**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**
**Universidad del Perú. Decana de América**
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

# Estudio comparativo de las propiedades físicas y químicas entre un cemento portland tipo I y nuevas formulaciones para obtener cemento hidráulico tipo GU como uso alternativo en construcciones generales

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

**AUTOR**

Jhamer Clinton RIVERA NUÑEZ

Miguel Angel ROBLES VERGARA

**ASESOR**

Dr. Raymundo ERAZO ERAZO

Lima, Perú

2024




Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

**Referencia bibliográfica**

---

Rivera, J. & Robles, M. (2024). *Estudio comparativo de las propiedades físicas y químicas entre un cemento portland tipo I y nuevas formulaciones para obtener cemento hidráulico tipo GU como uso alternativo en construcciones generales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

| | |
|---|---|
| **Datos de autor 1** | |
| Nombres y apellidos | Jhamer Clinton Rivera Nuñez |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 73465785 |
| **Datos de autor 2** | |
| Nombres y apellidos | Miguel Angel Robles Vergara |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 48504617 |
| **Datos de asesor** | |
| Nombres y apellidos | Raymundo Erazo Erazo |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 08439329 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0003-1480-7641 |
| **Datos del jurado** | |
| **Presidente del jurado** | |
| Nombres y apellidos | Ruben Alfredo Palomino Infante |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 08326506 |
| **Miembro del jurado 1** | |
| Nombres y apellidos | Juan Carlos Woolcott Hurtado |
| Tipo de documento | DNI |

| | |
|---|---|
| Número de documento de identidad | 07554433 |
| **Datos de investigación** | |
| Línea de investigación | C.0.5.3. Caracterización de materiales |
| Grupo de investigación | No aplica. |
| Agencia de financiamiento | Sin financiamiento. |
| Ubicación geográfica de la investigación | País: Perú<br>Departamento: Callao<br>Provincia: Callao<br>Distrito: Ventanilla<br>Latitud: -11.855556<br>Longitud: -77.073611 |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | Agosto 2024 - Diciembre 2024 |
| URL de disciplinas OCDE | Ingeniería química<br>https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 |

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
**FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA**
Central Telefónica: 619-7000

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÌA QUÍMICA**

# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "III Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-II", bajo la Presidencia del **Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE; Mg. JUAN CARLOS WOOLCOTT HURTADO (Miembro)** y el **Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **Estudio comparativo de las propiedades físicas y químicas entre un cemento portland tipo I y nuevas formulaciones para obtener cemento hidráulico tipo GU como uso alternativo en construcciones generales, SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por el bachiller en Ingeniería Química: **RIVERA NUÑEZ, JHAMER CLINTON** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUIMICO,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECIOCHO (LETRAS) 18 (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 21 de diciembre del 2024

**Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE**
Presidente

**Mg. JUAN CARLOS WOOLCOTT HURTADO**
Miembro

**Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO**
Asesor

**Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE**
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÌA QUÍMICA

# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "III Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-II", bajo la Presidencia del **Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE; Mg. JUAN CARLOS WOOLCOTT HURTADO (Miembro)** y el **Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **Estudio comparativo de las propiedades físicas y químicas entre un cemento portland tipo I y nuevas formulaciones para obtener cemento hidráulico tipo GU como uso alternativo en construcciones generales**, **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por el bachiller en Ingeniería Química: **ROBLES VERGARA, MIGUEL ANGEL** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUIMICO,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECIOCHO (LETRAS) 18 (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 21 de diciembre del 2024

**Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE**
Presidente

**Mg. JUAN CARLOS WOOLCOTT HURTADO**
Miembro

**Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO**
Asesor

**Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE**
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA
Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

# CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, RAYMUNDO ERAZO ERAZO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N°000027-2025-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título es **"Estudio comparativo de las propiedades físicas y químicas entre un cemento portland tipo I y nuevas formulaciones para obtener cemento hidráulico tipo GU como uso alternativo en construcciones generales"** presentado por los Bachilleres: Jhamer Clinton Rivera Nuñez y Miguel Angel Robles Vergara para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 20% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 08 de abril de 2025

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor: Raymundo Erazo Erazo

DNI: 08439329

## DEDICATORIA

A mi familia que siempre fue la motivación de mis sueños, sobre todo a mis padres Francisco y Margot que lucharon día y noche para sacar adelante a la familia, porque ellos no pudieron cumplir sus metas por sobreponer las mías, me formaron para ser una persona correcta y porque son lo más importante en mi vida, a mi hermana mayor Angela por ser mi apoyo en todo momento, como siempre lo dije este logro también es suyo ya que sin ella nada de esto hubiera sido posible, para mis sobrinos que son la nueva generación de mi familia y espero ser la inspiración de ellos cuando quieran cumplir sus sueños.

**Robles Vergara, Miguel Angel**

Agradezco mucho a mi familia, pues han sido mi fuente de inspiración y apoyo incondicional durante todo este proceso. A mis padres, Alfredo y Feliza, por su cariño, respeto y sacrificio. Su dedicación y esfuerzo han sido importantes para que yo pueda cumplir mis objetivos. A todos ellos, les expreso mi sincero agradecimiento por haberme hecho crecer y desarrollarme como persona y profesional. Este logro es también suyo, y espero que se sientan siempre orgullosos de mí como yo de ellos.

**Rivera Nuñez, Jhamer Clinton**

## AGRADECIMIENTO

A nuestra alma mater Universidad Nacional Mayor de San Marcos por abrirnos las puertas y darnos la oportunidad de formarnos durante 5 largos años como personas y profesionales, a las enseñanzas de todos nuestros maestros que aportaron con su grano de arena durante toda nuestra carrera profesional a pesar de las adversidades que surgieron como la pandemia, a nuestros compañeros de la universidad con los cuales compartimos muchos conocimientos y nos ayudaron a avanzar juntos, a nuestras familias por confiar, apoyar, nunca abandonarnos y estar siempre con nosotros, por último y más importante agradecer a nosotros mismos como persona por no desistir nunca de nuestros objetivos a pesar de que muchas veces el camino se encontrase adverso y complicado.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo preparar y encontrar nuevas formulaciones de cemento hidráulico tipo GU, para determinar su viabilidad como reemplazo del cemento Portland tipo I en edificaciones estructurales basándose en la comparación de sus propiedades físicas y químicas entre ambos cementos. Para el estudio se prepararon 1 patrón (cemento Portland tipo I) y 4 grupos de formulaciones denominadas Recetas GU (1, 2, 3 y 4) cada una con distintas dosificaciones (3%puzolana, 20% caliza), (4% puzolana, 25% caliza), (6% puzolana, 27% caliza) y (8% puzolana,20% caliza) respectivamente, cada receta tuvo 3 muestras. Se realizaron ensayos para determinar propiedades físicas y químicas como Blaine, expansión al agua 14 días, resistencia la compresión, expansión en autoclave, expansión por sulfatos y tiempo de fraguado.

El mayor Blaine se obtiene con la receta 4 (grafica 2) con un valor de 4387 cm2/g, respectos a las demás rectas; así mismo existe una gran variación respecto al patrón tipo I que tiene un valor de 3364 cm2/g. El menor fraguado inicial se obtiene con el patrón tipo I con un valor de 125 minutos, por otro lado, las recetas 1 y 4 obtienen menor fraguado comparando entre recetas, con valores de 138 y 139 minutos respectivamente, estos valores son más cercanos al valor del tipo I en comparación con las recetas 2 y 4. A diferencia de otras recetas, el cemento tipo GU de la receta 4 muestra un incremento en la resistencia a la compresión en comparación con el cemento tipo I. En particular, durante los días 28, 40 y 60, muestra un incremento del 1%, 3.9% y 7.0% respectivamente.

Debido a su comportamiento en sus características físicas, especialmente su oposición a la compresión, y su cumplimiento de las NTP 334.009 «Cementos Portland. Requisitos» y NTP 334.082» Cementos hidráulicos. Especificaciones de desempeño», se determina que el cemento hidráulico con la especificación de desempeño tipo GU (receta 4) puede ser utilizado como alternativa en construcciones de uso generales.

ABSTRACT

The present research work has the objective of preparing and finding new formulations of hydraulic cement type GU, in order to determine its viability as a replacement for portland cement type I in structural buildings based on the comparison of its physical and chemical properties between both cements.

For the study, 1 standard (portlad cement type I) and 4 groups of formulations called GU Recipes (1, 2, 3 and 4) were prepared, each with different dosages (3% pozzolana, 20% limestone), (4% pozzolana, 25% limestone), (6% pozzolana, 27% limestone) and (8% pozzolana, 20% limestone) respectively, each recipe had 3 samples. Tests were carried out to determine physical and chemical properties such as Blaine, 14-day water expansion, compressive strength, autoclave expansion, sulfate expansion and setting time.

The highest Blaine is obtained with straight lines 4 (graph 2) with a value of 4387 cm2/g, compared to the other straight lines; there is also a great variation with respect to the type I pattern, which has a value of 3364 cm2/g. The lowest initial setting time is obtained with the type I pattern with a value of 125 minutes, on the other hand, recipes 1 and 4 obtain lower setting times comparing between recipes, with values of 138 and 139 minutes respectively, these values are closer to the value of type I in comparison with recipes 2 and 4. The GU type cement of recipe 4, unlike the other recipes, has a gain in compressive strength with respect to type I cement, specifically at days 28, 40 and 60, it presents a gain of 1%, 3.9% and 7.0%, respectively. specifications". Due to its behavior in its physical characteristics, especially its opposition to compression, and its compliance with NTP 334.009 "Cementos Portland. Requirements" and NTP 334.082 "Hydraulic cements. Performance specifications", it is determined that hydraulic cement with performance specification type GU (recipe 4) can be used as an alternative in general purpose construction.

INDICE

I. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN ....1
1.1. Introducción ....1
1.2. Determinación del problema ....2
1.2.1. Formulación del Problema ....2
1.2.1.1. Problema General ....2
1.2.1.2. Problemas Específicos ....2
1.3. Objetivos de la Investigación ....3
1.3.1. Objetivo general ....3
1.3.2. Objetivos específicos ....3
1.4. Justificación de la investigación ....3
1.4.1. Justificación tecnológica ....3
1.4.2. Justificación económica ....4
1.4.3. Justificación medioambiental ....4
1.5. Limitaciones de La Investigación ....5
II. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO ....6
2.1. Antecedentes de la Investigación ....6
2.1.1. Antecedentes Nacionales ....6
2.1.2. Antecedentes Internacionales ....8
2.2. Bases Teóricas ....9
2.2.1. Cemento ....9
2.2.1.1. Materias primas ....9
2.2.2. Harina Cruda ....10
2.2.3. Proceso de Fabricación del Cemento ....11
2.2.3.1. Explotación y extracción de la materia prima ....11
2.2.3.2. Trituración de la materia prima ....12
2.2.3.3. Pre-Homogenización ....12
2.2.3.4. Molienda de Crudo ....12
2.2.3.5. Clinkerización o Piroproceso ....13
2.2.3.6. Finura de cemento ....16
2.2.3.7. Guardado y envasado ....16
2.2.4. Clinker ....17
2.2.4.1. Composición química del clinker ....17
2.2.4.2. Fases de mineral en clinker ....18

2.2.5. Yeso ....20
2.2.6. Adiciones ....20
2.2.6.1. Clasificación de las adiciones minerales ....21
2.2.7. Propiedades del Cemento ....24
2.2.7.1. Propiedades químicas ....24
2.2.7.2. Propiedades físicas y mecánicas ....26
2.2.8. Clasificación de los Cementos ....28
2.2.8.1. Cementos Portland Ordinarios ....28
2.2.8.2. Cementos Hidráulicos Adicionados ....30
2.2.8.3. Cementos Hidráulicos según su requisito de desempeño ....32
2.3. Definición de términos ....35
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES ....36
3.1. Hipótesis ....36
3.1.1. Hipótesis General ....36
3.1.2. Hipótesis Especificas ....36
3.2. Variables ....36
IV. CAPITULO 4: METODOLOGIA EXPERIMENTAL ....36
4.1. Área de estudio ....37
4.2. Metodología de la Investigación ....37
4.2.1. Nivel de Investigación ....37
4.2.1.1. Investigación explicativa ....37
4.2.1.2. Investigación correlacional ....37
4.3. Diseño de Investigación ....37
4.4. Muestra ....37
4.5. Procedimiento Experimental ....38
4.5.1. Recolección de muestras ....38
4.5.2. Secado ....38
4.5.3. Molienda piloto ....39
4.5.4. Ensayos ....40
4.5.4.1. Finura expresada por la superficie específica (NTP 334.002:2013) ....40
4.5.4.2. Tiempo de fraguado (NTP 334.006) ....42
4.5.4.3. Resistencia a la Compresión (NTP 334.051) ....44
V. CAPITULO 5: RESULTADOS ....51
5.1. Presentación de Resultados ....51
5.2. Interpretación grafica de resultados por Variables ....56
5.3. Análisis estadístico de los datos mediante técnicas estadísticas “ANOVA” y prueba de Dunnett ....66

5.4. Discusión de Resultados.....67
5.5. Pruebas de Hipótesis.....70
VI. CAPITULO 6: CONCLUSIONES.....73
VII. CAPITULO 7: RECOMENDACIONES.....74
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....75
IX. ANEXOS.....78

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1: *Comparación de los retenidos promedios de los cementos tipo GU y tipo I* .....56

Gráfica 2: *Comparación de la superficie especificas por recetas* .....56

Gráfica 3: *Comparación de Blaine promedio de los cementos tipo GU y tipo I* .....57

Gráfica 4: *Comparación del fraguado inicial por recetas* .....57

Gráfica 5: *Comparación del fraguado final por recetas*.....58

Gráfica 6: *Comparación de fraguado inicial promedio de los cementos tipo GU y tipo I* .....58

Gráfica 7: *Comparación de fraguado final promedio de los cementos tipo GU y tipo I* .....59

Gráfica 8: *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 1 día de los cementos tipo GU y tipo I*.....59

Gráfica 9: *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 3 días de los cementos tipo GU y tipo I.*.....60

Gráfica 10: *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 7 días de los cementos tipo GU y tipo I.*.....60

Gráfica 11: *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 28 días de los cementos tipo GU y tipo I*.....61

Gráfica 12: *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 40 días de los cementos tipo GU y tipo I*.....61

Gráfica 13: *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 60 días de los cementos tipo GU y tipo I*.....62

Gráfica 14: *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión de las diferentes recetas y la NTP 334:009.*.....63

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. *Transformaciones químicas en la cocción del crudo* .....15

Tabla 2: *Composición química del clinker* .....17

Tabla 3: *Principales compuestos del clinker*.....18

Tabla 4: *Adiciones minerales al cemento Portland*.....21

Tabla 5: *Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos de cemento Portland* .....25

Tabla 6: *Características de los compuestos del cemento*.....26

Tabla 7: *Parámetros químicos y físicos de los cementos portland* .....30

Tabla 8: *Parámetros para los cementos adicionados*.....32

Tabla 9: *Parámetros para los cementos hidráulicos*.....34

Tabla 10: *Nuevas formulaciones para el cemento hidráulico tipo GU.*.....38

Tabla 11: *Tolerancia para rotura de cubos a diferentes edades*.....50

Tabla 12: *Tabla de resultados de cemento Hidráulico tipo GU con Recta (1)*.....51

Tabla 13: *Tabla de resultados de cemento hidráulico tipo GU con Recta (2)* .....52

Tabla 14:*Tabla de resultados de cemento hidráulico tipo GU con Recta (3)* .....53

Tabla 15: *Tabla de resultados de cemento hidráulico tipo GU con Recta (4)* .....54

Tabla 16: *Resultado promedio de los análisis físicos y químicos de los cementos tipo GU y cemento Portland tipo I.* .....55

Tabla 17: *Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la rcta-1 respecto al tipo I*.....64

Tabla 18: *Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la rcta-2 respecto al tipo I.*.....64

Tabla 19: *Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la rcta-3 respecto al tipo I.*.....65

Tabla 20*: Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la rcta-4*

*respecto al tipo I.*.....65

Tabla 21: *Análisis de Anova de un factor de las resistencias promedios de las distintas recetas a 60 días, respecto al banco.* .....66

Tabla 22: *Prueba de Dunnett de las resistencias promedios a 60 días respecto al blanco.*.....66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. *Constitución del crudo de cemento* .....10

Figura 2*. Proceso de fabricación de cemento* .....11

Figura 3.*Pre-Homogenización en apilador circular*.....12

Figura 4. *Molino de prensa de rodillos* .....13

Figura 5. *Silo de homogenización* .....13

Figura 6. *Torre de precalentamiento y horno rotatorio*.....14

Figura 7: *Molino de bolas de cemento* .....16

Figura 8: *Envasado de cemento* .....17

Figura 9: *Estufas para secado de muestras*.....39

Figura 10: *Molino de Bond* .....39

Figura 11: *Aparato Blaine* .....40

Figura 12: *Aguja Vicat*.....42

Figura 13: *Equipo de rotura*.....44

Figura 14: *Muestra compactada para determinación de fluidez* .....46

Figura 15: *Fluidez del mortero* .....47

Figura 16: *Cámara de curado para mortero* .....49

Figura 17: *Mortero después de 24 hr de curado*.....49

# I. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción

La industria del cemento desempeña un papel vital en la vida de los seres humanos y es esencial para su desarrollo social. Las primeras civilizaciones, como la egipcia, la griega y la romana, utilizan desde la antigüedad yeso impuro calcinado y piedra caliza calcinada, respectivamente. Joseph Aspdin ha sido el pionero en obtener una patente para el cemento Portland en 1824. En menos de doscientos años, la industria global del cemento ha vivido un crecimiento asombroso, llegando a producir más de 4 mil millones de toneladas anuales.

De acuerdo a The Global Cement Report (2021), La producción mundial de cemento en 2021 alcanzó una cifra cercana a los 4400 millones de toneladas y a nivel nacional en el Perú, de acuerdo con ASOCEM (2023), la producción nacional de cemento en el 2022 alcanzó los 13.37 millones de toneladas.

Por otro lado, la emisión de dióxido de carbono sigue siendo una preocupación importante para la industria del cemento. La preocupación emana del proceso de fabricación actual, como liberar unos 535 kg de CO2 por tonelada de clinker de la calcinación de la piedra caliza y de unos 330 kg de CO2 por tonelada de clinker de la combustión del combustible, lo que resulta en una emisión directa de 865 kg de CO2 por tonelada de clinker. La cifra correspondiente para el cemento variaría, dependiendo de la masa de clinker utilizada en la produccion de una tonelada de cemento y de la tecnología de molienda adoptada. (Chatterjee, 2017 p.354).

La característica física más relevante, definida como requerimiento de rendimiento para cementos hidráulicos, para usos especiales y generales, se encuentra establecidas por la norma técnica ASTM C1157 y se basan en la dosificación de los elementos empleados en la producción del cemento. Por esta razón el objetivo de la investigación es realizar nuevas formulaciones con distinta dosificación al cemento portland y obtener un cemento tipo GU con un mejor desempeño en base sus propiedades físicas y químicas.

## 1.2. Determinación del problema

El sector cementero es una de las industrias que más daña al medio ambiente. Este problema se presenta principalmente debido al elevado volumen de dióxido de carbono (CO2) que se libera a la atmósfera para tratar el componente principal del cemento, o sea, el clinker. (Nidheesh & Kumar, 2019). Por lo tanto, se busca el desarrollo de cementos estructurales sostenibles en la industria de cemento como es el caso del cemento Hidráulico tipo GU, un cemento más respetuoso con el medio ambiente, donde se usa menor cantidad de clinker para su fabricación y reemplaza dicha proporción por adiciones calcáreas, puzolanas y minerales, los cuales ingresan al circuito de fabricación de cemento de manera directa sin previo proceso que genere emisiones contaminantes. Sin embargo, es necesario evaluar su desempeño como cemento alternativo de uso estructural en comparación con el cemento Portland tipo I.

### *1.2.1. Formulación del Problema*

#### 1.2.1.1. Problema General

¿En qué medida las nuevas formulaciones de cemento hidráulico tipo GU son una alternativa viable para reemplazar al cemento portland tipo I en edificaciones estructurales, en términos de propiedades físicas y químicas?

#### 1.2.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo se compara la durabilidad del cemento hidráulico tipo GU con la del cemento tradicional Portland tipo I?
- ¿Cuál es impacto de la variación en la porosidad del cemento hidráulico tipo GU en su resistencia a la penetración de agua y agentes agresivos?
- ¿ Qué diferencias existen entre el cemento Portland tipo I y el cemento hidráulico tipo GU en términos de composición química, y cómo afecta esto a la resistencia mecánica del primero?

## 1.3. Objetivos de la Investigación

### *1.3.1. Objetivo general*

Determinar las propiedades físico - químicas de un cemento hidráulico tipo GU con especificaciones por desempeño, variando el % de dosificación de las adiciones en las nuevas formulaciones frente a un cemento Portland Tipo I como uso alternativo en construcciones generales.

### *1.3.2. Objetivos específicos*

- Obtener las características físicas y químicas de las nuevas formulaciones de los cementos tipo GU y su comparación con el cemento portland tipo I.
- Interpretar los resultados físicos y químicos de cemento portland tipo GU.
- Determinar la viabilidad del cemento hidráulico tipo GU como alternativa al cemento Portland tipo I en términos de desempeño.

