



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DISEÑO, EJECUCIÓN Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS  
UTILIZANDO EL MÉTODO TAGUCHI**

*TRABAJO ESCRITO VÍA CURSOS DE EDUCACIÓN CONTINUA*

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**ROBERTO YAIR LÓPEZ ROMERO**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.**

**2025**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** José Antonio Marcel Edel Chico Morales

**VOCAL:** María Rosa Isela Gascón Guerrero

**SECRETARIO:** Rocío Gutiérrez Dávila

**1er. SUPLENTE:** Karla Mercedes Díaz Gutiérrez

**2° SUPLENTE:** Elsa Flores Marroquín

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**Facultad de Química, Ciudad Universitaria, CDMX.**

**ASESOR DEL TEMA:**



---

José Antonio Marcel Edel Chico Morales

**SUSTENTANTE:**

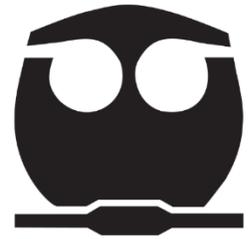


---

Roberto Yajir López Romero



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO



### **PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL (Titulación o Graduación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado **DISEÑO, EJECUCIÓN Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS UTILIZANDO EL MÉTODO TAGUCHI**

que presenté para obtener el título/grado de *INGENIERO QUÍMICO*, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por la Facultad de Química, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación/graduación.

**Atentamente**

*Roberto Yair López Romero*  
N° de cuenta 316116460

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por brindarme todas las herramientas necesarias para mi desarrollo académico, cultural y deportivo. Así como las oportunidades y reconocimientos otorgados.

A la **Facultad de Química**, por permitirme estudiar la carrera de Ingeniería Química en sus instalaciones, permitiéndome trabajar con sus equipos y materiales.

A la Dra. **María de Lourdes Chávez García** por todo el apoyo y tiempo dedicado durante mi estancia académica y servicio social. En donde realice los experimentos e investigación para el desarrollo de este trabajo.

Al M en C. **José Antonio Marcel Edel Chico Morales**, por todo el tiempo dedicado en la asesoría y correcciones de este trabajo.

A mis compañeros del **Laboratorio de cerámica de la Facultad de Química** y del **diplomado en Sistemas de Gestión de la Calidad Empresarial ISO 9000** por los conocimientos y momentos compartidos durante la realización de este proyecto.

## Contenido

1. Introducción .....	7
1.1. Planteamiento .....	7
1.2. Justificación .....	8
1.3. Formulación de objetivos .....	9
1.3.1. Objetivo general .....	9
1.3.2. Objetivo específico .....	9
2. Marco Teórico .....	10
2.1. El cemento Portland (cP) .....	10
2.2. Geopolímeros .....	11
2.2.1. Geopolímeros con base en escoria de alto horno .....	11
2.2.2. Geopolímeros con base en perlita .....	11
2.2.3. Geopolímeros con base en metacaolín .....	12
2.2.4. Geopolímeros combinados .....	12
2.3. Proceso a mejorar .....	12
2.3.1. Teoría del proceso .....	12
2.3.2. Factores que afectan la calidad de los geopolímeros .....	14
2.4. Técnicas estadísticas .....	15
3. Metodología a seguir en la tesis .....	19
4. Aplicación del diseño vía Taguchi .....	20
4.1. Identificar las características de calidad .....	20
4.2. Seleccionar los factores y sus niveles .....	20
4.3. Planificar los experimentos (vía Taguchi) .....	21
4.3.1. GPs de perlita (PP) .....	23
4.3.2. GPs combinados de EAH:PP .....	25
4.3.3. GPs de metacaolín (MK) .....	26
4.4. Preparar las materias primas .....	26
4.5. Preparar el material de laboratorio y equipos .....	27

4.6. Realizar experimentos.....	27
4.6.1. Primera fase: pruebas de consolidación y ruptura manual.....	30
4.6.2. Segunda fase: pruebas de resistencia a la compresión.....	40
4.6.3. Resultados.....	45
5. Conclusiones y recomendaciones.....	46
5.1. Conclusiones con respecto a los objetivos.....	46
5.2. Conclusiones con respecto a las herramientas utilizadas.....	47
5.3. Conclusiones generales.....	47
5.4. Recomendaciones.....	48
6. Glosario.....	49
7. Bibliografía.....	51

# 1. Introducción

## 1.1. Planteamiento

Un sistema de gestión de la calidad (SGC) es un conjunto estructurado de políticas, procesos y procedimientos que una organización implementa para garantizar que sus productos o servicios cumplan con los requisitos establecidos y, lo más importante, satisfagan las necesidades y expectativas de sus clientes. Hay diversas técnicas que resultan útiles en la implementación, mantenimiento y mejora de un SGC, entre ellas las técnicas estadísticas.

En este trabajo se desarrolla y analiza una técnica estadística: el diseño de experimentos (DDE) utilizando el método Taguchi para su diseño y análisis.

El DDE se aplica a la síntesis de *geopolímeros* (GPs), materiales cementantes con base en minerales y residuos de aluminosilicatos con propiedades conglomerantes.

## 1.2. Justificación

El aumento de la población genera la necesidad de proyectos de urbanización y la necesidad de infraestructura para la vivienda y el desarrollo. El cemento Portland (*cP*) es el material más utilizado en la industria de la construcción.

El sector industrial de producción de *cemento* ocupa el tercer lugar en uso de energía industrial y emite cantidades altas de CO<sub>2</sub>, un gas de efecto invernadero, lo que hace que su impacto ambiental sea considerable. Disminuir su consumo reemplazando algunas de sus aplicaciones con otros materiales de impacto ambiental menor en su fabricación hará una diferencia para mitigar el daño que genera esta industria.

Los *geopolímeros* (GPs) son candidatos potenciales para reemplazar al *cP*, por sus características conglomerantes y por sus propiedades de resistencia a la compresión (RC) similares a las del *cP*.

En este trabajo se utiliza el diseño de experimentos en el proceso de síntesis de GPs, aplicado a datos variables, donde medimos las condiciones de síntesis y la resistencia a la compresión resultado de dichas condiciones.

## 1.3. Formulación de objetivos

### 1.3.1. Objetivo general.

Aplicar el método Taguchi en el DDE para la mejora de la calidad de los GPs

### 1.3.2. Objetivo específico.

Sintetizar GPs con una RC que cumpla con los requisitos de las normas ASTM C331 (de al menos 0.34 MPa para *concreto* ligero y de 17 MPa para *concreto* estructural) y ASTM C91 (de al menos 3.4 MPa para *mortero* tipo N, de 9.0 para *mortero* tipo S y de 12.4 para *mortero* tipo M).

## 2. Marco Teórico

### 2.1. El cemento Portland (cP)

Este *cemento* es utilizado en la industria de la construcción como un conglomerante hidráulico, debido a que al entrar en contacto con agua forma una pasta que fragua, endurece y conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua; por estas características el *cP* es la sustancia manufacturada más consumida en el planeta, aproximadamente 4,150 millones de toneladas anuales.

La producción del *cP* se da en tres fases, la extracción de materias primas en canteras; la fabricación del *clínker* mediante la calcinación de los minerales en un horno a temperaturas mayores a los 1400°C y la preparación del *cemento* adicionando yeso al *clínker*. El proceso de fabricación tiene impacto ambiental, por la extracción de recursos no renovables de las canteras, la generación de CO<sub>2</sub> durante la calcinación con un aproximado de 900 g de CO<sub>2</sub> por cada 1000 g de *clínker* (ver figura 1); además, el consumo energético necesario para alcanzar las temperaturas de calcinación.

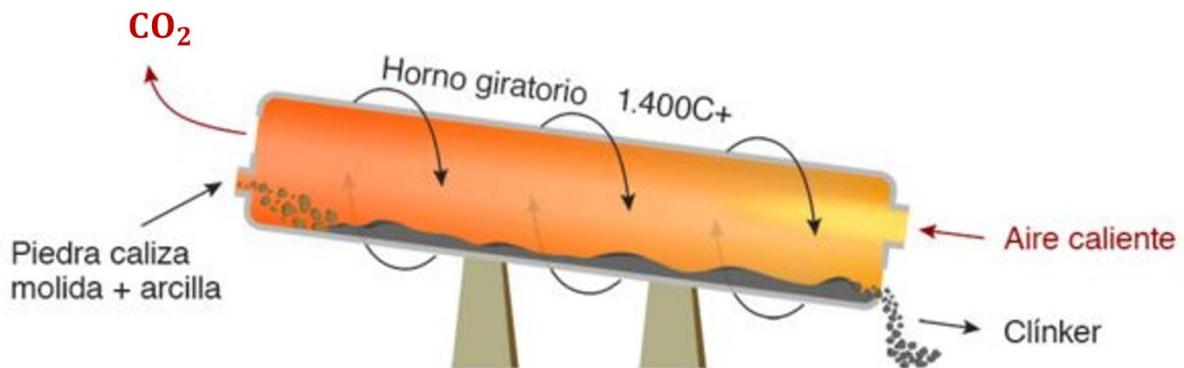


Figura 1. Proceso de obtención del clínker

En México, la producción anual de *cemento* se estima en 41 millones de toneladas (CANACEM 2018). La producción de *cemento* en México liberó aproximadamente 20 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mientras que el uso de energía agregó 9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> más (INECC & SEMARNAT 2015). El uso de otros materiales conglomerantes hidráulicos con procesos de fabricación de impacto ambiental menor ayudaría a reducir el consumo actual del *cP*, para mitigar las 2.2

gigatoneladas (Gt) de CO<sub>2</sub> emitidas anualmente, así como los 10.7 exajoules (EJ) de energía consumida cada año para su producción, según la agencia internacional de energía.

## 2.2. Geopolímeros

*Geopolímero* (GP) es el término acuñado por Joseph Davidovits en la década de los años 1980 para designar a materiales cerámicos sintetizados por reacción de aluminosilicatos con sustancias alcalinas concentradas, para generar una red polimérica.

Los *geopolímeros* (GPs) son candidatos potenciales para reemplazar al *cP*, por sus características conglomerantes y por su resistencia a la compresión (RC). Las ventajas de los GPs son tiempos y temperaturas de *fraguado* menores, coste energético inferior y emisiones de CO<sub>2</sub> reducidas o inexistentes.

### 2.2.1. Geopolímeros con base en escoria de alto horno

La producción de *geopolímeros* a base de escoria de alto horno implica la utilización de escoria vítrea, un subproducto industrial compuesto principalmente por óxidos ácidos (SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxidos básicos (MgO y CaO). Estos óxidos provienen de la *ganga* del mineral de hierro y de los fundentes empleados en el proceso de producción del hierro. Para obtener la escoria vítrea, es necesario enfriarla rápidamente una vez que sale del alto horno, con el fin de evitar la cristalización y preservar su estructura amorfa.

