



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

Facultad de Ciencia y Tecnología

*Reemplazo del material Playa por el material
San Joaquín en la fórmula para la pasta de
Biquema mediante Diseño Factorial Completo 2^k*

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título
Tecnólogo en Cerámica**

Autores:

**Calle Quizhpi Martha Irene
Picón Quizhpe Cristian Fernando**

Director:

Ing. Cristian Rojas

Cuenca, Ecuador

2009

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mis padres quienes con su fuerza de voluntad y carácter perseverante se han convertido en mis guías, dando un sentido a mi vida.

A mi hermano, quien ha sido mi compañero y amigo.

Gracias por estar a mi lado.

Cristián Picón

Esta monografía esta dedicada, con especial cariño y afecto a mis hijas Tania Jessica, y a mi amado Oswaldo, por todo el apoyo y comprensión que me brindaron hasta culminar con éxito este trabajo.

Martha Calle

AGRADECIMIENTOS

De una manera especial nuestros agradecimientos a Don Alfredo Peña Calderón, Presidente del Grupo Peña y al Ing. Alfredo Peña Payrò, Gerente General del Grupo Peña, que gracias a su apoyo y ayuda incondicional hemos logrado culminar con esta investigación.

De igual manera, nuestros agradecimientos a las siguientes personas que, de una u otra manera contribuyeron y sirvieron de inspiración a lo largo de esta Tecnología:

Ing. Sonia Ortega,
Ing. Esteban Alvear,
Ing. Augusto Rodas,
Ing. Juan Ordóñez,
Dr. Piercosimo Tripaldi

Mi gratitud al Ing. Cristian Rojas; Director de esta monografía, a mis compañeros de aula y a todos los docentes de la UDA, por haber compartido sus conocimientos.

C. Picòn, M. Calle.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatorias.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice de Contenidos.....	iv
Índice de Ilustraciones y Cuadros.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPITULO 1: OBJETIVOS, DEFINICIONES, CONCEPTOS Y CARACTERISTICAS.

1.1	Objetivos.....	3
1.2	Definiciones y conceptos	3
1.3	Características de los materiales	5

CAPITULO 2: PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS Y DESARROLLO DEL DISEÑO

2.1	Diseño experimental.....	7
2.1.1	Generalidades del diseño experimental	7
2.1.2	Objetivos del diseño experimental	7
2.1.3	Etapas de un diseño experimental	8
2.1.4	Ventajas del diseño experimental	9
2.1.5	Diseño factorial a dos niveles y tres variables.....	9
2.1.6	Descripción	10
2.1.7	Escalado de las variables	11
2.1.8	Función de utilidad o modulaciones.....	11
2.1.9	Cálculo del modelo de respuesta.....	13
2.1.10	Validación y determinación de los efectos significativos.....	13
2.1.11	Optimización: Método de superficie de respuesta.....	14
2.1.12	Diseño central compuesto.....	14
2.1.13	Obtención de la gráfica.....	15
2.2	Procedimientos de trabajo.....	15
2.2.1	Procedimiento para el muestreo de arcillas.....	16
2.2.2	Procedimiento para la elaboración de placas.....	16

2.3	Variables a analizar y especificaciones a alcanzar.....	16
2.4	Desarrollo del proyecto.....	17
2.4.1	Materiales a utilizar.....	17
2.4.2	Método utilizado para el desarrollo del proyecto.....	18
2.4.3	Resultados iniciales: Análisis de los factores significativos.....	20
2.5	Proyección de costos.....	24
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		25
BIBLIOGRAFÍA.....		26

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y CUADROS

Tabla 1.1: Clasificación de Materiales Cerámicos.....	4
Tabla 2.1: Numero de experimentos para un diseño factorial Completo 2K.....	9
Tabla 2.2: Matriz del modelo experimental completo 23.....	10
Tabla 2.3: Categorías de los valores de utilidad “U”.....	12
Tabla 2.4: Fórmula de producción.....	18
Tabla 2.5: Valores máximos y mínimos experimentales.....	18
Tabla 2.6: Matriz de los experimentos.....	19
Tabla 2.7: Plan de experimentación.....	19
Tabla 2.8: Cálculo <i>Half Normal Plot</i> de los coeficientes.....	20
Tabla 2.9: Análisis Función - <i>Desirability</i> (mediante programa <i>DART</i>).....	22
Tabla 2.10: Cálculo de los nuevos valores para la optimización.....	22
Tabla 2.11: Resultados de los experimentos.....	23
Tabla 2.12: Análisis de la optimización mediante <i>Desirability</i>	23
Tabla 2.13: Costos por tonelada de las materias primas.....	24
Tabla 2.14: Costo de cada fórmula (dólares por tonelada).....	24
Tabla 2.15: Producción al mes Pasta Gres de Biquema	25
Tabla 2.16: Proyección al mes y anual del ahorro	25

RESUMEN

Es cultura de las empresas cerámicas estar siempre a la vanguardia en nuevos diseños, nuevas tecnologías y nuevos procesos, siempre con la finalidad de ofrecer productos de calidad y a precios más competitivos; apuntando a fortalecer el sector productivo. Por esto; GRAIMAN aplicó un nuevo método de producción, basado en la metodología de Diseño Factorial Completo; que ayudaron a mejorar las condiciones del producto terminado, aumentaron espacios físicos en la bodega y redujeron costos, mediante la creación de una nueva fórmula para la pasta de biquema de mejores cualidades; ofreciendo al cliente un producto de alta calidad y menor precio.

ABSTRACT

The culture of the ceramic companies is to be on the cutting edge of new designs, technologies and processes, always with the aim of offering quality products at more competitive prices; they focus on strengthening the productive area. For this reason, GRAIMAN applied a new production process which is based on the Complete Factorial Design method, which helped to improve the state of finished products, increase the physical space in the storeroom and reduced costs through the creation of a new formula for the double-fire clay mixture which has better qualities and offers to the customer a high quality product with a lower price.



A handwritten signature in black ink, which appears to be 'Griselda Estanislao', written over a horizontal line.

Calle Quizhpi Martha Irene, Picón Quizhpe Cristian Fernando

Trabajo de Graduación

Ing. Cristian Rojas

Julio 2009

Reemplazo del material Playa por el material San Joaquín en la fórmula para la pasta de Biquema mediante Diseño Factorial Completo 2^k

INTRODUCCIÓN

Para optimizar procesos de fabricación, condiciones de reacción y métodos de análisis entre otros, es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y cómo afectan. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando. Primero se recogen en una lista todas las variables que podrían influir en la respuesta. A continuación, se realizan una serie de experimentos en los cuales se fijan las variables que no interesa modificar, se anota el valor de las que no se pueden controlar, y se varían las restantes. Finalmente, se obtiene la información comparando la variación de la respuesta entre experimentos.

