



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Química

Generación de un modelo de optimización en la dosificación de pastas cerámicas para porcelanato basado en programación lineal

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

Autora:

Andrea Estefania Velesaca Mora

CI: 0105074595

Correo electrónico: andreavelesaca1995@gmail.com

Director:

Ing. Noe Rodrigo Guamán Guachichullca

CI: 0105291595

Cuenca - Ecuador

19-agosto-2020



RESUMEN

La presente investigación propone el estudio y la generación de un modelo de optimización basado en programación lineal, con el objetivo de formular propuestas de pastas para porcelanato en la empresa Rialto S.A. Utilizando como base para el desarrollo del modelo las características físicas químicas de las materias primas.

El desarrollo de este proyecto se dividió en cuatro etapas principales, las mismas que se desarrollaron en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la empresa Rialto. La primera etapa consistió en la caracterización de las materias primas, para esto se realizó un muestreo de las materias primas que se utilizan para dosificar la pasta de porcelanato, luego se determinaron los valores del porcentaje de absorción, porcentaje de contracción, coeficiente de dilatación, módulo de rotura en crudo, secado y en la quema de cada una para crear una base de datos. La siguiente etapa es el desarrollo de la herramienta de optimización, la misma que se basa en el análisis químico de cada material y tiene como funciones objetivo la minimización de costo, minimización del porcentaje de absorción y del porcentaje de contracción. La tercera etapa del proyecto consistió en realizar una prueba in situ de las fórmulas propuestas por la herramienta de optimización junto con la fórmula estándar de producción. Finalmente, en la última etapa se realizó una comparación de costos y propiedades físico – químicas de las fórmulas obtenidas a través de la herramienta optimización vs las fórmulas de producción utilizadas en planta durante el año 2019.

Palabras clave: Porcelanato. Programación lineal.



ABSTRACT

This research proposes the study and generation of an optimization model based on linear programming, with the aim of formulating proposals for porcelain paste in the company Rialto SA, using it as the basis for the development of the model of the physical characteristics of raw materials.

The development of this project is divided into four main stages, the same ones that are developed in the Research and Development Laboratory of the Rialto company. The first stage consists of the characterization of the raw materials, for this a sampling of the raw materials that are used to dose the porcelain paste is carried out, then the values of the percentage of absorption, percentage of contraction, coefficient of expansion, are determined, module of crude break, drying and burning of each one to create a database. The next stage is the development of the optimization tool, which is based on the chemical analysis of each material and has the objective functions of minimizing cost, minimizing the percentage of absorption and the percentage of contraction. The third stage of the project consists of carrying out an on-site test of the formulas proposed by the optimization tool together with the standard production formula. Finally, in the last stage, a comparison of costs and physical-chemical properties was made of the formulas obtained through the optimization tool vs. the production formulas used in the plant during the year 2019.

Keywords: Porcelain. Linear programming.



ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	9
CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL.....	10
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL.....	11
AGRADECIMIENTOS	12
DEDICATORIA.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 PORCELANATO.....	15
1.1.1 Gres porcelánico	15
1.1.2 Características del gres porcelánico	16
1.1.3 Diferencias entre el gres normal y el gres porcelánico.....	16
1.1.4 Proceso de fabricación.....	17
1.2 MATERIAS PRIMAS PARA PASTAS CERÁMICAS	22
1.2.1 Materias Plásticas	22



1.2.2 Materias No Plásticas	23
1.3 CARACTERISTICAS FISICOQUÍMICAS Y PROPIEDADES DE LAS MATERIAS PRIMAS	25
1.3.1 Composición química y mineralógica	25
1.3.2 Absorción y contracción lineal	26
1.3.4 Módulo de rotura	27
1.3.5 Análisis dilatométrico.....	28
1.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN.....	28
1.4.1 Programación lineal.....	32
1.4.2 Método simplex	34
1.4.3 Modelos de optimización programación lineal	37
2. OBJETIVOS.....	37
2.1 OBJETIVO GENERAL	37
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
3. METODOLOGÍA.....	38
3.1 MUESTREO.....	38
3.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	39
3.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA	42
3.3.1 Determinación del porcentaje de humedad	43



3.3.2 Secado y reducción de tamaño de las materias primas molidas a nivel laboratorio	45
3.3.3 Prensado de placas de muestra	47
3.3.4 Quema de placas muestra	49
3.3.5 Determinación de pérdidas al fuego	50
3.3.6 Determinación del porcentaje de Contracción a la quema	50
3.3.7 Determinación de módulos de rotura.....	51
3.3.8 Determinación del porcentaje de Absorción	52
3.3.9 Determinación del coeficiente de dilatación	52
3.4 Desarrollo de la herramienta de optimización	53
4. RESULTADOS	59
4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	59
4.2 PASTA DE PORCELANATO.....	67
5. DISCUSIÓN	74
6. CONCLUSIONES.....	77
7. RECOMENDACIONES	77
8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	78



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Diferencias entre el gres normal y el gres porcelánico	16
Tabla N° 2 Códigos asignados a las materias primas de estudio.....	43
Tabla N° 3 Composición química de materias primas	54
Tabla N° 4 Composición química teórica de las fórmulas proporcionadas por la empresa Rialto	56
Tabla N° 5 Rangos de restricción: Porcentajes de óxidos en la composición química	57
Tabla N° 6 Costo por kilogramo de cada materia prima	57
Tabla N° 7 Porcentaje de humedad de materias primas	59
Tabla N° 8 Peso bruto, cantidad de aditivos, tiempo de molienda, densidad, residuo y viscosidad de cada materia prima.....	60
Tabla N° 9 Cantidad de agua para humedad =8%	61
Tabla N° 10 Porcentaje de pérdidas al fuego de materias primas.....	61
Tabla N° 11 Módulo de rotura en crudo de cada materia prima	62
Tabla N° 12 Módulo de rotura en seco de cada materia prima	63
Tabla N° 13 Módulo de rotura de cada materia prima luego de la quema.....	64
Tabla N° 14 Porcentaje de contracción de materias primas.....	65
Tabla N° 15 Porcentaje de absorción de materias primas.....	66
Tabla N° 16 Coeficientes de dilatación de materias primas	67
Tabla N° 17 Fórmulas calculadas por la herramienta de optimización	68



Tabla N° 18 Porcentaje de humedad de materias primas.....	69
Tabla N° 19 Parámetros de molienda de las pastas para porcelanato	70
Tabla N° 20 Tiempo óptimo de molienda para las pastas prueba y porcentaje de residuo de cada una.....	70
Tabla N° 21 Porcentaje de pérdidas al fuego de las pastas prueba	70
Tabla N° 22 Resistencia a la rotura de las pastas prueba.....	71
Tabla N° 23 Módulo de rotura de las pastas prueba	71
Tabla N° 24 Porcentaje de contracción de pastas prueba a nivel laboratorio	72
Tabla N° 25 Porcentaje de absorción de las pastas prueba a nivel laboratorio.....	72
Tabla N° 26 Coeficientes de dilatación de las fórmulas propuestas según la herramienta de optimización	73
Tabla N° 27 Propiedades físico - químicas de las pastas de porcelanato.....	74



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Gres Porcelánico.....	15
Ilustración 2: Proceso de fabricación.....	17
Ilustración 3: Formulación de un modelo de programación lineal	34
Ilustración 4: Cuarteador de jones	39
Ilustración 5: Reducción de partícula	40
Ilustración 6: Molino - muestra seca.....	41
Ilustración 7: Secado de muestra	42
Ilustración 8: Lámpara infrarrojo.....	44
Ilustración 9: Molinillo de laboratorio.....	45
Ilustración 10: Cacerola para secar material molido	46
<i>Ilustración 11:</i> Reducción de tamaño	47
Ilustración 12: Malla N° 10.....	48
Ilustración 13: Prensa de laboratorio	49
Ilustración 14: Placas de materias primas luego de la quema.....	50



CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Andrea Estefania Velesaca Mora en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Generación de un modelo de optimización en la dosificación de pastas cerámicas para porcelanato basado en programación lineal**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 19 de agosto del 2020

Andrea Estefania Velesaca Mora

C.I: 0105074595



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Andrea Estefania Velesaca Mora, autor del trabajo de titulación “**Generación de un modelo de optimización en la dosificación de pastas cerámicas para porcelanato basado en programación lineal**”, certifico que todas las ideas y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 19 de agosto del 2020

Andrea Estefania Velesaca Mora

C.I: 0105074595



AGRADECIMIENTOS

Expreso mis profundos agradecimientos a todos quienes fueron parte
de mi educación y formación profesional.

De manera especial agradezco a la empresa Rialto S.A y a su departamento
de Investigación y Desarrollo por la apertura y la colaboración
en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente agradezco a mis maestros, amigos y familiares, cuyo cariño y apoyo
incondicional impulsó mi anhelo por conseguir esta meta.



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia y a todas las personas que confiaron en que
llegaría a este punto en mi formación.

También me dedico este trabajo por el esfuerzo y tiempo entregado
para alcanzar este objetivo.



1. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de una pasta cerámica a nivel industrial, se deben hacer una serie de pruebas basándose en dos hechos importantes, por un lado, se encuentra el estudio especializado de la tecnología cerámica y por otro, el conocimiento adquirido con años de experiencia y pruebas prácticas en producción. Con todo esto, cada vez que se busca dosificar una pasta barbotina, es necesario ajustar la fórmula hasta obtener una mezcla que cumpla con la normativa de calidad y los parámetros de control en producción.

Por ejemplo, en cerámica plana de baja impregnación como es el caso del gres porcelánico vidriado, se espera que el porcentaje de absorción sea menor al 0,5% (INEN, 2009), y que la contracción se encuentre entre el 6 % y 8% de acuerdo a los requerimientos de fabricación. Realizar un ajuste para lograr este objetivo requiere entre otras cosas, de tiempo, debido a la serie de pruebas que se deben ejecutar y en la mayoría de veces habrá que recurrir al tanteo hasta alcanzar las características deseadas en el producto final.

Para minimizar el tiempo que necesitan estas pruebas y ensayos, es posible utilizar métodos de optimización como la programación lineal, mediante software. Actualmente, a nivel industrial se han introducido instrumentos en las últimas versiones de hojas de cálculo que permiten dar solución a algunos de los problemas mencionados de una manera más rápida y eficiente. Estos instrumentos, conocidos como “solvers”, son una alternativa muy efectiva que se utiliza en lugar de programas especializados de optimización, pues tienen como ventaja su facilidad de manejo y comunicación con el usuario final (ALVAREZ, 2003).

Por las razones expuestas, la presente investigación pretende dar solución a este problema en la empresa Rialto, donde se plantea generar fórmulas para porcelanato basándose en un modelo matemático de programación lineal, utilizando la herramienta Solver de Excel. Esto con la finalidad de conseguir una mejora en la calidad del porcelanato actual y a su vez conseguir la minimización en los costos de materia prima utilizada en la producción de porcelanato.

El modelo matemático de programación lineal tomará en cuenta propiedades físicas de las materias primas como: contracción, absorción, coeficiente de dilatación y módulo de rotura.



También incluirá el análisis químico de cada una de ellas.

Durante la generación de esta herramienta es necesario establecer ciertas restricciones para cada uno de los parámetros que determinarán la calidad del producto, estos valores serán proporcionados por la empresa Rialto de acuerdo a la Normativa Nacional y los requerimientos de producción.

1.1 PORCELANATO

Según lo establece (Porto & Merino, 2015), el porcelanato es un material utilizado para revestimientos de pisos y paredes, es un producto de tipo cerámico, hecho de una combinación de cuarzo, arcilla y otros materiales, mismos que se moldean, prensan y secan a una temperatura de más de 1300 grados centígrados. A continuación, se muestran las principales características de este material:

1.1.1 Gres porcelánico



Ilustración 1: Gres Porcelánico
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

El gres porcelánico es una cerámica de pasta compacta y dura, coloreada, no porosa. La palabra “gres” significa que la masa cerámica de la baldosa es extremadamente vitrificada, de lo que deriva su excepcional resistencia.

El gres porcelánico es un material que se destaca por demostrar los valores más bajos de absorción de agua, es decir, la cantidad de agua que puede absorber en particulares condiciones de acuerdo al método aplicado es mínima (Refin Ceramiche).