### 2.2.2. Geopolímeros con base en perlita

Los *geopolímeros* de perlita son obtenidos a través de la reacción de la perlita (material aluminosilicato) con un activador alcalino. La perlita es un vidrio volcánico que produce GPs con propiedades aislantes, térmicas y acústicas. El *GP* de perlita es de densidad baja y tiene resistencia a la compresión menor que otros GPs. Resulta útil para la elaboración de concretos ligeros.

### **2.2.3. Geopolímeros con base en metacaolín**

Los *geopolímeros* de *metacaolín* son materiales compuestos producidos a partir de un material de aluminosilicatos (*metacaolín*), el cual se obtiene al calcinar *caolín* a temperaturas considerablemente más bajas que las empleadas en la fabricación de *clínker* para la elaboración de cemento Portland; 700°C para el *metacaolín* y 1400°C para el *clínker*. Este *metacaolín* reacciona con una solución alcalina, formando una estructura tridimensional similar al *cemento*.

La estructura del *metacaolín* se compone de láminas de silicatos y aluminatos dispuestas de manera irregular. La capacidad del *metacaolín* para reaccionar con álcalis y formar geopolímeros está directamente relacionada con las características del *caolín* original, tales como el tamaño de sus partículas, su grado de pureza y su cristalinidad.

### **2.2.4. Geopolímeros combinados**

La elaboración de *geopolímeros* combinados consiste en la unión de materiales precursores con propiedades distintas, lo que permite obtener materiales compuestos con características únicas.

En este trabajo se sintetizan *geopolímeros* combinados con base en escoria de alto horno y perlita. Al proceso de síntesis de GPs se le llama geopolimerización.

## **2.3. Proceso a mejorar**

### **2.3.1. Teoría del proceso**

La geopolimerización es el proceso químico por el cual transformamos materiales inorgánicos de aluminosilicatos como arcillas, escorias o cenizas volantes, en materiales con propiedades similares a las del *cemento* denominados *geopolímeros*.

La reacción de geopolimerización se produce cuando la solución alcalina activa los enlaces químicos presentes en los aluminosilicatos, formando una estructura tridimensional similar a la del vidrio. Esta estructura le confiere al *geopolímero* una resistencia alta a la compresión, al fuego y a los agentes químicos.

Etapas simplificadas del mecanismo:

1. Disolución de los Aluminosilicatos

La solución alcalina rompe los enlaces Si-O-Al de los aluminosilicatos, liberando especies monómeras y oligoméricas de silicio y aluminio.

2. Formación de especies intermedias

Los aniones de silicio y aluminio reaccionan entre sí, formando especies intermedias con enlaces Si-O-Al. Estas especies intermedias pueden ser de diferentes tamaños y formas, dependiendo de las condiciones de reacción.

3. Condensación y formación de gel

Las especies intermedias se condensan entre sí, formando una red tridimensional de enlaces Si-O-Al. Esta red tridimensional es la estructura básica del *geopolímero*.

4. Solidificación y endurecimiento

La estructura del *geopolímero* continúa madurando con el tiempo, a medida que se forman más enlaces y la red se vuelve más densa.

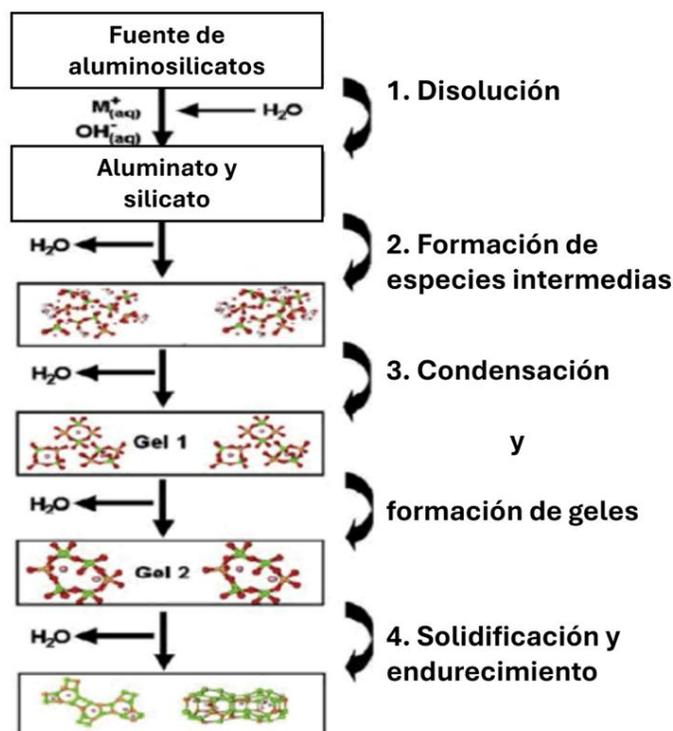


Figura 2. Mecanismo simplificado de la geopolimerización

### 2.3.2. Factores que afectan la calidad de los geopolímeros

Relación másica activador líquido/sólidos (L/S): la relación L/S requerida para la correcta activación alcalina dependen del sólido usado como precursor fuente de aluminosilicatos. Los estudios realizados por Zuhua y col. indican que para GPs con base en perlita valores de relación másica L/S comprendidos entre 1 y 1.2 promueven una cinética de reacción acelerada y una mayor disolución de precursores.

La relación L/S es el principal factor que afecta la trabajabilidad de las pastas geopoliméricas. Valores altos mejoran la fluidez de las pastas, pero disminuyen su cohesión, afectando de manera negativa su resistencia. Valores bajos disminuyen la trabajabilidad de las pastas, afectando de manera negativa la cinética de reacción promoviendo una menor disolución de los precursores.

Relación molar Si/Al: la relación entre el silicio y el aluminio (Si/Al) resulta ser un factor determinante en la resistencia a la compresión de los *geopolímeros*. Los GPs están conformados por cadenas de tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  y  $[\text{AlO}_4]^{5-}$ . Los eslabones de las cadenas, unidos por oxígenos compartidos se denominan *sialatos*. Existen tres tipos de polisialatos, dependiendo de su relación Si/Al, figura 3. Existe un óptimo en esta relación, donde la resistencia alcanza su valor máximo.

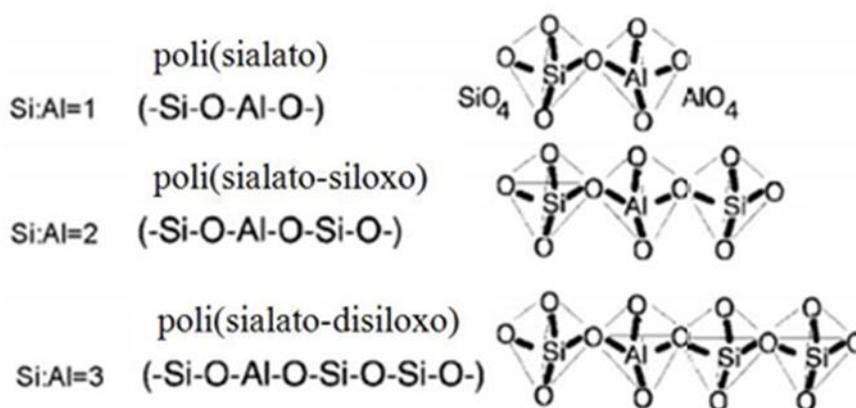


Figura 3. Composición de los GPs de acuerdo con la relación Si/Al

Concentración alcalina: esta concentración es un factor que influye de manera significativa en el proceso de geopolimerización. La solución alcalina, típicamente

compuesta por hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), actúa como activador, desencadenando la reacción química que transforma los precursores en un material cerámico similar al *cemento*. Una mayor concentración alcalina acelera la velocidad de la reacción de geopolimerización.

Tiempo de reacción: Wan y col. reportaron una relación directa entre el tiempo de reacción y la concentración de especies aluminosilicatos en solución (esenciales para la formación de *geopolímeros*) durante la síntesis de GPs con relaciones Si/Al comprendidas entre 1 y 3. Es decir, a medida que aumentaba el tiempo de reacción, también lo hacía la cantidad de compuestos de aluminio y silicio presentes en la solución.

Tiempo de precurado y curado: el *curado* es un proceso de maduración que se inicia inmediatamente después del vaciado de la pasta en el molde donde endurecerá. El tiempo de *curado* determina la resistencia y durabilidad de las estructuras. Este proceso consiste en mantener el material húmedo y a una temperatura adecuada durante un periodo determinado, permitiendo que la reacción química de hidratación se complete y se desarrolle la resistencia máxima.

Temperatura de precurado y curado: Mustafá y col. concluyeron que temperaturas de *curado* superiores a 60 °C provocan una evaporación acelerada del agua dispersa en la matriz de los GPs con base en *metacaolín*, lo que inhibe la difusión de las especies necesarias para la formación de las fases responsables de la resistencia a la compresión. La evaporación acelerada por las altas temperaturas también promueve la aparición de microgrietas observables por microscopía electrónica de barrido.

## 2.4. Técnicas estadísticas

La variabilidad presente en un proceso hace que las técnicas estadísticas sean esenciales para identificar patrones, tendencias y oportunidades de mejora. Estas

técnicas nos permiten analizar los datos de manera objetiva y tomar decisiones basadas en evidencia.

El DDE se utiliza para la planificación y estructuración de experimentos. Son investigaciones que dependen de una evaluación estadística de los resultados para obtener respuestas y conclusiones fidedignas. La preparación y manera en que se llevan a cabo los experimentos constituye el diseño de experimentos que se rige por su objetivo y las condiciones bajo las cuales se realiza.

El DDE sirve para evaluar alguna característica de un producto, proceso o sistema con el fin de validarla. Se investigan factores que pueden afectar la característica hasta determinar el efecto de cada factor. El objetivo del DDE es la optimización del valor de una característica.

El beneficio de un DDE es la mejora en la eficiencia de recursos al investigar los efectos de múltiples factores en comparación con una investigación de cada factor de manera individual. Además, tiene la posibilidad de identificar las interacciones entre los diversos factores, lo que nos ayudará a tener un mejor entendimiento del proceso.

Sin embargo, el DDE no es perfecto y cuenta con ciertas limitaciones. Las variaciones y factores sobre los que no se tiene control (ruidos), pueden confundir los resultados de las investigaciones; además, el efecto que tienen los factores desconocidos y que no tomamos en cuenta en nuestros resultados nos llevaría a conclusiones incorrectas.

Los resultados del experimento sólo son válidos para los factores y su rango de valores.