## 1.4. Justificación de la investigación

### *1.4.1. Justificación tecnológica*

Hoy en día, existe una tendencia clara e irreversible en la fabricación de cementos adicionados, incluso más que los cementos portland convencionales. Esta tendencia se relaciona con la gran relevancia que ha ganado en el sector de la construcción la idea de la durabilidad del hormigón, y también con la creciente inquietud por los asuntos relacionados con la preservación del medio ambiente. Por ello, en el presente proyecto se plantea evaluar el desempeño de un cemento hidráulico tipo GU a través de incorporación de adiciones inertes y cementantes, como uso alternativo al cemento portland tipo I.

La sustitución parcial del clinker por estas adiciones en la producción del cemento hidráulico tipo GU, no solo nos proporcionará tener un cemento con mejor desempeño, también resulta beneficioso para el medio ambiente, debido al menor uso de clinker lo cual durante su producción se emite una gran cantidad de gases de efecto invernadero.

### *1.4.2. Justificación económica*

La producción de cemento utiliza mucha energía térmica y eléctrica. Utiliza de manera particular unos 4GJ para producir 1000Kg de cemento, es una industria que consume mucha energía. La electricidad representa el 25% de los insumos energéticos básicos, mientras que la energía térmica supone el 75%. Alrededor del 26% de los costes asociados a la fabricación de cemento están relacionados con la energía. Hay una posibilidad significativa de economizar energía térmica disminuyendo las pérdidas a través del uso de gases de combustión presentes en el horno, por cuanto el uso específico de energía térmica en las fábricas de cemento es alrededor de 700 Kcal/Kg de clínker. En Perú, el consumo medio de energía térmica por tonelada de clinker es alrededor de 745 kcal/kg (3140 MJ/tonelada de clinker o 872 Kwh/tonelada de clinker). Dentro del mercado regulado, la cuota eléctrica para la industria cementera es alrededor de 0,25 Soles/kWh (OSINERGMIN, 2016), dando como resultado 218 soles/tonelada de clinker en términos económicos (MINEM, p.22).

Estos consumos específicos de energía traducidos en cifras económicas justifican la búsqueda de nuevas formulaciones para obtener un cemento hidráulico tipo GU que sustituyan parcialmente las cantidades de clinker y en consecuencia se reduzcan los costos de producción en las industrias cementeras.

### *1.4.3. Justificación medioambiental*

Para producir cemento tradicional (o cemento Portland), se tiene que realizar un proceso intensivo en energía y una gran fuente de $CO_2$, es así que, a fin de transformar la mezcla de materiales que constituye la harina cruda en el producto terminado, se utilizan hornos con temperaturas de 1450°C, La transformación química de los materiales libera $CO_2$. Es verdad que al fraguar el cemento, al ser utilizado en el concreto, absorbe $CO_2$. Sin embargo, el balance final indica que la producción de 1 tonelada de cemento Portland libera 0,4 toneladas de $CO_2$. Con la producción anual de 2 billones de toneladas, la industria de cemento aporta el 5% de emisiones mundiales de $CO_2$, superando a la aviación en términos de responsabilidad (MINEM, p.60).

Este problema respalda la implementación de avances tecnológicos en los procesos de producción de cemento, como la reposición de materias primas y la utilización de materiales novedosos como la puzolana, ceniza volante, humo de sílice, escoria de alto horno, adiciones, entre otros. En el contexto de la necesidad de salvaguardar el medio ambiente. La meta es alcanzar un nivel máximo de reemplazo de materiales no renovables. El uso de desechos como materias primas alternativas resulta en una disminución de la explotación de canteras, disminuyendo así el impacto ambiental. El reemplazo del clinker a través de formulaciones innovadoras en la fabricación del cemento hidráulico tipo GU es una prueba más de la aportación favorable del ámbito en la administración de los insumos. También, el empleo de materia prima alternativa en el sector del cemento disminuye las emanaciones totales de CO2 y tampoco impacta negativamente en el proceso de producción y tampoco en las emisiones (MINEM, p.58).

### 1.5. Limitaciones de La Investigación

Una de las limitaciones es la no disposición de todas las materias primas necesarias para obtener una mejor performance de cemento hidráulico tipo GU. Por otro lado, las pruebas se realizaron a escala laboratorio, lo que no puede representar con precisión los resultados a una escala industrial. Sin embargo, estas pruebas son de gran relevancia como base para las futuras pruebas pilotos y pruebas industriales en la industria cementera.

El tiempo limitado asignado para la investigación restringe poder representar con mayor claridad el objetivo de la presente investigación.

# II. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

## 2.1. Antecedentes de la Investigación

### *2.1.1. Antecedentes Nacionales*

Alfaro A., T & Laura C., L. J. (2014), realizó un estudio titulado: **"Estudio comparativo para la sustitución de un cemento portland tipo V entre un cemento puzolánico con especificaciones de la performance tipo HS en la fábrica de cemento YURA S.A"**. Con el fin de crear un cemento que satisfaga las Normas Técnicas Peruanas (NTP 334.082 / NTP 334.009) para que pueda ser extremadamente duradero ante la exposición a sulfatos, el estudio presentó los resultados de una investigación comparativa para sustituir un Cemento Portland Tipo V, por un cemento puzolánico con características del Tipo de Desempeño HS, la cual incluye puzolana junto con clinker y yeso en la planta de Cemento Yura S.A. En ese sentido, se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar la resistencia a la comprensión, superficie específica, tiempo de fraguado y resistencia al atraque de sulfatos, dichas pruebas mostraron resultados favorables en un lapso breve al comparar las propiedades químicas y físicas, es de esta forma que se determinó que se puede sustituir el cemento tipo V por el cemento puzolánico tipo HS.

Pretel C. R. (2022), realizó un estudio titulado: **"Evaluación de los cambios de longitud de barras de mortero fabricadas con cemento portland tipo V y tipo V modificado con escorias siderúrgicas frente a la agresión química de los sulfatos"**. El objetivo del estudio consistió en evaluar cómo afectaba la agresión química de los sulfatos a las variaciones en la longitud de las barras de mortero que fueron creadas con cementos Portland tipo V y tipo V modificados con escoria de acero. Para comparar las dimensiones de las barras de mortero, se han tomado muestras de ambos tipos de cemento investigados que fabricaba la empresa. En ese sentido, con dichas pruebas de cemento se fabricaron probetas prismáticas para el ensayo de incremento de sulfato, tal y como se indica en la Norma ASTM 1012 y en la NTP 334. 094. Los hallazgos de los cambios de longitud en un periodo de 180 días fueron de 0,025% en el caso del cemento Portland Tipo V modificado con escoria de acero y de 0,033% para el cemento

Portland Tipo V. El ensayo seleccionado evidenció que el cemento Portland Tipo V muestra un mayor crecimiento lineal o ampliación en la extensión de las barras analizadas, lo que indica un rendimiento inferior en comparación con el cemento Portland Tipo V mejorado con escorias siderúrgicas. Con este último, se verificó un aumento en la durabilidad del concreto.

Guevara & Tantarico (2019) **"Evaluación comparativa de las características físico–mecánicas de las diferentes marcas de cementos portland Tipo I comercializadas en el norte y centro del Perú"**, con el objetivo de comparar los diferentes cementos tipo I, donde se obtuvo registros de expansión que fluctúa entre 0.011% y 0.116%, en este estudio se utilizó el método de ensayo para medir la dilatación de barras de mortero de cemento portland curadas en agua en el transcurso de 14 días. Los resultados de cada ensayo mostraron que las características mecánicas y físicas de los seis cementos se encontraban en los límites de admisibilidad enumerados en la NTP 334.009.

Cortez y Sánchez (2006) **"Mejoramiento en las propiedades físicas y químicas del cemento portland Tipo MS por adición de clinker Tipo V en la sustitución de escoria BFS de alto horno".** La investigación tuvo como fin analizar la respuesta de los cementos Portland Tipo MS que se produjeron con clinker Tipo V y aquellos elaborados con 17% de escoria de alto horno, con el fin de reducir el uso de escoria que la empresa Cementos Pacasmayo venía utilizando en la fabricación de cemento Portland Tipo MS. Esta escoria era adquirida de la compañía Sider Perú, la cual estaba a punto de finalizar sus actividades, lo que hacía imprescindible buscar una alternativa para sustituirla. En ese contexto, se diseñó un cemento Tipo V, para lo cual se efectuaron análisis físicas y químicas, tales como residuo insoluble, pérdida al fuego, óxido de calcio, óxido férrico y resistencia a la compresión, consiguiendo datos que mostraron propiedades parecidas al cemento fabricado con escoria siderúrgica, cumpliendo con las normas ASTM y alcanzando una alta calidad comparable a la de un cemento con escoria.

### *2.1.2. Antecedentes Internacionales*

López (2015), realizó un estudio titulado: **"Estudio sobre la durabilidad de los nuevos tipos de cemento para la evaluación del comportamiento de morteros y hormigones frente a la agresión química de los sulfatos y del agua de mar"**. En este estudio se examinó el impacto de las propiedades de los nuevos cementos en el comportamiento expansivo generado a lo largo de un lustro debido al ataque externo de sulfatos y agua marina. Se usaron distintos métodos de ensayo, como el de cambios de longitud, con el fin de evaluar tanto la expansión como la resistencia química frente a los ataques de los sulfatos, estableciendo las propiedades químicas y mecánicas de quince cementos y su durabilidad ante el ataque de sulfatos. También se examinó cómo las diferentes adiciones, como puzolanas, escorias de horno alto y caliza, influían en la resistencia a la compresión y en el desgaste de la superficie de las probetas de mortero. Asimismo, se ratificaron los límites de aceptación que se establecieron en cada ensayo a fin de poder determinar la resistencia a sulfatos y se valoró el desempeño de estos cementos en comparación con los tipos convencionales de cementos europeos. Al diseñar el método de ensayo para evaluar la resistencia de los cementos frente a la agresión química de los sulfatos, utilizando la variación de longitud como referencia, A lo largo de los seis meses, se observaron índices de expansión que no excedieron el 0,05% en los cementos de tipo IP (MS) e IS (MS). Por otro lado, se concluyó que la adición de puzolana es una parte clave en la durabilidad del concreto en comparación con los cementos ordinarios, como el Portland tipo I.

Tobón, J. I. & Gómez, K. R. (2008) **"Desempeño del cemento portland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza"**. A diferencia de la piedra caliza de primera calidad que Cementos El Cairo S. A. incorpora a su cemento, el estudio determinó la incidencia que tienen añadir piedra caliza de diferentes calidades al cemento Portland tipo III. Se utilizaron dosificaciones de (% de $CaCO_3$) < 70%, 70 - 80%, y >80% para reemplazar el cemento con 15, 20, y 25% de caliza. A los 3, 7 y 28 días, se midió la resistencia mecánica de los morteros hechos en condiciones normales. Se utilizaron el análisis termogravimétrico y la difracción de rayos X

para conocer la evolución mineralógica de las pastas durante el proceso de hidratación. Al no producir las alteraciones mineralógicas esperadas de una puzolana, se descubrió que el 75% de las calizas (ASTM C311) no llegaron a presentar actividad puzolánica.

Un estudio por parte de la empresa CEMEX sobre **"Cementos Puzolánico aumentan la resistencia del concreto al ataque de sulfatos"** Se llegó a la conclusión de que el uso de cemento portland adicionando puzolana es una forma de incrementar la resistencia mecánica y la resistencia al ataque de los sulfatos reduciendo el clinker. La puzolana resultó ventajosa no sólo en la resistencia a la acción de los sulfatos en los distintos cementos portland -puzolana y cementos tipo I, II y V estudiados- sino también en la durabilidad del concreto y la formación de productos cementante.

## 2.2. Bases Teóricas

### *2.2.1. Cemento*

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico que se muele finamente para producir un producto que, cuando se mezcla con agua, forma una pasta que fragua, endurece y mantiene su estabilidad y resistencia inclusive debajo del agua.

#### 2.2.1.1. Materias primas

- **Materiales calizos**

  El carbonato de calcio (CaCO3) se puede encontrar en grandes cantidades; originalmente está presente en la naturaleza en dos minerales relativamente comunes como son la creta y caliza (Walter H. Duda, 1997).

- **Materiales arcillosos**

  La arcilla es el segundo componente más relevante empleado en la elaboración de cemento. Los silicatos provenientes de metales alcalinos y alcalinotérreos se meteorizan con el fin de crear arcillas. (Duda, Walter H, 1977).

  Las arcillas están conformadas por tres grupos:

- El primer grupo: El caolín ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$)
- El segundo grupo: La Montmorillonita
- El tercer grupo: La Mica, son arcillas con álcalis

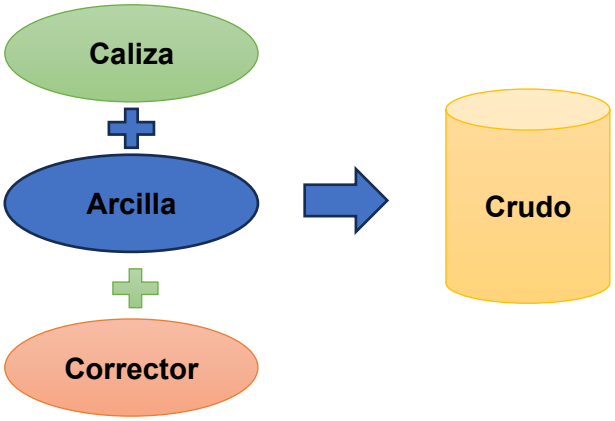
- **Materiales correctores**

Los minerales con una mayor proporción de un compuesto químico como $SiO_2$, $Fe_2O_3$ o CaO, necesario para la fabricación de cemento se emplearán si estos componentes no se encuentren en la proporción adecuada en la harina cruda. Por ejemplo, la arena, la tierra de diatomeas o las arcillas con alto contenido en sílice suelen utilizarse para compensar el déficit de dióxido de silicio (SiO2). El óxido de hierro (Fe2O3) se corrige con pirita y mineral de hierro. La bauxita sirve como corrector del óxido de aluminio ($Al_2O_3$) (Walter H. Duda, 1997).

### *2.2.2. Harina Cruda*

El conjunto de materias primas unidas y dosificadas (figura 1), trituradas y homogeneizadas se denomina crudo. Está formada por los compuestos que constituyen algo más del 95% de los óxidos que se encuentran en el clínker y aportan los óxidos principales. Un buen control de la calidad de la materia prima es crucial, porque los ingredientes se dosifican en función de su composición química y de las fases deseadas en el cemento.

**Figura 1.** *Constitución del crudo de cemento*




**Fuente:** *Elaboración propia*

### 2.2.3. Proceso de Fabricación del Cemento

El proceso de producción de cemento, como se muestra en la Figura 2, abarca desde la explotación de materias primas hasta el envasado del producto final.

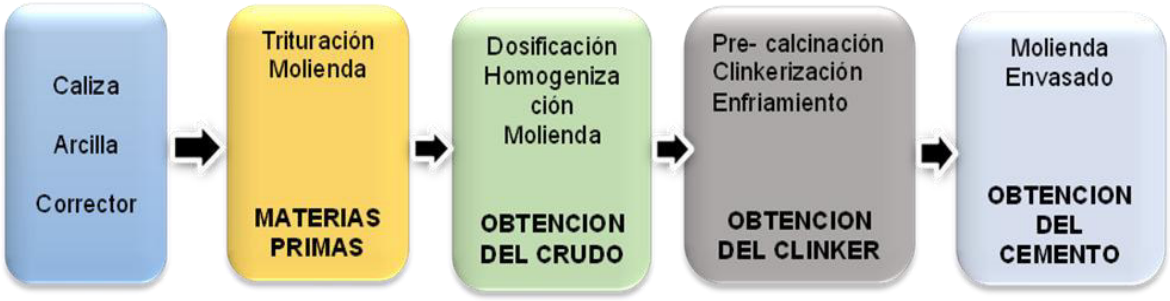



**Figura 2.** *Proceso de fabricación de cemento*

Fuente*: Elaboración propia*

Hay dos procedimientos fundamentales para fabricar el cemento. La producción a través de la vía húmeda es la primera, que implica la molienda en presencia de agua. Este procedimiento simplifica el traslado y reduce la polución ambiental, sin embargo, también incrementa los gastos de producción debido al uso de más combustible durante el proceso de cocción para eliminar el agua sobrante. El segundo proceso, conocido como producción en seco, la harina cruda que se obtiene tras la molienda se coloca en silos y se homogeneiza mediante agitación con aire.

#### 2.2.3.1. Explotación y extracción de la materia prima

La producción del cemento inicia con un programa de exploración adecuado para probar las canteras de caliza y arcilla, si el programa es viable se da la explotación de las canteras. La piedra caliza es el componente clave en la elaboración del cemento y su uso más frecuente es en la creación inicial de un mineral hidráulico artificial conocido como clinker, que constituye el fundamento para la elaboración de cualquier clase de cemento. Tras la voladura, se realiza el acarreo, que consiste en el traslado del material mediante camiones. (ASOCEM, 2016).

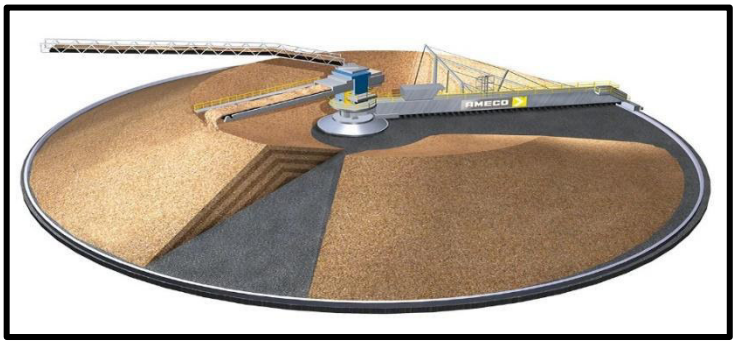
#### 2.2.3.2. Trituración de la materia prima

En este punto, las rocas minerales de la voladura se transportan a la trituradora primaria, donde es reducido su tamaño de 1,50 metros hasta los 25 centímetros.A partir de ahí, se envían a la trituradora secundaria, donde se reduce aún más su tamaño hasta unos 75 mm.

#### 2.2.3.3. Pre-Homogenización

Para garantizar la homogeneidad de cada materia prima y reducir las variaciones en su composición química, se combinan individualmente. Las cintas transportadoras (conveyor) trasladan las materias primas del almacén a las tolvas de una en una para poder dosificarlas en las distintas operaciones (molienda de cemento y fabricación de clínker). (ASOCEM, 2016).

**Figura 3.***Pre-Homogenización en apilador circular*




**Fuente:** *https://www.ameco-group.com/es/producto/almacenes-circulares/*

#### 2.2.3.4. Molienda de Crudo

El siguiente proceso es la molienda, que crea un material muy fino y puede realizarse con prensas de rodillos o molinos de bolas. En este proceso, los materiales se eligen en función del tipo de dosificación previsto, con la finalidad de maximizar el tonelaje de materia prima que entra en el horno teniendo en cuenta al mismo tiempo el clínker con las mejores propiedades.

Para garantizar una calidad constante y la eficacia del proceso de clinkerización, es necesario homogeneizar el material molido. Para ello se utilizan silos de homogeneización. El producto final, que es un polvo fino, debe tener una composición química constante (ASOCEM, 2016).

**Figura 4.** *Molino de prensa de rodillos*



**Fuente:** *http://heavy-plants.com/1-5-1-cement-raw-material-grinding-mill.html*

**Figura 5.** *Silo de homogenización*



**Fuente:** *https://es.made-in-china.com/co_jsntup/product*

#### 2.2.3.5. Clinkerización o Piroproceso

La materia prima en conjunto (harina cruda) es transportada por un mecanismo neumático y proporcionada correctamente a un intercambiador de calor, mediante la suspensión de gases de diversas fases, en la parte baja del cual se ubica un mecanismo de precalcinación; se utilizan flujos en contracorriente para elevar la temperatura de la harina a 870°C antes de que entre en el horno. Los gases calentados del horno ascienden, mientras que la harina desciende. A continuación, la harina se traslada al horno rotatorio, donde eleva su temperatura a 1450°C, razón por la cual se convierte la harina cruda en clínker (ASOCEM, 2016).

Después de salir del horno, el material rápidamente se enfría a través de enfriadores de parrilla, que lo exponen al aire secundario, un flujo de aire frío que disminuye la temperatura rápidamente del clínker a 120 C°.

Como resultado de las reacciones se forman los silicatos tricálcicos y dicálcicos, comúnmente llamados alita y belita respectivamente. Estos silicatos se encuentran inmersos en una fase compuesta por aluminato tricálcico, 3CaO.Al2O3, y una fase de ferroaluminato tetracálcico, 4CaO-Al2O3-Fe2O3, constituyendo esta última la fase líquida del clínker..