El elevado coste de la experimentación y las limitaciones de tiempo obligan a ejecutar sólo los experimentos imprescindibles. Y el método tradicional de variar un factor cada vez no suele ser la mejor opción. Puede implicar más experimentos de los necesarios y, a pesar de ello, proporcionar sólo información parcial. Por ejemplo, no mostrará si existe interacción entre factores. Las interacciones suelen ser muy corrientes y a veces son los efectos más importantes, por lo que conocerlas es imprescindible para comprender el comportamiento de muchos sistemas.

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son óptimas para generar la información que se busca. Se introducirá una de estas estrategias: el **diseño factorial completo 2^k** . Éste describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos.

Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no

haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian).

Es vital la importancia de diseñar la experimentación de modo que proporcione la información buscada con el menor número de experimentos. Cuando el objetivo es medir cómo influyen k factores en un proceso y descubrir si interaccionan entre ellos, el **diseño factorial completo 2^k** es la estrategia experimental óptima. Este diseño permite explorar una zona escogida del dominio experimental y encontrar una dirección prometedora para la optimización posterior. Un diseño factorial permite estudiar las diferentes reacciones, cambios, etc., que afectan a un determinado proceso, producto, etc.

CAPITULO 1

OBJETIVOS, DEFINICIONES, CONCEPTOS Y CARACTERISTICAS.

1.1 Objetivos:

Con el presente trabajo se busca llegar a los siguientes objetivos:

- Unificación de materias primas que se usan en planta (monoquema y biquema), con la única variante en la tecnología de biquema de utilizar en su fórmula el Carbonato de Calcio.
- Reducción de costos en la fórmula: El material Playa tiene un costo de \$13,35 cada tonelada, mientras que el material San Joaquín tiene el costo de \$9,07 la tonelada.
- Buscar la disminución del porcentaje de Carbonato de Calcio en la fórmula de la pasta de biquema, previniendo así la presencia de eflorescencias.

Todos estos objetivos, se los pretende alcanzar utilizando un método experimental, en éste caso mediante **el diseño factorial completo**.

1.2 Definiciones y Conceptos:

Producto Cerámico: Cualquier objeto producido artificialmente compuesto por materias inorgánicas no metálicas, formado a temperatura ambiente y consolidado a altas temperaturas.

No son cerámicos: Vidrios, Cementos, Adobes.

Clasificación:

Tabla 1.1: Clasificación de Materiales Cerámicos

MATERIAL	DIMENSION GRANOS	ABSORCION DE AGUA	PRODUCTOS
CERAMICAS SILICATICAS DE BASE ARCILLOSA	GRUESOS	POROSAS>6%	Terracotas refractarias o abrasivas, Fire Clays
		DENSAS<6%	Clinker, gres químico, gres artístico
	FINOS	POROSAS>2%	Faenza, terraille
		DENSAS<2%	Gres piso, gres rojo, gres porcelanato, gres artístico, Porcelana vítrea (blanca)

*Fuente: NORTON, H. "Cerámica Fina", Tercera edición, 1988.

Arcilla Plástica: Es una arcilla extremadamente fina que le confiere una alta plasticidad, y que ayuda para la resistencia de la baldosa en estado crudo en el transporte de la misma que se realiza en la decoración antes de ser quemada, ayudando a evitar despuntes y fisuras.

Arcilla Calcárea: Arcilla de baja contracción en quemado, contienen un porcentaje alto de CaO (óxido de calcio), con una mediana plasticidad, ayudando a contrarrestar el exceso de contracción de la pasta resultante al utilizar arcillas y feldespatos de alta contracción.

Feldespatos: Este componente es utilizado con el objetivo de conferir al producto quemado una buena resistencia a la rotura y disminuir la porosidad abierta de la baldosa (% de absorción).

Carbonato de calcio: componente utilizado en la tecnología de biquema, minimiza la contracción o retiro de la pasta, ayudando a tener una mayor porosidad para obtener un correcto pegado en paredes.

1.3 Características de los Materiales:

Pasta Cerámica: Es aquel material conformado de manera general:

Componente plástico.

Componente inerte.

Componente fundente.

COMPONENTE PLASTICO.

Características:

- Permite el moldeo de la pieza
- Sirve para suspensión: cuando la pasta es dispersada en agua
- Confiere solidez y cohesión en crudo y es responsable de la contracción
- En la quema, se transforma en compuestos cristalinos
- Responsable del color de la pasta

El componente plástico lo constituyen las arcillas.

COMPONENTE INERTE.

Características:

- Disminuye la plasticidad.
- Queda inalterada en todo el proceso cerámico.
- Disminuye la contracción en secado y en quema.
- Constituye el esqueleto de la masa cerámica.
- Aumenta la porosidad abierta.
- Mayor permeabilidad de la pasta en la quema (eliminación del corazón negro)
 - a) La acción desgrasante.

Cuando la arcilla es demasiado plástica crea muchos problemas. Es preciso añadir materiales inertes que:

- I. Tienen granulometrías más gruesas de las arcillas, por lo que interrumpen la uniformidad de la masa plástica.
- II. Tiene formas de granos en vez que capas, por esto no escurren tanto.

III. No absorben agua.

IV. Como resultado final se tiene: una reducción del componente plástico.

El componente inerte lo constituyen la chamota (producto quemado molido), sílice, cuarzo e inclusive cenizas volcánicas (pómez).

COMPONENTE FUNDENTE.

Características:

- Disminuye la temperatura a la cual se forma la fase vidriosa.
- En el gres, determina la cantidad de fase vidriosa, disminuye la porosidad y aumenta la contracción en quema.
- En cerámicas no greificadas forma compuestos que dan resistencia y cohesión a los productos.
- Es un desgrasante de la pasta cruda (reduce la plasticidad).

Las temperaturas a las cuales los materiales arcillosos se transforman y producen manufactos válidos técnicamente, son muy altas y por lo tanto anti-económicas.

Añadiendo sustancias fundentes se pueden obtener las mismas propiedades a temperaturas mas bajas.

CAPITULO 2

PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS Y DESARROLLO DEL DISEÑO

2.1 Diseño Experimental

2.1.1 Generalidades del Diseño experimental

El diseño experimental es una técnica científica que nos ayuda a realizar una planificación y análisis de experimentos para obtener información de calidad. Esta información nos permitirá comprobar hipótesis científicas, desarrollar nuevos productos y procesos, comprender de mejor manera un sistema (un procedimiento analítico, un proceso industrial, etc.) y tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad, etc. Evidentemente que la experimentación debe ser planificada cuidadosamente para que proporcione la información buscada.