El diseño de experimentos se utiliza para identificar los factores influyentes, reducir la variabilidad, controlar o mejorar el valor de alguna característica de interés, tal como el rendimiento del proceso, la resistencia o durabilidad de un producto.

El enfoque principal del método Taguchi es lograr que los productos sean menos sensibles a las variaciones en las condiciones de fabricación o uso. En otras palabras, busca que un producto mantenga su calidad a pesar de las variaciones inevitables en los materiales, el entorno o el proceso de producción. Entendiéndose calidad como "el

grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos" (ISO 9000:2015).

El método Taguchi, desarrollado por el ingeniero japonés Genichi Taguchi, propone optimizar la calidad desde el diseño inicial.

El objetivo principal es minimizar las pérdidas que un producto causa a la sociedad a lo largo de su ciclo de vida. Estas pérdidas pueden ser económicas, sociales o ambientales. Taguchi considera que la calidad no solo se mide en términos de cumplir con especificaciones, sino también en términos de reducir la variabilidad y hacer que el producto sea robusto frente a las condiciones de uso.

Para el diseño de experimentos usa un diseño ortogonal que es una estrategia estadística que permite estudiar múltiples factores a la vez, minimizando el número de experimentos necesarios e identificando la combinación de factores que produce los mejores resultados.

Etapas del método Taguchi:

1. **Identificación de la característica de calidad:** se define la característica que se desea mejorar.
2. **Selección de los factores y sus niveles:** se identifican los factores que pueden influir en la característica de calidad.
3. **Diseño de los experimentos:** se utiliza un diseño ortogonal para planificar los experimentos.
4. **Realización de los experimentos:** se llevan a cabo los experimentos según el diseño ortogonal.
5. **Análisis de datos:** se analizan los resultados para determinar los factores más influyentes y sus *niveles* óptimos.
6. **Validación:** se verifican los resultados obtenidos en condiciones reales.

El método Taguchi tiene tres modos de optimización de la respuesta (característica) a mejorar:

1. *La más pequeña es mejor.* se aplica cuando se requiere minimizar la respuesta
2. *Nominal es mejor.* se aplica cuando se requiere alcanzar un valor en específico.
3. *La más grande es mejor.* se aplica cuando se requiere maximizar la respuesta.

En este trabajo se buscó maximizar una respuesta (la resistencia a la compresión de los GPs).

Se usó Minitab 18 que nos da las opciones de (a) analizar el diseño de Taguchi, (b) evaluar gráficamente el efecto de los factores, (c) determinar el factor más influyente en la respuesta y (d) obtener sus *niveles* óptimos.

### 3. Metodología a seguir en la tesis

La metodología a desarrollar es la siguiente:

1. **Identificar la característica de calidad.**Cuál es la cualidad que se desea mejorar y cómo se mide.
2. **Seleccionar los factores y sus niveles.** Qué factores afectan la característica que se desea mejorar y qué valores tendrán los *niveles* de cada factor.
3. **Planificar los experimentos (vía diseño de Taguchi).** Utilizar Minitab para que genere el diseño con los factores y sus *niveles* elegidos previamente.
4. **Preparar las materias primas.** Caracterizar las fuentes de aluminosilicatos y preparar las soluciones alcalinas utilizadas en los experimentos.
5. **Preparar el material de laboratorio y equipos.**
6. **Realizar los experimentos.** Seguir el diseño de Taguchi. Realizar las mediciones de la característica.
7. **Analizar los datos.** Utilizar Minitab para introducir los resultados de los experimentos y generar graficas que nos muestren los efectos de los *niveles* de cada factor en la calidad de los GPs sintetizados.
8. **Validar los resultados.** Realizar las pruebas de resistencia a la compresión para determinar si los GPs cumplen los requisitos de RC mínima necesaria para ser utilizados en las aplicaciones del *cP*.

## 4. Aplicación del diseño vía Taguchi

### 4.1. Identificar las características de calidad

El diseño se desarrolla en 2 fases:

- En la 1ª se efectúa el diseño para determinar *geopolímeros* aptos para la prueba de resistencia. Se efectúan pruebas de consolidación (chequeo de grietas, resistencia al tacto y ruptura manual).
- En la 2ª fase se aplican las pruebas de la resistencia a la compresión.

Factores respuesta en el diseño:

- Estado del material evaluando grietas que pudiera tener.
- Resistencia al tacto.
- Resistencia a la ruptura manual.

Factor respuesta en la 2ª fase:

- Resistencia a la compresión.

### 4.2. Seleccionar los factores y sus niveles

Los *factores control* identificados que afectan a la RC de los *geopolímeros* son:

- a. La relación molar Si/Al (4.9, 3.2 y 2.1).
- b. La relación L/S (GPs PP: 1.6, 1.5, y 1.4; GPs EAH:PP: 0.7, 0.6 y 0.5).
- c. La temperatura de *curado* (GPs PP: 60, 80 y 100 °C).
- d. La humedad relativa de *curado* (GPs EAH:PP: 20%, 40% y 60%).
- e. La disolución alcalina utilizada como activador (GPs MK: 0%, 30% y 50% de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).
- f. La concentración molar de la disolución alcalina NaOH (GPs PP: 2, 4, y 6 M; GPs MK: 10, 12 y 14 M).
- g. El tiempo de reacción. (GPs PP: 5, 7 y 10 minutos).
- h. El tipo de molde donde se cura la pasta geopolimérica (GPs EAH:PP, porcentaje de sellado del molde: 100%, 50% y 0%).

### 4.3. Planificar los experimentos (vía Taguchi)

Se usó el software Minitab para crear los diseños de Taguchi siguiendo la ruta: Estadísticas > DOE > Taguchi > Crear diseño de Taguchi... Figura 4.

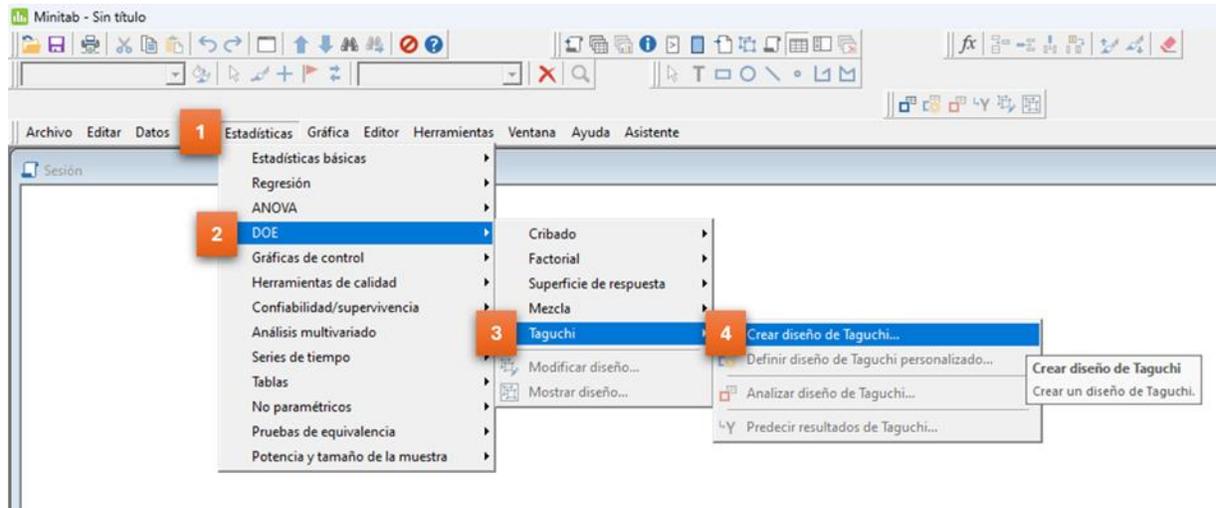


Figura 4. Ruta para crear diseños de Taguchi en Minitab 18

Al darle clic en “Crear diseño de Taguchi...” se abre una ventana donde seleccionamos las características del diseño de Taguchi que queramos utilizar. Figura 5.

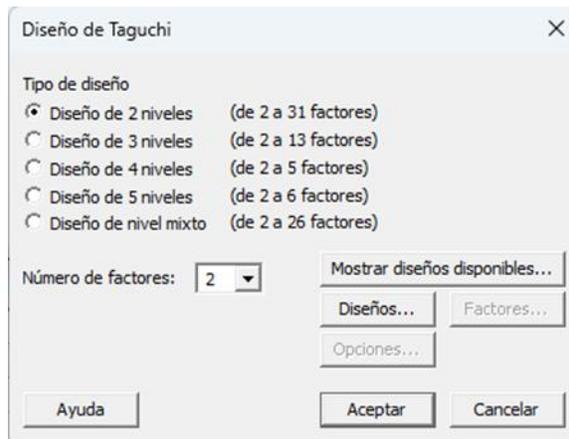


Figura 5. Ventana para crear el diseño de Taguchi

Al dar clic en “Mostrar diseños disponibles...” se abre una ventana con todos los diseños que se pueden generar dependiendo del número de *niveles* y factores que se quieran variar. Figura 6.

Diseños de Taguchi disponibles (con número de factores)

Diseños	Un nivel diseños			
	2 niveles	3 niveles	4 niveles	5 niveles
L4	2-3			
L8	2-7			
L9		2-4		
L12	2-11			
L16	2-15			
L16			2-5	
L25				2-6
L27		2-13		
L32	2-31			

◀ ▶ \ Un nivel / 2 a 3 niveles mixtos / 2 a 4 niveles mixtos / 2 a 8 niv

Figura 6. DDE Taguchi disponibles en Minitab 18

Los diseños disponibles son L4, L8, L9, L12, L16, L25, L27 y L32, donde el número posterior a la letra L significa el número de líneas (filas o corridas) que tendrá el *arreglo ortogonal* generado. Cada fila corresponde a un experimento, por ende, un diseño de Taguchi L4 corresponde a un DDE donde se realizarán 4 experimentos.

Los diseños disponibles para trabajar 3 *niveles* son L9 y L27. El primero puede trabajar de 2 a 4 factores y el segundo de 2 a 13.

Para probar los factores identificados que afectan la RC (8 factores) con 3 *niveles* cada uno se requeriría realizar un DDE Taguchi L27, lo que implicaría realizar 27 experimentos en un solo día.

Por cuestiones de practicidad se optó por probar estos factores en tres diferentes DDE Taguchi, uno para cada material precursor, PP, EAH y MK. Los *factores control* que se dejaron fijos y los que se variaron para cada DDE Taguchi se observan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Factores control de cada DDE para GPs de PP, EAH:PP y MK.