1.1.2 Características del gres porcelánico

Según lo indica (Geteco, 2018) las características y ventajas principales del gres porcelánico son:

- Está fabricado en una única cocción, por lo que el material es exactamente igual en la base que en la superficie.
- El gres porcelánico es un material compacto, antideslizante y, sobre todo, muy resistente al agua, al hielo, a la lluvia y a los cambios de temperatura.
- El gres porcelánico puede tener una gran afluencia de colores, espesores, acabados y formatos, e incluso puede imitar multitud de materiales naturales como la madera, la piedra, el granito o mármol; además se adapta prácticamente a cualquier estética y estilo.
- Gracias a su versatilidad, se puede realizar diferentes combinaciones de porcelanato con otros materiales y utilizarlo tanto en interiores como en exteriores, con resultados muy buenos.
- El gres porcelánico es muy fácil de trabajar, por lo que puede ser cortado o perforado y personalizarlo según necesidades de cada obra.
- Es fácil de mantener e higienizar, por lo que el mantenimiento de este material también es muy sencillo; se puede utilizar prácticamente cualquier detergente o desinfectante para limpiarlo, sin realizar mayores esfuerzos para dejarlo completamente limpio.

1.1.3 Diferencias entre el gres normal y el gres porcelánico

Tabla N° 1 Diferencias entre el gres normal y el gres porcelánico

Característica	Gres Normal	Gres Porcelánico
Resistencia	Menos resistente	Más resistente y también más duradero.
Materiales y su precio	Entre 10 – 15 dólares el m ²	Hasta un 50% más caro que el gres normal
Colorear	Es más sencillo de colorear lo que, en líneas generales, es una opción más barata y más rápida	Tiene complicaciones a la hora de colorear por todos sus acabados.

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)



1.1.4 Proceso de fabricación

Según lo señalado en el sitio web (Construmática, 2019), el proceso de fabricación se desarrolla en una serie de etapas sucesivas que a continuación se anuncian:

- ✓ Preparación de las materias primas.
- ✓ Conformación y secado en crudo de la pieza
- ✓ Cocción o cocciones, con o sin esmaltado
- ✓ Tratamientos adicionales
- ✓ Clasificación y embalaje

Dependiendo de que el producto a fabricar sea esmaltado o no, de que éste se fabrique por un procedimiento de monococción, bicocción o tercer fuego, en un determinado proceso se realizará o no el esmaltado, o se modificará la secuencia de las etapas de esmaltado y de cocción en la forma adecuada.



Ilustración 2: Proceso de fabricación
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)



Preparación de las materias primas

El proceso cerámico comienza con la selección de las materias primas que deben formar parte de la composición de la pasta, que son fundamentalmente arcilla, feldespatos, arena, carbonatos y caolines (Construmática, 2019).

En la industria cerámica tradicional las materias primas se suelen utilizar, por lo general, tal y como se extraen de la mina o cantera, o después de someterlas a un mínimo tratamiento para aprovechar al máximo su potencial natural. Su procedencia nativa exige, en la mayoría de los casos, una homogeneización previa que garantice la persistencia de sus características.

Molturación por vía seca o por vía húmeda.

Después de hacer la primera mezcla de diferentes componentes de la pasta de cerámica, esta generalmente se somete a un proceso de molienda, que puede ser seco (martillo o péndulo) o húmedo (molino de bolas continuo o discontinuo) (Construmática, 2019).

El material resultante de la molturación presenta unas características distintas si aquella se efectúa por vía seca o por vía húmeda. En el primer caso, la fragmentación ocurre mientras se mantienen los agregados y aglomerados de las partículas. El tamaño de partícula resultante (partículas mayores de 300 micras) es mayor que el obtenido por el método húmedo (todas las partículas menores de 200 micras). Al elegir el tipo de fresado a utilizar, el factor decisivo es el costo de inversión en cada caso.

Molturación por vía húmeda y secado de la composición por atomización

Debido a las importantes mejoras técnicas involucradas, el procedimiento que se ha adoptado completamente en la producción de pavimentos y revestimientos cerámicos mediante cocción única es el proceso húmedo, y luego la suspensión resultante se seca por atomización (Construmática, 2019).

En el procedimiento de vía húmeda, las materias primas pueden introducirse total o parcialmente en el molino de bolas, que es lo habitual, o desleírse directamente.



A la suspensión resultante (barbotina) se le elimina una parte del agua que contiene hasta alcanzar el contenido en humedad necesario para cada proceso. El método más utilizado en la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos es el secado por atomización.

El proceso de atomización es un proceso de secado, a través del cual la suspensión de las gotas finas trituradas se pone en contacto con aire caliente para producir un producto sólido con un bajo contenido de agua.

El contenido en humedad presente en la suspensión (barbotina), suele oscilar en torno a 0,30-0,45 kg. de agua / kg. de sólido seco, este contenido en agua tras el proceso de atomización se reduce a 0,05-0,07 kg. de agua / kg. de sólido seco.

El proceso de secado por atomización se desarrolla de la siguiente manera:

- ✓ Bombeo y pulverización de la suspensión.
- ✓ Generación y alimentación de los gases calientes.
- ✓ Secado por contacto gas caliente-gota suspensión.
- ✓ Separación del polvo atomizado de los gases

Conformación de las piezas

- ✓ **Prensado en seco**

El procedimiento predominante de conformación de las piezas es el prensado en seco (5-7% de humedad), mediante el uso de prensas hidráulicas. Este procedimiento de formación de pieza opera por acción de una compresión mecánica de la pasta en el molde y representa uno de los procedimientos más económicos de la fabricación de productos cerámicos de geometría regular.

El sistema de prensado se basa en una prensa hidráulica, que realiza el movimiento del pistón con relación a la matriz a través de la presión hidráulica, y tiene una serie de características, tales como: estanqueidad a alta presión, alta productividad, fácil ajuste y consistencia en el tiempo (Construmática, 2019).



Las prensas se han desarrollado mucho en los últimos años y son equipos con automatismos muy sofisticados fácilmente regulables y muy versátiles.

Secado de piezas conformadas

Después de moldear las piezas cerámicas, se realiza una etapa de secado para reducir la humedad de las piezas moldeadas a un nivel suficientemente bajo (0.2-0.5%) para la cocción y el desarrollo adecuado del esmalte en las circunstancias apropiadas (Construmática, 2019).

Cocción o cocciones, con o sin esmaltado

En productos sin esmalte, la cocción se realiza después de la etapa de secado. Del mismo modo, para los productos de esmalte fabricados mediante doble cocción, el cuerpo crudo se seca antes de la primera cocción (Construmática, 2019).

Esmaltado

El acristalamiento implica la aplicación de una o más capas de esmalte con un espesor total de 75-500 micras a través de diferentes métodos para cubrir la superficie de la pieza de trabajo. Este tratamiento se lleva a cabo para dar al producto de cocción una serie de propiedades técnicas y estéticas, tales como: impermeabilidad, fácil limpieza, brillo, color, textura de la superficie y resistencia química y mecánica (Construmática, 2019).

La naturaleza de la capa resultante es esencialmente vítrea, aunque incluye en muchas ocasiones elementos cristalinos en su estructura.

Esmaltes: Preparación y aplicación. Decoración

El proceso de preparación esmaltada generalmente implica moler la frita de vidrio y los aditivos en un molino de bolas de alúmina hasta que se obtenga un desperdicio predeterminado. A continuación, se ajustan las condiciones de la suspensión acuosa, cuyas características dependen del método de aplicación y de quema (Construmática, 2019).

El esmaltado de las piezas cerámicas se realiza en continuo y los métodos de aplicación más



usuales en la fabricación de estos productos cerámicos son: En cortina, por pulverización, en seco, o en las decoraciones.

La serigrafía es la técnica mayoritariamente utilizada para la decoración de baldosas cerámicas, debido a su facilidad de aplicación en las líneas de esmaltado. Esta técnica se utiliza tanto en monococción como en bicocción y tercer fuego, y consiste en la consecución de un determinado diseño que se reproduce por aplicación de una o varias pantallas superpuestas (telas tensadas de una luz de malla determinada).

Últimamente, y gracias a los avances de la tecnología, los fabricantes suelen usar esto a su favor, realizando impresiones en sus trabajos. Por esta razón, cerca del 50% de los fabricantes de cerámica que se emplea para la decoración, emplea la impresión de inyección, que además permite minimizar costos, reducir desperdicios y acelerar la cadena de producción, mejorando los tiempos de entrega y haciendo su producción más eficiente (El Oficial, 2018).

Adicionalmente, el empleo de la tecnología ofrece diversas ventajas, entre las que se puede mencionar:

- Pueden conseguirse patrones y acabados naturales más realistas y hay una mayor flexibilidad en el diseño y potencial creativo.
- La configuración y preparación se hace mediante el software de control de impresión, por ello hay menos tiempo de inactividad de la producción y menos desperdicios.
- Las tintas contienen pigmentos cerámicos vitrificables. La gama de color está centrada al desarrollo de texturas para uso de la industria.
- Con la impresión digital se pueden producir piezas y acabados perfectos que son virtualmente indistinguibles de los materiales naturales.
- La naturaleza sin contacto de la impresión de inyección digital hace que los casos de roturas sean extremadamente raros.
- Los cabezales de impresión digital pueden trabajar sobre superficies texturadas. La combinación de la impresión de inyección digital con las texturas produce representaciones más realistas de materiales naturales, aumentando el valor de las piezas (El Oficial, 2018).



Cocción de las piezas

La cocción de los productos cerámicos es una de las etapas más importantes del proceso de fabricación, ya que de ella dependen gran parte de las características del producto cerámico: resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia a los agentes químicos, facilidad de limpieza, resistencia al fuego, etc.

1.2 MATERIAS PRIMAS PARA PASTAS CERÁMICAS

Sin importar el sistema de producción para la fabricación de un producto cerámico, siempre se parte de una mezcla de materias primas conocida como pasta, esta mezcla va a sufrir algunos cambios fisicoquímicos para lograr las propiedades requeridas en el producto final (Barba, 2002).

Las materias primas para cerámica son minerales con los que se puede obtener un producto, estos materiales pueden usarse en estado natural o con un tratamiento previo. Ahora bien, de acuerdo al comportamiento de las materias primas con el agua se clasifican en plásticas y no plásticas.

1.2.1 Materias Plásticas

La plasticidad es la propiedad que permite a un material sufrir un cambio en su forma luego de haber aplicado una fuerza; es decir, es fácilmente maleable (Rado, 1990).

Arcillas

La arcilla es una roca sedimentaria de naturaleza y origen muy variable, formada por partículas muy finas que mezcladas con agua manifiesta un comportamiento plástico, que endurece con el secado y calor.

Los minerales arcillosos rara vez se presentan puros y están formados especialmente por los siguientes componentes:



- a) Minerales arcillosos propiamente dichos, son de composición variable que incluyen sustituciones reticulares de iones propios de la red cristalina u otros iones extraños.
- b) Sílice libre, que en la mayoría de arcillas es cuarzo cristalino (tamaño superior a 10 micras).
- c) Carbonatos en diversos grados de dispersión.
- d) Feldespatos, alcalinos y alcalinotérreos.
- e) Micas no hidratadas (moscovita y biotita)
- f) Hierro y titanio
- g) Sales solubles
- h) Materia orgánica

Los minerales arcillosos poseen cierta capacidad de intercambio catiónico, este fenómeno influye directamente en propiedades de la cerámica como son la plasticidad y la resistencia en seco, debido a la sustitución de un catión flocculante (Ca^{2+} , Mg^{2+}) por un deflocculante (Na^+ , K^+) (Paul Rado, 1990).

1.2.2 Materias No Plásticas

Las materias primas no plásticas se usan principalmente en pastas para la fabricación de pavimento y revestimiento cerámico, estos minerales actúan como desengrasantes reduciendo la plasticidad y facilitando la deflocculación. En la pieza cruda mejoran el empaquetamiento, aumentan el tamaño de poro y por lo tanto la permeabilidad de la pieza, lo que facilita el secado y la desgasificación durante la cocción.

Se dividen en los siguientes grupos:

Sílice

Los minerales cuya composición química es únicamente silicio como catión (SiO_2), se denomina sílice. Este elemento puede presentarse en varias formas mineralógicas, aunque la más común es el cuarzo (Instituto Nacional del Cáncer, 2015).



Este elemento es un componente esencial y tiene muchos usos en la industria, pero también es la causa de las enfermedades más comunes y conocidas en el mundo. Este compuesto es uno de los más abundantes en la corteza terrestre. (Hervás Fernández, 2019).

La sílice constituye un ingrediente importante en todos los tipos de cerámica y puede ser introducido con las arcillas naturales o como materia prima separada.

Según (Barba, 2002) en general, los efectos de la sílice en una mezcla de materias primas arcillosas son:

- Reducción de la plasticidad
- Disminución de la contracción de secado y cocción
- Aumento de la permeabilidad
- Disminución del tiempo de secado
- Disminución de la resistencia mecánica en seco y cocido
- Aumento del coeficiente de dilatación.