Ejemplos de sistemas experimentales son:

- Una reacción química, cuyo rendimiento (Y) puede ser función, entre otros, del tiempo de reacción (X_1), la temperatura de la reacción (X_2) y el tipo de catalizador (X_3) utilizado. Otras variables que pueden influir son, por ejemplo, la pureza de los reactivos, la limpieza del material, la velocidad de agitación, etc.
- Una separación cromatográfica, donde el tiempo de la separación depende del pH y el porcentaje de modificador orgánico de la fase móvil.
- Un alimento, que generalmente se produce por mezcla en distintas proporciones (X) de sus ingredientes, lo cual da lugar a diferentes caracteres organolépticos (Y).

2.1.2 Objetivos del Diseño experimental

Tanto por la importancia de las decisiones que se pueden tomar, como por el coste elevado de la experimentación no es adecuado dejar la elección de los experimentos y la evaluación de sus resultados a la mera intuición del

experimentador. Es más razonable utilizar una metodología matemática y estadística que indique como planificar (diseñar, organizar) la secuencia de experimentos de una forma óptima, de manera que se minimice el coste de la experimentación y la influencia del error experimental sobre la información buscada. Dicha planificación y análisis es el principal objetivo del Diseño Estadístico de Experimentos.

El diseño experimental persigue los siguientes objetivos:

- Obtener un conocimiento inicial sobre un nuevo sistema en estudio. ¿En qué valores de los factores se puede centrar la investigación?
- Determinar la influencia de los factores sobre las respuestas observadas. De entre todos los factores que afectan al proceso, ¿cuales influyen más?, ¿cómo interaccionan entre ellos?
- Optimizar respuestas. ¿Qué valores de los factores proporcionan las respuestas de mayor calidad?
- Determinar la robustez del sistema. ¿Como afectan a la respuesta variaciones no controladas en el valor de los factores?

2.1.3 Etapas de un Diseño Experimental

La aplicación del diseño experimental requiere considerar las siguientes etapas:

1. Comprender el problema y definir claramente el objetivo.
2. Identificar los factores que potencialmente podrían influir en la función objetivo, y los valores que éstos pueden tomar. Entre estos valores se buscará la información necesaria.
3. Establecer el plan de experimentación.
4. Efectuar los experimentos con los valores de las variables decididos en el punto anterior para obtener los valores de las respuestas estudiadas.

5. Responder las preguntas planteadas, sea directamente, sea utilizando un modelo matemático. Si es necesario, regresar a la etapa inicial.

2.1.4 Ventajas del Diseño experimental

1. Elimina el efecto producto de las variables perturbadoras o extrañas, mediante el efecto de la aleatorización.
2. El control y manipulación de las variables predictorias clarifican la dirección y naturaleza de la causa.
3. Flexibilidad, eficiencia, simetría y manipulación estadística.

2.1.5 Diseño Factorial a dos niveles y tres variables

Un diseño experimental común es en el que todas las variables de entrada se ponen a dos niveles cada una. Estos niveles se llaman “Alto” y “Bajo” o “+1” y “-1”, respectivamente. Un diseño con todas las posibles combinaciones de las variables de entrada en los niveles alto/bajo se denomina un plan o diseño experimental factorial completo a dos niveles.

Si tenemos k factores, cada uno colocado a 2 niveles, un diseño experimental factorial completo tiene 2^k experimentos.

Tabla 2.1: Número de experimentos para un diseño factorial completo 2^k

NÚMERO DE EXPERIMENTOS PARA UN DISEÑO FACTORIAL COMPLETO 2^k	
Número de factores	Número de experimentos
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128

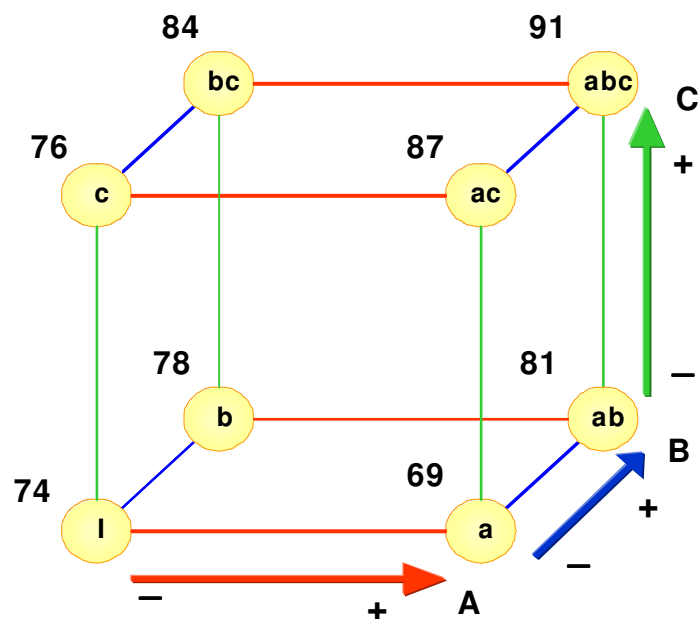
*Fuente: TODESCHINI R., “Introduzione Alla Chemiometria”, (1998).

Como se muestra en la tabla anterior, cuando el número de factores es igual a 5 o mayor, un diseño factorial completo requiere un elevado número de experimentos. En estos casos se recomienda un diseño experimental factorial fraccionario o un diseño de *Plackett-Burman* como opciones.

2.1.6 Descripción

Considerando el diseño experimental factorial completo a dos niveles para tres factores, es decir un plan experimental 2^3 . Esto implica ocho experimentos (sin contar las replicas al punto cero). Gráficamente podemos representar este diseño 2^3 por el cubo mostrado en la Figura 1. La dirección de las flechas muestra la dirección de aumento de los factores. Los números de las esquinas de referencia del cubo de plan muestran el orden normal de los experimentos.

Figura 1: Plan experimental factorial completo a dos niveles y tres factores



*Fuente: TODESCHINI R., "Introduzione Alla Chemiometria", (1998).

Un diseño factorial completo a 2 niveles y 3 factores tiene la siguiente matriz del modelo en la forma tabular:

Tabla 2.2: Matriz del Modelo Experimental Factorial Completo 2³

MATRIZ DEL MODELO EXPERIMENTAL FACTORIAL COMPLETO 2³									
Exp.	I	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y ₁
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y ₂
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y ₃
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y ₄
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y ₅
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y ₆
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y ₇
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y ₈

*Fuente: TODESCHINI R., "Introduzione Alla Chemiometria", (1998).