Material precursor	Sustancia activadora	Factores control		DDE Taguchi
		Variables	Fijos	
PP	NaOH	c. Temperatura de curado b. Relación L/S f. Concentración NaOH g. Tiempo de reacción	a. Relación Si/Al d. Humedad de curado e. % de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> en la sustancia activadora h. Sellado del molde	L9(3 <sup>4</sup> )
EAH:PP	NaOH	d. Humedad de curado b. Relación L/S h. Sellado del molde	a. Relación Si/Al c. Temperatura de curado e. % de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> en la sustancia activadora	L9(3 <sup>3</sup> )

			f. Concentración NaOH g. Tiempo de reacción	
MK	NaOH y Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	f. Concentración NaOH e. % de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> en la sustancia activadora	b. Relación L/S c. Temperatura de curado d. Humedad de curado g. Tiempo de reacción h. Sellado del molde	L9(3 <sup>2</sup> )

\*En los GPs de MK el factor “a” (relación Si/Al) depende del porcentaje de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> presente en la sustancia activadora.

La nomenclatura para nombrar un diseño de Taguchi es LZ( X<sup>Y</sup>), donde:

Z: es el número de experimentos a realizar.

X: es el número de *niveles* que tienen los factores.

Y: es el número de *factores variables*.

Los DDE Taguchi se realizaron para la primera fase evaluando pruebas de consolidación, ruptura al tacto y ruptura manual.

La primera fase se realiza debido a que se espera que no todos los experimentos de geopolimerización generen GPs con las características mínimas para someterse a pruebas de resistencia a la compresión.

#### 4.3.1. GPs de perlita (PP).

La geopolimerización de perlita se realiza con un diseño L9(3<sup>4</sup>), con los experimentos en las condiciones indicadas en la tabla 1 (en el reglón del material precursor PP). Los *niveles* de los factores fueron propuestos de acuerdo con los intervalos trabajados en la literatura; Minitab generó el arreglo del DDE, siguiendo la ruta de la figura 4. La configuración para el diseño de Taguchi se observa en la figura 7.

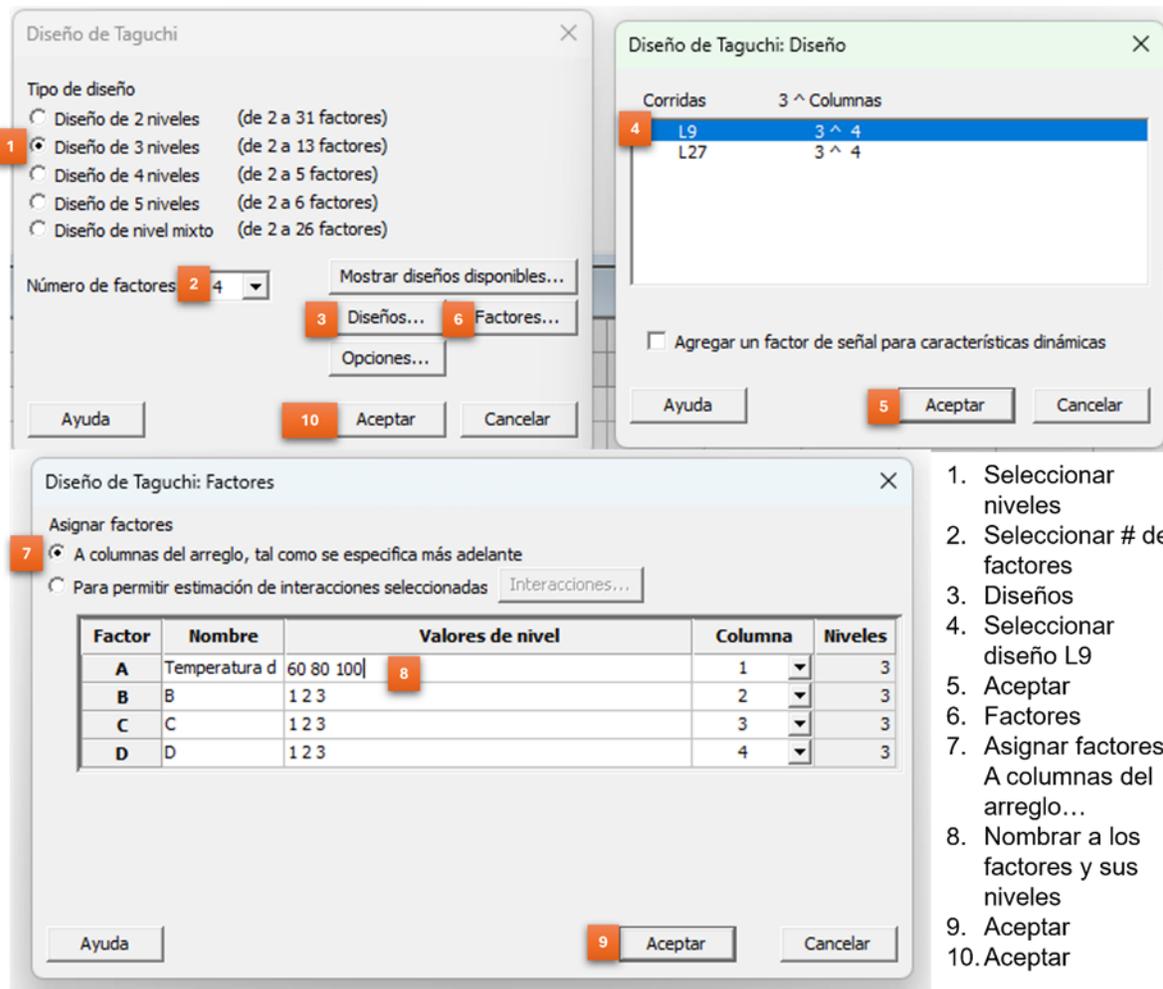


Figura 7. Configuración del diseño de Taguchi

El diseño completo está en la tabla 2.

**Tabla 2.** Diseño de experimentos Taguchi L9(3<sup>4</sup>); geopolímeros de perlita (PP).

Experi- mento	Factores Variables				Factores fijos
	Temperatura de curado	Relación L/S	Concentración NaOH	Tiempo de reacción	
T1-P1	60 °C	1.4	2 M	5 min	Relación Si/Al: 4.9 Humedad de curado: Ambiente Sellado del molde: 100%
T1-P2	60 °C	1.5	4 M	7 min	
T1-P3	60 °C	1.6	6 M	10 min	
T1-P4	80 °C	1.4	4 M	10 min	

T1-P5	80 °C	1.5	6 M	5 min	
T1-P6	80 °C	1.6	2 M	7 min	
T1-P7	100 °C	1.4	6 M	7 min	
T1-P8	100 °C	1.5	2 M	10 min	
T1-P9	100 °C	1.6	4 M	5 min	

#### 4.3.2. GPs combinados de EAH:PP

Los experimentos de geopolimerización de la mezcla 90% de escoria de alto horno (EAH) y 10% de perlita pura (PP) se realizan con un diseño L9(3<sup>3</sup>). El diseño completo está en la tabla 3.

**Tabla 3.** Diseño de Experimentos Taguchi L9(3<sup>3</sup>); GPs EAH:PP (90%EAH & 10%PP)

Experimento	Factores variables			Factores fijos
	Porcentaje de humedad	Relación L/S	Sellado del molde	
T2-EP1	20%	0.5	100%	Relación Si/Al: 3.2 Temperatura de curado: 70° Concentración NaOH: 6 M Tiempo de reacción: 7 min
T2-EP2	20%	0.6	50%	
T2-EP3	20%	0.7	0%	
T2-EP4	40%	0.5	50%	
T2-EP5	40%	0.6	0%	
T2-EP6	40%	0.7	100%	
T2-EP7	60%	0.5	0%	
T2-EP8	60%	0.6	100%	
T2-EP9	60%	0.7	50%	

### 4.3.3. GPs de metacaolín (MK)

El diseño a utilizar es un L9(3<sup>2</sup>) y está en la tabla 4.

**Tabla 4.** Diseño de experimentos de Taguchi L9(3<sup>2</sup>); *geopolímeros* de MK

Experimento	Factores variables		Factores fijos
	Concentración NaOH	Porcentaje de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> en la disolución	
T3-M1	10 M	0%	Relación L/S: 0.65 Temperatura de curado: 70°C Humedad de curado: Ambiente Tiempo de reacción: 7 min Sellado el molde: 100%
T3-M2	10 M	30%	
T3-M3	10 M	50%	
T3-M4	12 M	0%	
T3-M5	12 M	30%	
T3-M6	12 M	50%	
T3-M7	14 M	0%	
T3-M8	14 M	30%	
T3-M9	14 M	50%	

### 4.4. Preparar las materias primas

Los precursores a utilizar como fuente de aluminosilicatos son:

- Perlita: vidrio volcánico, capaz de expandirse a temperaturas aproximadas de 1000°C, ocasionada por la pérdida de agua.
- Escoria de alto horno: residuo que se genera en la producción de hierro y acero a través del método de alto horno. Está formada por aluminosilicatos y óxidos metálicos como magnesio, calcio, titanio y otros.

- Metacaolín: mineral con propiedades cementantes que se obtiene a partir de la calcinación del *caolín*. Este proceso térmico provoca una transformación estructural en el *caolín*, convirtiendo un material poco reactivo en un material altamente reactivo.

Las soluciones activadoras alcalinas son:

- NaOH: 2, 6, 8, 10, 12 y 14 mol/L
- Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: Con una relación peso SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O de 3.26

#### 4.5. Preparar el material de laboratorio y equipos

- Balanza analítica Ouhau Analytical Plus.
- Mortero y pistilo de ágata.
- Moldes circulares y cilíndricos con relación h:d = 2.
- Mufla Thermolyne 1500.
- Máquina para ensayo de compresión Humboldt HM 28.

#### 4.6. Realizar experimentos

El procedimiento experimental a seguir es similar en los tres diseños de Taguchi:

- a. Se pesó el material precursor.
- b. Se depositó en un mortero de ágata donde se adicionó la disolución activadora hasta tener la relación L/S deseada.
- c. Se hizo reaccionar con ayuda de un pistilo de ágata durante el tiempo especificado.
- d. La pasta formada por la reacción se depositó en los moldes donde se dejó reposar (precurar) durante 1 día a temperatura ambiente.
- e. Se curó en una estufa a la temperatura y humedad requeridas durante 3 días.
- f. A los GPs formado se les realizó pruebas de detección de grietas, resistencia al tacto y de ruptura manual.

El procedimiento gráfico para la síntesis de los GPs de PP, EAH:PP y MK se observan en las figuras 8, 9 y 10, respectivamente.