Feldespatos

Los feldespatos son aluminosilicatos de Na, Ca, K y Ba, procedentes de rocas primarias, en las que aparece principalmente mezclado con cuarzo y mica.

Estos materiales actúan como fundentes en pastas y vidriados cerámicos en donde se adicionan para disminuir la temperatura de cocción, reduciendo así los costos (Singer, 1979).

De acuerdo al metal alcalino o alcalinotérreo que presenten en su estructura los feldespatos pueden ser:

- Albita – feldespato de sodio ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
- Anortita – feldespato de calcio ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)
- Ortoclasa – feldespato de potasio (KAlSi_3O_8)
- Celsiana – feldespato de bario ($\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)



Para las pastas cerámicas los feldespatos potásicos son los más importantes, los feldespatos de sodio que tienen un menor punto de fusión, son utilizados en su mayoría para vidriados cerámicos.

Carbonatos

Los minerales más representativos de este grupo son: la calcita (carbonato de calcio) y la dolomita (carbonato de cálcico – magnésico). El uso de estos materiales en pastas cerámicas produce una acción blanqueante en los productos cocidos, y disminuyen su expansión por humedad. Adicionalmente, el incremento del porcentaje de carbonato de calcio en la pasta cerámica trae consigo un aumento en la absorción de agua (Barba, 2002).

Talco

El talco es silicato de magnesio hidratado. Físicamente, es un mineral con un toque blando, suave, firme y de color blanco. En la industria, se utilizan diferentes proporciones de este material para conseguir características como: alto punto de fusión, alta resistencia mecánica, baja capacidad de absorción, finura de grano y fácil molienda.

1.3 CARACTERISTICAS FISICOQUÍMICAS Y PROPIEDADES DE LAS MATERIAS PRIMAS

Las materias primas que se emplean en la fabricación de baldosas cerámicas están compuestas por distintos minerales que se han ido mezclando durante el proceso de formación, por esta razón sus propiedades van a depender de los minerales presentes en su estructura, su grado de degradación y de las cantidades en los que estos se encuentren.

1.3.1 Composición química y mineralógica

El análisis químico puede ser muy útil para el control de las variaciones que pueden producirse en la composición de la materia prima. Sin embargo, este análisis muy pocas veces sirve para caracterizar el material, si no viene acompañado de ciertos datos físicos o se conoce las especies mineralógicas que contiene (Barba, 2002).



Al conocer el análisis químico de un material cerámico, expresado en porcentaje en peso de los óxidos que contiene se puede obtener la siguiente información:

- Sílice (%SiO₂), indica el porcentaje de sílice libre o cuarzo que tiene la muestra.
- Alúmina (%Al₂O₃), su valor está relacionado con la cantidad de arcilla y feldespato.
- Óxido de Calcio (%CaO), se encuentra generalmente en forma de carbonatos alcalinotérreos.
- Óxido de magnesio (%MgO), este óxido se asocia a la presencia de dolomita y clorita.
- Óxido de potasio (%K₂O), indica la presencia de feldespato potásico, illita o mica.
- Óxido de sodio (%Na₂O), indica la presencia de feldespato sódico.
- Pérdidas al fuego, se debe a la descomposición de las arcillas y carbonatos, también la combustión de materia orgánica.

1.3.2 Absorción y contracción lineal

Durante la cocción de productos cerámicos, es importante conocer el rango de temperatura en el cual la contracción y la porosidad de la pieza no cambie mucho, ya que este rango de temperatura depende de las características de la pasta y debe ser lo más amplio posible. De lo contrario, pequeños cambios en la temperatura pueden causar que la pieza de trabajo se deforme o se queme insuficientemente, por lo que los valores de porosidad y resistencia mecánica del producto final no serán los ideales.

La absorción de agua de un material cerámico cocido se emplea para evaluar la fundencia del material. Se define como la ganancia de peso expresada en tanto por ciento, que experimentan las piezas al introducir las en agua en ebullición durante un periodo determinado de tiempo, generalmente 2 horas (Barba, 2002).

$$AA(\%) = \frac{M_a}{M_s} * 100$$

Donde Ma es el agua absorbida y Ms es la masa del sólido seco.



El comportamiento de un material cerámico durante la cocción se evalúa mediante el cambio o variación en la contracción lineal con la temperatura. Se determina con:

$$CL(\%) = \frac{L_i - L_f}{L_i} * 100$$

Donde L_i es la longitud inicial de la pieza cruda y L_f es la longitud de la pieza luego de la cocción.

La absorción de agua de un material cerámico o de una mezcla viene determinada esencialmente por el tipo y la proporción de los minerales que contiene, es decir, por su composición mineralógica.

Por otro lado, la contracción lineal depende de dos factores: la composición mineralógica y la compacidad de la pieza moldeada.

1.3.3 Módulo de rotura

La determinación del módulo de rotura de arcillas y pastas durante el proceso de producción es un indicador importante en la fabricación de productos cerámicos, debido a que si no se alcanza un valor estable de la resistencia se generarán un sin número de defectos durante el manejo, transporte, decoración y cocción de las piezas cerámicas (R. Diedel, 2006).

En la Norma NTE INEN 0652 se contempla dos magnitudes para analizar y evaluar la resistencia mecánica de una baldosa cerámica:

Fuerza de rotura, también conocida como resistencia a la rotura, que es el valor arrojado por el equipo al aplicar una carga sobre la baldosa, expresada en newtons (N).

Módulo de rotura, se deduce de la magnitud de la fuerza de rotura utilizando una fórmula matemática (resistencia a la rotura dividida para el cuadrado del grosor de la placa, relacionada con un coeficiente corrector que relaciona la distancia de los apoyos del equipo y la anchura de la probeta). El resultado de este cálculo, expresado en N/mm^2 da una idea de la resistencia mecánica de la baldosa (INEN, Norma NTE INEN 0652, 2009).



1.3.4 Análisis dilatométrico

La expansión térmica es un fenómeno que ocurre en todos los sólidos. Una de las consecuencias de aumentar el contenido de energía de los materiales es la generación de vibraciones atómicas de mayor amplitud, lo que se traduce más o menos en un aumento significativo en el volumen corporal (Navarro, 1982).

A medida que aumenta la temperatura del mineral, se puede observar que su tamaño aumenta de forma no lineal y finalmente se reduce. Esta contracción ocurre debido a fenómenos que ocurren al cocinar estos minerales, como: escape de gas, cambios en la estructura química, etc.

Las curvas de dilatación pueden proporcionar una idea sobre la composición mineralógica de los distintos materiales. Los puntos de inflexión y las temperaturas de máxima contracción y dilatación de estas curvas indican los intervalos de temperatura que son críticos en un horno cerámico durante la producción de baldosas.

Por esta razón, la técnica de dilatometría es muy útil para controlar materias primas y predecir el comportamiento de las pastas cerámicas durante la etapa de cocción.

Los factores que influyen sobre la dilatación térmica de un producto cerámico cocido son:

- La temperatura
- La naturaleza y la proporción de las fases presentes (cristalinas, vítreas o amorfas). Las fases amorfas proporcionan coeficientes de dilatación pequeños, en cambio las fases cristalinas y vítreas presentan un comportamiento muy variado.
- La porosidad, ya que los sistemas de poros confieren a las piezas coeficientes de dilatación más bajos debido a que actúan como amortiguadores y liberan tensiones.

1.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Cuando se emplea un modelo de optimización, se busca el cuidado de los recursos económicos, los factores ambientales, el empleo de materiales e incluso el transporte que de a de emplear en la producción (Feitó Cespón, Cespón Castro, & Rubio Rodríguez, 2016).



En general, un modelo es una demostración abstracta de un conjunto de pasos de aplicación específicos o una aplicación práctica general. Según el grado de dificultad o el contenido que debe explicarse, se proponen varias soluciones de desarrollo, tales como: diagrama de flujo, secuencia de visualización y una serie de actividades; organigrama, explicando la jerarquía y las relaciones existentes en la empresa; y modelos matemáticos, que reflejan problemas con números y símbolos matemáticos.

Este último modelo consta de tres elementos fundamentales:

- Las características del objeto por determinar (variables).
- Las características de las condiciones variables respecto al objeto modelado.
- Y el conjunto de parámetros internos del objeto.

Tanto las características de las condiciones variables como el conjunto de parámetros internos del objeto pueden estudiarse como variables exógenas y se operan fuera del modelo. Por otra parte, las características del objeto por determinar responden a las variables externas que se establecen con ayuda del modelo en el desarrollo de la respuesta al problema.

A esta formulación matemática dentro del ámbito económico se la conoce como modelo económico-matemático (Castro, Guerra, & López, 2017).

Hay varias actividades en la economía que pueden resolverse mediante la contribución del modelado. De manera general se pueden encasillar en: actividades de optimización y no optimización. La particularidad fundamental para esta agrupación radica en la presencia de una función que necesita ser optimizada, en donde el fin de las primeras es la comprobación de la respuesta óptima dentro de la gama de posibilidades existentes, entre las que se añade la elección de la organización de producción: delimitación del plan o presupuesto de producción en unidades físicas (Castro, Guerra, & López, 2017).

Aplicaciones

Estos procesos de optimización realizados con programación lineal son una herramienta eficaz que puede identificar y seleccionar opciones en los problemas de toma de decisiones,



por lo que puede utilizarse para innumerables problemas de diferente naturaleza. Son tan versátiles que es difícil enumerarlos (Arsham, 2015).

Entre sus aplicaciones más frecuentes dentro de una institución empresarial están:

Finanzas: el inconveniente del inversionista se puede dar por una selección del mix de su portafolio de inversiones. En definitiva, la diversidad de carteras podría darse en mayor cantidad respecto a lo que se indica en el ejemplo, incluso se pueden añadir otras limitaciones distintas.

Asimismo, otra dificultad de decisión involucra la identificación de la mezcla de métodos de inversión para un conjunto de productos en caso de que se presente varias formas de financiación utilizable. El fin se puede enfocar en aumentar las ganancias totales cuando las ganancias de un producto en particular tienen mucho que ver con el método de financiación (Arsham, 2015).

En esta situación también se puede costear con fondos internos, con deuda a corto plazo o con préstamo intermedio. Asimismo, se puede existir ciertas condiciones en lo que refiere a la disponibilidad de cada alternativa de financiación, como limitaciones financieras que requieran ciertas relaciones entre las alternativas de financiación, con el fin de cumplir con los términos y condiciones correspondientes a los créditos bancarios o préstamos intermedios. Además, pueden presentarse términos relacionados al nivel de producción. Las variables de decisión reflejarían el número de unidades que necesitan ser capitalizadas según lo exija cada alternativa de financiación.

Administración de Producción y Operaciones: según Arsham (2015), muchas veces en las empresas de proceso, el material base logra evolucionar en un sinnúmero de productos.

Dependiendo de la rentabilidad contemporánea del producto, ocurrirán defectos al determinar el porcentaje de fabricación de cada producto. La respuesta está relacionada con varias prohibiciones, por ejemplo; las limitaciones de varias tecnologías de procesos de refinación, acceso a materias primas, aceptación de cada producto en el mercado y regulaciones nacionales. Surgirán problemas similares en la producción de productos



químicos y el procesamiento.

Recursos Humanos: los inconvenientes de organización del equipo de trabajo son otra de las cuestiones que también se pueden estudiar con la programación lineal. Un caso sería, en las organizaciones telefónicas, la exigencia de los servicios de un equipo de instalación / reparación son temporales.

La complicación radica en identificar el número de personas de instalación / reparación y reparación de líneas que requerimos tener añadidas en la lucha de trabajo según cada mes con el fin de reducir la inversión total de contratación, despido, horas extras y sueldos dentro de la jornada normal. Este grupo de limitaciones engloba impedimentos vinculados a la exigencia de servicio que se debe compensar, horas fuera de la jornada normada, tratados con las asociaciones y el acceso a colaboradores calificados para integrar.

Lo expuesto se opone a la teoría de divisibilidad. Sin embargo, los escalones de trabajo de cada mes son lo necesariamente altos como para calcular la cifra final sin inconvenientes, sin infringir las limitaciones.

Marketing: la programación lineal también aplica para determinar la combinación más adecuada para la elección de medios para una campaña de publicidad. Piense que los medios de comunicación aprovechables son radio, televisión y prensa escrita. La cuestión es identificar la cantidad de información que se requiere ubicar en cada uno. Bajo la consideración de la cifra económica que exige la publicación de cada contenido acorde al medio seleccionado. El fin es reducir la inversión para la campaña, junto a un sinnúmero de limitaciones.

Basado en la idea de que cada medio refleja un cierto grado de influencia de acuerdo con el nivel de audiencia que tiene, puede representar el grado de influencia esperado de la campaña. Además, cada medio tiene diferentes niveles, estos niveles afectarán el logro de los resultados logrados, por otro lado, en relación con la eficiencia esperada, su aceptación puede ser menor. Incluso puede haber restricciones, y todos los medios no están disponibles.