2.1.7 Escalado de las Variables

Las variables naturales se transforman en variables codificadas, aplicando la siguiente fórmula:

$$X' = 2 \cdot \frac{X - X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} - 1$$

$$-1 \leq X' \leq +1$$

X = valor máximo de cada variable X' = +1

X = Valor mínimo de cada variable X' = -1

Este tipo de escalado de variables nos permite una mayor facilidad de interpretación de los factores, debido a que el coeficiente calculado del modelo está directamente relacionado con la importancia de los factores. La información obtenida no tiene influencia con la unidad de medida con que se expresa las diferentes variables.

2.1.8 Función de Utilidad o Modulaciones

Es un instrumento fundamental en el diseño experimental que nos permite tener una estrategia para las decisiones que se toman en el mismo.

$$u_{ki} = f_k(Y_{ki}) \quad 0 \leq u_{ki} \leq 1 \quad (a)$$

donde k es el criterio seleccionado, f es el tipo de función preestablecida, Y_{ki} es el valor de la i -ésima muestra por el k -ésimo criterio (a)

Los valores de la función de utilidad deben estar comprendidos entre cero y uno. Está definida por la ecuación:

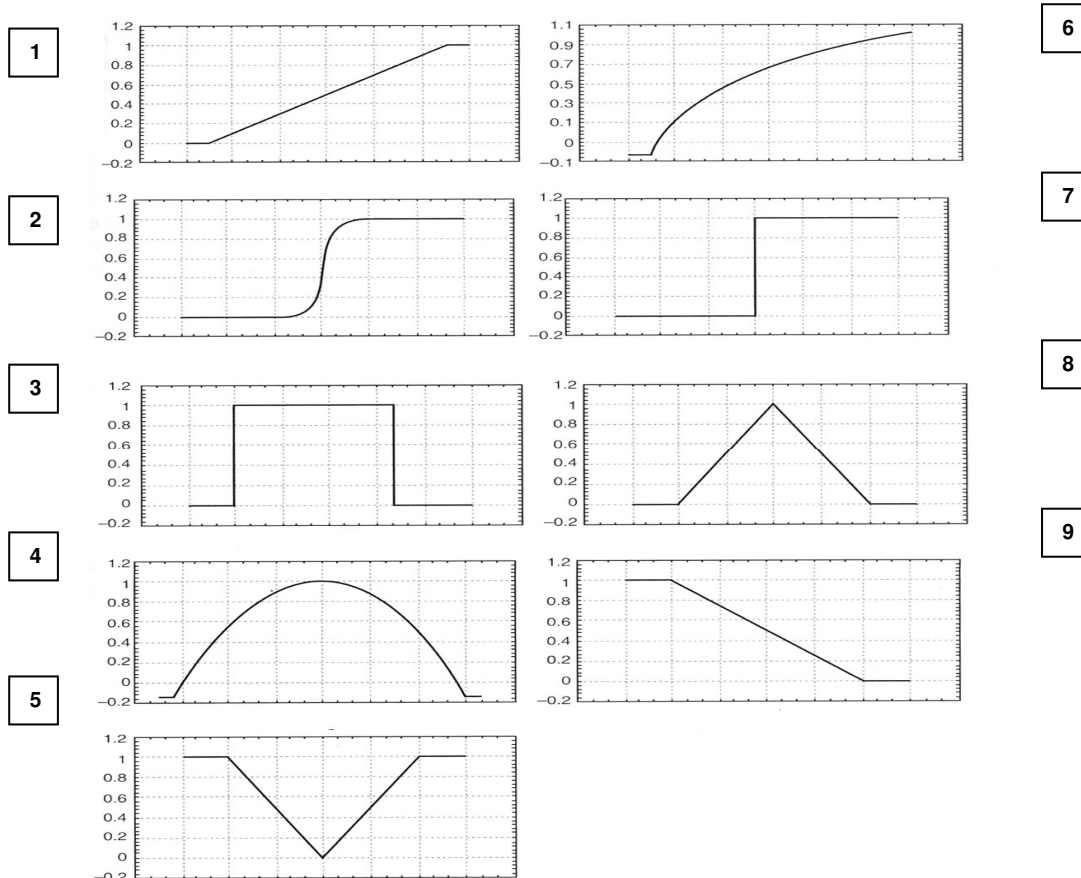
$$U = \sum_k w_k u_{ki} \quad 0 \leq U \leq 1$$

Donde w_k son los pesos que satisfacen la relación $\sum_k w_k = 1$.

Comúnmente las funciones de utilidad son:

1. Función lineal
2. Función signoidal
3. Función box invertido
4. Función parabólica
5. Función triangular inversa
6. Función logarítmica
7. Función a escala
8. Función triangular
9. Función lineal inversa

Figura 2: Funciones de Utilidad



*Fuente: TODESCHINI R., "Introduzione Alla Chemiometria", (1998).

Tabla 2.3: Categorías de los valores de utilidad “U”

CATEGORÍAS DE LOS VALORES DE UTILIDAD “U”	
Valor de “U”	Valoración de la utilidad
1,00 – 0,80	Excelente
0,80 – 0,63	Bueno
0,63 – 0,37	Aceptable – mediocre
0,37 – 0,20	Límite de aceptabilidad
0,20 – 0,00	No aceptable

*Fuente: TODESCHINI R., “Introduzione Alla Chemiometria”, (1998).

2.1.9 Cálculo del Modelo de Respuesta

Para obtener el valor de los coeficientes de las variables y de sus respectivas interacciones:

$$I = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{8} = b_0$$

$$X_1 = \frac{-Y_1 + Y_2 - Y_3 + Y_4 - Y_5 + Y_6 - Y_7 + Y_8}{8} = b_1$$

$$X_1 \cdot X_2 = \frac{Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 + Y_8}{8} = b_{12}$$

$$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 = \frac{-Y_1 + Y_2 + Y_3 - Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 + Y_8}{8} = b_{123}$$

2.1.10 Validación y Determinación de los Efectos significativos

Los efectos de los factores coinciden con el DOBLE de los coeficientes de los mismos en la regresión. La calidad de los parámetros del modelo se calcula a partir de la incertidumbre experimental.

En este caso la calidad de los coeficientes “b_j” del modelo son estimados independientemente, con igual y máxima precisión:

$$U \exp\left(\frac{\alpha}{2}, g.l.\right) = t\left(\frac{\alpha}{2}, g.l.\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

“U exp” es la incertidumbre experimental calculada con una probabilidad de error de primer orden de $\alpha/2$ y grados de libertad (g.l.) igual a “n-1”.