Figura 8. Procedimiento experimental para la síntesis de los GPs de PP

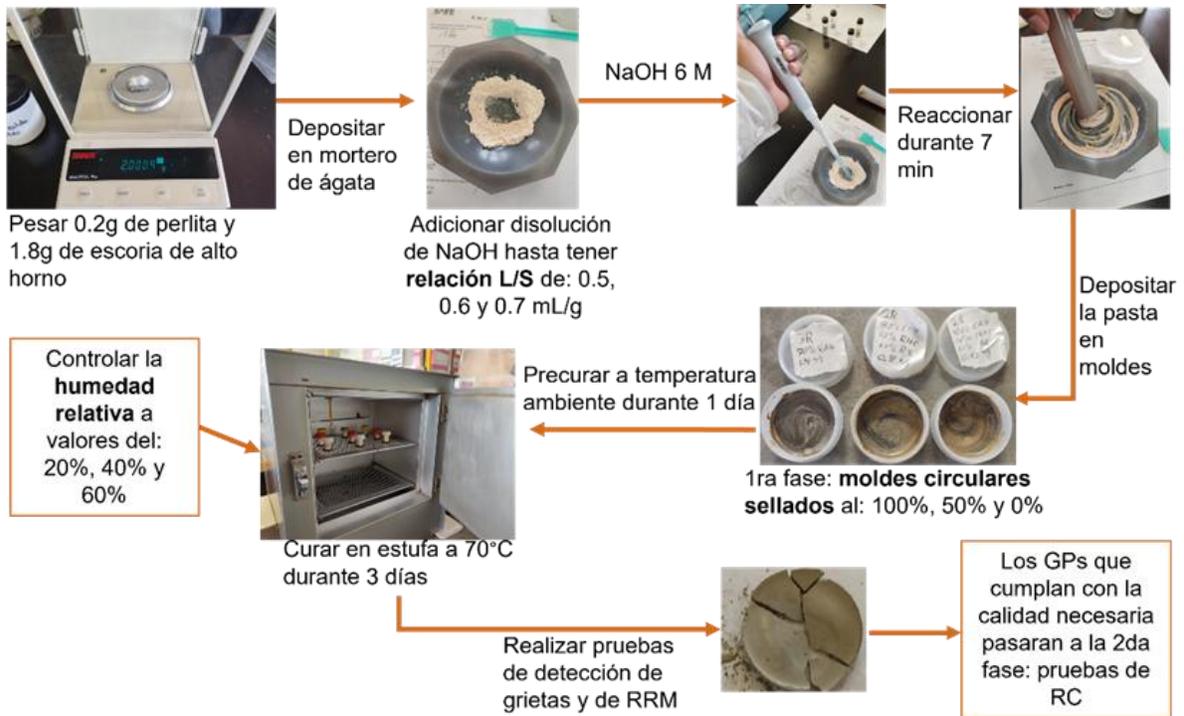


Figura 9. Procedimiento experimental para la síntesis de los GPs de EAH:PP

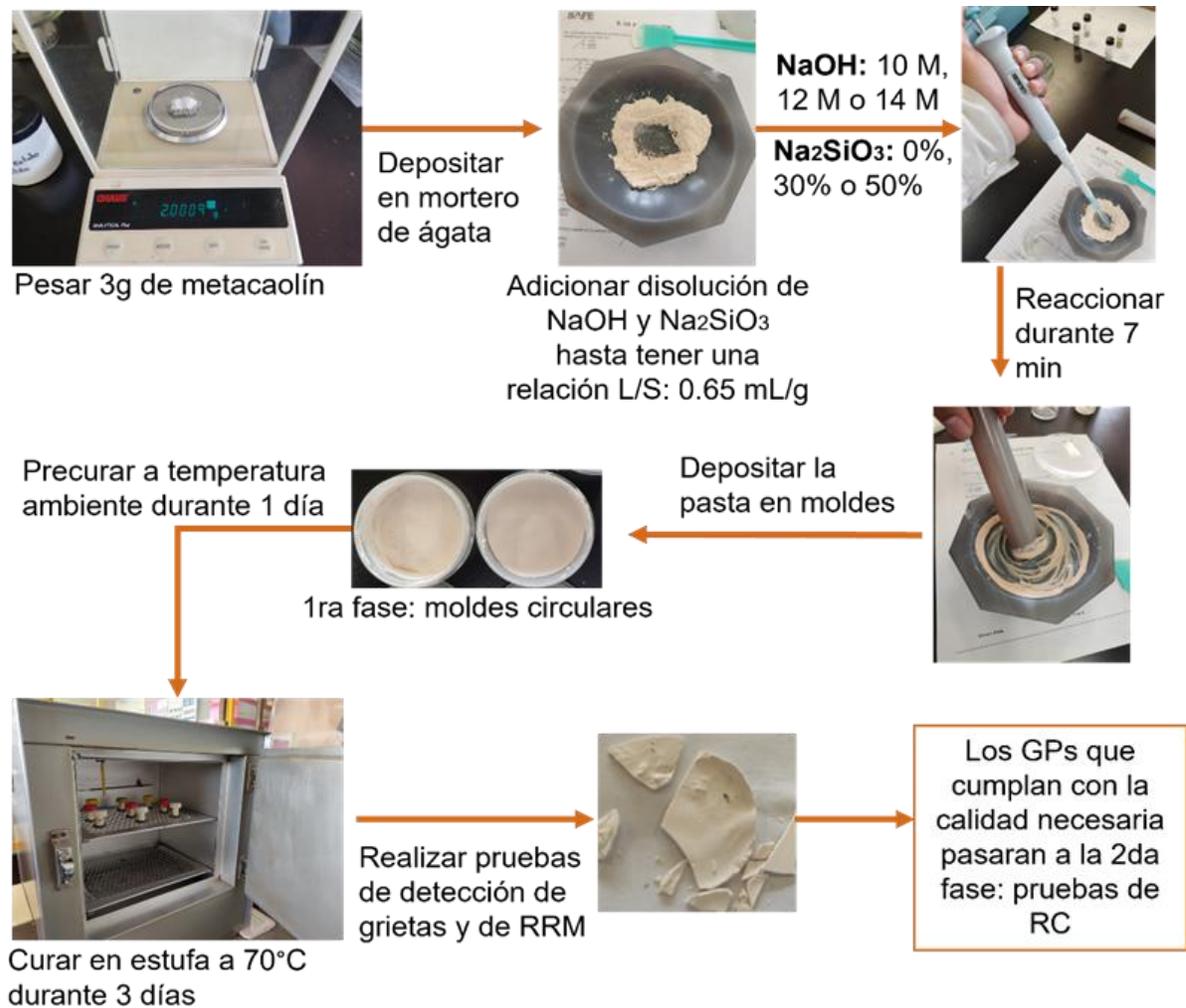


Figura 10. Procedimiento experimental para la síntesis de los GPs de MK

El proceso se realizó para los 9 experimentos de los tres diseños de Taguchi, cada uno por triplicado.

#### 4.6.1. Primera fase: pruebas de consolidación y ruptura manual

##### 4.6.1.1. GPs de perlita (PP)

A cada GP se le calificaron tres aspectos de su calidad de consolidación: 1) superficie libre de grietas, 2) resistencia al tacto (que el GP fuera lo suficientemente sólido para tocarlo sin perder su forma) y 3) resistencia a la ruptura manual, RRM, (la resistencia que presenta el GP a fracturarse al aplicar fuerza con las manos).

A los tres aspectos se le asignó de manera cualitativa una puntuación de 1 a 4 donde:

- ◆ es muy malo
- ◆◆ es malo
- ◆◆◆ es bueno
- ◆◆◆◆ es muy bueno.

Los resultados del primer diseño de experimentos para *geopolímeros* de perlita son visibles en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Resultados Taguchi L9(3<sup>4</sup>); GPs de perlita pura (PP)

Experimento	Factores variables				Calidad de consolidación	Ptos totales	Imagen
	Temperatura de curado	Relación L/S	Concentración NaOH	Tiempo de reacción			
T1-P1	60 °C	1.4	2 M	5 min	Libre de grietas: ◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆ Resistencia a la RM: ◆	5	
T1-P2	60 °C	1.5	4 M	7 min	Libre de grietas: ◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆ Resistencia a la RM: ◆	5	
T1-P3	60 °C	1.6	6 M	10 min	Libre de grietas: ◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆	7	
T1-P4	80 °C	1.4	4 M	10 min	Libre de grietas: ◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆	6	
T1-P5	80 °C	1.5	6 M	5 min	Libre de grietas: ◆◆◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆◆◆	12	

T1-P6	80 °C	1.6	2 M	7 min	Libre de grietas: ♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦	8	
T1-P7	100 °C	1.4	6 M	7 min	Libre de grietas: ♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦ Resistencia a la RM: ♦	5	
T1-P8	100 °C	1.5	2 M	10 min	Libre de grietas: ♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦	8	
T1-P9	100 °C	1.6	4 M	5 min	Libre de grietas: ♦ Resistencia al tacto: ♦♦ Resistencia a la RM: ♦	4	

El número total de puntos se registró en el Taguchi generado en Minitab en una columna titulada: puntos totales. Minitab 18 tiene la opción de analizar el Taguchi siguiendo la ruta: Estadísticas > DOE > Taguchi > Analizar diseño de Taguchi... (figura 11).

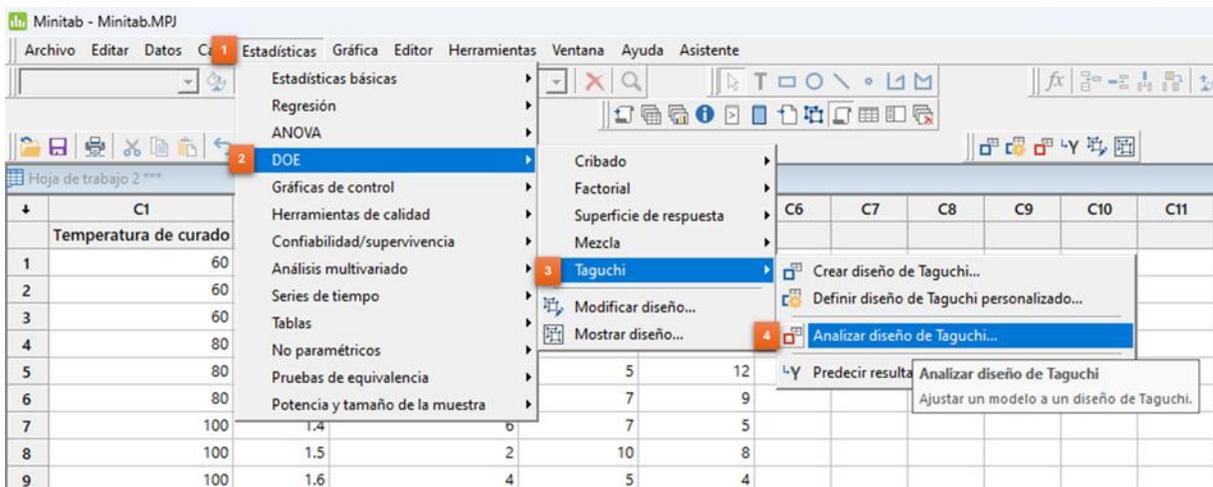


Figura 11. Ruta para analizar diseño de Taguchi

Al dar clic en “Analizar diseño de Taguchi...” se abre un menú donde se configuró el análisis para generar una gráfica que muestre los efectos de los factores en la calidad

de la consolidación de los GPs, representada como los puntos totales. En el menú se sigue la ruta de la figura 12.