Distribución: otro uso de programación lineal se da en el ámbito de distribución. Por



ejemplo, ante la presencia de “x” empresas que necesitan remitir productos a “y” establecimientos finales. Una cierta empresa podría ejecutar sus envíos sin importar el número de depósitos.

Determinado el valor económico de la expedición de cada unidad de los productos de cada empresa a cada depósito, el inconveniente es identificar el estándar del envío (cifra de unidades que cada empresa remite a cada depósito) que simplifique los valores totales. Esta disposición depende de las limitaciones que piden que cada empresa no traslade una cantidad que exceda su capacidad de producción.

El empleo de la programación lineal para la optimización, en este estudio, se sustenta en que constituye un análisis completo de los factores de la producción y que además está probada científicamente, puesto que a través de la profanación lineal se recolecta evidencia real que ayuda a formular diversos modelos con algunos escenarios que ayuden a tomar la decisión más certera y eficiente, logrando una reducción de costos e incrementando la productividad con el aprovechamiento máximo de los recursos (Bermúdez Colina, 2011).

Además, hay que hacer énfasis en que la aplicación de estas herramientas tiene su encaje en varias organizaciones dentro de los campos de producción, servicios, medio ambiente, logística, mercados, proyectos, finanzas, salud, etc. Todo esto es para aumentar la productividad, usar recursos de manera efectiva, reducir la administración de costos y satisfacer las necesidades de los clientes. Pudiendo así, ir conjuntamente de la mano con el desarrollo sostenible (Bermúdez Colina, 2011).

1.4.1 Programación lineal

El desarrollo de la programación lineal se considera un importante avance científico de mediados del siglo XX. Desde el año 1950 el efecto que ha tenido ha sido extraordinario.

La programación lineal es un tipo de modelo de programación matemática que tiene como objetivo asignar eficientemente recursos limitados para lograr los objetivos deseados, como minimizar costos o maximizar ganancias. La característica principal del modelo de programación lineal es que las funciones que representan la función objetivo y las



restricciones son lineales. (Taha, 1976).

Este modelo es extensamente utilizado en casi todas las áreas del conocimiento. La relación lineal entre las variables le da la cualidad de ser un modelo fácil de desarrollar y sencillo de resolver y analizar. En estudios recientes se ha determinado la posibilidad de trabajar en modelos de programación lineal con más de cien mil variables. Cuando se tienen problemas con dos variables se puede utilizar el método gráfico y para problemas donde se posea más de dos variables se usa un algoritmo llamado SIMPLEX diseñado por George Dantzig en 1947.

En los casos de programación lineal tanto la función objetivo como las restricciones son combinaciones lineales de las variables de interés.

Los pasos generales a seguir en la formulación de un modelo de programación lineal, son:

1. Comprender el problema: este paso se debe realizar previo a la formulación de la función objetivo, para que se enfoque realmente a la solución del problema.
2. Identificar las variables de decisión: contemplar todas las variables que se van a tomar en cuenta para resolver el problema de optimización.
3. Formular la función objetivo como combinación lineal de las variables de decisión: esta función expresa la relación matemática entre las variables que debe ser maximizada o minimizada.
4. Formular las restricciones como combinación lineal de las variables de decisión: estos son valores que restringen las variables en el problema a resolver.
5. Identificar los límites inferiores y superiores de las variables: determinar los rangos o los valores específicos que deben tener las variables para que cumplan con el objetivo de la optimización.

Esta metodología se muestra de mejor manera en el siguiente diagrama:

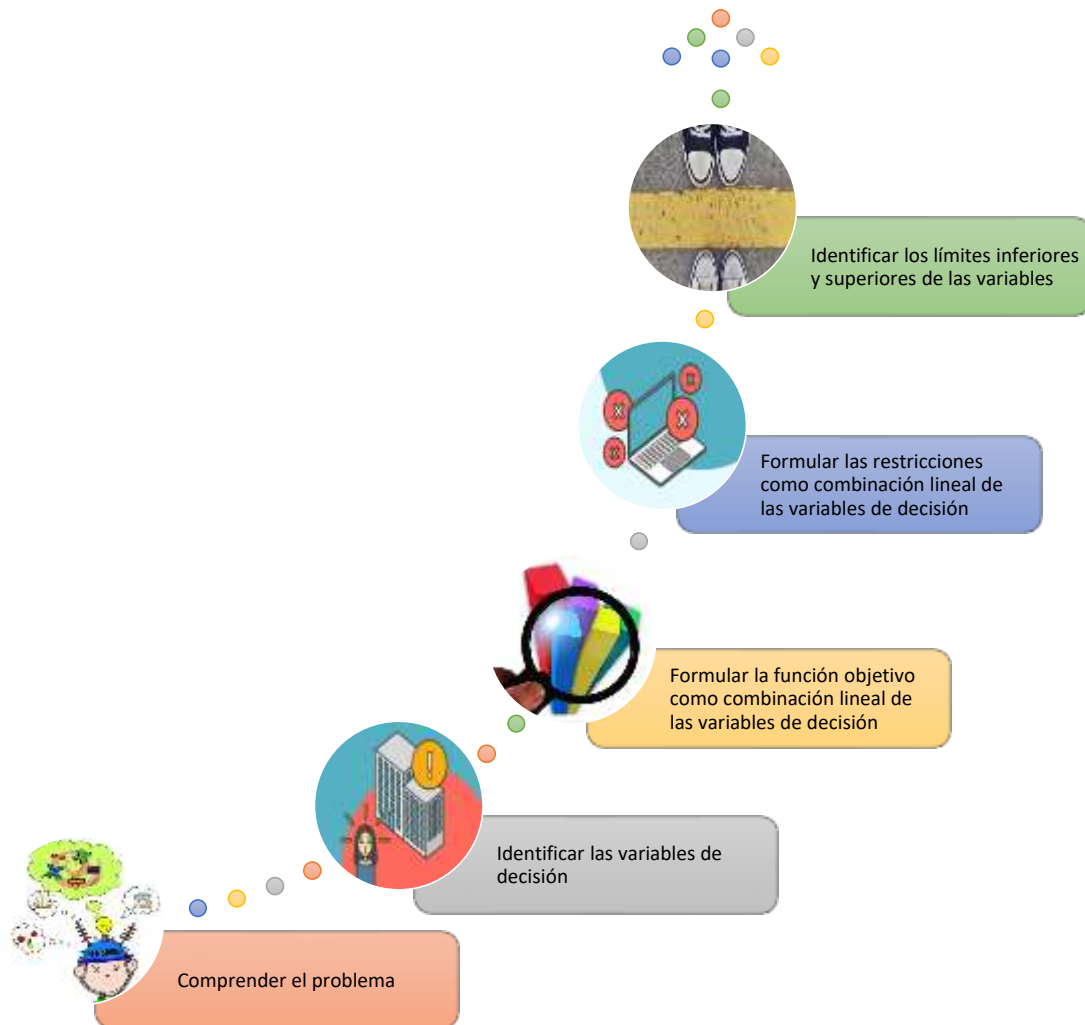


Ilustración 3: Formulación de un modelo de programación lineal

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

1.4.2 Método *simplex*

Este método es el proceso general de encontrar la respuesta más correcta a un problema de programación lineal. También puede proporcionar la mejor solución en innumerables pasos, lo que demuestra que es necesario para la operación (Rubin, s.f.).



Emplear un modelo matemático para la solución de problemas es el objetivo principal de la programación lineal, sin olvidar que este modelo se basa en la representación reducida de la realidad; los esquemas matemáticos, en particular, utilizan símbolos matemáticos y tienen elementos como:

- Variables: son las incógnitas del problema.
- Restricciones: indican las limitaciones a las que se encuentra propensa la solución del problema.
- Función objetivo: se refiere al fin que se anhela obtener y en el cual se considera las alternativas principales para aumentar los beneficios o para reducir los gastos (en la programación lineal el término “lineal” responde a que las ecuaciones aplicadas en el modelo serán de primer grado, es decir, sin exponentes) (Valencia, 2015).

Por otra parte, debe tomarse en cuenta que las decisiones finales no siempre se deben tomar con base al resultado de la programación lineal porque también existen otros factores como el medio ambiente, competencia, seguridad, los cuales deben complementar antes de la decisión.

En lo que respecta a la industria cerámica, no se deben ignorar otros factores que afectan la producción, como la temperatura y el ciclo de combustión, que afectarán directamente los parámetros del producto final, por lo que se recomienda que la fórmula obtenida se aplique y analice en condiciones de producción.

Frente a esto, Valencia (2015), en su estudio denominado “Introducción al método simplex: forma tabular paso a paso”, sugiere lo siguiente:

- Entre más simple sea el esquema, mejor será el resultado. Un modelo muy elaborado no siempre brindará la mejor decisión.
- El modelo debe ser evaluado y aceptado antes de ser aplicado para conocer si refleja la realidad del problema, de lo contrario deberán hacerse cambios para su ajuste.
- Si se hacen las cosas a último momento, el modelo saldrá mal. Debe realizarse un análisis detallado para ver que en realidad será rentable para el modelo.
- Los modelos solo son un instrumento, pues el responsable de la decisión siempre



tendrá la última palabra.

Además, para el desarrollo de este método son necesarias algunas definiciones (Valencia, 2015):

Solución:

Cualquier conjunto de variables x que satisfacen las restricciones del problema ($Ax = b$).

Solución factible:

Cualquier solución que satisface la no-negatividad de las restricciones.

Solución básica:

En un sistema de m ecuaciones lineales con n variables $Ax = b$ ($m < n$) cuyo rango $R(A) = m$; una solución es obtenida haciendo $n - m$ variables igual a cero y resolviendo para las m variables restantes, siempre y cuando el determinante de los coeficientes de estas m variables no seas cero.

Las m variables se llaman variables básicas (la solución resultante a este sistema, se le llama solución básica).

Solución básica factible:

Es una solución básica en la cual todas las m variables básicas son mayores o iguales que cero.

Degeneración:

Una solución básica $Ax = b$ es degenerada si una o más variables básicas son iguales a cero (más de $n - m$ variables iguales a cero).

Solver/Excel

Solver es una herramienta de Microsoft Excel que sirve para resolver problemas de



optimización y sistema de ecuaciones entre otras cosas, mediante esta herramienta se logra encontrar un valor máximo, mínimo o específico, depende cómo se cambien las variables. Incluso se pueden agregar parámetros de restricción (Aponte, 2018).

1.4.3 Modelos de optimización programación lineal

Según Cabrera (s.f.), la modelización de un problema consiste en reflejar matemáticamente el problema. En su estudio destaca los siguientes modelos:

Modelo de transporte: se aplica cuando tenemos una red de carreteras. Se presenta muchos puntos en donde suscitará algo y otros donde se denunciará algo. Es importante identificar los valores de movilidad, es necesario optar por el camino para que el gasto sea mínimo.

Modelo de asignación: esto sucede cuando desea asignar trabajo a ciertos candidatos. Es necesario analizar cómo llenar estos puestos mediante la optimización de variables efectivas. Es un modelo de programación lineal del algoritmo húngaro. Esto requiere la definición de una nueva variable, llamada variable dual.

Modelo de ordenación de tareas: analiza los tiempos de demora que se da en la ejecución entre tareas. El modelo es como el antes mencionado, con la diferencia que se desea reducir los gastos muertos entre tarea y tarea.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de optimización basado en programación lineal, para formular propuestas de pastas para porcelanato en la empresa Rialto S.A

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las materias primas utilizadas en fórmula de porcelanato en la empresa Rialto.



- Identificar variables, restricciones y función de costo para uso en el modelo de optimización.
- Construir el modelo de optimización en la dosificación de pastas cerámicas para porcelanato utilizando programación lineal.
- Validar del modelo de optimización con estudio de campo in situ.
- Reportar los resultados obtenidos.

3. METODOLOGÍA

3.1 MUESTREO

Para este proceso en primer lugar se identificaron las 13 materias primas que van a formar parte del estudio, estos materiales son feldespatos en su mayoría, también están algunas arcillas y talco.

Los materiales a muestrear se encuentran en galpones separados e identificados dentro de planta.

Para el muestreo se siguen los siguientes pasos:

1. Tomar una muestra de distintos lugares del material acumulado en el galpón.
2. Colocar el material muestreado en sacos (cuatro sacos 50kg)
3. Hacer pasar la muestra de los cuatro sacos por el cuarteador de jones, del mismo se toma la mitad para el ensayo y se desechará la otra. En total se obtuvieron 2 sacos de cada materia prima que constituyen una muestra representativa.