Luego del cálculo de los efectos de los factores el paso siguiente es establecer cuales de estos son significativamente diferentes de CERO. Se lo realiza comparando el valor de los efectos de cada variable contra la incertidumbre experimental.

Variable no significativa en el modelo experimental

$$2b_j < U \exp\left(\frac{\alpha}{2}, g.l.\right)$$

Variable significativa en el modelo experimental

$$2b_j > U \exp\left(\frac{\alpha}{2}, g.l.\right)$$

2.1.11 Optimización: Método de Superficie de Respuesta

El método se basa sobre la mejor aproximación de la superficie de la respuesta del dominio experimental, se puede presentar polinomios lineales o cuadráticos dependiendo del mejor resultado que genere el análisis de la varianza.

$$Y = b_0 + \sum b_j X_j + \dots + \sum b_{jk} X_j X_k + \dots + \sum b_{jj} X_j^2 + \dots$$

2.1.12 Diseño Central Compuesto

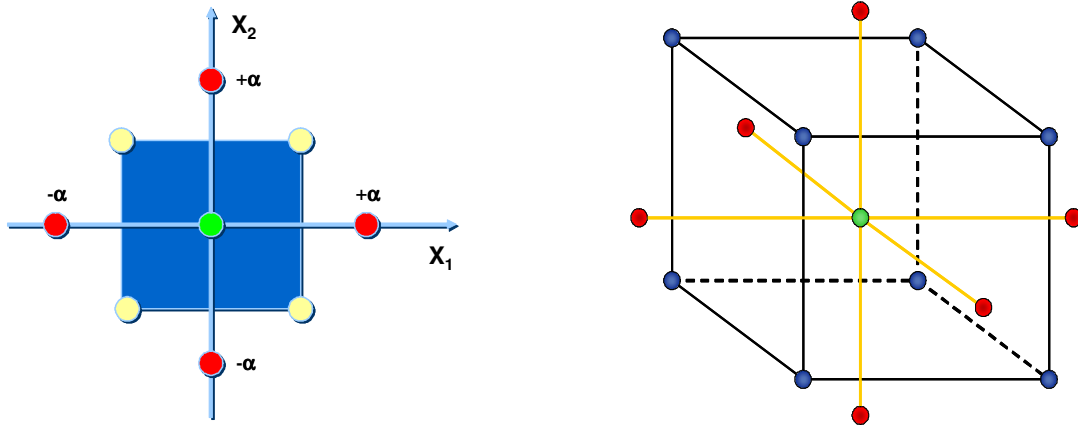
Este diseño experimental está constituido de tres partes:

1. Un diseño factorial completo.
2. Uno o más experimentos al punto central.
3. Experimentos simétricamente distribuidos respecto a los ejes de los factores a una distancia $\pm \alpha$ del centro.

$$\alpha = (n_F)^{1/4}$$

“ n_F ” es el número de experimentos del diseño factorial, en el caso del diseño 2^3 , será 8 experimentos.

Figura 3: Esquema del diseño factorial central compuesto.



*Fuente: TODESCHINI R., "Introduzione Alla Chemiometria", (1998).

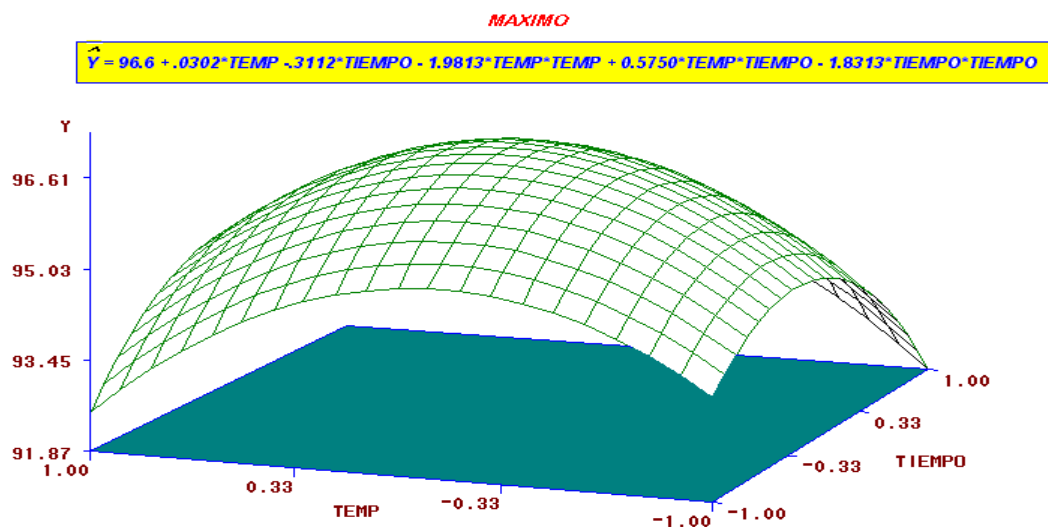
Se calcula nuevamente los coeficientes de las variables y sus respectivas interacciones con la ecuación para obtener el polinomio completo del modelo de superficie de respuesta.

$$Y = b_0 + \sum b_j X_j + \dots + \sum b_{jk} X_j X_k + \dots + \sum b_{jj} X_j^2 + \dots$$

2.1.13 Obtención de la Gráfica

Para elaborar la gráfica de superficie de respuesta se puede utilizar varios programas como herramienta, entre ellos los más relevantes son el *Matlab*, *Statistica*, *Dart*, etc., obteniéndose gráficos similares al siguiente:

Figura 4: Modelo de superficie de respuesta cuadrático.



*Fuente: TODESCHINI R., "Introduzione Alla Chemiometria", (1998).

2.2 Procedimientos de Trabajo

Para empezar con la parte práctica del proyecto; es importante dar una pequeña reseña de los procedimientos aplicados en el mismo, ya que estos constituyen además instructivos de trabajo normales dentro del proceso de aprobación de materiales y/o seguimiento de los mismos para sus uso dentro del proceso de producción:

2.2.1 Procedimiento para el muestreo de Arcillas

Se tomaron muestras de cada material, a 2 metros de profundidad de la superficie del montón, sucesivamente se recogieron las muestras cada 3 ó 4 metros lineales, siguiendo el contorno del montón. Se molieron todos los materiales en el molino de martillos de laboratorio. Homogeneizando el total de la muestra en un plástico.

2.2.2. Procedimiento para la elaboración de Placas

Inicialmente se procedió a la determinación del porcentaje de humedad de cada una de las materias primas, luego éstas se los cargaron en los molinetes (capacidad 3,5kg) de acuerdo a las fórmulas establecidas en el diseño experimental.