**Figura 6.** *Torre de precalentamiento y horno rotatorio*



**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 1.** *Transformaciones químicas en la cocción del crudo*

| PUNTO DEL PROCESO | T°C | PROCESO | TRANSFORMACIONES QUIMICAS MAS IMPORTANTES |
|---|---|---|---|
| **TORRE DE INTERCAMBIO DE CALOR** | **<200** | Secado. Eliminación del agua libre. | |
| | **100-400** | Eliminación del agua absorbida | |
| | **400-750** | Descomposición de la arcilla con formación de metacaolinita. | **AL4[(OH)]8*SI4O10]2(AI2O3*SiO2)+4H2O** |
| **HORNO ROTATORIO** | **600-900** | Descomposición de la metacaolinita y otros componentes con formación de mezcla de óxidos reactivos. | AI2O3*SiO2 AI2O3+2SiO2 |
| | **600-1000** | Descomposición de la caliza con formación de **CS Y CA** Y formación de **CO2** | CaCO3 CaO + **CO2** 3CaO+2SiO2 + AI2O3 **2(CaO*SiO2)+CaO*AI2O3** |
| | **800-1300** | Fijación de la cal por cs (silicato cálcico) con formación de **A4AF** (aluminoferrito tetracalcico) y **CyA** (silicato tricalcico) | $CaO.2SiO_2$+CaO → $2CaO.SiO_2$ $2CaO+SiO_2$ → $2CaO.SiO_2$ CaO.AI2O3 +2CaO → **3CaO.AI2O3** CaO.AI2O3+ 3CaO+Fe2O3 → **4CaO.AI2O3.Fe2O3** |
| | **1250-1450** | Nueva fijación de cal por **C2S** (silicato bicalcico) con formación de **C3S** en presencia de fase liquida. | 2CaO*SiO2 +CaO **3CaO*SiO2** |

**Fuente:** *Revista técnica (Cemento Hormigón, 2005)*

#### 2.2.3.6. Finura de cemento

El material granulado clínker se procesa hasta llegar a una finura específica para el tipo de cemento en molinos de bolas o en algunos casos prensas de rodillos, luego se mezcla con yeso y otros componentes dependiendo del tipo de cemento que se planea producir (ya dosificados).

Las adiciones proporcionan características que potencian sus atributos y disminuyen las emisiones de CO2 al entorno; el producto final es el cemento de tonalidad gris.

**Figura 7:** *Molino de bolas de cemento*



**Fuente:** *Elaboración propia.*

#### 2.2.3.7. Guardado y envasado

El cemento se produce bajo rigurosos controles de calidad y se lleva a lugares adecuados para cada tipo de cemento generado, para su correspondiente almacenaje. Finalmente, el procedimiento de fabricación del cemento implica el embalaje del cemento en embaces de bolsa de 42,5 Kg o en grandes volúmenes a fin de realizar su distribución posterior.

**Figura 8:** *Envasado de cemento*



**Fuente:** *https://cetesa.com.co/wp-content/uploads/2021/11/foto5-1-700x350.jpg*

### *2.2.4. Clinker*

Este mineral sintético hidráulicamente activo, que constituye la mayor parte del cemento Portland, se crea calcinando y sinterizando una proporcion adecuada de minerales conteniendo principalmente óxidos de calcio, sílice, hierro y aluminio.

#### 2.2.4.1. Composición química del clinker

El material granulado clinker del cemento portland presenta de manera aproximada los siguientes componentes químicos:

**Tabla 2:** *Composición química del clinker*

| Componentes | Proporción % |
|---|---|
| $SiO_2$ | 16-26% |
| $Al_2O_3$ | 4-8% |
| $Fe_2O_3$ | 2-5% |
| $Mn_2O_3$ | 0-3% |
| $TiO_2$ | 0-0.5% |
| CaO | 58-67% |
| MgO | 1-5% |
| $K2O+Na_2O$ | 0-1% |
| $SO_3$ | 0.1-2.5% |
| $P_2O_3$ | 0-1.5% |
| Perdida al fuego | 0.5-3% |

**Fuente:** *Manual tecnológico del cemento (Walter H. Duda, 1997)*

#### 2.2.4.2. Fases de mineral en clinker

Dado que el clínker Portland es un material sintético compuesto de silicatos cálcicos, aluminatos y ferroaluminatos, como se ha mencionado anteriormente, por lo general se determinan cuatro componentes fundamentales que están presentes en el cemento Portland, los cuales se visualizan en la **tabla 3.**

**Tabla 3:** *Principales compuestos del clinker*

| Nombre del compuesto | Formula | Abreviatura |
|---|---|---|
| Silicato tricálcico | $3CaOSiO_2$ | $C_3S$ |
| Silicato dicálcico | $2CaOSiO_2$ | $C_2S$ |
| Aluminato tricálcico | $3CaOAl_2O_3$ | $C_3A$ |
| Ferroaluminato tetracalcico | $4CaOFe_2O_3Al_2O_3$ | $C_4AF$ |

**Fuente:** *Tecnología del concreto (Neville y Brooks, 1998)*

Los minerales de clínker son etapas mixtas de cristales que albergan los elementos de otras etapas en cantidades reducidas en un enlace de cristal, además de los compuestos químicos residuales que se encuentran tras el clínker pero no logran formar fases independientes. No constituyen una mezcla íntegra los minerales de clinker. Las denominaciones de Alita y Belita se han conservado para las fases primarias del clínker, el silicato tricálcico (C3S) y el silicato bicálcico (C2S), de acuerdo con la asignación de Tornebohmen en 1897. Tornebohmen identificó las fases a nivel microscópico, pero todavía no tenía conocimiento de su composición. Esto se realiza para describir de manera conceptual la distinción entre las mezclas puras y los minerales de Clinker. (Walter H. Duda, 1997).

Tanto la alita como la belita están sumergidos en una fase de ferroaluminato tetracálcico (C4AF), también denominado fase líquida del clínker, y aluminato tricálcico (C3A). Los sulfatos alcalinos (K2SO4 y Na2SO4), la cal libre (CaO) y la periclasa (MgO) son algunas otras fases minoritarias que podrían darse.

Se ha definido de manera general las propiedades de cada fase mineral:

- **Silicato tricálcico (Alita).** El compuesto denominado alita es un silicato

tricálcico (3 CaO.SiO2), que constituye una red cristalina en estado sólido con impurezas que son reemplazos de iones de magnesio, hierro y aluminio. El resultado es un proceso de exotérmica que se distingue por tener un elevado calor de hidratación (120cal/g) y una rapidez en la hidratación, significando que tiene una propiedad de generar altas resistencias mecánicas a edades cortas (Tylor, 2003).

- **Silicato bicálcico (Belita).** Belita es el término utilizado para el silicato dicálcico (2CaOSiO2), que generalmente presenta iones de óxido de aluminio, magnesio y potasio. La belita tiene una velocidad de hidratación lenta y un calor de hidratación bajo (62cal/g). Sin embargo, su aporte en la resistencia mecánica a largo plazo es buena (Tylor, 2003).
- **Ferrito aluminato tetracálcico (Ferrita).** El ferrito aluminato tetracálcico o ferrita (4CaO.Al2O3.FeO3), reacciona de forma muy similar al C3A. La fase ferrita posee un calor de hidratación bajo y no contribuye prácticamente al aporte de resistencias (Taylor, 2003).
- **Aluminato tricálcico (Aluminato).** El aluminato tricálcico (3CaO.Al2O3) en agua tiene un alto calor de hidratación (270cal/g) y una rapidez en la hidratación. Su comportamiento reactivo genera un " fraguado relámpago" cuando no hay sulfato de calcio, debido a que adquiere resistencias mecánicas a edades muy tempranas, lo cual afecta de manera negativa la hidratación del cemento (Taylor, 2003). Cuando hay yeso presente, reacciona formando etringita (C3A.C3Ŝ3H32). Este procedimiento reduce la rapidez de respuesta del C3A.

- **Cal libre y Periclasa.** El clínker incluye elementos menoritarios como la periclasa (MgO) y la cal libre (CaO). Pueden provocar expansiones riesgosas

ya que interactúan con el agua para producir hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio, los cuales demandan más espacio que los óxidos iniciales. Por esta razón, la legislación limita su aplicación.

- **Compuestos de metales alcalinos.** Los carbonatos alcalinos (NaCO3, K2CO3) mediante combustión producen los óxidos alcalinos. En el procedimiento, se convierten en los óxidos alcalinos presentes en el clínker en estado bruto, liberando dióxido de carbono. Considerando que pueden interactuar con ciertos agregados para generar inestabilidad de volumen, como sucede con la etringita, cal libre y óxido de magnesio, su concentración debe ser menor al 1% (Monshi, 1999).

### *2.2.5. Yeso*

El mineral conocido como yeso, aljez o yeso natural está formado por dos moléculas de agua y sulfato de calcio cristalizado (sulfato de calcio dihidratado: CaSO4-2H2O). Debido a que se depositó por la desecación de mares interiores y lagunas, donde se disolvió, es bastante abundante en la naturaleza.

El yeso, a menudo conocido como «yeso cocido», es un producto industrial cuyo compuesto es hemihidrato de sulfato de calcio (CaSO4-½H2O). Se vende en polvo, molido. Debido a su facilidad de tallado, el alabastro, un tipo de yeso, se utiliza con frecuencia para crear recipientes en miniatura, estatuillas y otros objetos.

Los dos tipos de sulfato cálcico que se añaden al cemento son el dihidrato y la anhidrita, o ambos combinados. Al incrementar la temperatura del cemento que contiene yeso durante la conminución o el guardado en silos, puede crearse sin intención previa yeso semihidratado (CaSO4-½H2O) o estuco y provocar un fraguado falso, o una rigidez repentina (Fritz – Keil, 1973).

### *2.2.6. Adiciones*

Los aditivos minerales son componentes, naturales o artificiales, que se añaden a los

cementos para mejorar sus propiedades tanto en estado fresco como en sus cualidades resistentes y duraderas. Al reducir el consumo de energía a lo largo de las distintas fases de producción, la sustitución del clínker Portland por estos materiales aumenta también la eficacia energética de la fabricación de cemento y ofrece ventajas conexas para la preservación de los recursos y del medio ambiente. (Instituto del Cemento Portland Argentino, s.f.).

#### 2.2.6.1. Clasificación de las adiciones minerales

Dependiendo de su procedencia, los aditivos utilizados con el cemento Portland pueden clasificarse como naturales o artificiales. La conminución, la organización y segregación con distinta granulometría de partícula y, en ocasiones, la característica térmica son algunas de las operaciones que pueden ser necesarias cuando se utilizan aditivos naturales.

Los aditivos artificiales se fabrican a partir de restos de otras industrias y pueden necesitar o no un tratamiento posterior antes de poder añadirse al cemento como adiciones minerales (Mehta y Monteiro, 1998). Existen adiciones cementantes (hidráulicamente latentes), puzolánicas (hidráulicamente activas), inertes (hidráulicamente inactivas) y puzolánicas y cementantes. En la **Tabla 4** se visualiza la categorización, la proporción química y la composición mineralógica de algunos de los aditivos minerales más comunes que pueden añadirse al cemento tradicional portland.

| Tipo | Procedencia | Composición química y mineralógica | Características del Material |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| Escoria granulada de alto horno (Adición cementante) | Producto de desecho obtenido de fabricar acero. | Mayormente es vidrio silicatado cuyo contenido principal es el sílice, aluminio, calcio y magnesio | Sin haberse procesado tiene el tamaño de la arena y un contenido de humedad de 10% a 15%. Para usarse se tiene que secar y moler. La textura es rugosa. |
| Ceniza volante con alto contenido de calcio (Adición cementante y puzolánica) | Producto de desecho de estaciones de fuerza motriz que funcionan a base de carbón. | Mayormente es vidrio silicatado cuyo contenido principal es calcio, magnesio álcalis y aluminio. Puede contener una pequeña parte de materia cristalina como: cuarzo, cal, periclasa y C3A. | Las partículas suelen ser esféricas con una superficie lisa y de la misma finura del cemento. |
| Ceniza volante con bajo contenido de calcio (Adición puzolánica) | | Mayoritariamente es vidrio silicatado conteniendo aluminio, hierro y álcalis. Puede poseer una pequeña parte de materia cristalina como: cuarzo, magnetita, sillimanita, hematita y mulita. | |
| Puzolanas naturales Vidrio volcánico. Tobas volcánicas. Tierra diatomeas. (Adición puzolánica ) | Proceden de rocas volcánicas, con excepción de las tierras diatomeas que tienen un origen orgánico. | Se componen por materiales silíceos o silicoaluminosos con un alto contenido de sílice amorfa. Como impurezas pueden contener mica, cuarzo y feldespato. | Para utilizarlo tienen que ser seleccionados, secados, homogeneizados, y pulverizados. Son partículas con una textura rugosa |
| Puzolanas artificiales Arcillas calcinadas Escoria no ferrosa (Adición puzolánica ) | Pueden ser de procedencia natural o como desecho de alguna industria. | La arcilla calcinada es un material silicoaluminoso con estructura amorfa. Como materia cristalina puede contener feldespato y cuarzo. Según su procedencia y al proceso de enfriamiento, pueden contener materia no cristalina y cal variable. | La arcilla se tiene que calcinar para conseguir un material puzolánico. La escoria no ferrosa debe ser adecuadamente enfriada para lograr la mayor cantidad de material vítreo. |
| Humos de sílice Ceniza de cáscara de arroz (Adición puzolánica rápida) | Los humos de sílice son el producto de desecho en la producción de silíceo y aleaciones de ferrosilíceo. La cáscara de arroz es un desecho industrial. | Consisten esencialmente en sílice pura no cristalina. Están constituidas por sílice amorfa. | El humo de sílice es extremadamente fino, cuyas partículas son esféricas con un diámetro de 0.1 µm. La cáscara de arroz debe calcinar de manera controlada para lograr una ceniza con propiedades correctas. Las partículas son celulares con una alta finura. |
| Filler calcáreo Calizas sedimentarias Caliza metamórficas Coralinas y secundarias Creta y Carbonatitas . (Adición hidráulicamente inactiva o inerte) | Proceden de rocas metamórficas o sedimentarias. | Los materiales calcáreos se componen fundamentalmente por carbonato de calcio bajo la forma de calcita y como impurezas, cuarzo, pirita, minerales arcillosos, anhidrita y feldespatos. | Se deben seleccionar adecuadamente para ser usadas como adición. Generalmente tienen una finura de por lo menos de la del cemento. Las partículas tienen formas más o menos biseladas y las calizas más duras suelen aglomerarse. |

**Tabla 4:** *Adiciones minerales al cemento Portland*

**Fuente:** *Concrete: Structure, Properties and Materials (Mehta y Monteiro, 1998)*

- **Adiciones puzolánicas.**

La puzolana corresponde a un material síliceo o síliceo y aluminoso, el cual por sí solo, tienen poco o ningún valor cementante; sin embargo, cuando se divide finamente y se encuentra en humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio y los compuestos cementosos se crean cuando el calcio y el CH producido durante el proceso de hidratación de los silicatos reaccionan químicamente. (Neville, 2013). La ecuación simplificada de la reacción se muestra a continuación.

$$C_3S \text{ ó } C_2S + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + CH$$

$$\text{Puzolana} + CH + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H.$$

Al tratarse de una reacción lenta, el aumento de resistencia se en periodos tardíos, por lo que es necesario prolongar el periodo de curado para que la reacción siga su curso.

- **Filler Calcáreo**

Este material proviene de rocas calcáreas naturales, las que son finamente molidas hasta alcanzar una finura adecuada y similar a la del cemento. Los principales beneficios de su uso son la mejora de la reología de las mezclas en el estado fresco, y los efectos de “dilución”, “filler” y “nucleación”. Al «rellenar» y crear centros de nucleación para la creación de productos de hidratación, estos factores actúan conjuntamente para mejorar las propiedades físicas de las mezclas y permitir una mejor dispersión de las partículas de cemento durante la hidratación. La densidad aparente del filler calcáreo es del orden de 2.6 a 2.8 g/cm3.

Este tipo de adición no presenta actividad puzolánica, aunque su uso puede proporcionar un ligero incremento de la resistencia a edad temprana de las mezclas elaboradas, en función a los efectos mencionados previamente (ICPA, s.f.).

- **Escoria granulada de alto Horno**

Es de procedencia artificial y esta adición deriva por rápido enfriamiento de la roca fundida separa del hierro (ganga) durante la fabricación del arrabio, en que luego se utiliza en la fabricación del acero en altos hornos siderúrgicos. Es de naturaleza vítrea, al hidratarse y en

presencia de un catalizador (alcalisis, calor, hidróxido de calcio o sulfato de calcio) produce la formación de sílice activa (silicatos de calcio hidratados), con similares propiedades hidráulicas a las de cemento, aunque la velocidad de reacción es más lenta.

Los efectos más comunes de la incorporación de la escoria granulada de alto horno son una ligera reducción en el consumo de agua de amasado para ciertas condiciones de trabajabilidad objetivo, mejora significativa en las propiedades durables de los concretos, y la resistencia a largo plazo.

### *2.2.7. Propiedades del Cemento*

#### 2.2.7.1. Propiedades químicas

Como puede observarse, las principales materias primas necesarias para fabricar cemento portland son óxido de hierro, sílice, alúmina y calcio. Aparte de un pequeño residuo de calcio sin combinar, que no ha tenido tiempo necesario para reaccionar, estos compuestos se mezclan en el horno rotatorio para crear una secuencia de resultados cada vez más complicados hasta que alcanzan un estado de equilibrio químico.

Además de las fases primarias enumeradas previamente (Tabla 3), hay algunas fases o compuestos menores, como la cal libre (CaO), la periclasa (MgO), el TiO2, el MnO3, el K2O y el Na2O, que suelen constituir una parte muy pequeña de la masa del cemento. Algunas de ellas, en particular el CaO y el MgO, pueden ser puras, pero, usualmente, las fases carecen de una composición precisa, sobre todo las más significativas, ya que todas están alteradas por soluciones sólidas de óxidos comunes o compuestos menores.

Dado que reaccionan con determinados áridos para producir sustancias químicas que descomponen el hormigón y alteran la rapidez con que adquiere resistencia, dos ingredientes menores de interés son el Na2O y el K2O, también denominados álcalis. Por último, las concentraciones efectivas de los distintos compuestos fluctúan significativamente entre los cementos, y añadiendo proporcionalmente los componentes adecuados se pueden producir

nuevas clases de cemento (ASOCRETO, 2010). En la **tabla 5** se muestra valores representativos de la composición de los distintos tipos de cemento.

**Tabla 5:** *Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos de cemento Portland*

| Tipo de cemento Portland | Composición química en % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $C_3S$ | $C_2S$ | $C_3A$ | $C_4AF$ |
| **Tipo I** | 48 | 27 | 12 | 8 |
| **Tipo II** | 40 | 35 | 5 | 13 |
| **Tipo III** | 62 | 13 | 9 | 8 |
| **Tipo IV** | 25 | 50 | 5 | 12 |
| **Tipo V** | 38 | 37 | 4 | 9 |

**Fuente:** *Tecnología del concreto – Tomo 1(ASOCRETO, 2010)*

- **Hidratación del cemento.** La reacción que convierte el cemento Portland en un aglutinante se produce en una pasta de cemento-agua, que se produce por las reacciones químicas que crean los compuestos. Dicho de otro modo, los silicatos y aluminatos crean productos de hidratación cuando hay agua, que finalmente dan lugar a la pasta de cemento, una masa sólida y dura. (Sanchez, 1991)
- **Calor de Hidratación.** El proceso de hidratación corresponde a un proceso exotérmico que eleva la temperatura del concreto a medida que fragua y se endurece. Esto es crucial para un concreto masivo, porque el material se contrae tras el fraguado e inicia el descenso térmico, que puede causar graves fisuras.

  El calor de hidratación se refiere a la cantidad de calor, expresada en calorías por gramo de cemento deshidratado, tras una hidratación total a una temperatura dada (Sanchez, 1991).
- **Resistencia a los sulfatos.** Como los sulfatos se encuentran en contacto con el concreto endurecido, interactúan con el aluminato tricálcico para generar el sulfoaluminato de calcio, que tiene un volumen mayor que los componentes que lo originan, su presencia es perjudicial para el concreto. Por esta razón, es crucial

controlar también el contenido de C3A. Las tensiones internas que podrían provocar el desmoronamiento del hormigón son el resultado de este aumento de volumen (Sanchez, 1991).

En resumen, la tabla 6 presenta de forma cualitativa las propiedades de los distintos compuestos del cemento.

**Tabla 6:** *Características de los compuestos del cemento*

| Propiedad | $C_3S$ | $C_2S$ | $C_3A$ | $C_4AF$ |
|---|---|---|---|---|
| **Resistencia** | Buena | Buena | Pobre | Pobre |
| **Intensidad de reacción** | media | lenta | rápida | rápida |
| **Calor desarrollado** | medio | pequeño | grande | pequeño |
| **Resistencia a los sulfatos** | buena | buena | Pobre | media |

**Fuente:** *Tecnología del concreto y mortero (Sanchez, 1991)*

### 2.2.7.2. Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades físicas y mecánicas del cemento Pórtland ayudan a complementar sus características químicas y permiten analizar otros aspectos de su comportamiento como material cementante.

- **Peso específico.** Se define como la masa de una cantidad dada dividida por su volumen total. Su valor fluctúa muy poco y suele estar bastante cerca de 3,15 g/cm3 en el cemento Portland normal. Es inferior en el caso de los cementos adicionados, ya que hay menos clínker por tonelada de cemento; su valor suele rondar los 2,90 g/cm3, dependiendo del porcentaje de adiciones (Sanchez, 1991).
- **Finura del cemento.** La finura del cemento, o el tamaño de las partículas de cemento, viene determinada por el proceso de molienda del clínker y el yeso. Dado que está estrechamente relacionada con la velocidad de hidratación, el desarrollo del calor, la contracción y la mejora de la resistencia, la finura es una de las características físicas más significativas del cemento.

La superficie total de las partículas de cemento es un factor decisivo para controlar el ritmo de hidratación, ya que la hidratación de los granos de cemento comienza desde la superficie hacia el interior. Como resultado, el cemento con partículas de alta superficie específica -es decir, partículas con un alto grado de finura- se endurece y desarrolla resistencia más rápidamente (Neville, 1999).