Ilustración 4: Cuarteador de jones
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Previo al proceso de caracterización de la materia prima se debe tener una muestra homogénea, para esto la materia prima debe ser tratada de la siguiente manera:

1. Tomar una muestra de 5 kg de cada materia
2. Reducir el tamaño de partícula con un martillo hasta un tamaño de partícula de aproximadamente 5cm de diámetro.



Ilustración 5: Reducción de partícula
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3. Secado de la muestra triturada:
 - 3.1 Tomar la muestra y colocarla en una olla
 - 3.2 Someter la muestra a calor en una cocina industrial, el tiempo necesario hasta eliminar la humedad que contenga, aproximadamente 20 min.
 - 3.3 Retirar la muestra del calor y esperar su enfriamiento.
4. Tomar la muestra seca y colocarla en el molino hasta obtener un polvo fino.
5. Almacenar la muestra en fundas plásticas para evitar que adquiera humedad.



Ilustración 6: Molino - muestra seca
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)



Ilustración 7: Secado de muestra
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA

Uno de los procesos más importantes previo al desarrollo de una fórmula para pastas cerámicas es la caracterización de materias primas, esto nos ayudará a conocer las cualidades



que aportará cada material al producto final.

Las materias primas que se utilizarán en el desarrollo de las fórmulas se codificaron por razones de confidencialidad de la empresa. Cada materia prima posee un código asignado de acuerdo a su naturaleza y se describen a continuación:

Tabla N° 2 Códigos asignados a las materias primas de estudio.

CÓDIGO	Descripción
AR-01	Arcilla
TA-01	Talco
FE-01	Feldespatos
FE-02	Feldespatos
FE-03	Feldespatos
FE-04	Feldespatos
FE-05	Feldespatos
AR-02	Arcilla
FE-06	Feldespatos
CA-01	Caolin
FE-07	Feldespatos
FE-08	Feldespatos
SI-01	Sílice

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

Para la caracterización de las materias primas se siguió el siguiente procedimiento:

3.3.1 Determinación del porcentaje de humedad

- 1.1. Pesar 10 gr de muestra
- 1.2. Colocar la muestra en la lámpara de infrarrojo durante 30 min o hasta peso constante
- 1.3. Determinar el peso seco de la muestra
- 1.4. Calcular el porcentaje de humedad y el peso bruto de muestra a cargar en la molienda.



$$\%Agua = \frac{Peso_{humedo} - Peso_{seco}}{Peso_{humedo}} * 100$$

Donde:

- Peso húmedo: serán en este caso 10 gramos
- Peso seco: será el peso después de haber sometido a la materia prima a la lámpara durante media hora, este peso será específico para cada materia prima dependiendo de su humedad.

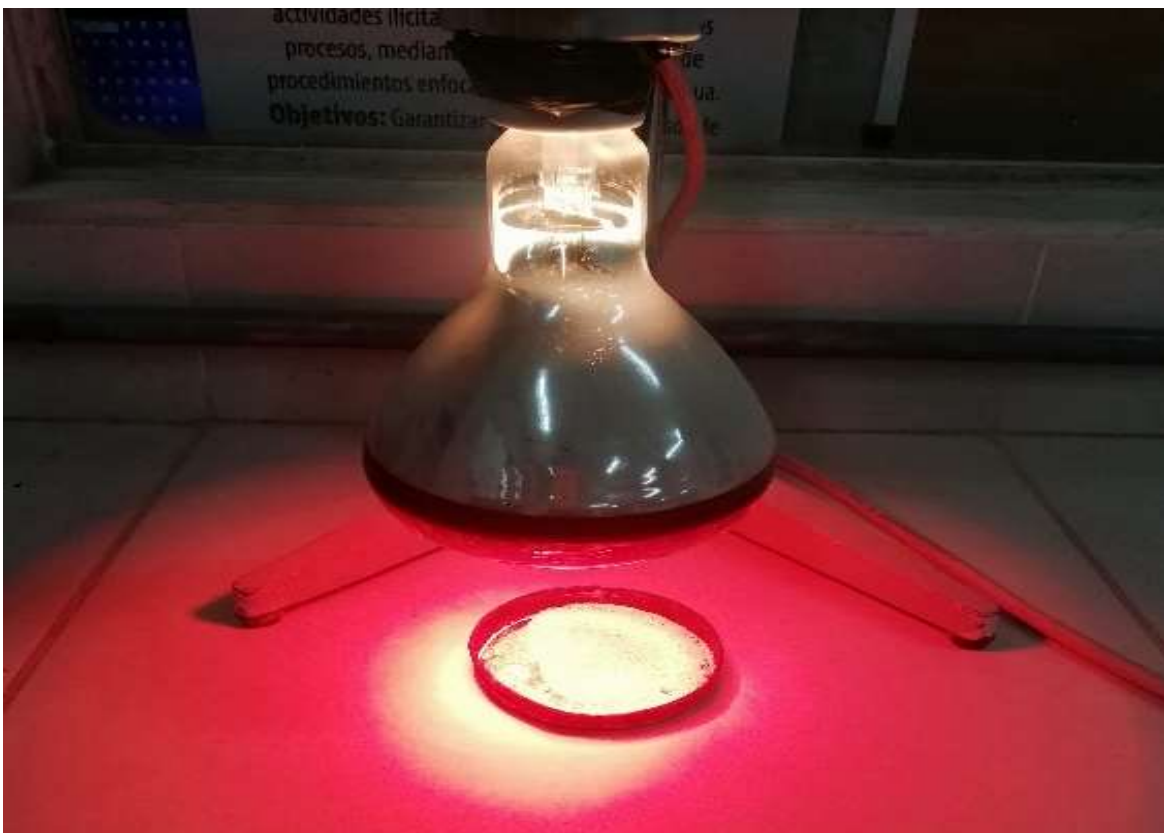


Ilustración 8: Lámpara infrarrojo
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

Este procedimiento también ayudará con el cálculo del peso bruto de cada material para poder realizar la carga del molino. El molinillo debe ser cargado con 500 gramos netos de cada material, la cantidad de agua y de tripolifosfato (que emplea como un agente dispersante, emulsificante y estabilizante), fueron determinadas experimentalmente y va a depender del material a moler. El parámetro que se va a controlar es el residuo, el mismo que debe encontrarse entre 0,3 y 0,5 % (Tamiz ASTM N°230 – Malla 63µm) para la descarga.



Cálculo del peso bruto:

$$\text{Peso bruto} = \frac{\text{Peso de la carga} * \text{Peso inicial}}{\text{Peso final}}$$

Donde:

Peso de la carga = 500g

Peso inicial = 10g

Peso final = peso de la muestra luego de secarla.



Ilustración 9: Molinillo de laboratorio
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3.3.2 Secado y reducción de tamaño de las materias primas molidas a nivel laboratorio

Luego de realizar las moliendas y descargar las materias primas dentro de la norma interna de la empresa, el siguiente paso es secar la muestra, este secado se va a realizar en una



cacerola de acero en una hornilla industrial, se someterá a calor a la muestra hasta eliminar toda el agua que contenga.

1. Colocar la materia prima molida en la cacerola
2. Someterla a calor en una hornilla industrial durante 20 – 25 min, o hasta que la muestra se encuentre totalmente seca.
3. Retirar la cacerola del fuego y esperar su enfriamiento durante 30 min.
4. Retirar la muestra seca de la cacerola y colocarla en el molino.
5. Moler la muestra seca hasta obtener aproximadamente 300g de polvo fino.
6. Colocar el polvo en una funda plástica e identificarla con su respectivo código.



Ilustración 10: Cacerola para secar material molido
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)



Ilustración 11: Reducción de tamaño
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3.3.3 Prensado de placas de muestra

Para los ensayos de caracterización de materia prima se deben prensar los polvos en placas muestra de 5 cm x 10 cm.

1. Humedecer el polvo seco:
 - 1.1 Pesar el polvo seco
 - 1.2 Calcular la cantidad de agua que se debe agregar para obtener un polvo con una



humedad de 8%.

$$H_2O (ml) = \text{Peso seco} * 8\%$$

1.3 Colocar el agua en el polvo seco y mezclarlo con la mano

1.4 Pasar el polvo humedecido por una malla N° 10 con el objetivo de romper los aglomerados de material con agua.

2. Pesar 90 g de polvo con humedad
3. Colocar el polvo en la cavidad de la prensa (10cm x 5 cm), el polvo debe ser bien distribuido por la cavidad para un prensado uniforme.
4. Prensar el polvo de la cavidad a 80 – 340 bar (condiciones específicas para materia prima y pastas de porcelanato).
5. Retirar la placa de la prensa y colocarla en la parrilla.



Ilustración 12: Malla N° 10

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)



Ilustración 13: Prensa de laboratorio
Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3.3.4 Quema de placas muestra

Para ciertos parámetros de control como: contracción, absorción, pérdidas al fuego, y módulo de rotura se debe quemar la placa muestra en el horno de producción, para esto se siguen los siguientes pasos:

1. Colocar la parrilla en el secadero de producción.
2. Luego de transcurrido el tiempo en el secadero retirar la parrilla.



3. Colocar la parrilla en la entrada del horno y tomar los datos de quema (temperatura y ciclo)



Ilustración 14: Placas de materias primas luego de la quema

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3.3.5 Determinación de pérdidas al fuego

1. Pesar las placas muestra luego del proceso de secado.
2. Pesar las placas luego de la quema
3. Calcular el porcentaje de pérdidas al fuego

$$\%Pérdidas Fuego = \frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ inicial} * 100$$

3.3.6 Determinación del porcentaje de Contracción a la quema

El porcentaje de contracción tanto de las placas muestra de materia prima como de las placas de pasta barbotina se determinan de la siguiente manera:

1. Con el pie de rey tomar el dato exacto de longitud de los dos lados más cortos de la placa después de la quema.
2. Calcular un promedio de los dos valores medidos.



3. Con el valor promedio, calcular el porcentaje de contracción de la placa, tomando en cuenta que la longitud inicial de los lados más cortos de la placa fueron 50 mm (cavidad de la prensa).

$$CL(\%) = \frac{L_i - L_f}{L_i} * 100$$

Donde L_i es la longitud inicial de la pieza cruda y L_f es la longitud de la pieza luego de la cocción.

3.3.7 Determinación de módulos de rotura

Para determinar la resistencia a la rotura y el módulo de rotura de las placas muestra de materia prima como de las fórmulas propuestas se sigue el siguiente procedimiento:

1. Retirar las partículas que se encuentren en la base del aparato para medir la resistencia a la flexión.
2. Colocar las bases en los orificios de medida para placas muestra (nivel laboratorio)
3. Colocar la placa muestra sobre los rodillos de soporte, en el centro del aparato.
4. Presionar START en el aparato de medida, esto con el objetivo de aplicar la carga sobre la placa.
5. Registrar el valor (resistencia a la rotura) que marca el aparato.
6. De la placa rota, con el pie de rey registrar el valor del espesor de la placa.
7. Con el valor de fuerza (kgf) registrado, calcular el módulo de rotura (kgf/cm²).

$$MRO = \frac{3}{2} \left(\frac{F * L}{\varepsilon^2 * b} \right)$$

Donde:

- MRO: módulo de rotura
- F: fuerza (resistencia a la rotura)
- L: longitud de barras de apoyo (8cm)
- b: ancho de la placa (5cm)



- ϵ : espesor de la muestra

3.3.8 Determinación del porcentaje de Absorción

Para la determinación del porcentaje de absorción de agua en las placas muestra de materia prima y en las muestras de pastas barbotina se sigue el procedimiento descrito en la Norma NTE INEN 0651.

1. Secar las placas muestra en la estufa a una temperatura de (110 ± 5) °C, hasta que la masa de la placa no varíe.
2. Pesar cada una de las placas y registrar el peso para el cálculo posterior.
3. **Método de ebullición:**
 - 3.1 Calentar agua en un recipiente hasta ebullición
 - 3.2 Colocar las placas muestra en el recipiente, sin contacto entre ellas y con una profundidad de mínimo 5 cm debajo del nivel del agua. Las placas deben mantenerse en el agua a ebullición durante 2 horas.
 - 3.3 Luego de transcurrido este tiempo, retirar el recipiente de la fuente de calor y dejar que las placas se enfríen aún sumergidas en el agua.
 - 3.4 Preparar un paño semi húmedo y colocarlo sobre una superficie plana, colocar las placas sobre el trapo y retirar el exceso de agua de las placas
 - 3.5 Inmediatamente de este procedimiento, pesar cada placa y registrar el valor.
4. Calcular el porcentaje de absorción de agua.

$$AA(\%) = \frac{M_a}{M_s} * 100$$

Donde M_a es el agua absorbida y M_s es la masa del sólido seco.

