,1409	1,67085E-13	4,066180551
Dentro de los grupos	3,007E-06	8	3,758E-07			
Total	0,0058898	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Análisis de varianza de contracción lineal de fórmula 4

Análisis de varianza de un factor				
Formula 4 Contracción lineal				
RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
1 100 °C	3	0,011	0,004	0,000
1 120 °C	3	0,014	0,005	0,000
1 140 °C	3	0,046	0,015	0,000
1 160 °C	3	0,199	0,066	0,000

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0079625	3	0,0026542	20230,156	7,42552E-16	4,0661806
Dentro de los grupos	1,05E-06	8	1,312E-07			
Total	0,0079635	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Análisis de varianza de contracción lineal de fórmula 5

Análisis de varianza de un factor						
Formula 5 Contracción lineal						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100 °C	3	0,0062	0,0020667	1,021E-08		
1 120 °C	3	0,0181	0,0060333	1,233E-07		
1 140 °C	3	0,049625	0,0165417	7,146E-08		
1 160 °C	3	0,164	0,0546667	5,771E-08		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0051909	3	0,0017303	26345,422	2,58203E-16	4,0661806
Dentro de los grupos	5,254E-07	8	6,568E-08			
Total	0,0051914	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Análisis de varianza de absorción de fórmula 1

Análisis de varianza de un factor						
Fórmula 1 Absorción						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100 °C	3	0,602925	0,2010	6,639E-06		
1 120 °C	3	0,565075	0,1884	3,378E-06		
1 140 °C	3	0,450375	0,1501	1,043E-06		
1 160 °C	3	0,178775	0,0596	1,356E-05		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0367298	3	0,0122433	1989,1751	7,90175E-12	4,0661806
Dentro de los grupos	4,924E-05	8	6,155E-06			
Total	0,036779	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Análisis de varianza de absorción de fórmula 2

Análisis de varianza de un factor						
		Fórmula 2		Absorción		
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100 °C	3	0,6333	0,2111	2,44E-06		
1 120 °C	3	0,5731	0,1910333	6,933E-07		
1 140 °C	3	0,4629	0,1543	1,351E-05		
1160 °C	3	0,0996	0,0332	3E-06		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0571524	3	0,0190508	3879,3431	5,4781E-13	4,0661806
Dentro de los grupos	3,929E-05	8	4,911E-06			
Total	0,0571917	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Análisis de varianza de absorción de fórmula 3

Análisis de varianza de un factor						
		Formula 3		Absorción		
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100 °C	3	0,6253	0,2084333	1,633E-07		
1 120 °C	3	0,5848	0,1949333	2,48E-05		
1 140 °C	3	0,4905	0,1635	2,1E-07		
1 160 °C	3	0,2676	0,0892	1E-08		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0255794	3	0,0085265	1354,1262	3,66927E-11	4,0661806
Dentro de los grupos	5,037E-05	8	6,297E-06			
Total	0,0256298	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Análisis de varianza de absorción de fórmula 4**

Análisis de varianza de un factor						
		Formula 4	Absorción			
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100 °C	3	0,6382	0,21273333	2,1333E-07		
1 120 °C	3	0,5858	0,19526667	1,6493E-05		
1 140 °C	3	0,5227	0,17423333	2,3243E-05		
1 160 °C	3	0,1759	0,05863333	5,8033E-06		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,04350643	3	0,01450214	1267,85458	4,7718E-11	4,06618055
Dentro de los grupos	9,1507E-05	8	1,1438E-05			
Total	0,04359794	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Análisis de varianza de absorción de fórmula 5**

Análisis de varianza de un factor						
		Formula 5	Absorción			
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
1 100 °C	3	0,6066	0,2022	7E-08		
1 120 °C	3	0,5845	0,1948333	3,333E-09		
1 140 °C	3	0,5131	0,1710333	1,773E-06		
1 160 °C	3	0,3345	0,1115	2,5E-07		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0152304	3	0,0050768	9685,4791	1,41242E-14	4,0661806
Dentro de los grupos	4,193E-06	8	5,242E-07			
Total	0,0152346	11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Análisis de varianza de resistencia a la flexión en cocido
fórmula 1**

Análisis de varianza de un factor					
RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
160	3	17,38	5,79	0,00253	
180	3	22,43	7,48	0,00463	
200	3	27,48	9,16	0,0016	
220	3	29,42	9,81	0,00363	

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	29,2166		9,7378	3141,75	1,28E-12	4,06618
Dentro de los grupos	0,0248		0,0031			
Total	29,2419					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Análisis de varianza de resistencia a la flexión formula 2**

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
160	3	26,8	8,933	0,0042		
180	3	27,64	9,2133	0,0101		
200	3	30,2	10,066	0,005833		
220	3	33,22	11,073	0,005633		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos		3	2,7859	431,36	3,49E-09	4,06618
Dentro de los grupos		8	0,006458			
Total		11				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. Análisis de varianza de resistencia a la flexión formula 3

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN					Formula 3	Resistencia en cocido
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
160	3	20,31	6,77	0,0067		
180	3	22,9	7,6333	0,001143		
200	3	23,98	7,9933	0,009433		
220	3	27,41	9,1367	0,000933		

ANÁLISIS DE VARIANZA							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Entre grupos	8,6548	3	2,8849	404,9	4,49E-09	4,06618	
Dentro de los grupos	0,057	8	0,0071				
Total	8,71	11					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. Análisis de varianza de resistencia a la flexión formula 4

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN					Formula 4	Resistencia en cocido
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
160	3	21,69	7,23	0,028		
180	3	26,74	8,91	0,00253		
200	3	27,48	9,16	0,0067		
220	3	29,09	9,69	0,001233		

ANÁLISIS DE VARIANZA							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Entre grupos	10,204	3	3,4013	1025,53	1,11E-10	4,06618	
Dentro de los grupos	0,02653	8	0,0033				
Total	10,2306	11					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Análisis de varianza de resistencia a la flexión formula 5**

Análisis de varianza de un factor						
Formula 5 Resistencia en cocido						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
160	3	22,65	7,55	0,0121		
180	3	23,78	7,92	0,01233		
200	3	24,69	8,23	0,0084		
220	3	26,53	8,84	0,002033		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2,689	3	0,8963	150,86	2,22E-07	4,06618
Dentro de los grupos	0,0475	8	0,005941			
Total	2,73	11				

Fuente: elaboración propia.