- **Sanidad.** La capacidad de una pasta endurecida para mantener su volumen tras el fraguado se denomina sanidad o estabilidad. Un exceso de cal libre o magnesia provoca una expansión destructiva retardada o una sanidad deficiente. El contenido de magnesia (periclasa) y la expansión en la prueba de autoclave están limitados en casi todos los requisitos del cemento Portland. (Kosmatka y Paranese, 1992).
- **Consistencia.** La movilidad o fluidez relativa de una pasta o mortero de cemento recién combinado se denomina consistencia. En la prueba del cemento, los morteros se mezclan para alcanzar un vínculo agua-cemento especificada o una cierta fluidez dentro de un intervalo dado, mientras que se preparan pastas de consistencia típica definida por una penetración de aguja vicat de 10 +/- 1 mm. Según la norma ASTM C 230, para determinar la fluidez se utiliza una meza de fluidez. Los contenidos de agua de las pastas y morteros, que se utilizarán en ensayos posteriores, se controlan utilizando las técnicas de consistencia normal y fluidez, respectivamente. Ambos permiten compara distintas recetas con la misma penetración o fluidez (Kosmatka y Paranese, 1992).
- **Tiempo de fraguado.** El concepto se emplea para referirse al cambio del estado plástico al endurecido de una pasta de cemento, a pesar que durante el fraguado la pasta necesita de alguna resistencia, para efectos prácticos es útil que se pueda hacer una distinción entre el fraguado del endurecimiento, ya que este

último hace referencia al aumento de resistencia de una pasta de cemento fraguado (Sanchez, 1991).

- **Falso fraguado.** El término «falso fraguado» se refiere al endurecimiento temprano e inusual del cemento que tiene lugar en los minutos iniciales tras la mezcla con agua. A diferencia del fraguado instantáneo, no emite una cantidad significativa de calor, y si la pasta de cemento se vuelve a combinar sin agua, se restablecen su fraguado y fluidez típicos sin comprometer la resistencia (Sanchez, 1991).
- **Resistencia mecánica.** Tal vez la propiedad más obvia del material en términos de necesidades para fines estructurales sea la resistencia mecánica del cemento endurecido. Por lo tanto, no debería sorprender que todos los requisitos del cemento incluyan pruebas de resistencia (Sanchez, 1991).

### *2.2.8. Clasificación de los Cementos*

#### 2.2.8.1. Cementos Portland Ordinarios

- **Portland Tipo I.** Cuando no se necesitan las cualidades únicas de otras clases de cementos, el cemento Tipo I puede utilizarse para cualquier aplicación. Pavimentos, suelos, puentes, tanques, depósitos, tuberías, unidades de mampostería, edificios de hormigón armado y productos prefabricados de hormigón son algunas de sus aplicaciones concretas (Kosmatka et al., 2004).
- **Portland Tipo II.** El cemento tipo II se emplea en situaciones donde se requieren medidas de protección contra el ataque por sulfatos. Puede utilizarse en estructuras comunes o en elementos expuestos a suelos o agua subterránea, donde los niveles de sulfatos sean superiores a la normal, pero no extremadamente alta. El cemento tipo II posee propiedades de moderada resistencia a los sulfatos esto se debe a que tiene no más del 8% de aluminato tricálcico (C3A) (Kosmatka et al., 2004).

- **Portland Tipo III.** El cemento tipo III, proporciona resistencia en edades tempranas, generalmente en 7 días o menos. Este cemento es química y físicamente parecido al cemento tipo I, con la diferencia de que sus partículas se descomponen de manera más fina. Se utiliza cuando se necesita retirar las cimbras (encofrados) lo antes posible o cuando se requiere que la estructura entre rápidamente en funcionamiento (Kosmatka et al., 2004).
- **Portland Tipo IV.** El cemento tipo IV, es empleado en situaciones donde es necesario reducir la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación. En consecuencia, este cemento desarrolla la resistencia a un ritmo más pausado en relación con otras clases de cemento (Kosmatka et al., 2004).
- **Portland tipo V.** El cemento tipo V, es empleado en concretos expuestos a la fuerte acción de sulfatos, especialmente en áreas donde el suelo y el agua subterránea presentan una alta concentración de sulfatos. La elevada resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se debe a su escaso contenido de aluminato tricálcico, que no supera el 5% (Kosmatka et al., 2004).

**Tabla 7:** *Parámetros químicos y físicos de los cementos portland*

| PARAMETROS QUIMICOS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Requisitos** | **Metodo de ensayo aplicable** | **Tipo de cemento** | | | | | |
| | | **I** | **II** | **II(MH)** | **III** | **IV** | **V** |
| Oxido de magnesio, (mgO), max, % | NTP 334.086 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| Trioxido de azufre, (SO3), máx, % | | | | | | | |
| Cuando (C3A)E es 8% o menos | | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.5 | 2.3 | 2.3 |
| Cuando (C3A)E es mas del 8% | | 3.5 | F | F | 4.5 | F | F |
| Perdida por ignicion, max, % | | | | | | | |
| Cuando la adicion calcarea no es un ingrediente | | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 2.5 | 3.0 |
| Cuando la adicion calcarea es un ingrediente | | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| Residuo insoluble, max. % | | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| **PARAMETROS FISICOS** | | | | | | | |
| **Requisitos** | **Metodo de ensayo aplicable** | **Tipo de cemento** | | | | | |
| | | **I** | **II** | **II(MH)** | **III** | **IV** | **V** |
| Contenido de aire del mortero volumen %: | NTP | | | | | | |
| Máx | 334.048 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Min | | - | - | - | - | - | - |
| Finura, Superficie Especifica, (m2/kg) | | | | | | | |
| Ensayo de Permeabilidad al aire | NTP | | | | | | |
| Min | 334.002 | 260 | 260 | 260 | - | 260 | 260 |
| Máx | | - | - | 430 | - | 430 | - |
| Expansión en autoclave, Max., % | NTP 334.004 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| Resistencia, no menor que los valores mostrados pa | NTP | | | | | | |
| las edades indicadas a continuacion : | 334.051 | | | | | | |
| Resistencia a la compresion, Mpa (psi) | | | | | | | |
| 1 día | | - | - | - | 12.0 | - | - |
| | | | | | (1740) | | |
| 3 días | | 12.0 | 10.0 | 10.0 | 24.0 | - | 8.0 |
| | | (1740) | (1450) | (1450) | (3480) | | (1160) |
| 7 días | | 19.0 | 17.0 | 17.0 | - | 7.0 | 15.0 |
| | | (2760) | (2470) | (2470) | | (1020) | (2180) |
| 28 días | | - | - | - | - | 17.0 | 21.0 |
| | | | | | | (2470) | (3050) |
| Tiempo de fraguado: | NTP | | | | | | |
| Ensayo de Vicat, minutos | 334.006 | | | | | | |
| Tiempo de fraguado: no menor que: | | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Tiempo de fraguado: no mayor que: | | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 |

**Fuente:** *INACAL-Norma técnica peruana (NTP 334:009, 2020)*

### 2.2.8.2. Cementos Hidráulicos Adicionados

Los cementos añadidos se elaboran mediante la molienda uniforme y conjunta o la combinación de dos o más clases de materiales finos. Los materiales principales utilizados incluyen cemento Portland, ceniza volante, escoria granulada de alto horno, humo de sílice,

arcilla calcinada, otras puzolanas, cal hidratada y combinaciones premezcladas de estos materiales (Kosmatka et al., 2004).

- **Cemento Hidráulico Adicionado Tipo IS.** Entre el 25% y el 70% de la masa de cemento se compone de escoria de alto horno (Kosmatka et al., 2004).
- **Cemento Hidráulico Adicionado Tipo IP.** El tipo P se utiliza en estructuras que no requieren grandes resistencias iniciales, mientras que el tipo IP puede emplearse para la construcción en general. Estos cementos se producen mezclando cemento portland o cemento de alto horno con puzolana, moliendo clinker de cemento portland con una puzolana adecuada, o combinando ambos procesos. El contenido de puzolana de estos cementos está entre 15% y 40% de la masa del cemento (Kosmatka et al., 2004).
- **Cemento Hidráulico Adicionado Tipo I(PM).** Los cementos portland modificados con puzolana de tipo I (PM) se utilizan en la construcción de hormigón normal. Para crear el cemento se combinan una puzolana fina y cemento portland o cemento portland de alto horno (Kosmatka et al., 2004).
- **Cemento Hidráulico Adicionado Tipo IL.** Este tipo de cemento es una mezcla binaria entre cemento portland y adición calcárea en una relación de 90 % de portland y 10 % de material calcáreo (NTP 334.090, 2020).
- **Cemento Hidráulico Adicionado Tipo ICo.** Es un cemento Pórtland que se produce por la pulverización combinada de clinker Pórtland, materias calizas y/o inertes hasta un máximo de 30 % (NTP 334.090, 2020).

**Tabla 8:** *Parámetros para los cementos adicionados*

| PARAMETROS FISICOS PARA CEMENTOS ADICIONADOS | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo de cemento** | **Metodo de ensayo aplicable** | **IL, IP, IS(<70), IT(S<70), I(PM), Ico** | **IS(≥70), IT(S≥70)** |
| Finura | NTP 334.002/ NTP 334.045 | A | A |
| Densidad | NTP 334.005 | A | A |
| Expansion en autoclave, max, % | NTP 334.004 | 0.8 | 0.8 |
| Contracción en autoclave, max, % | NTP 334.004 | 0.2 | 0.2 |
| Tiempo de fraguado inicial, ensayo Vic | NTP 334.006 | | |
| Fraguado, minutos, no menos que | | 45 | 45 |
| Fraguado, horas, no mas que | | 7 | 7 |
| Contenido de aire del mortero, máx, %volumen | NTP 334.048 | 12 | 12 |
| Resistencia a la compresión, mín., | NTP 334.051 | | |
| Mpa (psi) | | | |
| 3 dias | | 13.0 (1890) | --- |
| 7 dias | | 20.0 (2900) | 5.0 (720) |
| 28 dias | | 25.0 (3620) | 11.0 (1600) |

**Fuente:** *INACAL-Norma técnica peruana (NTP 334:090, 2020)*

#### 2.2.8.3. Cementos Hidráulicos según su requisito de desempeño

- **Tipo GU.** El cemento de uso general tipo GU es apropiado para cualquier uso en las que no se requieran las características particulares de otros tipos de cemento. Su utilización en concreto abarca pisos, pavimentos, edificios de concreto armado, puentes, tuberías, productos de concreto prefabricado y otros usos donde se emplea el cemento tipo I (Kosmatka et al., 2004).
- **Tipo HE.** El cemento tipo HE ofrece resistencia alta en edades tempranas, generalmente en menos de 7 días. Este cemento se utiliza de manera similar al cemento Portland tipo III (Kosmatka et al., 2004).
- **Tipo MS**. En los sistemas de drenaje en los que los niveles de sulfato en las aguas subterráneas superan lo habitual pero no son graves, el cemento tipo MS se utiliza cuando la protección contra el ataque moderado de sulfato es crucial. La aplicación

de este cemento es idéntica a la del cemento portland de tipo II. (Kosmatka et al., 2004).

- **Tipo HS.** El cemento tipo HS se emplea en concreto expuesto a la fuerte acción de los sulfatos, especialmente en zonas donde el suelo o el agua subterránea presentan concentraciones altas de sulfatos. Su uso es similar al del cemento Portland tipo V (Kosmatka et al., 2004).
- **Tipo MH.** El cemento tipo MH se utiliza en situaciones donde el hormigón requiere un calor moderado de hidratación y es necesario regular el incremento de la temperatura. Su uso es similar al del cemento Portland de moderado calor tipo II (Kosmatka et al., 2004).
- **Tipo LH.** Cuando la velocidad y la cantidad de calor producido por la hidratación deben mantenerse al mínimo, se utiliza el cemento tipo LH. La velocidad a la que este cemento gana resistencia es más lenta que la de otros cementos. Cuando las estructuras de hormigón en masa necesitan limitar el ascenso de temperatura debido al calor producido durante el endurecimiento, se utiliza el cemento tipo LH. La aplicación de este cemento es idéntica a la del cemento portland de tipo IV (Kosmatka et al., 2004).

**Tabla 9:** *Parámetros para los cementos hidráulicos*

| PARAMETROS FISICOS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tipo de cemento** | **Método de ensayo aplicable** | **GU** | **HE** | **MS** | **HS** | **MH** | **LH** |
| Finura | NTP 334.002 | A | A | A | A | A | A |
| | NTP 334.045 | | | | | | |
| Expansión en autoclave, Max., % | NTP 334.004 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat B | NTP 334.006 | | | | | | |
| Inicial, no menor que, minutos | | 45.0 | 45.0 | 45.0 | 45.0 | 45.0 | 45.0 |
| Inicial, no mayor que, minutos | | 420.0 | 420.0 | 420.0 | 420.0 | 420.0 | 420.0 |
| Contenido de aire del mortero, en volumen máx, % | NTP 334.048 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 |
| Resistencia a la compresion, min., MPa (psi)D | NTP 334.051 | | | | | | |
| 1 día | | --- | 12.0 (1740) | --- | --- | --- | --- |
| 3 días | | 13.0 (1890) | 24.0 (3480) | 11.0 (1600) | 11.0 (1600) | 5.0 (725) | --- |
| 7 días | | 20.0 (2900) | --- | 18.0 (2610) | 18.0 (2610) | 11.0 (1600) | 11.0 (1600) |
| 28 días | | 28.0 (4060) | --- | --- | 25.0 (3620) | --- | 21.0 (3050) |
| Calor de hidratación | NTP 334.171 | | | | | | |
| 3 días, máx, kJ/kg (cal/g) | | --- | --- | --- | --- | 335 (80) | 200 (50) |
| 7 días, máx, kJ/kg (cal/g) | | --- | --- | --- | --- | --- | 225 (55) |
| Expansión de la barra de mortero | NTP 334.093 | | | | | | |
| 14 días, máx, % | | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |
| Expansión por sulfato (Resistencia a los sulfatos)E | NTP 334.094 | | | | | | |
| 6 meses, máx, % | | --- | --- | 0.10 | 0.05 | --- | --- |
| 1 año, máx, % | | --- | --- | --- | 0.10 | --- | --- |

**Fuente:** *INACAL-Norma técnica peruana (NTP 334:090, 2020)*

## 2.3. Definición de términos

- **Clinker**. Se refiere al resultado de las reacciones físicas y químicas de los componentes calcáreos y arcillosos presentes en los residuos que pasan por un proceso de clinkerización en los hornos de las plantas de cemento a temperaturas de hasta 1450 °C.
- **Yeso.** Hace referencia a un producto que se elabora usando un mineral natural conocido como yeso o aljez (sulfato de calcio dihidratado: $CaSO4·2H2O$), a través de la deshidratación. El yeso, se suele añadir al clinker para controlar el fraguado.
- **Adiciones.** Son materiales que pueden tener un origen artificial o natural, al ser incorporado en la molienda de cementos permite mejorar tecnológicamente su desempeño, ya sea en su estado fresco como en sus propiedades durables y resistentes.
- **Caliza.** Es la roca sedimentaria que se forma por la precipitación del Carbonato Cálcico ($CaCO3$) Es considerada caliza o material calcáreo cuando tiene una concentración de $CaCO3$ mayor al 75%.
- **Fraguado.** Procedimiento físico del mortero o del concreto donde la mezcla pierde su plasticidad para pasar al estado endurecido.
- **Puzolana.** La puzolana natural corresponde a un mineral silíceo formado durante las erupciones volcánicas de lava basáltica. Contiene alúmina, sílice, óxido de hierro, cal y óxido de magnesio. La puzolana se usa como adición cementante en la industria de cemento y construcción.
- **Sanidad.** Es la propiedad física del cemento en mantener estable su volumen después de que sus componentes se hayan hidratado y fraguado.

# III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

## 3.1. Hipótesis

### *3.1.1. Hipótesis General*

Las nuevas formulaciones de cemento hidráulico tipo GU presentarán propiedades físicas y químicas similares o superiores a las del cemento Portland tipo I, lo que las hace adecuadas para su uso en construcciones estructurales.

### *3.1.2. Hipótesis Específicas*

- El cemento hidráulico tipo GU tendrá propiedades químicas y físicas similares al cemento portland tipo I.
- La resistencia a la compresión de las nuevas formulaciones de cemento hidráulico tipo GU es igual o superior a la del cemento Portland tipo I.
- La incorporación de adiciones en el cemento hidráulico tipo GU mejorará la durabilidad, impermeabilidad, resistencia a los sulfatos en comparación al cemento portland tipo I.

## 3.2. Variables

- **Variables Independientes**

Contenido de adiciones en base seca en el cemento hidráulico tipo GU:

  - (3 % puzolana, 20 % caliza)
  - (4% puzolana, 25 % caliza)
  - (6 % puzolana, 27 % caliza)
  - (8 % puzolana, 20 % caliza)

- **Variable Dependiente**
  - Desempeño del cemento hidráulico tipo GU.

# IV. CAPITULO 4: METODOLOGIA EXPERIMENTAL

## 4.1. Área de estudio

Las pruebas físicas y químicas se desarrollaron en un laboratorio de control de calidad de una planta cementera, Lima-Perú.

## 4.2. Metodología de la Investigación

### *4.2.1. Nivel de Investigación*

#### 4.2.1.1. Investigación explicativa

Busca explicar la influencia de las nuevas formulaciones como variable independiente en el desempeño del cemento Hidráulico tipo GU.

#### 4.2.1.2. Investigación correlacional

Busca determinar un grado de asociación entre las variables de nuevas formulaciones y el desempeño del cemento Hidráulico tipo GU. Para ello se mide las variables y se estima la correlacional con la prueba de hipótesis.

## 4.3. Diseño de Investigación

Este estudio será de tipo experimental y tendrá un enfoque cuantitativo, puesto que se evaluará las propiedades físicas y químicas del cemento Portland tipo I y el cemento hidráulico tipo GU, donde el análisis incluirá utilización de métodos y gráficos estadísticos para determinar la confiabilidad de los resultados.

## 4.4. Muestra

Se realizaron por triplicado cuatro experimentos, cambiando las diferentes dosificaciones de adiciones (3 % puzolana, 20 % caliza), (4% puzolana, 25 % caliza), (6 % puzolana, 27 % caliza) y (8 % puzolana, 20 % caliza) en el cemento Hidráulico tipo GU, tal como se muestra en la **Tabla 10.**

**Tabla 10:** *Nuevas formulaciones para el cemento hidráulico tipo GU.*

| | CLINKER | YESO | CALIZA | PUZOLANA |
|---|---|---|---|---|
| **RECETA 1** | 71% | 6% | 20% | 3% |
| **RECETA 2** | 65% | 6% | 25% | 4% |
| **RECETA 3** | 61% | 6% | 27% | 6% |
| **RECETA 4** | 66% | 6% | 20% | 8% |

**Fuente:** *Elaboración propia*

## 4.5. Procedimiento Experimental

Esta investigación nos permite conocer las propiedades físicas y químicas (superficie específica, expansión al agua 14 días, resistencia a la compresión, expansión en autoclave, expansión por sulfatos y tiempo de fraguado) de la nueva formulación de cemento Hidráulico tipo GU con especificaciones de la NTP 334.082: 2020, a diferencia de las de un cemento Portland Tipo 1. Vale aclarar con el mismo yeso, clinker, caliza y puzolana a distintos porcentajes (3 % puzolana, 20 % caliza), (4% puzolana, 25 % caliza), (6 % puzolana, 27 % caliza) y (8 % puzolana, 20 % caliza) en el cemento Hidráulico tipo GU.

### *4.5.1. Recolección de muestras*

Las muestras fueron recolectadas de las canchas de materias primas de la empresa cementera donde se realizó los ensayos correspondientes.

### *4.5.2. Secado*

El material inicial se mantuvo en una estufa por 24 horas para lograr su sequedad y así poder continuar con el siguiente proceso de cuarteo. Este se realizó a temperaturas de 110 °C para la caliza y puzolana; para el yeso a 45 °C.

**Figura 9:** *Estufas para secado de muestras*




**Fuente:** *Elaboración propia.*

### *4.5.3. Molienda piloto*

Se preparó las muestras con las distintas dosificaciones y se llevó a un molino de Bond para moler por 1 hora.

**Figura 10:** *Molino de Bond*

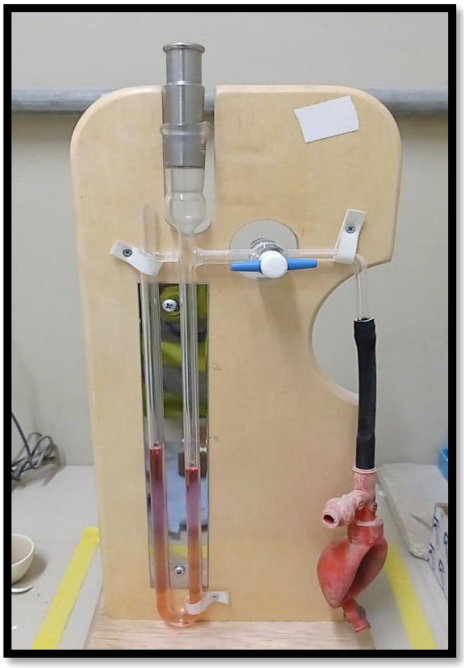



**Fuente:** *Elaboración propia.*

### *4.5.4. Ensayos*

#### 4.5.4.1. Finura expresada por la superficie específica (NTP 334.002:2013)

**Figura 11:** *Aparato Blaine*



**Fuente:** *Elaboración propia.*

- **Procedimiento**

✓ Preparar el tubo de permeabilidad limpiándolo de cualquier posible contaminante (humedad, polvo, residuos de cemento) con una escobilla, así como también limpiar el disco perforado.