3.3.9 Determinación del coeficiente de dilatación

El coeficiente de dilatación fue determinado por el personal técnico de ESFEL S.A.

Para las pruebas que permiten la determinación del coeficiente de expansión, los datos más importantes son la temperatura de combustión de la placa de muestra. Estos datos se deben



proporcionar con la muestra para la prueba.

3.4 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACIÓN

1. Identificar las variables: en el desarrollo de la herramienta de optimización las variables son la cantidad de cada una de las materias primas que se requieren para la formulación de la pasta barbotina.

Para esta herramienta las variables serán cada una de las materias primas y su composición química. A cada materia prima se le asignó un código por el acuerdo de confidencialidad con la empresa.

En la tabla siguiente se detalla la composición química de cada materia prima:

Tabla N° 3 Composición química de materias primas

		AR-01	TA-01	FE-01	FE-02	FE-03	FE-04	FE-05	AR-02	FE-06	CA-01	FE-07	FE-08	SI-01
COMPOSICIÓN QUIMICA	Na₂O	3,02	0,00	0,44	1,24	2,06	2,80	3,56	0,26	5,57	0,67	2,15	9,20	0,18
	MgO	0,02	33,06	0,77	0,55	0,09	0,09	0,00	0,26	0,00	0,21	0,45	2,25	0,09
	Al₂O₃	19,36	0,44	18,39	13,89	15,53	15,06	14,37	29,62	16,97	24,16	16,91	17,15	3,48
	SiO₂	67,57	30,15	63,88	65,44	71,72	72,54	72,72	55,42	69,25	61,31	69,78	66,85	85,81
	P₂O₅	0,06	0,00	0,04	0,04	0,03	0,03	0,06	0,06	0,04	0,06	0,00	0,31	0,00
	K₂O	1,88	0,00	3,29	3,50	4,09	4,05	3,61	0,53	3,72	0,35	2,10	0,38	0,17
	CaO	1,35	0,00	0,71	1,99	0,10	0,25	0,24	0,13	0,11	0,28	0,44	0,87	0,10
	TiO₂	0,31	0,00	0,20	0,15	0,10	0,10	0,04	1,13	0,04	0,41	0,00	0,32	0,00
	Mn₂O₃	0,00	0,00	0,10	0,07	0,33	0,27	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Fe₂O₃	0,58	0,46	1,94	1,36	0,99	0,98	1,07	1,77	0,19	0,84	0,87	0,17	0,71

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

Fuente: Empresa Rialto

2. Formulación de las restricciones: las restricciones de la herramienta son las composiciones químicas de las materias primas, es decir su composición en óxidos.

En este caso específico las restricciones se manejarán en rangos, basado en un histórico entregado y calculado por la planta, así como la composición química de cada formulación teóricamente.

Las limitaciones de la herramienta de optimización se basan en la composición química del deslizamiento requerido. Para lograr este objetivo, se han realizado cálculos basados en la teoría de la composición química del historial de la pasta. La producción de estas pastas logró buenos resultados en 2004. Para determinar el rango mínimo y máximo del porcentaje de cada óxido contenido en diferentes formulaciones, Rialto lo estableció como el rango mínimo y máximo.

A continuación, se detallan las composiciones químicas calculadas de las diferentes fórmulas.

Tabla N° 4 Composición química teórica de las fórmulas proporcionadas por la empresa Rialto

	FÓRMULA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COMPOSICIÓN QUÍMICA	Na ₂ O	2,02	1,88	1,98	1,69	2,04	2,01	2,01	2,06	2,02	2,05
	MgO	0,93	0,92	0,92	1,17	0,93	1,16	0,90	0,91	0,92	0,92
	Al ₂ O ₃	17,59	16,84	16,25	18,59	17,45	17,46	14,69	15,81	16,56	17,16
	SiO ₂	67,79	64,16	64,84	65,73	67,95	67,53	61,00	65,35	64,49	63,78
	P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
	K ₂ O	2,77	2,56	2,70	2,89	2,76	2,75	2,72	2,80	2,76	2,68
	CaO	0,16	0,15	0,15	0,26	0,17	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16
	TiO ₂	0,33	0,32	0,28	0,36	0,31	0,32	0,21	0,25	0,29	0,32
	Mn ₂ O ₃	0,12	0,11	0,12	0,16	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,10
	Fe ₂ O ₃	1,18	1,13	1,10	1,26	1,16	1,17	1,00	1,08	1,11	1,14

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

Fuente: Empresa Rialto

De estas composiciones químicas teóricas se calcularon los valores máximos y mínimos de cada óxido. Estos valores se establecieron como restricciones en la herramienta de optimización, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N° 5 Rangos de restricción: Porcentajes de óxidos en la composición química

	Óxido	Porcentaje máximo (%)	Porcentaje mínimo (%)
COMPOSICIÓN QUÍMICA	Na ₂ O	2,058	1,689
	MgO	1,166	0,899
	Al ₂ O ₃	18,590	14,689
	SiO ₂	67,953	60,995
	P ₂ O ₅	0,045	0,039
	K ₂ O	2,893	2,564
	CaO	0,260	0,148
	TiO ₂	0,363	0,215
	Mn ₂ O ₃	0,157	0,103
	Fe ₂ O ₃	1,255	0,997

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

3. Formular la función objetivo: para el desarrollo de esta herramienta se va a hacer un estudio de tres funciones objetivo de minimización: costo, porcentaje de absorción de agua y porcentaje de contracción.

Minimización de costo

Para cumplir con esta función objetivo la empresa proporcionó los costos por kilogramo de cada materia prima, los mismos que se detallan a continuación:

Tabla N° 6 Costo por kilogramo de cada materia prima

Materia Prima	Costo (\$) /kg
AR-01	0,01293
TA-01	0,29
FE-01	0,0244
FE-02	0,03021
FE-03	0,0224
FE-04	0,025
FE-05	0,0366
AR-02	0,0365
FE-06	0,037
CA-01	0,031
FE-07	0,066
FE-08	0,175
SI-01	0,025

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

Fuente: Empresa Rialto



Con estos costos se formuló la función objetivo de minimización, esta función es una suma producto del costo de cada materia prima por su porcentaje en la fórmula de la pasta de prueba.

Minimización del porcentaje de contracción

La función objetivo para minimizar el porcentaje de contracción es la suma del producto del porcentaje de contracción de cada materia prima por el porcentaje de cada una en la pasta de prueba propuesta.

Minimización del porcentaje de absorción

La función objetivo para minimizar el porcentaje de absorción es la suma del producto del porcentaje de absorción de cada materia prima por el porcentaje de cada materia prima en la pasta de prueba propuesta.

4. Cálculo del costo por kilogramo de cada fórmula propuesta

Para finalizar el proceso de desarrollo de la herramienta de optimización se calculó el costo de cada fórmula propuesta para analizar los resultados.



4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

1. Determinación del porcentaje de humedad de las materias primas:

Tabla N° 7 Porcentaje de humedad de materias primas

Materia prima	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
AR-01	10	8,03	19,70
TA-01	10	9,98	0,20
FE-01	10	8,10	19,00
FE-02	10	9,17	8,30
FE-03	10	9,94	0,60
FE-04	10	9,85	1,50
FE-05	10	9,58	4,20
AR-02	10	7,95	20,50
FE-06	10	9,54	4,60
CA-01	10	7,99	20,10
FE-07	10	8,87	11,30
FE-08	10	9,96	0,40
SI-01	10	9,57	4,30

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

2. Moliendas de muestras de materias primas

Tabla N° 8 Peso bruto, cantidad de aditivos, tiempo de molienda, densidad, residuo y viscosidad de cada materia prima

Materia prima	Peso de carga (g)	Cantidad de agua (ml)	TPF %	Peso TPF 500g	Tiempo de molienda(min)	Densidad (g/L)	Residuo (g)	Viscosidad (s)
AR-01	622,67	50	0,75	3,75	25	1542	0,43	11,60
TA-01	501,00	50	0,75	3,75	1	1775	0,30	130
FE-01	617,28	60	0,90	4,50	50	1521	0,45	61
FE-02	545,26	60	0,90	4,50	52	1549	0,40	infinito
FE-03	503,02	50	0,75	3,75	24	1716	35,00	28
FE-04	507,61	50	0,75	3,75	22	1710	0,48	25
FE-05	521,92	50	0,75	3,75	40	1687	0,33	20
AR-02	628,93	80	2,00	10,00	65	1452	0,39	17
FE-06	524,11	50	0,75	3,75	38	1669	0,35	14
CA-01	625,78	50	0,75	3,75	30	1546	0,45	12
FE-07	563,70	50	0,75	3,75	36	1567	0,36	20
FE-08	502,01	50	0,75	3,75	40	1720	0,37	15
SI-01	522,47	50	0,75	3,75	45	1690	0,35	10,60

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 8 se describe la cantidad de agua y aditivo para cada materia prima, así como el tiempo óptimo de molienda para obtener un residuo dentro del rango establecido por la empresa (entre 0,3 y 0,5). Adicionalmente se determinó la densidad y viscosidad de descarga de la molienda.

3. Adición de agua para alcanzar la humedad requerida (8%) para prensar las placas muestra.

Tabla N° 9 Cantidad de agua para humedad =8%

Materia prima	Peso seco (g)	Cantidad agua (ml)
AR-01	305,5	24,4
TA-01	269,6	21,6
FE-01	339,8	27,2
FE-02	298	23,8
FE-03	298,4	23,9
FE-04	256,1	20,5
FE-05	291,7	23,3
AR-02	417,7	33,4
FE-06	298,6	23,9
CA-01	232,6	18,6
FE-07	319,2	25,5
FE-08	245,6	19,6
SI-01	307,3	24,6

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla número 9 se encuentra la cantidad del agua que se debe añadir al polvo seco de cada materia prima para conseguir una humedad del 8%, que es la humedad adecuada para el prensado de las placas.

4. Determinación de pérdidas al fuego

Tabla N° 10 Porcentaje de pérdidas al fuego de materias primas



Materia Prima	Peso inicial (g)	Peso final (g)	(%) Pérdidas
AR-01	81,53	78,67	3,51
TA-01	82,07	52,77	35,70
FE-01	81,54	77,21	5,31
FE-02	80,73	77,28	4,27
FE-03	82,11	80,6	1,84
FE-04	82,08	80,94	1,39
FE-05	82,01	80,93	1,32
AR-02	80,93	73,29	9,44
FE-06	82,64	81,81	1,00
CA-01	81,19	74,09	8,74
FE-07	81,97	79,8	2,65
FE-08	82,11	80,18	2,35
SI-01	82,43	81,92	0,62

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 10 se describe: el peso inicial de las placas luego del proceso de secado; el peso final, que es el peso de la placa luego del proceso de quema a una temperatura de **1167/1223°C** en un ciclo de **60 min**; y finalmente el porcentaje de pérdidas al fuego de cada materia prima calculado.

5. Determinación del módulo de rotura en crudo

Tabla N° 11 Módulo de rotura en crudo de cada materia prima

Materia prima	Espesor (mm)	Fuerza (kgf)	Módulo (kgf/cm ²)
AR-01	10,98	1,3	2,59
TA-01	7,56	0,9	3,78
FE-01	9,41	4,2	11,38
FE-02	9,31	1,4	3,88
FE-03	9,42	0,9	2,43
FE-04	9,33	0,9	2,48
FE-05	9,76	0,9	2,27
AR-02	8,65	5,5	17,64
FE-06	9,94	0,8	1,94
CA-01	9,2	1,5	4,25
FE-07	10,42	1	2,21
FE-08	9,75	0,5	1,26
SI-01	10,06	0,4	0,95

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 11 se encuentran los datos medidos del espesor de las placas muestra de materia



prima, así como la fuerza que marcó el equipo de módulo de rotura y finalmente el módulo de rotura en crudo calculado de cada una de ellas.

6. Determinación del módulo de rotura en seco

Tabla N° 12 Módulo de rotura luego del secado de cada materia prima

Materia prima	Espesor (mm)	Fuerza (kgf)	Módulo (kgf/cm²)
AR-01	9,97	2,8	6,76
TA-01	7,61	2,1	8,70
FE-01	9,31	16	44,30
FE-02	9,31	4,2	11,63
FE-03	9,42	3,3	8,93
FE-04	9,33	2,9	8,00
FE-05	9,76	3,2	8,06
AR-02	8,5	15	49,83
FE-06	9,94	3,4	8,26
CA-01	9,22	5,8	16,37
FE-07	10,46	3,9	8,55
FE-08	9,9	2,2	5,39
SI-01	10,06	0,8	1,90

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 12 se encuentran los datos medidos del espesor de las placas muestra de materia prima luego de haberse sometido al proceso de secado, así como la fuerza que marcó el equipo de módulo de rotura y finalmente el módulo de rotura en seco calculado de cada una de ellas.