La carga de agua corresponde al 60% de la cantidad pesada de materiales, tomando en cuenta la diferencia por la humedad contenida en los mismos, para así poderlo descargar a una densidad aproximada de 165 g/c.c. a 167 g/c.c.

El porcentaje de defloculante para todos los ensayos fue del 0,4% siendo utilizado el metasilicato de sodio.

Luego se procedió a la molienda, hasta obtener el residuo deseado en malla ASTM 100. Se descargaron en unos recipientes adecuados y se los puso a secar durante 1 día.

Se disgregan las muestras secas sobre un molino de martillos de laboratorio y el producto se lo pasa en una malla ASTM 20.

Luego se lo humectó con agua mediante un pulverizador hasta obtener un valor comprendido entre 6% y 7,5% de humedad.

Una vez obtenido la humedad deseada, el siguiente paso es compactarlo en la prensa de laboratorio. Para obtener una repetibilidad de condiciones, las placas fueron trabajadas a un rango de densidad aparente entre 1,90g/c.c. y 1,97 g/c.c.

2.3 Variables a analizar y especificaciones a alcanzar

Se analizaron las siguientes variables que corresponden a los mismos ensayos genéricos que se realizan en planta:

- a. % de Absorción.
- b. % de Contracción.
- c. Resistencia a la Flexión (en quemado)

En cuanto a las especificaciones a alcanzar en (bizcocho de producción) corresponden a los exigidos por la normativa EN 159 para los productos de tecnología de biquema y son los que se basan para la producción en Cerámicas Graiman:

- a. Absorción: Entre 17% y 20%
- b. Contracción: Menor al 4%
- c. Resistencia a la Flexión: >100 Kg./cm²

2.4 Desarrollo del Proyecto

2.4.1 Materiales a utilizar:

- 1. Materias Primas:

Zhumir,

Jadàn,

San Joaquín,

Carbonato de Calcio

Chamota

- 2. Herramientas:

Recipientes metálicos para secar el material

Molino de martillos

Molinos de esferas de alubit

Recipientes metálicos para las barbotinas

Humectador

Prensa

Horno de cocción

2.4.2 Método utilizado para Desarrollo del Proyecto.

Para el presente diseño, trabajamos con cuatro variables y que constituyen los materiales de la formula de biquema: Zhumir, Jadàn, San Joaquín y Carbonato de Calcio.

El dominio experimental de un factor continuo se expresa con los valores mínimo y máximo que puede tomar, y se asigna la notación codificada -1 al nivel inferior y $+1$ al superior ($-$ y $+$ para simplificar).

Tabla 2.4: Fórmula de Producción

FORMULA PRODUCCION	
<i>MATERIAL</i>	<i>%</i>
ZHUMIR	37
JADAN	25
CaCO ₃	12
PLAYA	23
CHAMOTA	3

Tabla 2.5: Valores máximos y mínimos experimentales

	material	MIN	MAX	Medio
X1	ZHUMIR	33	43	38
X2	JADAN	21	31	26
X3	S. JOAQUÍN	19	29	24
X4	CaCO ₃	7	11	9
	CHAMOTA	3		0

La chamota se mantiene invariable en todos los ensayos.

Para conocer el efecto de un factor es suficiente estudiarlo entre dos niveles. Los más adecuados son los extremos de su dominio experimental: Entre el nivel -1 y el $+1$. Y además esta variación se debe realizar para cada posible combinación de los valores de los demás factores. Esto permitirá descubrir si el efecto depende de qué

valor tomen los otros factores. Todas estas combinaciones están contempladas en el diseño factorial completo 2^4 , dando lugar a la **matriz de los experimentos**:

Tabla 2.6: Matriz de los experimentos

	ZHUMIR	JADAN	S. JOAQUIN	CaCO3
Experimentos	X1	X2	X3	X4
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

Plan de Experimentación

Se obtiene al reemplazar los valores – y + por los valores de las variables reales:

Tabla 2.7: Plan de Experimentación

Exp	X1	X2	X3	X4
1	33	21	19	7
2	43	21	19	7
3	33	31	19	7
4	43	31	19	7
5	33	21	29	7
6	43	21	29	7
7	33	31	29	7
8	43	31	29	7
9	33	21	19	11
10	43	21	19	11
11	33	31	19	11
12	43	31	19	11
13	33	21	29	11
14	43	21	29	11
15	33	31	29	11
16	43	31	29	11
R1	38	26	24	9
R2	38	26	24	9
R3	38	26	24	9

Se elaboraron además tres ensayos “replicas” para comprobación en la repetición de condiciones en el proceso de la elaboración de ésta pasta.

Ya en la parte práctica, se procedió a realizar las mezclas de acuerdo a los experimentos detallados en el plan de experimentación, luego basados en el procedimiento para la elaboración de placas (citado en 2.2.2) se elaboraron las mismas para finalmente quemarlas en el horno de producción de biquema (Temperatura en zona de quema: 1100°C).

2.4.3 Resultados iniciales: Análisis de los factores significativos.

Una vez quemadas todas las placas al mismo tiempo, se realizaron los ensayos de absorción, contracción y resistencia a la flexión a todas las placas, y se procedió al análisis de resultados, inicialmente se analizó los coeficientes para interpretar que factores o interacciones son importantes para poder sacar el mejor experimento, así:

COEFICIENTES	b0	b1	b2	b3	b4
	0,449	0,069	0,042	0,042	-0,053

COEFICIENTES	b12	b13	b14	b23	b24	b34	b123	b234	b134	b124	b1234
	0,055	0,020	-0,005	-0,061	0,121	0,110	0,011	0,012	-0,052	-0,025	-0,046

Tabla 2.8: Cálculo *Half Normal Plot* de los coeficientes

Half Normal Plot		
Coeficiente		Probabilidad
b14	0,005	3,125
b123	0,011	9,375
b234	0,012	15,625
b13	0,020	21,875
b124	0,025	28,125
b3	0,042	34,375
b2	0,042	40,625
b1234	0,046	46,875
b134	0,052	53,125
b4	0,053	59,375
b12	0,055	65,625
b23	0,061	71,875
b1	0,069	78,125
b34	0,110	84,375
b24	0,121	90,625