✓ Ingresar por la parte superior del tubo de permeabilidad el disco perforado hasta asentar en el reborde inferior de éste (asegúrese que el disco se apoye horizontal y completamente en la parte inferior).

✓ Colocar un disco de papel de filtro (Tipo 1, Grado B, como: Whatman N° 597 ó 589/2) sobre el disco perforado.

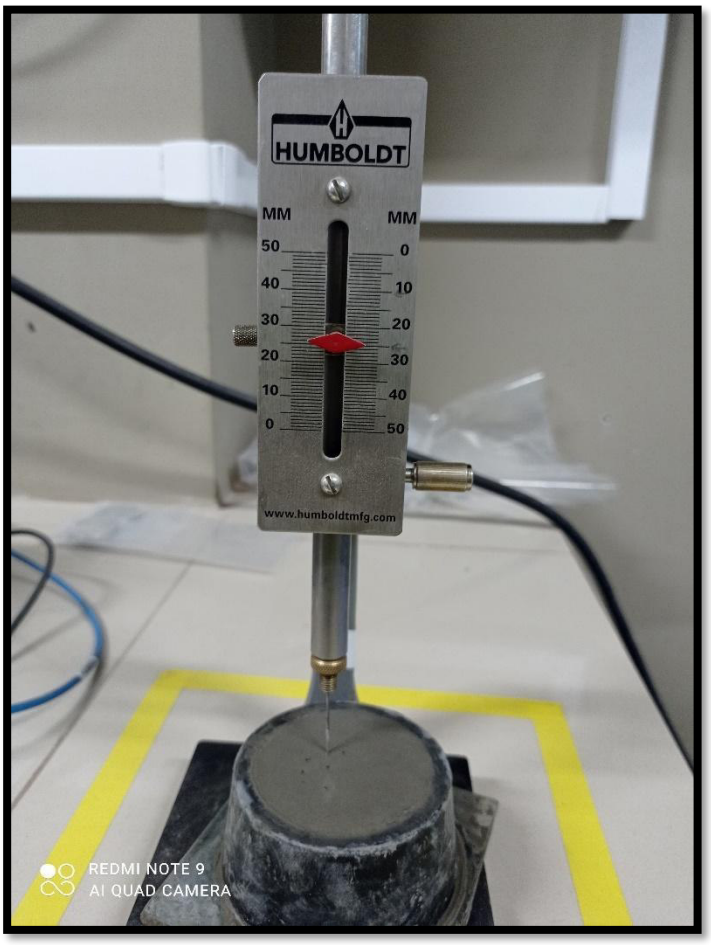
✓ Presionar suavemente y hacia abajo el disco de papel de filtro con la ayuda de una barra cilíndrica de madera de extremo plano (pincel), asegurándose que quede completamente

apoyado sobre el disco perforado.

- ✓ Pesar la cantidad de cemento de acuerdo al tipo de cemento en una balanza analítica con una precisión de 0.0001g.
- ✓ Vaciar el contenido de la pesa muestras al tubo de permeabilidad limpiándolo completamente con la ayuda de un pincel y un embudo, dar ligeros golpes al embudo para dejar caer completamente el contenido dentro del tubo.
- ✓ Retirar el embudo del tubo golpear levemente la celda para nivelar la capa de cemento y poner suavemente el segundo disco de papel filtro evitando que salga la muestra agregada.
- ✓ Comprimir, utilizando el émbolo de acero inoxidable hasta que el fondo de éste pueda asentar en la parte superior de la celda, luego mover el émbolo lentamente a una distancia corta rotándolo alrededor de 90° y volver a comprimir y luego retirarlo suavemente.
- ✓ Poner la celda de permeabilidad en la parte superior del manómetro cerciorándose de tener una conexión hermética (puede usar alguna grasa el cual debe ser aplicado con algún hisopo de algodón o pincel); tener cuidado que no se altere la capa de cemento.
- ✓ Presionar la bombilla de jebe del equipo, girar suavemente la llave y liberar lentamente la presión en la bombilla para elevar el líquido manométrico hasta alcanzar la marca superior más alta, inmediatamente cerrar la llave y liberar la bombilla.
- ✓ Cuando el menisco llegue a la segunda marca, el cronómetro se pone en marcha.
- ✓ Cuando el menisco llegue a la tercera marca (nivel inferior), detener el cronómetro.
- ✓ Anotar el tiempo registrado en segundos, con este resultado se calcula la superficie específica.

#### 4.5.4.2. Tiempo de fraguado (NTP 334.006)

**Figura 12:** *Aguja Vicat*




**Fuente:** *Elaboración propia*

- **Preparación de la pasta de cemento**

Pesar 650 g de cemento y mezclar con la proporción de agua necesaria para alcanzar la consistencia típica de 10+/-1 mm. Utilizar agua destilada siempre que sea posible, especialmente cuando se realicen ensayos interlaboratorios. Usar la mezcla utilizada para la consistencia normal o hacer mezcla nueva para el Método A: Aparato manual Vicat para determinar el tiempo de fraguado, según la preferencia del técnico.

- **Determinar el tiempo de fraguado**
  - ✓ Inmediatamente después de determinada la consistencia normal, mantenga el conjunto conformado por el anillo y la pasta en la cámara de humedad durante 30 minutos sin perturbarla con la cara superficial expuesta al ambiente pero protegida de una eventual caída de gotas de agua (humedad relativa > a 95% ).
  - ✓ Trascurridos este periodo retirar el conjunto de la cámara de humedad y colocar el conjunto conformado por el anillo y la pasta en la superficie de apoyo del aparato Vicat y se centra debajo del vástago que contiene a la aguja Vicat.
  - ✓ Retirar el émbolo usado en la prueba de consistencia normal y colocarlo en la parte superior del vástago, asegurar y ajustar el émbolo con el tornillo de seguridad.
  - ✓ Se hace bajar el vástago hasta que el extremo de la aguja Vicat tome contacto con la superficie de la pasta; se mantiene en esta posición a través de un tornillo ubicado en la parte inferior derecha de la escala (0 a 50 mm). Soltar la aguja Vicat girando el tornillo que se ubica en la parte inferior derecha del equipo.
  - ✓ El período que transcurre desde la preparación de la pasta hasta el primer ingreso de la aguja Vicat a 25 mm es el tiempo de fraguado inicial.
  - ✓ El último fraguado comenzará cuando la aguja no deje marca circular bien marcada.

#### 4.5.4.3. Resistencia a la Compresión (NTP 334.051)

**Figura 13:** *Equipo de rotura*




**Fuente:** *Elaboración propia*

- **Materiales**
  - ✓ Probeta de vidrio
  - ✓ Balanza
  - ✓ Moldes para especímenes
  - ✓ Mezcla, recipiente y paleta plana
  - ✓ Meza y molde de flujo
- **Determinación de Fluidez en Morteros de Cemento tipo I y Adicionados**
  - ✓ Homogenizar la muestra a evaluar.
  - ✓ Para cemento tipo 1 pesar 1060 g de cemento tipo I, 2915 g de arena gradada Ottawa (NTP 334.097) y emplear 519 mL de agua.
  - ✓ Para cementos adicionados pesar 1060 g de cemento adicionado, 2915 g de arena gradada Ottawa (NTP 334.097) y emplear la cantidad de agua necesaria para cumplir con la fluidez normada de 110 +/- 5.

- ✓ Verter el agua al recipiente mezclado de capacidad nominal 4.73 litros del equipo de mezclado, luego agregar el cemento al agua y mezclar el contenido del recipiente durante medio minuto a velocidad lenta (140 +/-5 rpm).
- ✓ Añadir en un tiempo de 30 segundos la totalidad de la arena mientras continúa el mezclado a velocidad lenta. Después se pausa la mezcladora y se cambia a una velocidad media (285 +/- 10rpm) mezclando por 30 segundos.
- ✓ Se pausa la mezcladora y dejar reposar la mezcla por 90 segundos, durante los 15 segundos iniciales de reposo arrastrar el mortero adherido a las paredes hacia el fondo con la espátula. Utilizando un trapo industrial húmedo, tapar el recipiente durante el resto del intervalo de tiempo.
- ✓ Pasado el tiempo de reposo, mezclar durante 1 minuto a velocidad media (285 +/- 10 rpm).
- ✓ Limpiar con cuidado la superficie superior de la mesa de flujo hasta que se encuentre totalmente seca y colocar en ella el molde de flujo (tipo anillo cono trunco) ubicándola exactamente en el centro.
- ✓ Se llena una capa de mortero de aproximadamente 25mm de espesor en el molde y se compacta dando 20 golpes con el apisonador.
- ✓ Seguidamente se llena el envase y se apisona como se especificó en el paso anterior.
- ✓ Emparejar el mortero eliminando el exceso con un pase de espátula o badilejo por la parte superior del molde y nivelarlo al borde superior del molde con una espátula y con un movimiento de aserrado en el borde del mismo.

**Figura 14:** *Muestra compactada para determinación de fluidez*




**Fuente:** *Elaboración propia*

- ✓ Después de 1 minuto de completar el llenado levantar el molde por medio de un movimiento vertical dejando solo el mortero e inmediatamente operar la mesa de flujo desde una altura de 12.7 +/- 0.13 mm aplicando 25 golpes en 15 segundos.
- ✓ Terminado el proceso y con la ayuda de un calibrador se determina la fluidez midiendo el diámetro del mortero deformado por los golpes descritos en el paso anterior.

**Figura 15:** *Fluidez del mortero*




**Fuente:** *Elaboración propia*

- ✓ Se deben tomar 4 lecturas, en los diferentes diámetros que posea el mortero deformado (diámetros o líneas de flujo).
- ✓ La fluidez viene a ser la suma de las 4 lecturas de los diámetros del mortero medidos con el caliper correspondiente.

- **Resistencia a la compresión de morteros de cemento en especímenes cúbicos de 50 mm (2 in) de lado.**
  - ✓ Preparación de mortero: Se vierte el mortero de la prueba de fluidez (véase el punto C) en la mezcladora y, a continuación, se hace funcionar a velocidad media (285 +/- 10 rpm) por 15 segundos. Al final del proceso de mezclado, se extrae el mortero que se ha adherido a la paleta mezcladora y se vierte en el envase.
  - ✓ El llenado de los compartimientos cúbicos del molde se inicia a los 150 seg. Contados desde que se termina de batir el mortero.
  - ✓ Hacer un mínimo de 9 cubos por cada tipo de cemento para el experimento de

resistencia a la compresión.

- ✓ Colocar una capa de mortero de 25mm de espesor en cada compartimiento y compactar dando 32 golpes a cada uno con la ayuda de un apisonador (el tiempo que debe demorar en dar los golpes tiene que ser de 10 segundos). Se utilizan cuatro fases de ocho golpes consecutivos cada una para aplicar estos golpes a la superficie de la muestra. Es importante que los golpes de cada fase sean perpendiculares a los de la anterior.
- ✓ La presión del compactado debe ser suficiente para asegurar un llenado total de los compartimentos de los 4 moldes (12 cubos en total).
- ✓ Seguir con la segunda capa y compactar como se hizo con la primera.
- ✓ Al finalizar la compactación, el mortero debe sobre salir por encima de los bordes superiores de los compartimientos de cada molde.
- ✓ La superficie de los cubos tiene que alinearse con el lado plano del badilejo. Con el badilejo sostenido perpendicularmente, el mortero que destaca en la parte superior del molde se retira cortando a lo largo de la longitud del molde. Utilizando el borde del badilejo, corte el mortero a ras de la superficie superior del molde, moviéndose hacia delante y hacia atrás por toda la longitud del molde.
- ✓ Colocar los moldes con los cubos inmediatamente después del moldeo, en una cámara húmeda de 20 a 24 horas aproximadamente, donde las caras superficiales deben estar expuestas al ambiente, no obstante, deben protegerse contra la eventual caída de gotas de agua (humedad relativa > a 95%).

**Figura 16:** *Cámara de curado para mortero*



**Fuente:** *Elaboración propia*

- ✓ Luego de permanecer 24 horas en la cámara húmeda se procederá a desmoldar los especímenes cúbicos. Si los especímenes son desmoldados antes de las 24 horas, mantenerlos en la cámara húmeda hasta cumplir las 24 horas de edad.

**Figura 17:** *Mortero después de 24 hr de curado*




**Fuente:** *Elaboración propia*

- ✓ Los especímenes que serán ensayados a edades de 3, 7 y 28 días deben sumergirse en una solución saturada de cal apagada o hidróxido de calcio (Ca(OH)2) con 2 a 3g./L de agua en tanques construidos de material no corrosivo.

- ✓ Todos los cubos tienen que probarse dentro de las tolerancias establecidas en la siguiente tabla:

**Tabla 11:** *Tolerancia para rotura de cubos a diferentes edades*

| Edad del cubo | Tolerancia permitida |
|---|---|
| 24 h | ± 1/2 hora |
| 3 dias | ± 1 hora |
| 7 dias | ± 3 horas |
| 28 dias | ± 12 horas |

**Fuente:** *NTP 334.051:2022*

# V. CAPITULO 5: RESULTADOS

## 5.1. Presentación de Resultados

**Tabla 12:** *Tabla de resultados de cemento Hidráulico tipo GU con Receta (1)*

| CEMENTO HIDRAULICO TIPO GU- RECT (1) | | | |
|---|---|---|---|
| **ANALISIS QUIMICOS FRX** | **GU-1** | **GU-2** | **GU-3** |
| P.F. | 9.83 | 9.77 | 9.85 |
| f-CaO | 0.97 | 1.01 | 0.98 |
| SiO2 | 23.15 | 23.10 | 23.05 |
| Al2O3 | 6.25 | 6.28 | 6.15 |
| Fe2O3 | 1.08 | 1.10 | 1.07 |
| CaO | 61.15 | 61.18 | 61.38 |
| MgO | 1.12 | 1.15 | 1.13 |
| Na2O | 0.78 | 0.79 | 0.77 |
| K2O | 0.88 | 0.90 | 0.89 |
| SO3 | 3.25 | 3.27 | 3.27 |
| Cl | 0.002 | 0.003 | 0.003 |
| **ENSAYOS FISICOS** | | | |
| Retenido 325 % | 8.85 | 8.86 | 8.84 |
| Blaine, cm2/gr | 4165 | 4185 | 4194 |
| Densidad (gr/cc) | 2.94 | 2.94 | 2.94 |
| Expansión en Autoclave % | 0.04 | 0.02 | 0.03 |
| Expansión al agua 14 días % | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| Expansión a los sulfatos 14 dias % | 0.06 | 0.07 | 0.07 |
| Consistencia normal mm %* | 28.46 | 28.46 | 28.46 |
| Frag.Inicial, minutos | 138 | 138 | 139 |
| Frag.Final, minutos | 230 | 231 | 233 |
| **RESISTENCIAS A LA COMPRESION (psi)** | | | |
| Relacion A/C | 0.51 | 0.51 | 0.51 |
| Agua Requerida (gr) | 538 | 538 | 538 |
| Fluidez (%) | 106 | 107 | 106 |
| 1 D | 1,250 | 1,240 | 1,250 |
| 3 D | 2,980 | 2,990 | 2,990 |
| 7 D | 3,750 | 3,760 | 3,750 |
| 28 D | 4,750 | 4,730 | 4,740 |
| 40 D | 5,650 | 5,620 | 5,640 |
| 60 D | 6,640 | 6,560 | 6,630 |

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 13:** *Tabla de resultados de cemento hidráulico tipo GU con Receta (2)*

| CEMENTO HIDRAULICO TIPO GU- RECT (2) | | | |
|---|---|---|---|
| **ANALISIS QUIMICOS FRX** | **GU-1** | **GU-2** | **GU-3** |
| P.F. | 10.12 | 10.14 | 10.10 |
| f-CaO | 1.10 | 1.12 | 1.08 |
| SiO2 | 23.28 | 23.23 | 23.25 |
| Al2O3 | 6.68 | 6.69 | 6.72 |
| Fe2O3 | 0.98 | 0.99 | 1.01 |
| CaO | 58.75 | 58.83 | 58.82 |
| MgO | 1.13 | 1.14 | 1.11 |
| Na2O | 1.21 | 0.97 | 0.98 |
| K2O | 1.35 | 1.34 | 1.28 |
| SO3 | 3.24 | 3.25 | 3.23 |
| Cl | 0.002 | 0.002 | 0.003 |
| **ENSAYOS FISICOS** | | | |
| Retenido 325 % | 8.72 | 8.71 | 8.74 |
| Blaine, cm2/gr | 4274 | 4285 | 4269 |
| Densidad (gr/cc) | 2.88 | 2.88 | 2.89 |
| Expansión en Autoclave % | 0.03 | 0.02 | 0.03 |
| Expansión al agua 14 días % | 0.008 | 0.007 | 0.007 |
| Expansión a los sulfatos 14 dias % | 0.05 | 0.06 | 0.05 |
| Consistencia normal mm %* | 29.08 | 29.08 | 29.08 |
| Frag.Inicial, minutos | 141 | 142 | 140 |
| Frag.Final, minutos | 238 | 241 | 239 |
| **RESISTENCIAS A LA COMPRESION (psi)** | | | |
| Relacion A/C | 0.51 | 0.51 | 0.51 |
| Agua Requerida (gr) | 540 | 540 | 540 |
| Fluidez (%) | 105 | 106 | 105 |
| 1 D | 1,080 | 1,090 | 1,070 |
| 3 D | 2,870 | 2,890 | 2,880 |
| 7 D | 3,450 | 3,460 | 3,450 |
| 28 D | 4,520 | 4,530 | 4,520 |
| 40 D | 5,560 | 5,570 | 5,540 |
| 60 D | 6,530 | 6,590 | 6,490 |

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 14:** *Tabla de resultados de cemento hidráulico tipo GU con Receta (3)*

| CEMENTO HIDRAULICO TIPO GU- RECT (3) | | | |
|---|---|---|---|
| **ANALISIS QUIMICOS FRX** | **GU-1** | **GU-2** | **GU-3** |
| P.F. | 10.85 | 10.82 | 10.86 |
| f-CaO | 1.12 | 1.12 | 1.13 |
| SiO2 | 23.35 | 23.45 | 23.56 |
| Al2O3 | 6.71 | 6.75 | 6.82 |
| Fe2O3 | 0.95 | 0.94 | 0.97 |
| CaO | 58.13 | 58.21 | 57.95 |
| MgO | 1.25 | 1.18 | 1.16 |
| Na2O | 1.12 | 1.18 | 1.07 |
| K2O | 1.25 | 1.31 | 1.35 |
| SO3 | 3.22 | 3.21 | 3.23 |
| Cl | 0.002 | 0.002 | 0.003 |
| **ENSAYOS FISICOS** | | | |
| Retenido 325 % | 8.64 | 8.62 | 8.65 |
| Blaine, cm2/gr | 4321 | 4331 | 4310 |
| Densidad (gr/cc) | 2.85 | 2.85 | 2.85 |
| Expansión en Autoclave % | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| Expansión al agua 14 días % | 0.007 | 0.008 | 0.007 |
| Expansión a los sulfatos 14 dias % | 0.04 | 0.03 | 0.04 |
| Consistencia normal mm %* | 29.38 | 29.38 | 29.38 |
| Frag.Inicial, minutos | 149 | 148 | 151 |
| Frag.Final, minutos | 242 | 240 | 244 |
| **RESISTENCIAS A LA COMPRESION (psi)** | | | |
| Relacion A/C | 0.51 | 0.51 | 0.51 |
| Agua Requerida (gr) | 543 | 543 | 543 |
| Fluidez (%) | 106 | 105 | 107 |
| 1 D | 890 | 910 | 880 |
| 3 D | 2,370 | 2,420 | 2,360 |
| 7 D | 3,250 | 3,280 | 3,260 |
| 28 D | 4,130 | 4,150 | 4,140 |
| 40 D | 5,340 | 5,350 | 5,340 |
| 60 D | 6,430 | 6,520 | 6,390 |

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 15:** *Tabla de resultados de cemento hidráulico tipo GU con Receta (4)*

| CEMENTO HIDRAULICO TIPO GU- RECT (4) | | | |
|---|---|---|---|
| **ANALISIS QUIMICOS FRX** | **GU-1** | **GU-2** | **GU-3** |
| P.F. | 9.84 | 9.82 | 9.81 |
| f-CaO | 1.03 | 1.02 | 1.04 |
| SiO2 | 24.12 | 24.25 | 24.18 |
| Al2O3 | 6.76 | 6.74 | 6.73 |
| Fe2O3 | 1.04 | 0.99 | 1.03 |
| CaO | 59.25 | 59.23 | 59.18 |
| MgO | 1.05 | 1.08 | 1.06 |
| Na2O | 0.98 | 1.02 | 1.05 |
| K2O | 1.15 | 1.06 | 1.13 |
| SO3 | 3.25 | 3.25 | 3.26 |
| Cl | 0.002 | 0.002 | 0.003 |
| **ENSAYOS FISICOS** | | | |
| Retenido 325 % | 8.25 | 8.26 | 8.24 |
| Blaine, cm2/gr | 4386 | 4379 | 4395 |
| Densidad (gr/cc) | 2.87 | 2.87 | 2.87 |
| Expansión en Autoclave % | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Expansión al agua 14 días % | 0.006 | 0.005 | 0.005 |
| Expansión a los sulfatos 14 dias % | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| Consistencia normal mm %* | 28.92 | 28.92 | 28.92 |
| Frag.Inicial, minutos | 139 | 141 | 138 |
| Frag.Final, minutos | 235 | 232 | 236 |
| **RESISTENCIAS A LA COMPRESION (psi)** | | | |
| Relacion A/C | 0.51 | 0.51 | 0.51 |
| Agua Requerida (gr) | 540 | 540 | 540 |
| Fluidez (%) | 108 | 107 | 106 |
| 1 D | 1,180 | 1,170 | 1,190 |
| 3 D | 2,860 | 2,840 | 2,870 |
| 7 D | 3,580 | 3,560 | 3,610 |
| 28 D | 4,910 | 4,910 | 4,920 |
| 40 D | 6,120 | 5,990 | 6,140 |
| 60 D | 6,930 | 6,890 | 6,970 |