7. Determinación del módulo de rotura después de la quema

Tabla N° 13 Módulo de rotura de cada materia prima luego de la quema

Materia prima	Espesor (mm)	Fuerza (kgf)	Módulo (kgf/cm²)
AR-01	9,41	34,4	93,24
TA-01	7,4	12,4	54,35
FE-01	8,2	162,2	578,94
FE-02	9,16	50,1	143,30
FE-03	8,43	121,5	410,33
FE-04	8,51	32,6	108,04
FE-05	8,44	124,2	418,45
AR-02	7,65	80,2	328,90
FE-06	9,05	93,3	273,40
CA-01	8,72	25,1	79,22
FE-07	9,32	108,5	299,78
FE-08	8,85	107,4	329,10
SI-01	9,85	18,5	45,76

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 13 se encuentran los datos medidos del espesor de las placas muestra de materia prima luego de haberse sometido al proceso de quema a una temperatura de **1167/1223°C** en un ciclo de **60 min**, también la fuerza que marcó el equipo de módulo de rotura y finalmente el módulo de rotura en la quema calculado de cada una de ellas.



8. Determinación del porcentaje de contracción

Tabla N° 14 Porcentaje de contracción de materias primas

Materia Prima	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Promedio (mm)	Porcentaje de Contracción (%)
AR-01	46,69	46,72	46,71	6,59
TA-01	49,58	49,62	49,60	0,80
FE-01	44,39	44,32	44,36	11,29
FE-02	43,82	43,94	43,88	12,24
FE-03	45,91	45,82	45,87	8,27
FE-04	45,24	45,36	45,30	9,40
FE-05	44,81	44,87	44,84	10,32
AR-02	45,69	45,65	45,67	8,66
FE-06	45,52	45,49	45,51	8,99
CA-01	48,85	48,88	48,87	2,27
FE-07	43,97	43,93	43,95	12,10
FE-08	44,09	44,03	44,06	11,88
SI-01	50,17	50,22	50,20	-0,39

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 14 se describen las medidas de los dos lados más cortos de las placas muestra, así como el promedio de los mismos, con estos datos se calculó el porcentaje de contracción de cada una de las materias primas luego de haberse sometido al proceso de quema a una temperatura de **1167/1223°C** en un ciclo de **60 min.**

9. Determinación del porcentaje de absorción DE AGUA

**Tabla N° 15** Porcentaje de absorción de agua de materias primas

Materia Prima	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Porcentaje de Absorción (%)
AR-01	45,71	50,25	9,93
TA-01	29,13	40,23	38,11
FE-01	34,22	34,27	0,15
FE-02	40,58	40,58	0,00
FE-03	40,55	42,00	3,58
FE-04	51,99	52,38	0,75
FE-05	44,24	44,29	0,11
AR-02	37,99	39,25	3,32
FE-06	42,66	44,42	4,13
CA-01	46,51	54,90	18,04
FE-07	44,17	44,18	0,02
FE-08	43,80	43,81	0,02
SI-01	44,41	54,40	22,49

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 14 se describe: el peso inicial de cada materia prima, este peso se registra luego de la quema de las placas en el horno de producción a una temperatura de **1167/1223°C** en un ciclo de **60 min**; el peso final, que es el peso registrado luego del procedimiento para determinar la absorción de agua y el porcentaje de absorción de cada materia prima.

10. Coeficientes de dilatación de materias primas

Para esto, se entregaron las muestras de las placas prueba de cada una de las materias primas al departamento técnico de ESFEL para la determinación del coeficiente. Los resultados son:

**Tabla N° 16** Coeficientes de dilatación de materias primas

Materia Prima	Coef. Dilatación (1/°K)
AR-01	74,19
TA-01	117,14
FE-01	65,12
FE-02	58,72
FE-03	113,34
FE-04	116,57
FE-05	107,16
AR-02	64,85
FE-06	92,28
CA-01	97,72
FE-07	54,14
FE-08	80,51
SI-01	201,47

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 15 se describen los coeficientes de dilatación de cada materia prima. Las placas muestras de cada materia prima fueron quemadas a una temperatura de **1167/1223°C** en un ciclo de **60 min.** Los coeficientes de dilatación fueron determinados en un rango de temperatura: 30 – 650 °C.

4.2 PASTA DE PORCELANATO

En el programa de optimización se plantearon las siguientes funciones objetivo:

- Minimización de costo



- Minimización del porcentaje de absorción
- Minimización del porcentaje de contracción

De acuerdo a esto se obtuvieron las siguientes fórmulas de pasta barbotina para porcelanato:

Tabla N° 17 Fórmulas calculadas por la herramienta de optimización

		MIN COSTO	MIN CONTRACCIÓN	MIN ABSORCIÓN
MATERIA PRIMA	FÓRMULA STD	FÓRMULA 1	FÓRMULA 2	FÓRMULA 3
AR-01	0,00	3,55	0,00	0,00
TA-01	2,5	2,13	2,34	2,14
FE-01	0,00	12,29	2,19	5,22
FE-02	0,00	0,00	0,00	0,00
FE-03	27,9	43,82	43,08	0,00
FE-04	7,6	0,00	0,00	36,96
FE-05	33	0,00	16,76	18,94
AR-02	0,00	3,35	4,81	24,55
FE-06	0,00	8,18	0,00	0,00
CA-01	0,00	22,99	25,91	0,00
FE-07	0,00	0,00	0,00	12,19
FE-08	0,00	0,00	0,00	0,00
SI-01	3,00	3,69	4,90	0,00
AR-03	21,00	0,00	0,00	0,00
CH-01	5,00	0,00	0,00	0,00
COSTO/KG	0,0378	0,0317	0,0341	0,0406

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

1. Porcentaje de humedad de las materias primas que se utilizarán en las fórmula estándar y fórmulas propuestas de pasta barbotina de porcelanato.

**Tabla N° 18** Porcentaje de humedad de materias primas

MATERIA PRIMA	% Humedad
AR-01	18,9
TA-01	0
FE-01	18,3
FE-03	0,5
FE-04	1,3
FE-05	3,8
AR-02	20,1
FE-06	4,2
CA-01	20,3
FE-07	10,5
SI-01	4,4
AR-03	26
CH-01	0

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

La tabla 18 muestra los porcentajes de humedad de cada materia prima que será utilizada en la formulación de la pasta estándar y de las pastas de prueba. El porcentaje de humedad es útil para el cálculo del peso bruto de cada materia prima en una carga de 500 g, así como para el cálculo de la cantidad de agua con la que se realizará la molienda de las pastas para tener una pasta con 35% de humedad.

2. Parámetros de molienda – pastas barbotinas nivel laboratorio

**Tabla N° 19** Parámetros de molienda de las pastas para porcelanato

Parámetro	Cantidad
Carga	500 g
% Defloculante D-53 PLUS	0,72
% Humedad de la pasta	35

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 19 están descritos los parámetros, aditivos y porcentaje de humedad para la molienda de pastas de porcelanato a nivel laboratorio.

Tabla N° 20 Tiempo óptimo de molienda para las pastas prueba y porcentaje de residuo de cada una.

Fórmula	Tiempo de molienda (min)	Porcentaje de residuo
STD	29	0,40
1	28,5	0,35
2	26	0,39
3	35	0,36

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 20 se hallan los tiempos óptimos de molienda de cada pasta de prueba para lograr un porcentaje de residuo entre 0,35 y 0,40 (especificado en planta).

3. Determinación del porcentaje de pérdidas al fuego

Tabla N° 21 Porcentaje de pérdidas al fuego de las pastas prueba

Fórmula	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% Pérdidas al fuego
STD	82,84	80,04	3,38
1	82,63	78,94	4,46
2	82,65	79,63	3,65
3	82,66	79,11	4,3

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 21 está registrado el peso inicial de las placas de prueba luego del proceso de secado (Temperatura: 247-260°C, tiempo: 19 min), el peso final luego del proceso de quema



a una temperatura de **1163/1224°C**, en un ciclo de **61 min** y el porcentaje de pérdidas al fuego de cada placa.

4. Determinación del módulo de rotura

Tabla N° 22 Resistencia a la rotura de las pastas prueba

Fórmula	Crudo		Seco		Quema	
	(Kgf)	(N)	(Kgf)	(N)	(Kgf)	(N)
STD	1,7	16,67	3,5	34,32	124,2	1217,99
1	1,9	18,63	4,3	42,16	105,3	1032,64
2	1,3	12,74	3,1	30,4	103,7	1016,95
3	2,2	21,57	6,7	65,7	135,7	1330,76

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 22 están los valores de resistencia a la rotura de cada placa muestra, expresados en kilogramo fuerza y en newton. El aparato para medir la resistencia a la rotura de la empresa RIALTO arroja un valor en kilogramos fuerza, pero en la norma INEN la resistencia a la rotura está expresada en newton, por esta razón se expresan en las dos unidades para realizar una comparación adecuada.

La NTE INEN 0654 define las especificaciones en función del tamaño y espesor de la baldosa por ejemplo para aquellas que tienen baja absorción, la resistencia a la rotura luego de la quema debe ser **mínimo 1300 N**, si posee un espesor mayor o igual a 7,5mm y una superficie entre 90 y 410 cm².

Tabla N° 23 Módulo de rotura de las pastas prueba

Fórmula	Crudo		Seco		Quema	
	(Kgf/cm ²)	(N/mm ²)	(Kgf/cm ²)	(N/mm ²)	(Kgf/cm ²)	(N/mm ²)
STD	4,91	0,481	9,94	0,97	419,45	41,14
1	5,24	0,514	11,6	1,14	329,33	32,29
2	3,35	0,328	7,77	0,76	309,32	30,33
3	6,65	0,652	19,54	1,916	480,83	47,15

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)



En la tabla 23 se encuentran los valores calculados del módulo de rotura de cada placa muestra, expresados en kilogramo fuerza sobre centímetro cuadrado y en newton sobre milímetro cuadrado.

La NTE INEN 0654 indica que para baldosas de baja absorción el módulo de rotura luego de la quema debe ser de **mínimo 35 N/mm²**, si posee un espesor mayor o igual a 7,5mm y una superficie entre 90 y 410 cm².

5. Determinación del porcentaje de contracción

Tabla N° 24 Porcentaje de contracción de pastas prueba a nivel laboratorio

Fórmula	Longitud 1 (mm)	Longitud 2 (mm)	Promedio (mm)	Porcentaje de Contracción (%)
STD	45,67	45,72	45,695	8,61
1	46,22	46,11	46,165	7,67
2	46,18	46,10	46,14	7,72
3	45,63	45,46	45,545	8,91

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 24 se encuentran los datos de longitud medidos en los lados más cortos de las placas muestra de las pastas de prueba, con estos datos se obtuvo un promedio y se calculó el porcentaje de contracción de cada una de las pastas propuestas, luego de haberse sometido al proceso de quema a una temperatura de **1163/1224°C**, en un ciclo de **61 min.**

6. Determinación del porcentaje de absorción

Tabla N° 25 Porcentaje de absorción de las pastas prueba a nivel laboratorio

Fórmula	Peso inicial (g)	Peso final (g)	(%) Absorción
STD	36,37	37,64	3,49
1	40,77	43,50	6,70
2	42,99	46,45	8,05
3	36,54	37,35	2,22

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 25 están el peso inicial de cada placa de pasta prueba, este peso se registra luego



de la quema de las placas en el horno de producción a una temperatura de **1163/1224°C**, en un ciclo de **61 min**. También se encuentra el peso final de cada una luego de realizar el procedimiento para la determinación del porcentaje de absorción, y finalmente el porcentaje de absorción calculado de cada una de las placas prueba.

7. Determinación del coeficiente de dilatación.

Para esto, se entregaron las muestras de las placas prueba de cada una de las pastas propuestas al departamento técnico de ESFEL para la determinación del coeficiente. Los resultados son:

Tabla N° 26 Coeficientes de dilatación de las fórmulas propuestas según la herramienta de optimización

Fórmula	Coeficiente de Dilatación (1/°K)
STD	96,15
1	90,95
2	96,17
3	84,74

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

En la tabla 26 se describen los coeficientes de dilatación de las fórmulas obtenidas en la herramienta de optimización. Las placas muestras de las fórmulas propuestas fueron quemadas a una temperatura de **1163/1224°C** en un ciclo de **60 min**. Los coeficientes de dilatación fueron determinados en un rango de temperatura: 30 – 650°C.



5. DISCUSIÓN

Para el análisis de los resultados obtenidos con la herramienta de optimización es importante comparar las características físico – químicas del histórico de las pastas de porcelanato que han sido aprobadas para producción con las características de las pastas propuestas.