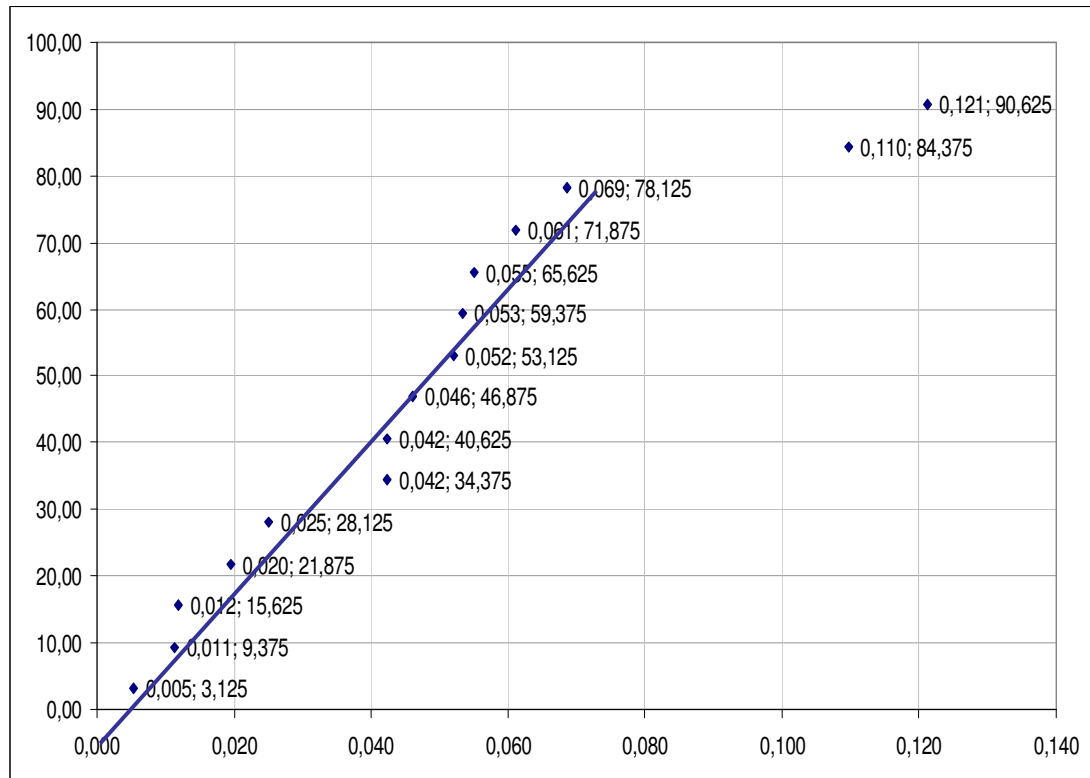


Figura 5: Gráfico *Half Normal Plot* de los coeficientes

En el cuadro de los coeficientes, vemos que los factores importantes corresponden a las interacciones b24 y b34, es decir; son los factores que influirán en los resultados dependiendo del nuevo valor que se les asigne, el coeficiente b1 por tener una valor pequeño, nos indica que no incide en el diseño, en cuanto en el análisis del Half Normal Plot vemos que el nivel de probabilidad es bastante alto: b24=90,625 y b34=84,375; en la grafica de arriba podemos visualizarlo con más claridad: los dos factores indicados se encuentran separados del resto, lo cual nos dice que son los que influirán en el diseño final, no así el resto que se encuentran agrupados y forman una línea.

Colocando los resultados de los experimentos en el programa DART y utilizando la función DESEABILIDAD, nos arrojó los siguientes resultados:

Tabla 2.9: Análisis Función – *Desirability* (mediante programa *DART*)

Experimento	X1	X2	X3	X4	Absorción	Contracción	Flexión	Desirability
1	-1	-1	-1	-1	18,12	0,29	82,39	0,596
2	1	-1	-1	-1	18,22	0,34	81,75	0,555
3	-1	1	-1	-1	17,06	0,41	84,22	0,539
4	1	1	-1	-1	17,18	0,32	75,99	0,589
5	-1	-1	1	-1	19,25	-0,05	57,58	0,579
6	1	-1	1	-1	19,30	-0,09	58,28	0,595
7	-1	1	1	-1	16,72	0,56	77,79	0
8	1	1	1	-1	16,41	0,43	96,18	0,566
9	-1	-1	-1	1	22,89	-0,18	29,32	0
10	1	-1	-1	1	22,86	-0,18	33,18	0,062
11	-1	1	-1	1	20,87	-0,14	35,24	0,296
12	1	1	-1	1	18,97	-0,09	58,89	0,617
13	-1	-1	1	1	20,93	-0,09	45,22	0,398
14	1	-1	1	1	20,36	-0,09	49,48	0,469
15	-1	1	1	1	18,41	0,16	74,99	0,636
16	1	1	1	1	18,04	0,14	79,92	0,688

R1					18,89	0,20	69,37	0,564
R2					17,39	0,29	90,60	0,656
R3					17,59	0,36	88,80	0,583

PATRON	20,26	0,34	66,15
--------	-------	------	-------

El mayor valor de *desirability* (deseabilidad) lo obtuvo el experimento 16, es decir; que es el mejor experimento.

Ya con éste resultado y conociendo los factores importantes que influyen en nuestro modelo, el siguiente paso es el de la **optimización**.

Conociendo los factores importantes y también sabiendo qué experimento es el mejor; procedemos a obtener los nuevos valores para el experimento de optimización:

Tabla 2.10: Cálculo de los nuevos valores para la optimización

VARIABLES	Valor	Coef.	K	Valor	MAX	Medio	Variación	Nuevo valor	Variación 0.1	Valor experimental
X2 JADAN	1	0,042	2	1	31	26	5	0,5	0,1	31,5
X3 S. JOAQUIN	1	0,042	2	1	29	24	5	0,5	0,1	29,5
X4 CaCO3	1	-0,053	2	1	11	9	2	0,2	0,1	10,8

Colocando los coeficientes individuales a cada variable, restando los valores del experimento (Exp.16) con los de las réplicas obtenemos el rango de variación, de ahí calculamos el nuevo valor experimental, tomando en cuenta el signo del coeficiente lo sumamos o lo restamos; con esto hemos sacado los nuevos valores para la optimización.

Se ejecuta los mismos procesos y ensayos al experimento de optimización, es decir; molienda de materiales, realización de la placa, absorción de agua, contracción, etc.

Estos son los resultados obtenidos:

Tabla 2.11: Resultados de experimentos

Experimento	% CONTRACCION	% ABSORCION DE AGUA	RESISTENCIA LA FLEXION Kg./cm ²
16	0,0	18,38	63,93
optimización	0,0	18,20	72,14
PATRON	0,0	19,70	63,54

Nuevamente se realiza el análisis de resultados, mediante la función deseabilidad, con lo que se obtiene lo siguiente:

Tabla 2.12: Análisis de la optimización mediante *Desirability*

Experimento	<i>Desirability</i>
1	0.596
2	0.555
3	0.539
4	0.589
5	0.579
6	0.595
7	0
8	0.566
9	0
10	0.062
11	0.296
12	0.617
13	0.398
14	0.469
15	0.636
16	0.688
Opt.	0.741

El experimento de optimización logró ser mejor en todas sus condiciones con respecto al experimento 16, observándose un aumento del 7,7% en la utilidad respecto al experimento 16.