**Fuente:** *Elaboración propia*

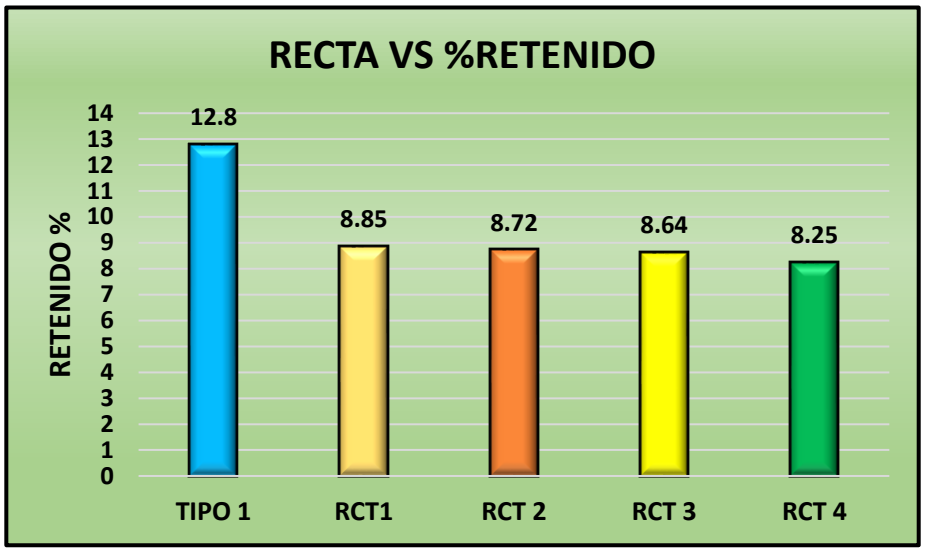
**Tabla 16:** *Resultado promedio de los análisis físicos y químicos de los cementos tipo GU y cemento Portland tipo I.*

| | CEMENTO HIDRAULICO TIPO GU | | | | | CEMENTO PORTLAND TIPO I | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ANALISIS QUIMICOS FRX** | **RECTA-1** | **RECTA-2** | **RECTA-3** | **RECTA-4** | **NTP 334.082** | **CEMENTO TIPO I** | **NTP 334.009** |
| P.F. | 9.82 | 10.12 | 10.84 | 9.82 | - | 3.35 | < 3.5 |
| f-CaO | 0.99 | 1.10 | 1.12 | 1.03 | - | 1.14 | - |
| SiO2 | 23.10 | 23.25 | 23.45 | 24.18 | - | 23.57 | - |
| Al2O3 | 6.23 | 6.70 | 6.76 | 6.74 | - | 5.86 | - |
| Fe2O3 | 1.08 | 0.99 | 0.95 | 1.02 | - | 1.18 | - |
| CaO | 61.24 | 58.80 | 58.10 | 59.22 | - | 62.53 | - |
| MgO | 1.13 | 1.13 | 1.20 | 1.06 | - | 1.21 | < 6 |
| Na2O | 0.78 | 1.05 | 1.12 | 1.02 | - | 0.48 | - |
| K2O | 0.89 | 1.32 | 1.30 | 1.11 | - | 0.82 | - |
| SO3 | 3.26 | 3.24 | 3.22 | 3.25 | - | 3.45 | < 3.5 |
| Cl | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | - | 0.002 | - |
| **ENSAYOS FISICOS** | | | | | | | |
| Retenido 325 % | 8.85 | 8.72 | 8.64 | 8.25 | - | 12.8 | - |
| Blaine, cm2/gr | 4181 | 4276 | 4321 | 4387 | - | 3364 | > 2600 |
| Densidad (gr/cc) | 2.94 | 2.88 | 2.85 | 2.87 | - | 3.12 | - |
| Expansión en Autoclave % | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | < 0.8 | 0.13 | < 0.8 |
| Expansión al agua 14 días % | 0.010 | 0.007 | 0.007 | 0.005 | < 0.02 | 0.016 | - |
| Expansión a los sulfatos 14 dias % | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | - | 0.12 | - |
| Consistencia normal mm %* | 28.46 | 29.08 | 29.38 | 28.92 | - | 26.92 | - |
| Frag.Inicial, minutos | 138 | 141 | 149 | 139 | > 45 | 125 | > 45 |
| Frag.Final, minutos | 231 | 239 | 242 | 234 | < 420 | 212 | < 375 |
| **RESISTENCIAS A LA COMPRESION (psi)** | | | | | | | |
| Relacion A/C | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | - | 0.49 | - |
| Agua Requerida (gr) | 538 | 540 | 543 | 540 | - | 519 | - |
| Fluidez (%) | 106 | 105 | 106 | 107 | - | 105 | - |
| 1 D | 1,250 | 1,080 | 890 | 1,180 | - | 1450 | - |
| 3 D | 2,990 | 2,880 | 2,380 | 2,860 | 1890 | 3230 | 1740 |
| 7 D | 3,750 | 3,450 | 3,260 | 3,580 | 2900 | 4160 | 2760 |
| 28 D | 4,740 | 4,520 | 4,140 | 4,910 | 4060 | 4860 | 4060 |
| 40 D | 5,640 | 5,560 | 5,340 | 6,080 | - | 5850 | - |
| 60 D | 6,610 | 6,540 | 6,450 | 6,930 | - | 6470 | - |

**Fuente:** *Elaboración propia*

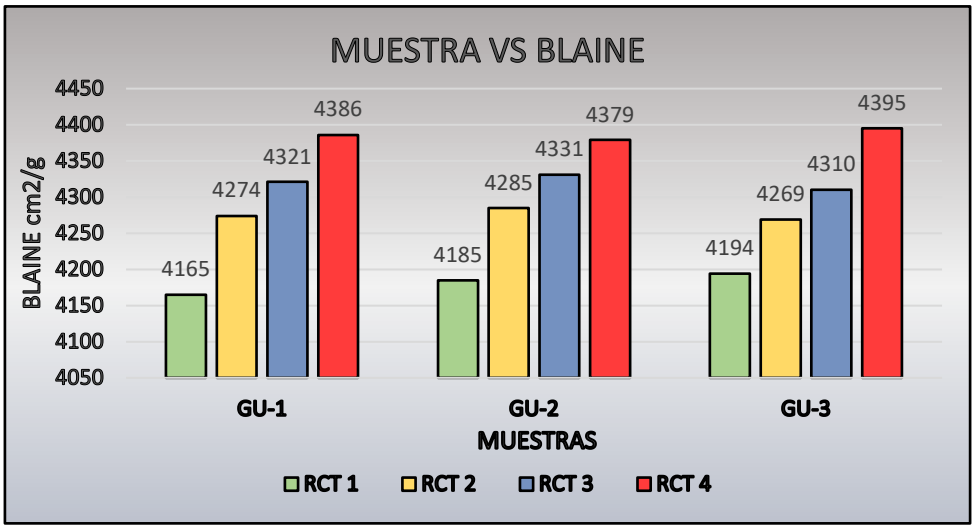
## 5.2. Interpretación grafica de resultados por Variables

**Gráfica 1:** *Comparación de los retenidos promedios de los cementos tipo GU y tipo I*



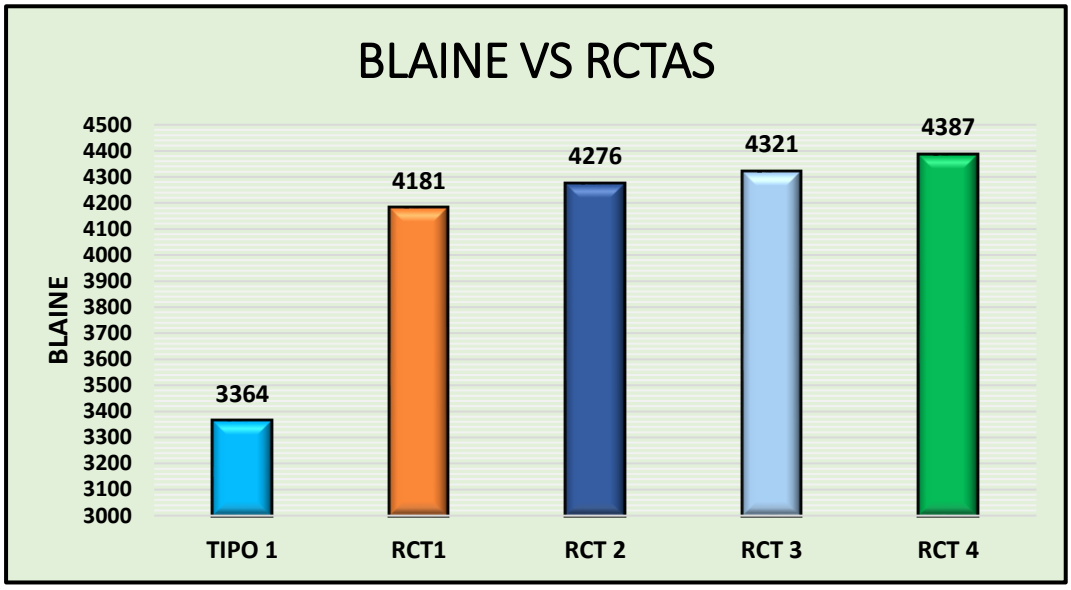

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 2:** *Comparación de la superficie especificas por recetas*



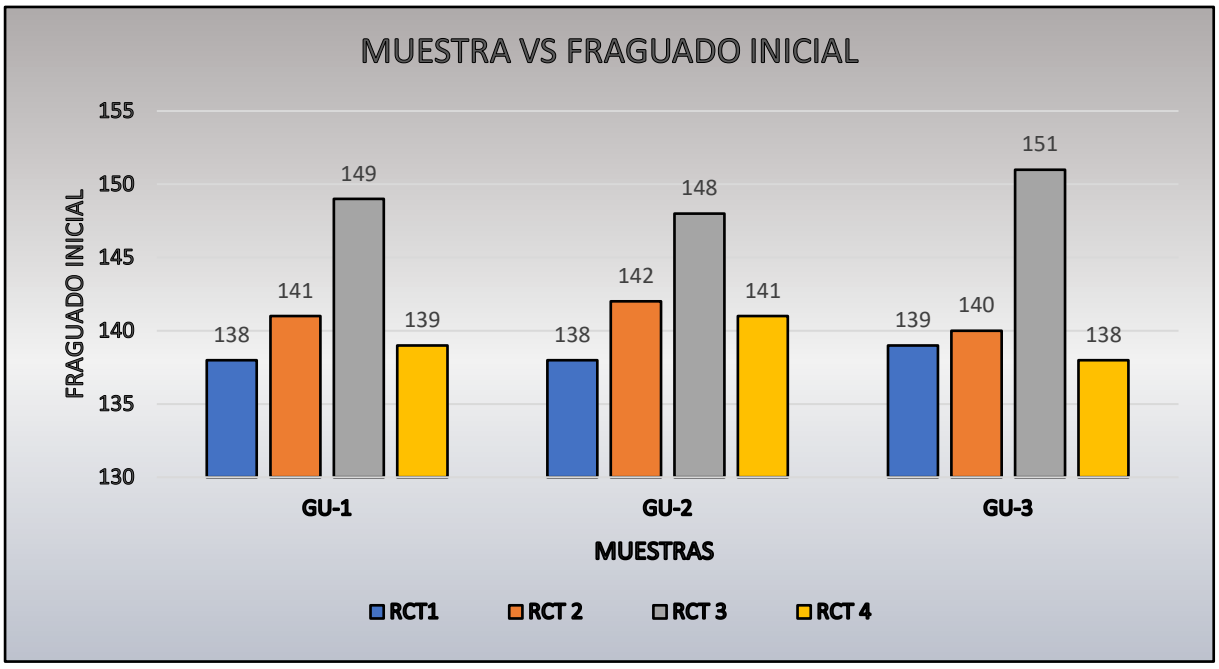

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 3:** *Comparación de Blaine promedio de los cementos tipo GU y tipo I*



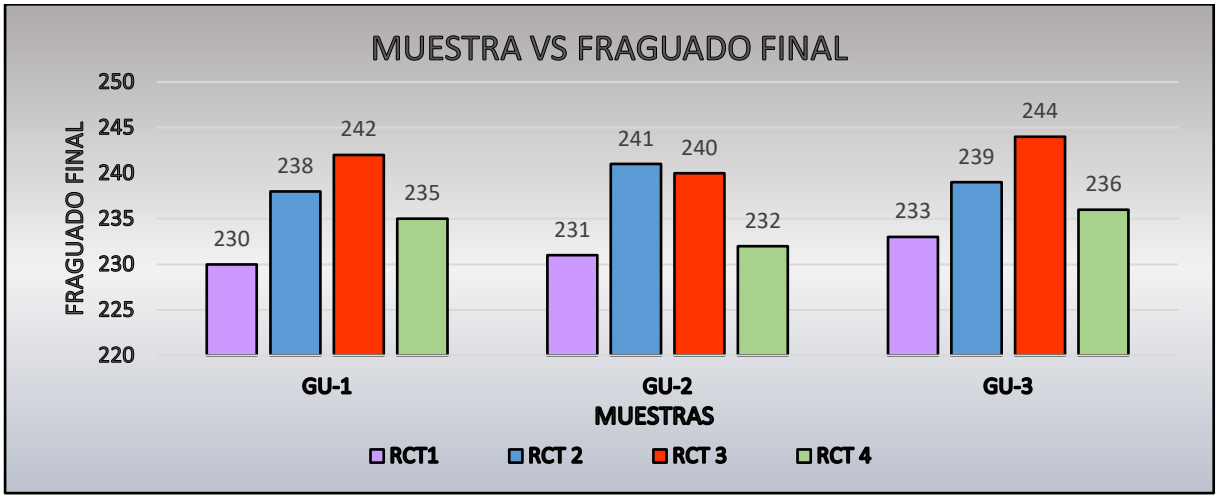

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 4:** *Comparación del fraguado inicial por recetas*



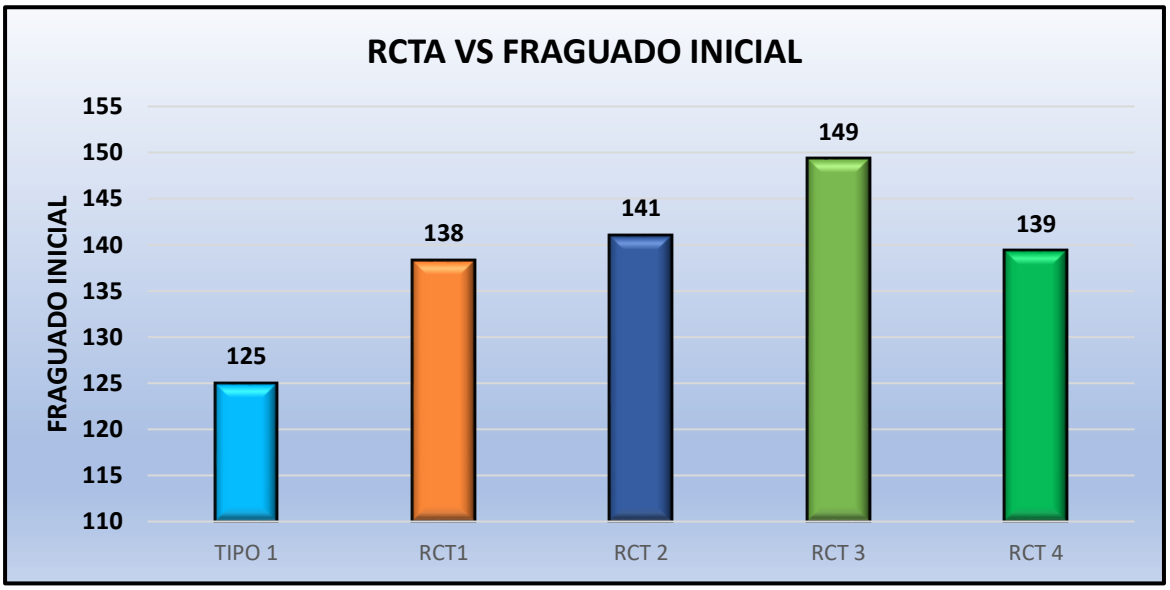

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 5:** *Comparación del fraguado final por recetas*



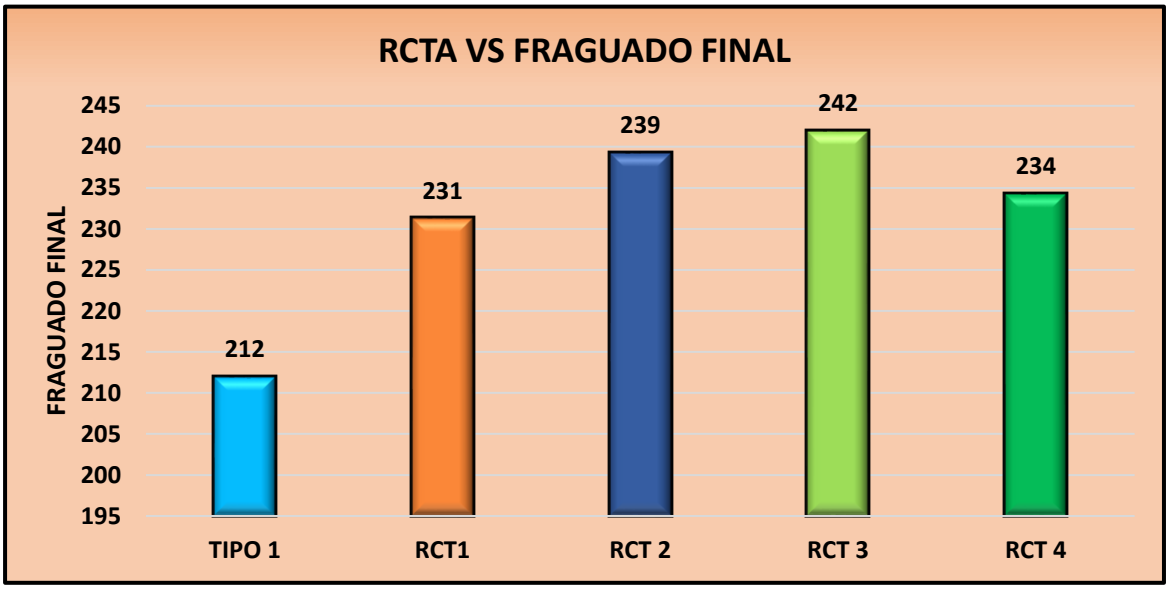

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 6:** *Comparación de fraguado inicial promedio de los cementos tipo GU y tipo I*



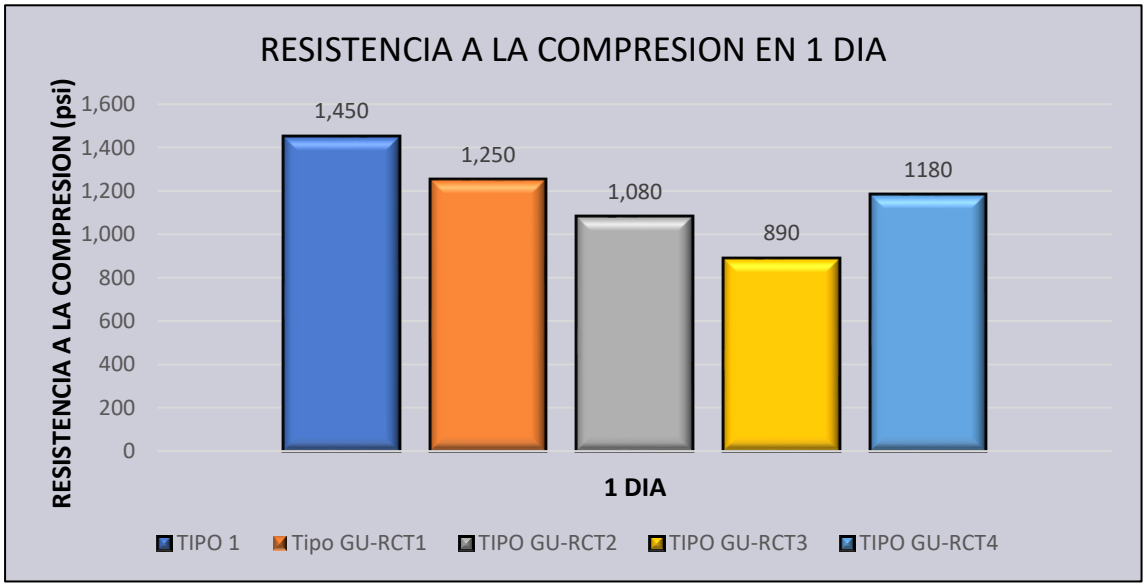

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 7:** *Comparación de fraguado final promedio de los cementos tipo GU y tipo I*