Tabla N° 27 Propiedades físico - químicas de las pastas de porcelanato

PROPIEDAD FÍSICA / QUEMA	Porcentaje de Contracción	Porcentaje de Absorción	Módulo de Rotura	Coefficiente de Dilatación
UNIDAD	(%)	(%)	(N/mm ²)	(1/K°)
PBP_16-105-3	8,64	0,33	9,46	93,39
PBP_49-4	9,26	0,29	45,9	93,96
PBP_49-5	9,05	0,14	49,58	93,49
PBP_51-15-4	8,21	0,38	37,97	89,4
PBP_54-14	9,37	0,15	47,09	94,16
PBP_63-4	8,96	0,3	43,85	92,24
PBP_81-9	8,96	0,2	42,94	99,79
PBP_86-3	9,16	0,31	48,93	92,46
PBP_86-5	8,91	0,34	44,16	95,91
PBP_86-13	8,71	0,51	44,31	95,86
FP_STD 86-5	8,61	3,49	41,14	96,15
FP_1-C	7,67	6,70	32,29	90,95
FP_2-CC	7,72	8,05	30,33	96,17
FP_3-A	8,91	2,22	47,15	84,74

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)

Durante el ensayo para la determinación de estas características, además de las fórmulas propuestas se tomó como referencia estándar a la fórmula de producción, con el objetivo de tener un punto de comparación más cercano, esta fórmula es la PBP_86-5, la cual se sometió a los mismos ensayos que las propuestas y en las mismas condiciones, de acuerdo la tabla N°27, se puede decir que la fórmula FP_3-A es la que más se aproxima a las características del estándar, comparando los valores del porcentaje de contracción, en el caso del porcentaje de absorción la propuesta tiene una absorción más baja que el estándar, este valor puede considerarse como una ventaja ya que lo que se busca es obtener una pasta para baldosa de baja absorción (menor al 0,5%) y considerando que la fórmula estándar posee una absorción de 0,34% en producción, se esperaría que la propuesta en condiciones de producción tenga



una absorción menor.

Ahora bien, la fórmula FP_3-A fue entregada por la herramienta de optimización buscando como función objetivo la minimización del porcentaje de absorción, de acuerdo con los resultados obtenidos, esta propuesta cumple con lo diseñado en la herramienta. El porcentaje de contracción, aumenta alrededor del 1% respecto al estándar de producción, pero en comparación al histórico se mantiene dentro del rango de trabajo en planta. Finalmente, de acuerdo a la tabla N° 17, respecto al costo, esta fórmula posee el mayor en comparación con las otras dos propuestas y un 8% más (\$0,02 más costos por kilogramo de pasta) vs el estándar.

La fórmula FP_1-C entregada por la herramienta como la combinación que tiene por objetivo la minimización de costo, es efectivamente la que posee el costo de materias primas más bajo en comparación con el estándar y las demás propuestas. Respecto a sus características como porcentaje de absorción y contracción, son mayor y menor respectivamente en comparación con el estándar. En el caso específico del porcentaje de absorción en casi un 50% mayor por lo que en producción esto sería contraproducente y haría que la pasta salga de las especificaciones requeridas por la normativa que maneja la empresa internamente.

La propuesta que tiene como objetivo la minimización del porcentaje de contracción no cumple con lo que busca la función objetivo, debido a que tiene un porcentaje de contracción más alto que el de la fórmula FP_1-C, por tanto, no es la contracción mínima entre las propuestas. A pesar de que el costo sea menor que el de la fórmula estándar, las características físico – químicas hacen a esta propuesta no viable para producción.

Análisis de variación de la composición química

Tabla N° 28 Composición química teórica de las fórmulas propuestas (porcentajes)

ÓXIDO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
STD/86-5	2,022	0,916	16,555	64,487	0,043	2,757	0,156	0,286	0,119	1,108
FP_1-C	1,689	0,899	17,826	67,102	0,039	2,672	0,260	0,215	0,157	0,997
FP_2-CC	1,689	0,899	17,370	67,953	0,042	2,564	0,183	0,215	0,148	0,997
FP_3-A	2,058	0,899	18,590	66,676	0,039	2,738	0,260	0,332	0,109	1,217

Elaborado por: Andrea Velesaca (2020)



Las composiciones químicas de las materias primas fueron la base para el diseño de la herramienta de optimización, por lo tanto, es importante realizar una comparación de las composiciones químicas entre las propuestas de pastas y la fórmula estándar.

La sílice es la que se presenta en mayor porcentaje, pues desde el inicio de la alfarería ha sido considerado como un provechoso constituyente e indispensable de la pasta cerámica (Paul Rado, 1990). La función de la sílice depende del tipo de cerámica, en pastas de baja absorción la sílice va a aumentar la refracteriedad, disminuyen la contracción y aumentan el rango de cocción. En las fórmulas propuestas FP_1-C y FP_2-CC, el porcentaje de sílice es mayor esto justifica la baja contracción en ellas.

La alúmina es otro de los componentes que se presenta en mayor porcentaje en las composiciones químicas de las pastas cerámicas esto debido a que por su alta conductividad térmica y baja expansión térmica dará a la pasta una buena resistencia al choque térmico, en las fórmulas propuestas se encuentra entre un 16 y 18%, siendo la fórmula 3 la que posee el mayor porcentaje, esto sería un indicativo de que la pasta en producción tendría menor probabilidad de presentar este defecto a la salida del horno.

Respecto al porcentaje de fundentes (Na_2O y K_2O) sigue siendo la tercera propuesta FP_3-A la que posee mayor similitud respecto al estándar, este valor permite tener una idea de la variación de contracción entre pastas cerámicas, pues la fórmula 3 al tener mayor cantidad de fundentes va a tener un mayor porcentaje de contracción que las otras dos propuestas durante la quema, pero al tener una mayor cantidad de fundentes va a necesitar una menor temperatura y probablemente menor ciclo para llegar a su punto de fusión.

El porcentaje de óxido de hierro en las pastas cerámicas da una referencia del tono – color que tendrá la pasta luego de la quema, en las fórmulas FP_1-C y FP_2-CC existe un porcentaje de este óxido menor que en el estándar y la FP_3-A, por lo tanto, físicamente se ven más blancas.



6. CONCLUSIONES

Durante este proyecto se logró realizar la caracterización de las materias primas utilizadas en la empresa Rialto para la producción de pasta para porcelanato, también se obtuvo una composición química teórica de cada una de ellas con el objetivo de diseñar una herramienta de optimización para obtener tres fórmulas basadas en: la minimización de costo, porcentaje de absorción y porcentaje de contracción.

De las fórmulas obtenidas se determinó a nivel laboratorio que la fórmula FP_3-A es la que tiene el mejor comportamiento físico – químico y cumple con las especificaciones requeridas por la planta de producción, no obstante, es la más costosa.

Respecto a la herramienta de optimización se puede concluir que es una forma más rápida de obtener una fórmula que cumpla con los objetivos de producción, siempre y cuando se cuente con un histórico de las pastas que han tenido buenos resultados en planta, esto debido a que las características como porcentaje de absorción, porcentaje de contracción, módulo de rotura, coeficiente de dilatación, etc., son variables que no se comportan linealmente, porque la cerámica o las materias primas sufren cambios en su estructura molecular durante la cocción y esto vuelve complicado predecir su comportamiento, sin embargo, conociendo la composición química se tiene una idea bastante clara de los resultados que podrían obtenerse utilizando la herramienta. Existe un margen de error, pero en general disminuye el tiempo que regularmente se invierte usando el método de tanteo para obtener una fórmula adecuada.

7. RECOMENDACIONES

Para la empresa se recomienda elaborar una base de datos más amplia de las fórmulas utilizadas en producción, esta base de datos deberá constar de composiciones químicas y características físico –químicas de pastas e incluso de materias primas, esto con el objetivo de encontrar un modelo matemático para predecir con más exactitud el comportamiento de pastas cerámicas utilizando un modelo computacional más avanzado como redes neuronales, por ejemplo.



8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Geovirtual. (22 de agosto de 2015). *Los Feldespatos*. Obtenido de <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap02e.html>

ALVAREZ, I. S. (2003). OPTIMIZACIÓN CON SOLVER. *Departamento de Economía Cuantitativa - Universidad de Oviedo*, 1-10.

Aponte, E. (21 de Julio de 2018). *finanzas9y6.com*. Recuperado el 16 de Enero de 2020, de [finanzas9y6.com: https://www.finanzas9y6.com/como-usar-solver/](https://www.finanzas9y6.com/como-usar-solver/)

Arsham, H. (s.f.). *home.ubalt.edu*. Recuperado el 15 de Enero de 2020, de [home.ubalt.edu: http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/Business-stat/opre/SpanishD.htm](http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/Business-stat/opre/SpanishD.htm)

Barba, A. (2002). *Materias Primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Castellón : Graphic Group, S.A.

Bermúdez Colina, Y. (2011). Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias, II(7)*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2150/215024822007.pdf>

Cabrera, S. (s.f.). *matematicas.uclm.es*. Recuperado el 16 de Enero de 2020, de [matematicas.uclm.es: http://matematicas.uclm.es/ita-cr/web_matematicas/trabajos/248/Programacion_lineal.pdf](http://matematicas.uclm.es/ita-cr/web_matematicas/trabajos/248/Programacion_lineal.pdf)

Castro, N., Guerra, O., & López, G. (Marzo de 2017). *scielo.sld.cu*. Recuperado el 15 de Enero de 2020, de [scielo.sld.cu: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202017000100026](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202017000100026)

Construmática. (s.f.). *Proceso de Fabricación de Baldosas Cerámicas*. Obtenido de https://www.construmatica.com/construpedia/Proceso_de_Fabricaci%C3%B3n_de_Baldosas_Cer%C3%A1micas



- El Oficial. (18 de mayo de 2018). *IMPRESIÓN DIGITAL DE CERÁMICA Y PORCELANATO*. Obtenido de <https://www.eloficial.ec/impresion-digital-de-ceramica-y-porcelanato/>
- Feitó Cespón, M., Cespón Castro, R., & Rubio Rodríguez, M. (2016). Modelos de optimización para el diseño sostenible de cadenas de suministros de reciclaje de múltiples productos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(1). Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/772/77243535013.pdf>
- Geteco. (19 de junio de 2018). *QUÉ TIPO DE PRODUCTO ES EL PORCELÁNICO Y QUÉ USOS LE PODEMOS DAR*. Obtenido de <https://www.geteco.es/que-es-gres-porcelanico-y-caracteristicas.html>
- Hervás Fernández, R. (30 de diciembre de 2019). *Sílice cristalina en minería*. Obtenido de <https://prevencionar.com/2019/12/30/silice-cristalina-en-mineria/>
- INEN, I. E. (2009). *BALDOSAS CERÁMICAS. REQUISITOS*. Quito.
- INEN, I. E. (2009). *Norma NTE INEN 0652*. Quito.
- Ingeniería Civil. (2016). *Procedimiento para Identificar Suelos de Grano Fino*. Obtenido de <https://www.ingenierocivilinfo.com/2010/06/62-procedimiento-para-identificar.html>
- Instituto Nacional del Cáncer. (20 de marzo de 2015). *Sílice cristalina*. Obtenido de <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/silice-cristalina>
- Navarro, E. (1982). *TECNOLOGÍA CERÁMICA*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Paul Rado, F. I. (1990). *Introducción a la tecnología de la Cerámica*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.



Porto, J. P., & Merino, M. (2015). *Definición de porcelanato* . Obtenido de <https://definicion.de/porcelanato/>

R. Diedel, S. L. (2006). *MÓDULO DE RUPTURA DE LAS ARCILLAS Y PASTAS CRUDAS*. Castellón: QUALICER.

Rado, P. (1990). *Introducción a la tecnología de la cerámica*. España: Omega, S.A.

Refin Ceramiche. (s.f.). *Gres porcelánico*. Obtenido de <https://www.refin-gres-porcelanico.com/gres-porcelanico/>

Rubin, H. (s.f.). *hemaruce.angelfire.com*. Recuperado el 16 de Enero de 2020, de hemaruce.angelfire.com: http://hemaruce.angelfire.com/Metodo_Simplex.pdf

Singer, F. (1979). *Cerámica Industrial* . Bilbao: URMO, S.A.

Taha, H. A. (1976). *Investigación de operaciones, una introducción*. New York: COPYRIGHT.

Valencia, K. (Septiembre de 2015). *ri.uaemex.mx*. Recuperado el 16 de Enero de 2020, de ri.uaemex.mx: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/31644/secme-16318.pdf?sequence=1&isAllowed=y>