2.5 Proyección de costos

Ahora, pasemos al análisis de costos comparativo con la pasta actual de producción.

En ella; inicialmente se observan los costos individuales en dólares y por tonelada de cada materia prima (Tabla 2.13), luego; se relaciona dicho costo con cada uno de los materiales que componen cada fórmula, en éste caso se comparan la fórmula de producción, la del Experimento 16 y la del Experimento de Optimización (Tabla 2.14). Para dar una proyección del ahorro, se debe tener el dato de los metros cuadrados de producción al mes y las toneladas de pasta de biquema que estos representan (Tabla 2.15), luego; se multiplican por el valor de cada fórmula y se obtiene el ahorro proyectado al mes y anual (Tabla 2.16), así:

Costos individuales de las materias primas:

Tabla 2.13: Costos por tonelada de las materias primas

COSTOS \$/ton.	Playa	Jadàn	Zhumir	san Joaquín	CaCO ₃	Chamota
	13,35	9,38	9,79	9,07	23,9	10

Costo de cada fórmula:

Tabla 2.14: Costo de cada fórmula (dólares por tonelada)

BIQUEMA			
PGB02 = pasta gres biquema		Escenario	
	PGB02	Exp16	OPT1
	%	%	%
ZHUMIR	37	36	36
JADAN	25	26	26
PLAYA	23	----	-----
CaCO ₃	12	9	9
CHAMOTA	3	3	3
S.JOAQUIN	0	25	25
Costo \$/ton.	12,21	10,83	10,79

Metros promedio de producción al mes en la tecnología de biquema y toneladas promedio de consumo al mes:

Tabla 2.15: Producción al mes Pasta Gres de Biquema

Producción al mes pasta gres biquema	
111000	m²/mes
1908	ton./mes

Siendo la pasta nueva P16 un 11,3% y la OP1 un 11,6% más barata que la pasta normal de producción, lo que nos implicaría un ahorro anual de:

Tabla 2.16: Proyección al mes y anual del ahorro

		Ahorro	
		\$/mes	\$/año
PGB02	23292	0	0
Escen. 1 Exp16	20662	2630	31555,4
Escen. 2 Opt1	20587	2705	32464,5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los diseños factoriales completos comprenden los experimentos óptimos para estudiar qué variables influyen en el sistema. En nuestro caso, con 17 experimentos (incluyendo la optimización) hemos determinado los efectos principales de los factores, y sus interacciones. Estos efectos al principio pueden no ser obvios para el experimentador y no se habrían descubierto variando un-factor-cada-vez.

Los mayores beneficios de los diseños factoriales completos se obtienen cuando se deben estudiar pocas variables. El motivo es que el número de experimentos crece exponencialmente con el número de factores. Por ejemplo, para 8 factores, el diseño 2^8 comprende 256 experimentos. Éstos permiten estimar 256 efectos, muchos de los cuales son interacciones de orden elevado y no serán significativos. Para estudiar un número elevado de factores, es más eficaz utilizar sólo una fracción de un diseño factorial completo.

Por esto, hemos podido reducir a un total de 17 experimentaciones, cumpliendo con los objetivos planteados inicialmente:

- Se reemplazó el material Playa por el San Joaquín sin llegar a alterar las condiciones técnicas de la pasta, es mas se llegó a obtener una mejora al reducir la **absorción de agua** en un 8%, en lo referente a la **resistencia a la flexión** tuvo un aumento del 14% (más resistente) y la **contracción** se mantiene igual (sin contracción), además de **reducir el porcentaje de Carbonato de Calcio** en la fórmula: del 12% inicial se redujo al 9%.
- En cuanto al costo, con la fórmula de optimización vemos en el estudio de los mismos que la fórmula de Optimización en sí tiene una reducción del 11,6% frente a la fórmula de producción, obteniendo un ahorro anual de 32500 dólares.

BIBLIOGRAFÍA

A continuación se presenta una relación, no tan exhaustiva, de textos que pueden ser considerados de referencia para una mejor comprensión o profundización en los temas tratados en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. AMORÒS Alberto, BELTRÀN Porcar, BLASCO Fuentes, NAVARRO Enrique, ESCARDINO Benlloch, NEGRE Medall., “Defectos de Fabricación de Pavimentos y Revestimientos Cerámicos”. España, T. G. Ripoll, S.A. 1991.
2. AENOR; Asociación Española de Normalización y Certificación., “Baldosas Cerámicas, adhesivos para baldosas y materiales de rejuntado”. España, Ediciones AENOR, 2004.
3. BOX, G. E. Hunter, W. G. and Hunter, J. S., “*Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis and model building*”. USA, John Wiley and Sons, 1978.
4. CARLSON, Richard. “*Design and optimization in organic synthesis*”. Netherlands, Elsevier Science, 1992.
5. FERRÈ, Joan. Rius, X. “Técnicas de Laboratorio”, España, Editorial Publica S. A., 2002.
6. GUTIERREZ, H. y VARA, R. “Análisis y diseño de experimentos”. México, Editorial McGraw – Hill, 2008.
7. MASSART, D. VANDEGINSTE, B. BUYDENS, L. DE JONG, S. LEWI, P. and SMEYERS, J. “*Handbook of chemometrics and qualimetrics: Part A*”. Netherlands, Elsevier Science, 1997.
8. NORTON, H. “Cerámica Fina”. Barcelona - España, Ediciones Omega, Tercera edición, 1988.
9. SACMI; Asociación Española de Técnicos Cerámicos., “Tecnología Cerámica Aplicada”. Castellón – España, Editorial *Faenza Editrice Ibérica*, Tomo I, 2004.

10. TODESCHINI Roberto., *“Introduzione Alla Chemiometria”, L'Italia, Casa Editrice: Edises Edizione I, 1998.*

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS:

1. ASCER. Asociación Española de Fabricantes de Azulejos, Pavimentos y Baldosas Cerámicas. “Guía de la baldosa Cerámica”.
<http://www.spaintiles.info/documentos/gbc.pdf> [consulta 21 de abril de 2009].
2. RAMPERTI, Alberto; “Introducción al Diseño de Experimentos”.
<http://www.rubberservice.com.ar/literatura/confdoe.pdf> [consulta 26 de abril de 2009].