Figura 12. Configuración del análisis del DDE Taguchi

La gráfica generada donde se muestran los efectos que tiene cada factor variable sobre el factor respuesta se observan en la figura 13.

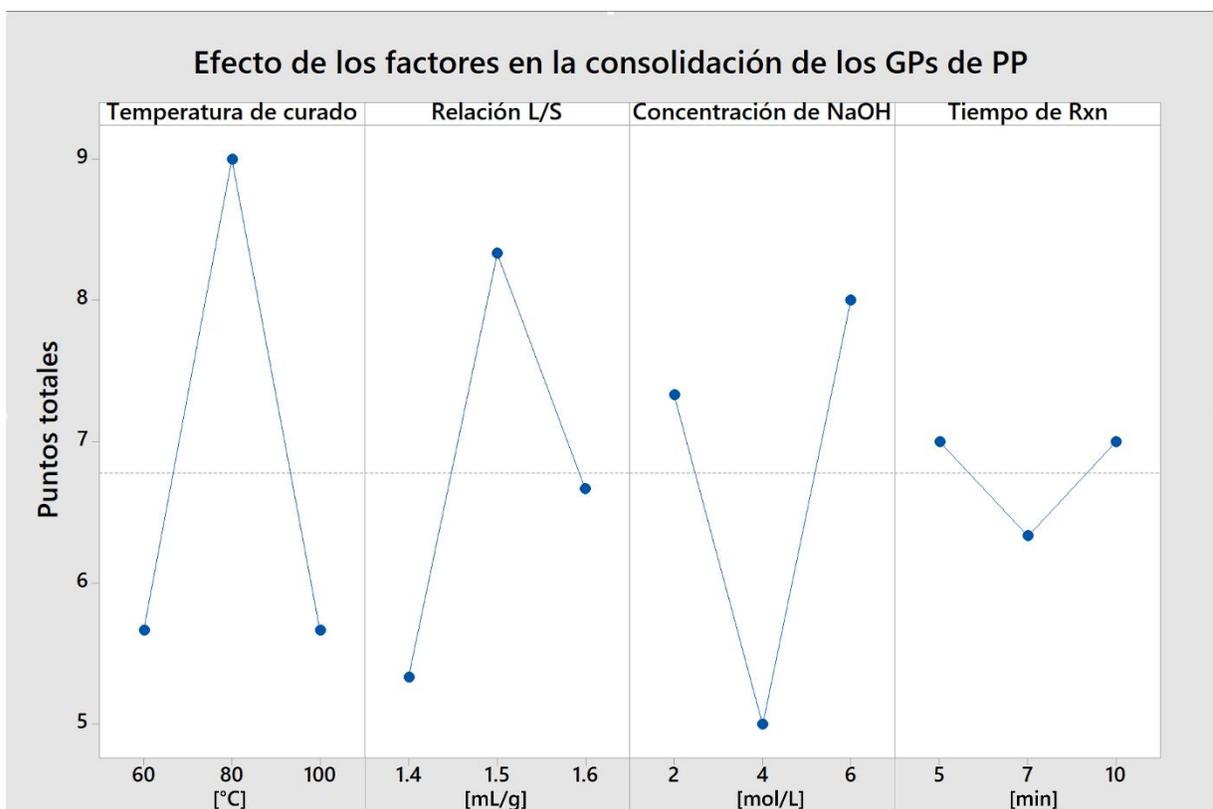


Figura 13. Gráfica de efectos de los factores sobre la consolidación de los GPs de PP

Las condiciones óptimas de síntesis para los GPs de PP fueron:

- Temperatura de *curado*: 80°C,
  - Relación L/S: 1.5,
  - Concentración de NaOH: 6M,
  - Tiempo de reacción: ver punto 4 líneas abajo.
1. Temperaturas de *curado* mayores a 80°C provocan una rápida evaporación del medio acuoso de la pasta geopolimérica con generación de grietas y rupturas durante su *fraguado*, mientras que temperaturas menores no permiten el secado en el periodo de 3 días.
  2. Al igual que la temperatura, los efectos de la relación L/S presentan un pico, el valor de 1.5 es el que genera *geopolímeros* mejor consolidados, asociando valores mayores a un exceso de saturación del medio acuoso y valores menores a una carencia generando grietas y rupturas durante el *fraguado*.
  3. Los GPs mejor consolidados fueron los activados con concentraciones de NaOH 6M.
  4. Para el tiempo de reacción no hubo diferencias notables sobre sus efectos para los tiempos de 5, 7 y 10 min.

Los GPs para ser candidatos para la 2da fase (pruebas de RC), deben estar libres de grietas, teniendo mínimo tres puntos en dicho aspecto. Los otros dos aspectos se califican para tener una tendencia cualitativa de cómo afectan los *niveles* de los *factores variables* a la resistencia general de los GPs.

De los nueve experimentos, sólo el T1-P5 fue candidato para realizar pruebas de RC. El T1-P5 está indicado en la tabla 2.1 en color amarillo.

#### **4.6.1.2. GPs combinados de EAH:PP**

Los GPs combinados de EAH:PP se evaluaron con los mismos lineamientos que los GPs de PP. En la tabla 3.1 se ven los valores de los *factores variables*, los resultados de consolidación y la imagen del GP correspondiente a cada experimento.

**Tabla 3.1.** Resultados Taguchi L9(3<sup>3</sup>); GPs EAH:PP (90%EAH & 10%PP)

Experimento	Factores variables			Calidad de consolidación	Ptos. totales	Imagen
	Porcentaje de humedad	Relación L/S	Sellado del molde			
T2-EP1	20%	0.5	100%	Libre de grietas: ◆◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆◆	10	
T2-EP2	20%	0.6	50%	Libre de grietas: ◆◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆	7	
T2-EP3	20%	0.7	0%	Libre de grietas: ◆◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆◆	9	
T2-EP4	40%	0.5	50%	Libre de grietas: ◆◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆◆◆	10	
T2-EP5	40%	0.6	0%	Libre de grietas: ◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆	6	
T2-EP6	40%	0.7	100%	Libre de grietas: ◆◆◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆◆◆	12	
T2-EP7	60%	0.5	0%	Libre de grietas: ◆◆ Resistencia al tacto: ◆◆ Resistencia a la RM: ◆◆	6	

T2-EP8	60%	0.6	100%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦♦	12	
T2-EP9	60%	0.7	50%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦	10	

Al igual que para los GPs anteriores, el número total de puntos se registró en Minitab y siguiendo los pasos de las figuras 11 y 12 se generó una gráfica de los efectos que tiene cada factor variable sobre la consolidación de los GPs. Dichos efectos se observan en la figura 14.

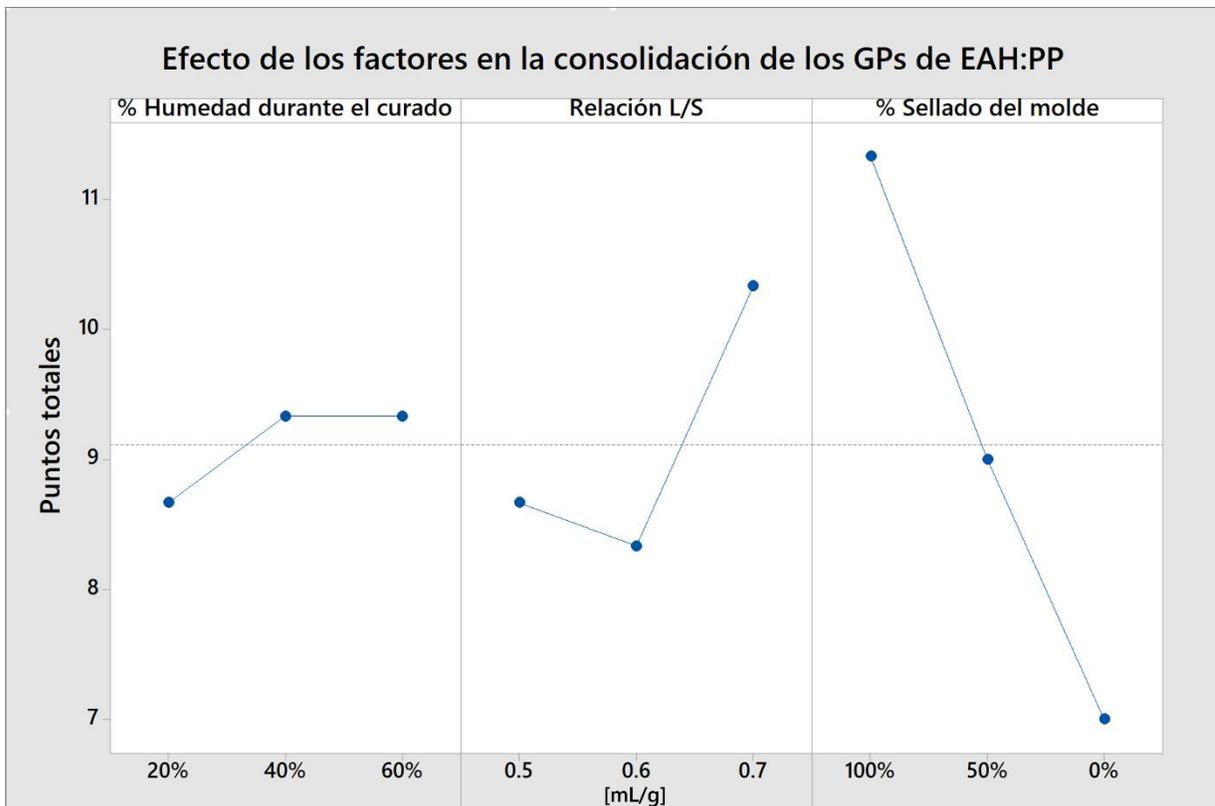


Figura 14. Gráfica de efectos de los factores sobre la consolidación de los GPs de EAH:PP

Las condiciones óptimas de síntesis para los GPs de EAH:PP fueron:

- Porcentaje de humedad durante el curado: ver punto 3 líneas abajo,

- Relación L/S: 0.7,
- Porcentaje de sellado del molde durante el curado: 100%.