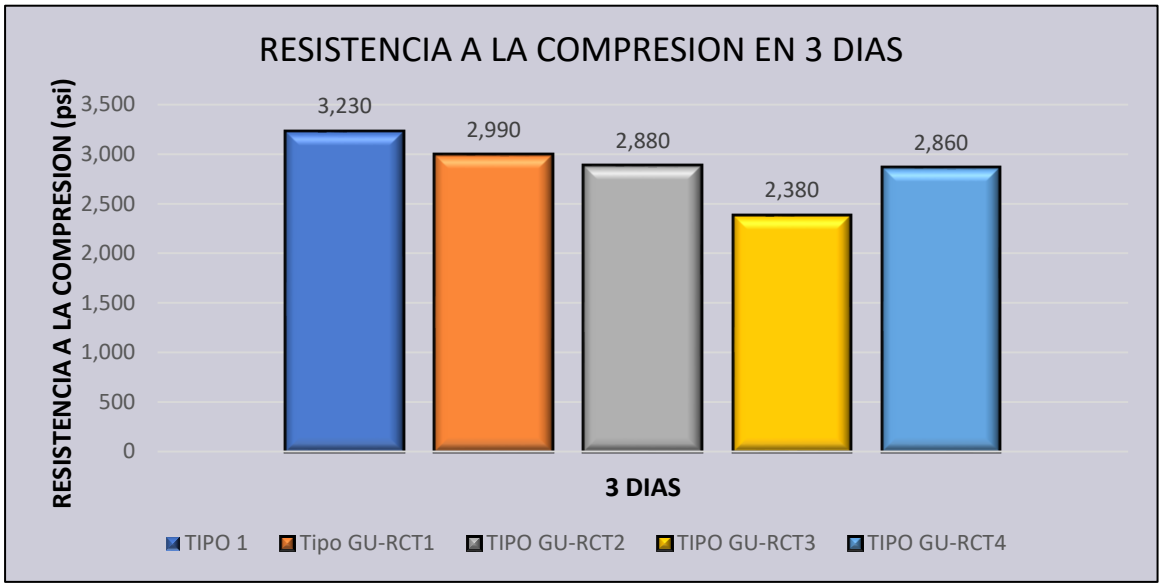

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 8:** *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 1 día de los cementos tipo GU y tipo I*



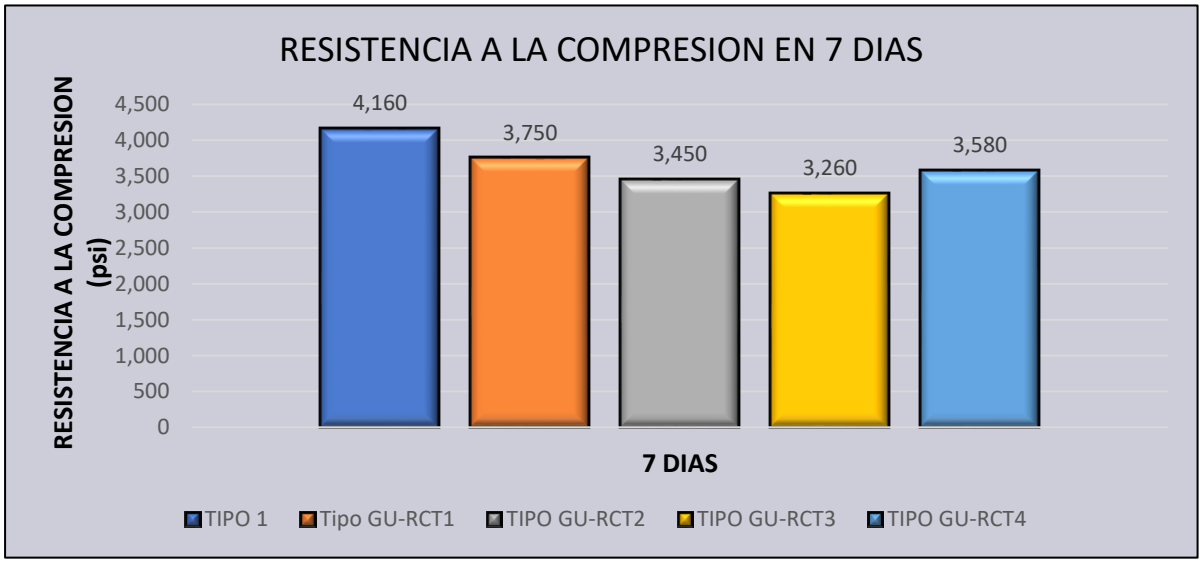

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 9:** *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 3 días de los cementos tipo GU y tipo I.*



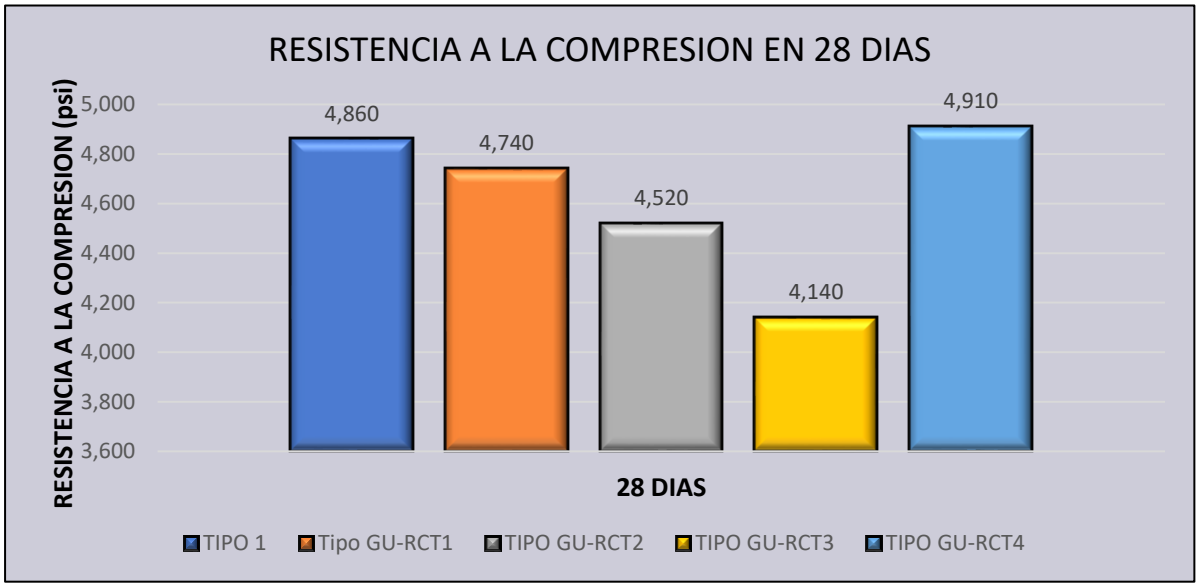

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 10:** *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 7 días de los cementos tipo GU y tipo I.*



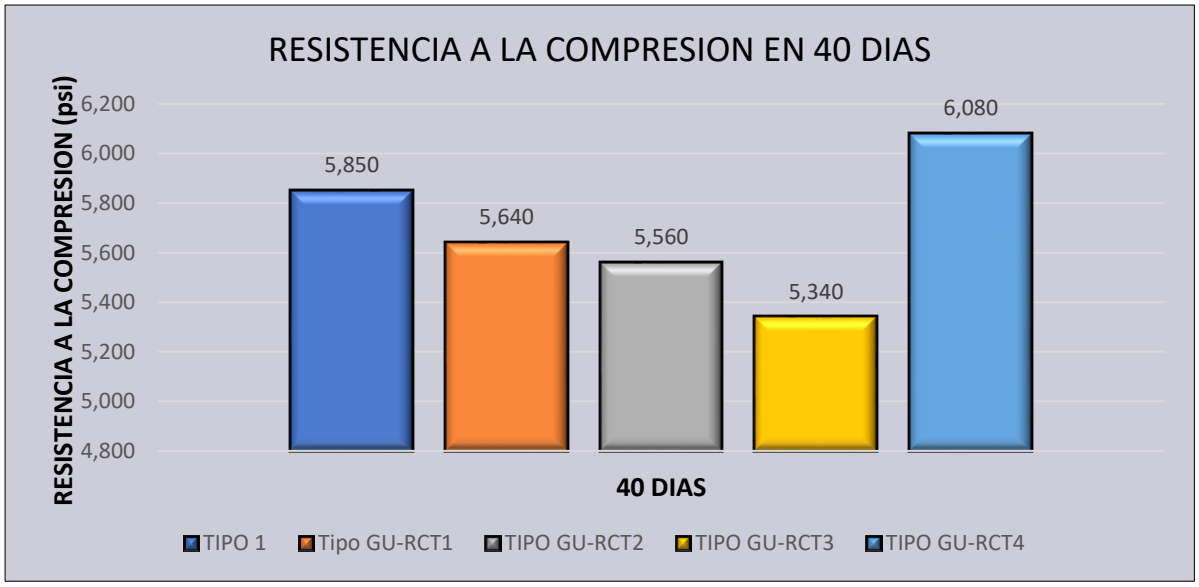

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 11:** *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 28 días de los cementos tipo GU y tipo I*



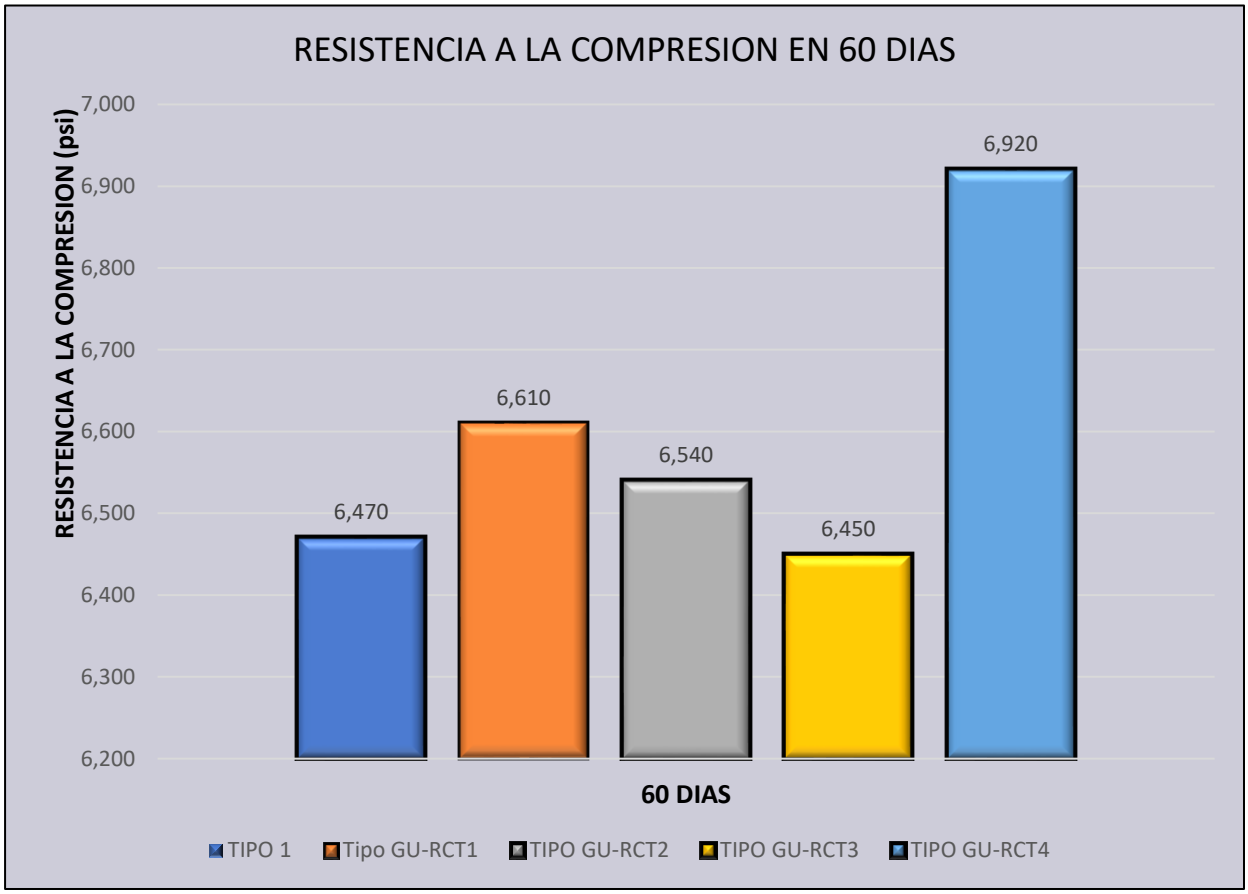

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 12:** *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 40 días de los cementos tipo GU y tipo I*



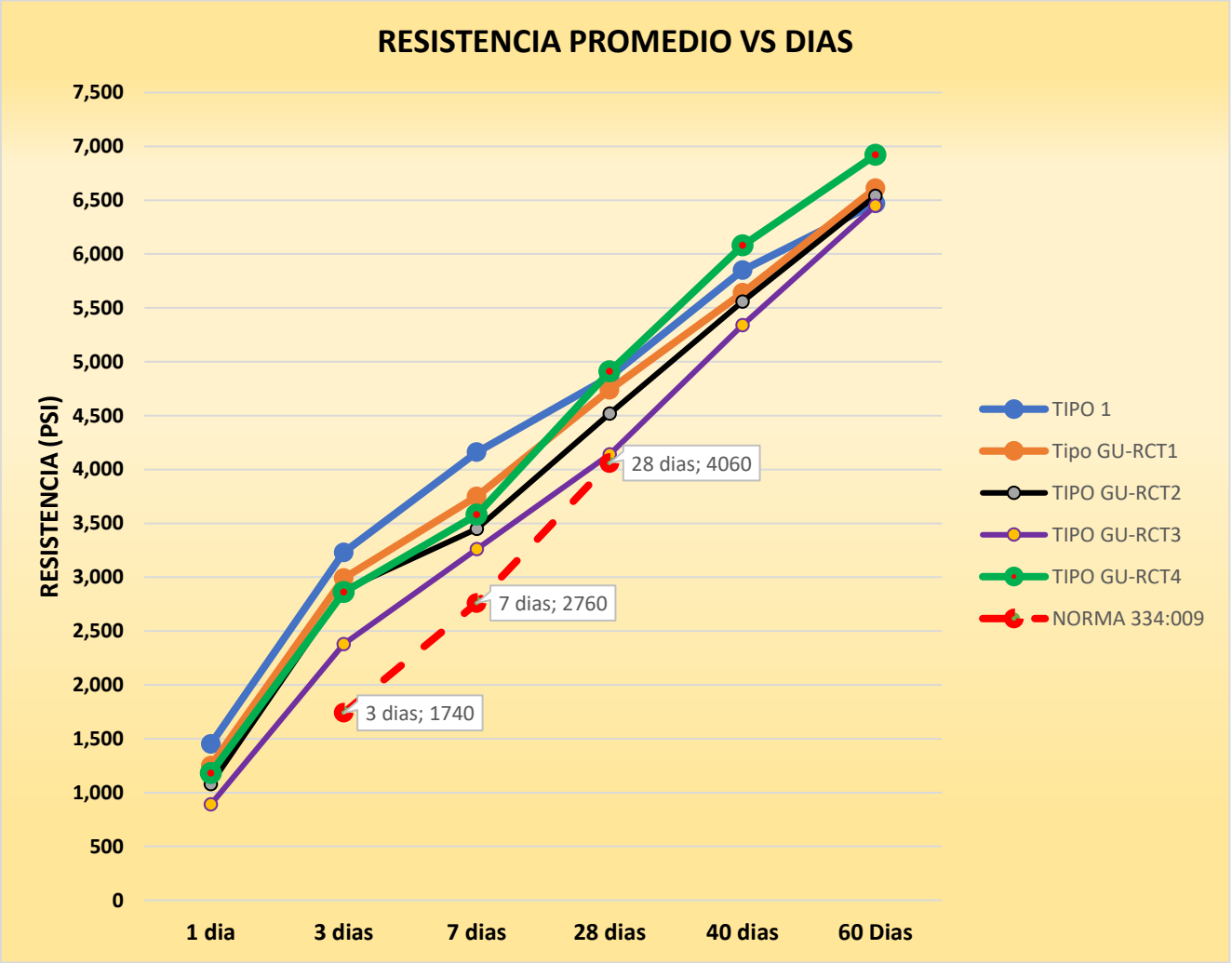

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 13:** *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión a 60 días de los cementos tipo GU y tipo I*




**Fuente:** *Elaboración propia*

**Gráfica 14:** *Comparación de los promedios de resistencia a la compresión de las diferentes recetas y la NTP 334:009.*




**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 17:** *Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la receta-1 respecto al tipo I*

| DIAS | TIPO I | RECTA-1 | ΔRC | % Ganancia RC |
|---|---|---|---|---|
| **1 D** | 1450 | 1,250 | -200 | -13.8% |
| **3 D** | 3230 | 2,990 | -240 | -7.4% |
| **7 D** | 4160 | 3,750 | -410 | -9.9% |
| **28 D** | 4860 | 4,740 | -120 | -2.5% |
| **40 D** | 5850 | 5,640 | -210 | -3.6% |
| **60 D** | 6470 | 6,610 | 140 | 2.2% |

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 18:** *Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la receta-2 respecto al tipo I.*

| DIAS | TIPO I | RECTA-2 | ΔRC | % Ganancia RC |
|---|---|---|---|---|
| **1 D** | 1450 | 1,080 | -370 | -25.5% |
| **3 D** | 3230 | 2,880 | -350 | -10.8% |
| **7 D** | 4160 | 3,450 | -710 | -17.1% |
| **28 D** | 4860 | 4,520 | -340 | -7.0% |
| **40 D** | 5850 | 5,560 | -290 | -5.0% |
| **60 D** | 6470 | 6,540 | 70 | 1.1% |

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 19:** *Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la receta-3 respecto al tipo I.*

| DIAS | TIPO I | RECTA-3 | ΔRC | % Ganancia RC |
|---|---|---|---|---|
| **1 D** | 1450 | 890 | -560 | -38.6% |
| **3 D** | 3230 | 2,380 | -850 | -26.3% |
| **7 D** | 4160 | 3,260 | -900 | -21.6% |
| **28 D** | 4860 | 4,140 | -720 | -14.8% |
| **40 D** | 5850 | 5,340 | -510 | -8.7% |
| **60 D** | 6470 | 6,450 | -20 | -0.3% |

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 20***: Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la receta-4 respecto al tipo I.*

| DIAS | TIPO I | RECTA-4 | ΔRC | % Ganancia RC |
|---|---|---|---|---|
| **1 D** | 1450 | 1,180 | -270 | -18.6% |
| **3 D** | 3230 | 2,860 | -370 | -11.5% |
| **7 D** | 4160 | 3,580 | -580 | -13.9% |
| **28 D** | 4860 | 4,910 | 50 | 1.0% |
| **40 D** | 5850 | 6,080 | 230 | 3.9% |
| **60 D** | 6470 | 6,920 | 450 | 7.0% |

**Fuente:** *Elaboración propia*

## 5.3. Análisis estadístico de los datos mediante técnicas estadísticas “ANOVA” y prueba de Dunnett.

**Tabla 21:** *Análisis de Anova de un factor de las resistencias promedios de las distintas recetas a 60 días, respecto al banco.*

**Análisis de Varianza**

| Fuente | GL | SC Sec. | Contribución | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Factor | 4 | 440600 | 94.85% | 440600 | 110150 | 46.02 | 0.000 |
| Error | 10 | 23933 | 5.15% | 23933 | 2393 | | |
| Total | 14 | 464533 | 100.00% | | | | |

**Fuente:** *software Minitab*

**Tabla 22:** *Prueba de Dunnett de las resistencias promedios a 60 días respecto al blanco.*

**Pruebas simultáneas de Dunnett para la media de nivel – Media de control**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95% | Valor T | Valor p ajustado |
|---|---|---|---|---|---|
| RECTA-1 - BLANCO | 140.0 | 39.9 | (24.5; 255.5) | 3.50 | 0.018 |
| RECTA-2 - BLANCO | 66.7 | 39.9 | (-48.8; 182.1) | 1.67 | 0.331 |
| RECTA-3 - BLANCO | -23.3 | 39.9 | (-138.8; 92.1) | -0.58 | 0.936 |
| RECTA-4 - BLANCO | 450.0 | 39.9 | (334.5; 565.5) | 11.27 | 0.000 |

*Nivel de confianza individual = 98.39%*

**Fuente:** *software Minitab*

## 5.4. Discusión de Resultados

- **Grafica 1: Comparación de retenidos promedios de las distintas recetas tipo GU y el patrón tipo I.**

De la gráfica 1 podemos apreciar que el retenido de la receta 4 que se obtiene a una 1 hora de molienda en un molino Bond es de 8.25 %, lo cual es menor a las demás recetas y aún más respecto al patrón tipo I que tiene un retenido de 12.8 %. Por lo tanto, la incorporación de la mayor cantidad de puzolana en la receta 4 influye significativamente en el retenido debido a su menor work index.