1. El factor de sellado durante el periodo de *curado* es el que más afecta la calificación de los *geopolímeros*.
2. Una alta relación L/S ayudó a que no se generaran grietas y rupturas por la total evaporación del medio acuoso de las pastas geopoliméricas durante el *curado*.
3. El porcentaje de humedad durante el *curado* no tuvo efectos significativos, por lo que en la 2da fase (pruebas de RC), no se tomó en cuenta.

Dos experimentos no cumplieron los requerimientos necesarios para pasar a la 2da fase, el T2-EP5 Y T2-EP7, al presentar una gran cantidad de grietas. Se optó por solo elegir tres para pasar a la 2da fase, siendo los mejor puntuados y dando prioridad a los que tenían el nivel óptimo de sellado del molde (100%), al ser el factor más determinante para la calidad de consolidación de los GPs.

Los experimentos T2-EP1, T2-EP6 y T2-EP8 se consideraron como los mejores candidatos para realizar las pruebas de RC. Están indicados en color amarillo en la tabla 3.1.

#### 4.6.1.3. GPs de metacaolín (MK)

Los resultados de la experimentación se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados Taguchi L9(3<sup>2</sup>); *geopolímeros* de MK

Experimento	Factores variables		Calidad de consolidación	Ptos. totales	Imagen
	Concentración NaOH	Porcentaje de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> en la disolución			
T3-M1	10 M	0%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦	8	

T3-M2	10 M	30%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦	10	
T3-M3	10 M	50%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦♦	12	
T3-M4	12 M	0%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦	8	
T3-M5	12 M	30%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦	10	
T3-M6	12 M	50%	Libre de grietas: ♦♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦♦♦	12	
T3-M7	14 M	0%	Libre de grietas: ♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦	7	
T3-M8	14 M	30%	Libre de grietas: ♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦	7	

T3-M9	14 M	50%	Libre de grietas: ♦♦♦ Resistencia al tacto: ♦♦ Resistencia a la RM: ♦♦	7	
-------	------	-----	--	---	---

El efecto de los *factores variables* en la consolidación de los GPs se aprecia en la gráfica generada por Minitab, figura 15.

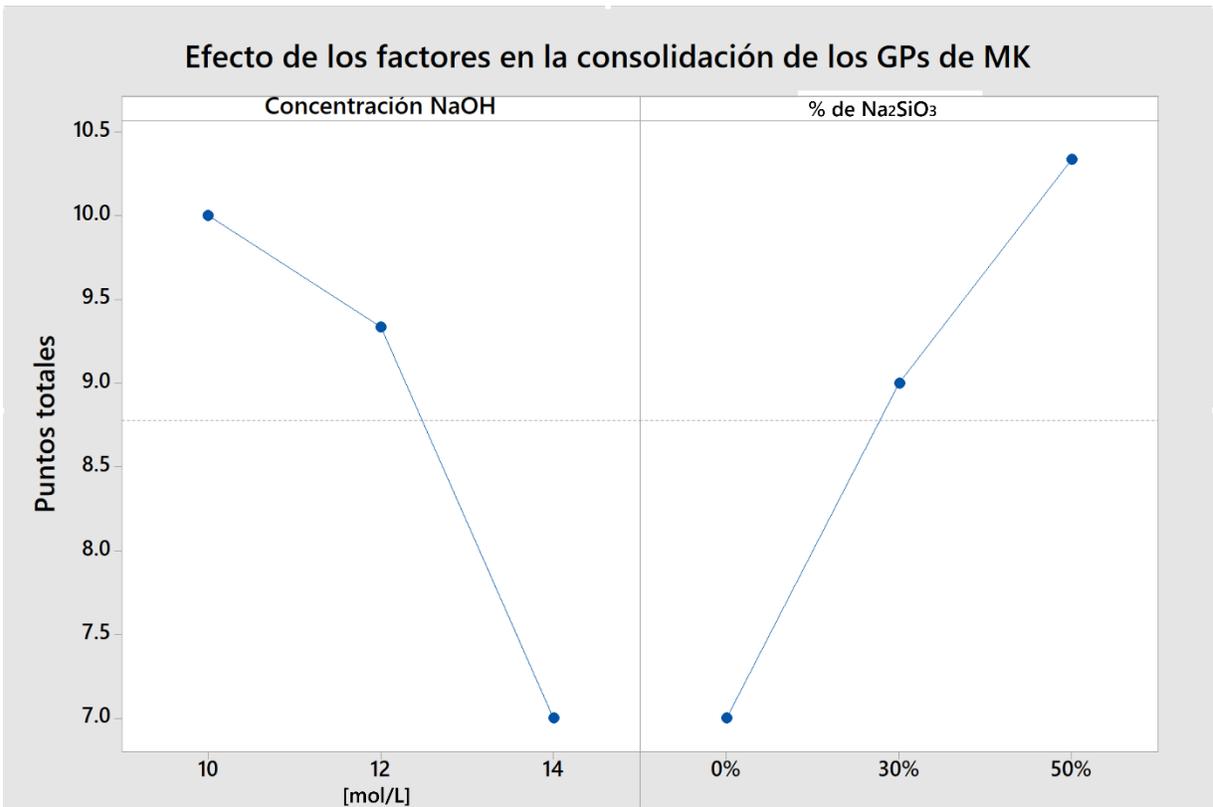


Figura 15. Gráfica de efectos de los factores sobre la consolidación de los GPs de MK

Las condiciones óptimas de síntesis para los GPs de MK fueron:

- Concentración de NaOH: 10 M,
  - Porcentaje de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: 50%.
1. Una concentración de NaOH superior a 12 M, en este caso 14 M, afecta negativamente la RC, disminuyéndola.

2. El porcentaje de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  en la disolución activadora fue el factor con mayor efecto sobre la RC de los GPs; aquellos que fueron sintetizados sin la disolución de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  tuvieron una resistencia a la ruptura manual mucho menor.

El *metacaolín* es un material que produce GPs con una cohesión alta, provocando que se adhieran al molde donde se curan, dificultando su desmolde. El experimento T3-M8 se rompió durante el desmoldado, sin embargo, éste y todos los demás experimentos se consolidaron sin presentar grietas importantes en su superficie.

Se determinó que todos los experimentos del DDE Taguchi  $L9(3^2)$  son candidatos para realizar las pruebas de resistencia a la compresión (RC).

#### 4.6.2. Segunda fase: pruebas de resistencia a la compresión

Para los ensayos de resistencia a la compresión la pasta geopolimérica se depositó, *precuró* y curó en moldes cilíndricos de 25 x 12 mm, cumpliendo con el requisito de la norma ASTM C39, donde los cilindros deben tener el doble de altura que el diámetro de su base.



Figura 16. Probetas de GPs de EAH:PP



Figura 17. Probetas de GPs de MK

En los moldes donde se depositó la pasta geopolimérica de los GP de MK se cubrió la superficie con gel de silicón a modo de lubricante para evitar la adherencia de la pasta al molde, facilitando su desmoldado.

##### 4.6.2.1. GPs de perlita (PP)

La prueba de resistencia a la compresión del único GP de PP que pasó a la 2ª fase (el experimento T1-P5, en los experimentos de consolidación), se realizó a las condiciones de 10 minutos de reacción, el *precurado* a temperatura ambiente durante un día, para un tratamiento posterior de *curado* a 80°C, durante 3 días. El resultado de la prueba está en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1.** Resultado prueba de resistencia a la compresión del GP de PP

Expt. 1ra fase	Precursor	Sustancia Activadora	Condiciones particulares de síntesis	Imagen del GP	RC (MPa)
T1-P5	PP	NaOH 6M	Relación Si/Al: 4.9 Relación L/S: 1.5		<b>2.2</b>

La última columna de las tablas de las pruebas muestra los resultados de la RC.

#### 4.6.2.2. GPs de EAH:PP

Los experimentos de síntesis de GPs de EAH:PP se realizaron durante una reacción de 10 minutos, *precurado* de un día a temperatura ambiente, para un posterior *curado* a 70°C durante 3 días, ambos procesos en moldes 100% sellados.

**Tabla 6.2.** Resultados pruebas de resistencia a la compresión de los GPs EAH:PP

Expt. 1ra fase	Precursor	Sustancia Activadora	Condiciones particulares de síntesis	Imagen del GP	RC (MPa)
T2-EP1	EAH:PP 9:1	NaOH 6M	Relación Si/Al: 3.2 Relación L/S: 0.5		<b>14.6</b>
T2-EP6	EAH:PP 9:1	NaOH 6M	Relación Si/Al: 3.2 Relación L/S: 0.6		7.1

T2-EP8	EAH:PP 9:1	NaOH 6M	Relación Si/Al: 3.2 Relación L/S: 0.7		7.2
--------	---------------	---------	--	---	-----

La relación Si/Al es la relación molar más importante en la resistencia de los GPs, ya que de ella depende la estructura básica que tendrán. Dicha relación depende de la composición elemental que tiene cada material precursor.

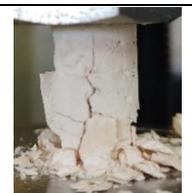
La relación L/S óptima que maximiza la RC de los GPs depende del material precursor utilizado. La perlita es un material muy absorbente que necesita de cantidades altas de sustancia alcalina para comenzar la geopolimerización, mientras que la escoria y el *metacaolín* requieren de una relación menor.

#### 4.6.2.3. GPs de metacaolín (MK)

Estos GPs se sintetizaron al reaccionar MK con NaOH a diferentes concentraciones y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  en diferentes porcentajes hasta tener una relación L/S de 0.65, durante 10 min. Se realizó un *precurado* a temperatura ambiente durante un día y posteriormente un *curado* a 70°C durante 3 días, en moldes sellados al 100%. Ver tabla 6.2.

**Tabla 6.2.** Resultados pruebas de resistencia a la compresión de los GPs de MK

Expt. 1ra fase	Precursor	Sustancia Activadora	Condiciones particulares de síntesis	Imagen del GP	RC (MPa)
T3-M1	MK	NaOH 10 M	Relación Si/Al: 2.1		1.9

T3-M2	MK	NaOH 10 M y 30% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Relación Si/Al: 2.2		12.5
T3-M3	MK	NaOH 10 M y 50% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Relación Si/Al: 2.3		<b>17.0</b>
T3-M4	MK	NaOH 12 M	Relación Si/Al: 2.1		2.0
T3-M5	MK	NaOH 12 M y 30% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Relación Si/Al: 2.2		<b>17.3</b>
T3-M6	MK	NaOH 12 M y 50% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Relación Si/Al: 2.3		14.5
T3-M7	MK	NaOH 14 M	Relación Si/Al: 2.1		2.1
T3-M8	MK	NaOH 14 M y 30% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Relación Si/Al: 2.2		5.1

T3-M9	MK	NaOH 14 M y 50% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Relación Si/Al: 2.3		3.8
-------	----	---	---------------------	---	-----

Las concentraciones óptimas que maximizan la RC dependen de la fuente de aluminosilicatos utilizada en la síntesis de los GPs. La investigación previa realizada a la experimentación nos dio valores  $<10$  M para GPs de PP y EAH; y  $\geq 10$  para GPs de MK. La experimentación de la 1ra fase identificó como la concentración de NaOH óptima de 6M para GPs de PP (figura 13) y de 10M para GPs de MK (figura 15). En contraste la 2da fase indicó que el GP de MK con la RC máxima (T3-M5) fue sintetizado con NaOH 12 M.

Los efectos positivos de la adición de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> en la sustancia activadora en la RC de los GPs se estudiaron en otros trabajos bibliográficos. Para ver su efecto en la RC en los experimentos de GPs de MK se diseñaron *niveles* con 0%, 30% y 50% de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> en la disolución activadora. Los GPs de MK sintetizados sin Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alcanzaron RC máximas de 2.14 MPa; en contraste los GPs sintetizados con 30% y 50% de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> tuvieron una RC arriba de 3 MPa.

### 4.6.3. Resultados

#### 4.6.3.1. Resultados de la 1ª fase (experimentación).

1. En cada una de las 3 experimentaciones se muestran los resultados y la definición de los experimentos aptos para pasar a las pruebas de resistencia a la compresión.
2. También se observan los niveles óptimos de los *factores variables* que mejoran la calidad de los *geopolímeros*.

#### 4.6.3.2. Resultados de la 2ª fase (pruebas de la resistencia a la compresión).

1. Los *geopolímeros* sintetizados tienen aplicaciones viables en la industria de la construcción para su aplicación en *concreto* ligero no estructural y *concreto* estructural (ASTM C331) así como en *morteros* de tipo N, S y M (ASTM C91).
2. El GP de PP, T1-P5 tiene un valor de resistencia a la compresión que corresponde al *concreto* ligero ( $\geq 0.3$  a  $< 3.4$  MPa).
3. Los GPs de EAH:PP T2-EP6 y T2-EP8 tienen valores de resistencia a la compresión que corresponden a *morteros* de tipo N ( $\geq 3.4$  a  $< 9.0$  MPa) y el T2-EP1 de *mortero* de tipo M ( $\geq 12.4$  a  $< 17$ ), ASTM C91.
4. Los GPs de *metacaolín* T3-M1, T3-M4 y T3-M7 tienen valores de resistencia a la compresión que corresponden a *concreto* ligero ( $\geq 0.3$  a  $< 3.4$ ). Los GPs T3-M8 y T3-M9 corresponde a *morteros* tipo N ( $\geq 3.4$  a  $< 9.0$  MPa); los GPs T3-M2 y T3-M6 tienen valores de RC que corresponden a *morteros* de tipo M ( $\geq 12.4$  a  $< 17$ ). Mientras que los GPs T3-M3 y T3-M5 tienen valores de RC que corresponden a *concreto* estructural ( $\geq 17$  MPa).

Ver tabla en la sección 5.1.2

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones con respecto a los objetivos.

Se logró cumplir con el 100% de los objetivos planteados.

#### 5.1.1. Aplicar el método Taguchi en el DDE para la mejora de la calidad de los GPs.

El DDE Taguchi se utilizó como una técnica estadística que nos sirvió para identificar los valores óptimos de los factores para incrementar la RC de los GPs sintetizados. Se encontraron las condiciones de síntesis adecuadas para que los GPs sean de la calidad requerida para cumplir con los requisitos de las normas ASTM C331 y ASTM C91.

#### 5.1.2. Sintetizar GPs de calidad, con una RC que cumpla con los requisitos de las normas ASTM C331 y ASTM C91.

DDE	RC (MPa)	Especs (MPa) Concreto ligero no estructural	Especs (MPa) Mortero de mampostería tipo N	Especs (MPa) Mortero de mampostería tipo S	Especs (MPa) Mortero de mampostería tipo M	Especs (MPa) Concreto estructural
		ASTM C331 ≥0.3 a <3.4	ASTM C91 ≥3.4 a <9.0	ASTM C91 ≥9.0 a <12.4	ASTM C91 ≥12.4 a <17.0	ASTM C331 ≥17.0
T1-P5	2.2	✓				
T2-EP1	14.6				✓	
T2-EP6	7.1		✓			
T2-EP8	7.2		✓			
T3-M1	1.9	✓				
T3-M2	12.5				✓	
T3-M3	17.0					✓
T3-M4	2.0	✓				

T3-M5	<b>17.3</b>					✓
T3-M6	<b>14.5</b>				✓	
T3-M7	<b>2.1</b>	✓				
T3-M8	<b>5.1</b>		✓			
T3-M9	<b>3.8</b>		✓			

## 5.2. Conclusiones con respecto a las herramientas utilizadas.

1. El análisis del DDE taguchi nos permitió conocer los factores que estadísticamente tienen mayor influencia en la resistencia a la compresión de los *geopolímeros* sintetizados: relación L/S, sellado del molde durante el curado, concentración y sustancia activadora.
2. En este trabajo se planteó la utilidad de las técnicas estadísticas en un sistema de gestión de la calidad para apoyar el cumplimiento de requisitos.
3. Se demostró la utilidad del diseño de experimentos en la mejora de la calidad de un producto maximizando una característica, la resistencia a la compresión (teniendo valores similares o superiores a las del cemento Portland).

## 5.3. Conclusiones generales.

1. Los *niveles* de la relación L/S que optimizan la resistencia a la compresión dependen del tipo de precursor de aluminosilicatos empleado en la síntesis de los GPs, teniendo en común que todos tienen un valor óptimo, donde valores superiores se asocian a un exceso de saturación del medio acuoso y valores menores a una carencia, generando grietas y rupturas durante el *fraguado*.
2. El proceso de elaboración de los GPs tiene (1) un impacto ambiental menor al *cP* (no hay emisiones de CO<sub>2</sub> en su síntesis), (2) un coste energético menor en la obtención de su materia prima y (3) la ventaja del uso de desechos industriales como la escoria de alto horno.

## 5.4. Recomendaciones.

1. Usar técnicas estadísticas para analizar e interpretar datos e información, como una forma de tomar decisiones basadas en evidencias.
2. Usar el diseño de experimentos para planificar, ejecutar y analizar experimentos optimizando los recursos disponibles.
3. Usar la disciplina para cumplir con los tiempos, recursos y objetivos previamente planteados.
4. Trabajar en equipo como una forma de alcanzar metas comunes, mejorar la calidad del trabajo, facilitar actividades y fomentar el aprendizaje y retroalimentación entre colaboradores.
5. Aprender a utilizar paquetes y programas que faciliten la aplicación de técnicas estadísticas. Tener conocimientos básicos en estadística, saber qué y cómo medir los datos requeridos, así como interpretar la información de manera adecuada.

## 6. Glosario

**Arreglo ortogonal:** arreglo que prueba diferentes combinaciones de ingredientes de forma sistemática para identificar cuáles tienen el mayor impacto en el sabor final. Un arreglo ortogonal significa que el diseño está balanceado, de manera que los niveles de los factores se ponderan equitativamente. Debido a eso, cada factor se puede evaluar sin considerar todos los demás factores, de manera que el efecto de un factor no afecta la estimación de otro factor.

**Caolín:** mineral de arcilla con composición  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Al calcinarlo a temperaturas superiores de los 600 °C se obtiene el metacaolín.

**Cemento:** polvo fino y suave que se utiliza como conglomerante debido a que se endurece después de estar en contacto con el agua. Se produce a partir de una mezcla de caliza y arcilla, calcinadas y posteriormente molidas.

**Clínker:** producto granulado que se obtiene de la calcinación de caliza y arcilla, y que se utiliza para fabricar cemento. Compone aproximadamente el 90% del cemento Portland.

**Concreto:** también conocido como hormigón, es un material de construcción compuesto por una mezcla de cemento, agua, aditivos, arena y grava.

**cP:** cemento Portland

**Curado:** proceso fundamental en la construcción que consiste en mantener la humedad del concreto durante un periodo determinado después de su vaciado. Esta acción permite que el cemento continúe hidratándose y desarrollando la resistencia y durabilidad necesarias para cumplir con su función estructural.

**EAH:** escoria de alto horno

**Factores control:** son aquellas variables que el investigador manipula de manera intencional para observar su efecto sobre una variable de respuesta.

**Factores fijos:** son los factores cuyo valor es constante durante el DDE

**Factores variables:** son los factores cuyo valor cambia en niveles establecidos en el DDE

**Fraguado:** proceso mediante el cual la mezcla de concreto, que inicialmente es líquida y maleable, se transforma en un material sólido y resistente.

**Ganga:** en minería, materia que acompaña a los minerales y que se separa de ellos como inútil.

**GP:** Geopolímero

**MK:** Metacaolín

**Mortero:** mezcla de cemento, agua y arena. A diferencia del concreto, no contiene grava

**Niveles:** en los diseños de Taguchi, los niveles representan los diferentes valores o estados que puede tomar un factor para observar su efecto en la respuesta final de un proceso o producto.

**PP:** Perlita

**Precurado:** técnica que consiste en aplicar tratamientos especiales al concreto recién vaciado, antes de que inicie el curado convencional.

**RRM:** Resistencia a la ruptura manual

**RNX:** Reacción

**Sialatos:** silicato-oxo-aluminatos, que son polímeros inorgánicos derivados de aluminosilicatos.

## 7. Bibliografía

1. Davidovits, J. (2015). Geopolymer, Chemistry and Applications. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
2. Hameed, A.M., Rawdhan, R.R., Al-Mishhadani, S.A. (2017). Effect of Various Factors on the Manufacturing of Geopolymer Mortar. Archives of Science 1: 111.
3. ISO/TR 10017:2003. Orientación sobre las técnicas estadísticas para la Norma ISO 9001:2000
4. Kacker, R.N., & Phadke, M.S. (1985). Off-line quality control, parameter design, and the Taguchi method
5. Lahoti, M., Wong, K. K., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2018). Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure. Materials and Design, 154, 8–19.
6. Ross, P.J. (1988). Taguchi techniques for quality engineering. Un libro que ofrece una introducción práctica a la metodología y sus aplicaciones.
7. Taguchi, G. (1986). Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes.
8. Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, 114, 40-48. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009.
9. Wang H. (2021). The Effect of Various Si/Al, Na/Al Molar Ratios and Free Water on Micromorphology and Macro-Strength of Metakaolin-Based Geopolymer
10. Zhang F. (2017). Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers. Ceramics International 43. PP 3811-3817