- **Grafica 3: Comparación de Blaine promedios de las distintas recetas tipo GU y el patrón tipo I.**

De la gráfica 2 se aprecia que el mayor Blaine se obtiene con las recetas 4 con un valor de 4387 cm2/g, respectos a las demás recetas; así mismo existe una gran variación respecto al patrón tipo I que tiene un valor de 3364 cm2/g. Esto es debido a las adiciones en particular la mayor proporción de puzolana en la receta 4 que tiene como propiedad física una mayor superficie especifica.

- **Grafica 6: Comparación de fraguado inicial promedios de las distintas recetas tipo GU y el patrón tipo I.**

Se puede identificar que el menor fraguado inicial se obtiene con el patrón tipo I con un valor de 125 minutos, lo cual refleja la mayor cantidad de C3A y C3S, responsables de fraguado inicial, por el mayor porcentaje de clinker que lleva este cemento Portland tipo I. Por otro lado, las recetas 1 y 4 se obtiene menor fraguado comparando entre recetas, con valores de 138 y 139 minutos respectivamente. Estos valores son más cercanos al valor del tipo I en comparación con las recetas 2 y 4.

- **Grafica 7: Comparación de fraguado final promedios de las distintas recetas tipo GU y el patrón tipo I.**

Se puede identificar que el fraguado del patrón Portland tipo I tiene un menor fraguado final con un valor de 212 minutos, esto es debido al C3A, C3S y C2S, responsables del fraguado progresivo, que está presente en mayor proporción en el cemento Portland tipo I, respecto a las nuevas formulaciones del cemento tipo GU. Por otro lado, el fraguado de la receta 1 y 4 tiene un valor de 231 y 234 minutos respectivamente. Estos valores no son tan variables como los de las recetas 2 y 3 que tiene fraguados más prolongados lo cual también se ve reflejado en sus resistencias a diferentes edades en la gráfica N° 14.

- **Grafica 8: Comparación de los promedios de las resistencias de las distintas recetas tipo GU y el patrón tipo I a 1 día.**

Se puede apreciar que a 1 día la resistencia del patrón Portland tipo I tiene un valor de 1450 psi, lo cual es mayor a las demás recetas del nuevo cemento hidráulico tipo GU. Esto es debido principalmente a la mayor proporción de Clinker aproximadamente de 92% en su fabricación y a sus compontes químicos principales como son el C3S Y C2S, los cuales son responsables de las resistencias iniciales y tardías respectivamente. Sin embargo, las nuevas formulaciones a pesar de tener menor cantidad de clinker y materiales inertes y cementantes como la caliza y puzolana respectivamente, tienen resistencias mecánicas no tan variables con valores de 1250 psi y 1180 psi, para las recetas 1 y 4 que llevan un porcentaje de clinker de 71 % y 66% respectivamente. Esto es principalmente por la adición de caliza y puzolana, que en particular la caliza de alto grado de pureza no aporta en la resistencia mecánica del cemento, en cambio la puzolana aporta resistencia mecánica, pero a edades prolongadas por la formación de HCS (silicato de calcio hidratado).

- **Tabla 20: Determinación de la ganancia de resistencia del cemento tipo GU para la receta-4 respecto al tipo I.**

Se logra inferir que el cemento tipo GU de la receta 4 a diferencia de las demás recetas tiene una ganancia en la resistencia a la compresión con respecto al cemento tipo I. Si bien tiene una menor resistencia en los primeros 7 días, posteriormente en los días 28, 40 y 60 presenta una ganancia de 1%, 3.9% y 7.0% respectivamente. Esto es principalmente por la adición de puzolana que forma HCS, lo cual es producto cementante que es responsable de las resistencias mecánicas del cemento.

- **Tabla 21 y 22: Análisis de anova de un fator y prueba de Dannett a las resistencias a 60 días de los cementos hidráulico tipo GU, respecto al Portland tipo I.**

Se realizó el análisis de varianza “ANOVA” y prueba de “Dunnett” para los hallazgos logrados de resistencia a la compresión a la edad de 60 días a fin de evaluar las diferencias significativas dentro de los 4 grupos de tratamiento de cementos hidráulico tipo GU. La edad de 60 días es un tiempo viable para observar el desempeño de los cementos en base a sus resistencias de un mortero, ya que el desarrollo de resistencia ha avanzado en gran proporción y es posible observar la performance del cemento.

Se utilizó el análisis ANOVA de un solo factor, debido a que se considera que la variable independiente o factor que desencadenará el efecto que se espera cada tratamiento es la variación en las formulaciones.

También, el uso de la prueba de Dunnett permitió comparar estadísticamente el grupo control, que para el estudio es el cemento Portland tipo I sin ningún tipo de adición diferente especificado en la norma (clinker, yeso y proporción máxima de 5% de adición calcárea), y las otras formulaciones que presentan adiciones calcáreas y puzolana, con esta prueba se puede medir si las dosificaciones han producido cambios estadísticamente significativos.

El análisis de varianza de las resistencias mecánicas a 60 días de los morteros con nuevas formulaciones para cemento tipo GU indican diferencias significativas entre las muestras, no obstante, la prueba de Dunnett, tabla 22, indica diferencias significativas entre la muestra control (1 blanco) y las rectas 1, 4; en la que el aumento de resistencia a la compresión es mayor, con la receta 4, la contiene un 8% de puzolana en su formulación. Esto evidencia la propiedad de la puzolana de formar producto cementante a edades tardías con los Ca(OH)2 que se obtiene del producto de la reacción del cemento, donde el SiO2 se combina con el Ca(OH)2 para formar HCS que es responsable de las resistencias mecánicas del cemento.

### 5.5. Pruebas de Hipótesis

El cemento hidráulico tipo GU con mayor performance respecto al cemento Portland tipo I se obtiene con la recta 4, esto debido a la proporción adecuada de caliza y puzolana. La incorporación de caliza como material inerte que como propiedad tiene ser un relleno de las porosidades del clinker y aumenta en mínima cantidad la resistencia mecánica a edades tempranas. Por otro lado, la incorporación de puzolana aporta resistencia mecánica a edades tardías, debido su propiedad de formar producto cementante.

- **Hipótesis especifica 1: El cemento hidráulico tipo GU tendrá propiedades químicas y físicas similares al cemento portland tipo I.**
    - ✓ La recta 4 del cemento hidráulico tipo GU tiene composición química similar al Portland tipo I.
    - ✓ El fraguado del cemento hidráulico es menor, por ende, menor calor de hidratación; lo cual disminuye la expansión térmica, así se evita la fisuración en el enfriamiento y a su vez ingreso de elementos externos perjudiciales.
    - ✓ Nos da una mejor trabajabilidad respecto al tipo I.

- **Hipótesis especifica 2: La resistencia a la compresión de las nuevas formulaciones de cemento hidráulico tipo GU es igual o superior a la del cemento Portland tipo I.**
  - ✓ Si bien la resistencia mecánica a edades tempranas del cemento hidráulico tipo GU son menores a la del cemento Portland tipo I, a edades prolongadas se obtiene mejor resistencia mecánica y por consiguiente un cemento con mejor desempeño; por lo tanto, construcciones más duraderas en el tiempo. Cabe mencionar que tanto las resistencias tempranas y tardías han cumplido con los requisitos de NTP 334:009.
- **Hipótesis especifica 3: La incorporación de adiciones en el cemento hidráulico tipo GU mejorará la durabilidad, impermeabilidad, resistencia a los sulfatos en comparación al cemento portland tipo I.**
  - ✓ Mejora la durabilidad al tener un cemento con mayores resistencias a edades tardías, por lo tanto, las construcciones al usar este tipo de cemento serán resistentes al largo de los años. Por otro lado, a través de la prueba en expansión en autoclave que simula el desempeño de un cemento en cómo se comportara en 50 años en base a su expansión o contracción (estabilidad de volumen), se puede apreciar en la tabla 16 que el cemento hidráulico tipo GU tiene una menor expansión por MgO y CaO libre presentes en el cemento.
  - ✓ Se obtiene un cemento con mayor impermeabilidad, esto debido a las incorporaciones de caliza y puzolana, tal como lo plantea Alfaro A., T & Laura C., L. J. (2014) que la adición de puzolana al ser un material con mayor área superficial y menos porosa, no permite el ingreso de agentes agresivos ni la penetración excesiva de agua. Esto también se puede apreciar en la tabla 16 donde se obtiene menores valores de expansión al agua en barras de mortero con el cemento hidráulico tipo GU. Esto resulta beneficioso en las obras hidráulicas, donde se necesita cementos con menos porosidad.

- ✓ Si bien la norma técnica peruana no exige valores de resistencia a los sulfatos para estos tipos de cementos, pero se realizó este ensayo para determinar el grado de resistencia expuestos a agentes agresivos. En la tabla 16 se puede apreciar la resistencia a los sulfatos, donde se obtiene menores expansiones en las barras de mortero elaboradas con el cemento hidráulico tipo GU, específicamente la reecta 4. Estos valores corroboran lo planteado por la empresa Cemex S.A.A Colombia y Alfaro A., T & Laura C., L. J. (2014) donde mencionan que la adición de puzolana aporta al cemento en la resistencia al ataque de sulfatos.

# VI. CAPITULO 6: CONCLUSIONES

- Se analizaron las características químicas y físicas del cemento hidráulico con indicaciones de desempeño de cemento tipo GU, con distintas formulaciones frente al Cemento Portland Tipo I, y se concluye que el Cemento hidráulico con la especificación de la performance tipo GU ( receta 4) se puede usar como alternativa en construcciones de uso general, debido a su desempeño en sus propiedades físicas, específicamente su resistencia a la compresión; acorde a las indicaciones de la Norma Técnica Peruana 334.009 “Cementos Portland. Requisitos” y con la Norma Técnica Peruana 334.082 “Cementos Hidráulico. Especificaciones de la performance”.
- Los Parámetros físicos y químicos obtenidas están dentro de las restricciones autorizadas por la Norma Técnica Peruana (NTP 334.009 /NTP 334.082). se puede apreciar en la tabla N° 16.
- El cemento hidráulico tipo GU nos permite tener procesos más sostenibles con el medio ambiente, ya que para su producción se usa menos cantidad de clinker; reduciendo así el consumo energético y la emisión de un gas de efecto invernadero importante como el $CO_2$, de ahí la razón por la cual se produce el mencionado cemento hidráulico tipo GU como uso alternativo al Cemento Portland tipo I.

# VII. CAPITULO 7: RECOMENDACIONES

- Es necesario garantizar el trabajo a la temperatura y condiciones que se especifican en cada normar técnica de ensayo.
- Se recomienda evaluar con la incorporación de otras adiciones minerales, como por ejemplo la escoria de alto horno.
- Se debe tener en cuenta la relación agua/cemento para su correcta dosificación en el mezclado de concreto para obtener resistencias y trabajabilidad específicas.
- Se recomienda evaluar estudios con aditivos mejoradores de calidad, que ayudan mejorar la performance del cemento.
- Es importante la evaluación de los componentes químicos de las materias primas y adiciones minerales a usar, para una correcta formulación.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS


- Alfaro A., T & Laura C., L. J. (2014) Estudio comparativo para la sustitución de un cemento portland tipo V entre un cemento puzolánico con especificaciones de la performance tipo HS en la fábrica de cemento YURA S.A.
- A.M. Neville, J.J. Brooks.,(1998). Tecnología del Concreto. Editorial Trillas SA. Mexico.
- Asociación Colombiana de Productores de Concreto (2010). "Tecnología del concreto: Materiales, propiedades y diseño de mezclas". Tomo 1.
- Asociación de productores de cemento ASOCEM (enero 2023). *Reporte estadístico mensual Industria del cemento en Perú.* https://www.asocem.org.pe/archivo/files/Reporte-Estad%C3%ADstico-Mensual/2023-01/2301%20Reporte%20Estadistico%20Mensual%20v3.pdf
- Chatterjee Kumar A. (2017). *Cement Production Technology Principles and Practice* https://nasiri.iut.ac.ir/sites/nasiri.iut.ac.ir/files//files_course/cement_production_technology_principles_and_practice.pdf
- Cortez, M., y Sánchez, J. (2006). Mejoramiento en las propiedades físicas y químicas del cemento portland Tipo MS por adición de Clinker Tipo V en la sustitución de escoria BSF de alto horno (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- D. Sanchez., (1991) "Tecnología del concreto y del mortero", Biblioteca de la construcción, Colombia.
- FRITZ-KEIL., (1973). "Cemento, Fabricación, Propiedades, Aplicaciones". Editores Técnicos Asociados. España.
- Guevara, V., y Tantarico, M. (2019). Evaluación comparativa de las características físico - mecánicas de las diferentes marcas de cementos portland Tipo I

comercializadas en el norte y centro del Perú, 2018 (Tesis de grado). Universidad Señor de Sipán, Perú.

- Instituto del Cemento Portland Argentino(s.f.). Adiciones minerales. Recuperado el 10 de octubre de https://icpa.org.ar/biblioteca-icpa/
- Instituto Nacional de la Calidad. INACAL. Normas Técnicas Peruanas. Revisado 10 de octubre 2024 de https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/
- K. Mehta and P. Monteiro (1993). "Concrete: Structure, Properties and Materials". Prentice Hall, N.J. USA, pp 273 - 274.
- Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Asociación, Skokie, Illinois, EE.UU.
- López, P. (2015). Estudio sobre la durabilidad de los nuevos tipos de cementopara la evaluación del comportamiento de morteros y hormigones frente a la agresión química de los sulfatos y del agua de mar (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Ministerio de Energía y Minas (2023). Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético-Industrias Cementeras. Recuperado de https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4709408-sector-industrial
- Monshi, A. et al.,(1999), Producing Portland cement from iron and Steel slags and limestone, Cement and Concrete Research, Vol.29, No. 9, pp. 1373-1377
- Neville A., (2013) *Tecnología del concreto* (Cuarta edición). Editorial Imcyc. https://www.udocz.com/apuntes/66641/tecnologia-del-concreto-neville
- Neville A., (2013)., "Tecnología del concreto", 4ta. Edición, Instituto Mexicano del Cemento y del concreto, A.C.

- Neville A., (1981) “Tecnología del Concreto”. Tomo I. Editorial LIMUSA. México, p 106.
- Nidheesh, P. V., & Kumar, M. S. (2019). “An overview of environmental sustainability in cement and steel production”. Journal of Cleaner Production, vol. 231, pp. 856–871. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.251
- Otto Labahm., (1985). “Prontuario del Cemento”; Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona 1985.
- Pretel C. R. (2022) “Evaluación de los cambios de longitud de barras de mortero fabricadas con cemento portland tipo V y tipo V modificado con escorias siderúrgicas frente a la agresión química de los sulfatos. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Callao, Perú.
- Revista Hábitat. Publicada en abril del 2014. Sobre la diferencia de cementos convencionales.
- Revista técnica Cemento Hormigón., (2005), “Modelos matemáticos del proceso de cocción del clinker de cemento. Parte I. Reacciones y operaciones básicas”. Nº 871
- Taylor, H.F., (2003), Cment Chemistry, Thomas Telford.
- The Global Cement Report (2021). *Cifras de la industria cementera mundial.* https://ficem.org/wp-content/uploads/2023/08/Informe-estadistico-2021.pdf
- Tobón, J. I. & Gómez, K. R. (2008) Desempeño del cemento portland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza.
- Walter.H. Duda., (1997).” Manual tecnológico del cemento”.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Norma técnica peruana 334.045, 2010. CEMENTOS, Método de ensayo para determinar la finura del cemento Portland por el tamiz de 45 µm (No. 325)

- ✓ **PROCEDIMIENTO**

Colocar 1 000 g de muestra sobre el tamiz de 45 µm (No. 325) limpio y seco. Humedecer la muestra completamente con una suave corriente de agua. Retire el tamiz del aspersor y ajuste la presión del rociador a 69 kPa ± 4 kPa (10 lb/pulg$^2$± 0,5 lb/pulg$^2$). Regresar el tamiz a su posición bajo el aspersor y lavar por un minuto, moviendo el tamiz en forma circular en un plano horizontal, a la velocidad de una vuelta por segundo en el aspersor. La distancia entre la base de la boquilla y el extremo superior del bastidor del tamiz debe ser aproximadamente 12 mm (0,5 pulg). Inmediatamente después de retirar el tamiz del rociador, lavar una vez con aproximadamente 50 cm$^3$ de agua destilada o desionizada, teniendo cuidado de no perder alguna parte del residuo y luego secar suavemente la superficie inferior con un paño húmedo. Secar el tamiz y residuo, en un horno o plancha caliente (Véase Nota 2), manteniendo el tamiz de manera tal que el aire pueda pasar libremente a través de la parte inferior de éste. Enfriar el tamiz, luego retirar el residuo con una brocha y pesarlo en una balanza analítica con aproximación de 0,0005 g.

NOTA 2: Tener cuidado de no calentar demasiado el tamiz como para ablandar la soldadura.

**Anexo 2: Norma técnica peruana 334.004, 2008. CEMENTOS. Ensayo en autoclave para determinar la estabilidad del volumen.**

12.1 Transcurridas 24 h ± 30 min , desde el momento del llenado del molde, los especímenes de ensayo se retiran de la cámara húmeda, se desmoldan y se miden las longitudes (iniciales) entre los extremos libres de los topes de medida y se colocan en el autoclave a la temperatura ambiente en un soporte adecuado de manera que sus cuatro caras mayores queden expuestas a la acción del vapor.

12.2 El autoclave debe ser cargado con agua, a una temperatura inicial de 20 °C a 28 °C, en cantidad suficiente para que durante el ensayo, el vapor se mantenga en estado de saturación.

El volumen de agua necesario a este efecto es en general, del 7 % al 10 % del total de la cámara. Al iniciarse el calentamiento del autoclave, debe permanecer abierta la válvula de eliminación de aire hasta que por ella comience a salir vapor. Se le cierra entonces y se regula el calentamiento del autoclave en forma de obtener la presión de ensayo de 295 psi entre los 45 min y 75 min siguientes al momento en que se inició el calentamiento. Durante las 3 h siguientes la presión debe mantenerse entre 295 ± 10 psi . Al termino de ese plazo se suprime el calentamiento y se enfría al autoclave de manera que al cabo de 90 min la presión manométrica sea inferior a 10 psi .

La presión residual se elimina lentamente dejando escapar el vapor por la válvula citada, hasta alcanzar la presión atmosférica. Se abre entonces el autoclave colocándose los especímenes de ensayo en agua a más de 90 °C la que se hace disminuir de manera uniforme por la adición de agua fría, de modo que descienda en 15 min a 23 °C . Se mantiene esta temperatura por un período adicional de 15 min, al cabo del cual se retiran los especímenes, se secan cuidadosamente sus caras y se mide entonces nuevamente la longitud entre los extremos libres de los topes de medida.

Si se prefiere hacer todas las medidas a 26,5 °C se recomienda que al retirar los especímenes de la cámara húmeda, sean colocados a 26,5 °C durante 15 min como mínimo. Luego se mide su longitud y se colocan en el autoclave. Retirados de él y puestos en el agua a más de 90 °C, ésta debe hacerse descender en 15 min a 26,5 °C y transcurrido un período adicional de 15 min (durante el cual la temperatura se mantiene constante), se

NOTA 2: Si se prefiere tomar todas las lecturas a 27 °C , es recomendable que los especímenes después de ser retirados de la cámara húmeda se coloquen en agua a 27 °C , por lo menos 15 minutos antes de tomar las lecturas iniciales en el comparador y luego se colocan en el autoclave. Luego de remover del autoclave enfriar los especímenes y el agua a 27 °C en 15 minutos. Mantenga los especímenes en agua a esta temperatura por 15 minutos adicionales, luego obtenga la lectura en el comparador de longitud para cada especimen.

**Anexo 3: Norma técnica peruana 334.051, 2022. CEMENTOS. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50mm de lado. Método de ensayo.**

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN Y/O COMERCIAL

5.3 **Moldes para especímenes:** Los moldes para los especímenes cúbicos de 50 mm deben ser apropiadamente herméticos. Los moldes no deben tener más de tres compartimientos cúbicos, y deben estar separados en no más de dos partes. Estos elementos deben estar dotados de dispositivos que aseguren una perfecta y rígida unión. Los moldes deben ser fabricados de un metal duro no atacable por la mezcla de cemento. Los moldes nuevos tendrán una dureza Rockwell del metal no menor de 55 HRB. Las paredes de los moldes deben ser lo suficientemente rígidas para prevenir ensanchamiento o deformación. Las caras interiores de los moldes deben ser superficies planas, con una variación máxima permisible conforme a las tolerancias indicadas en la Tabla 1.

**Tabla 1 - Variaciones permisibles de los moldes cúbicos**

| | Moldes cúbicos de 2 pulg | | Moldes cúbicos de 50 mm | |
|---|---|---|---|---|
| **Parámetro** | **Nuevo** | **En uso** | **Nuevo** | **En uso** |
| Planitud de distancia | < 0,001 pulg | < 0,002 pulg | < 0,025 mm | < 0,05 mm |
| Distancia entre los lados opuestos | 2 pulg ± 0,005 | 2 pulg ± 0,02 pulg | 50 mm ± 0,13 mm | 50 mm ± 0,50 mm |
| Altura de cada compartimiento | 2 pulg + 0,01 pulg a -0,005 pulg | 2 pulg + 0,01 pulg a -0,015 pulg | 50 mm + 0,25 mm a -0,13 mm | 50 mm + 0,25 mm a -0,38 mm |
| Angulo entre caras adyacentes[A] | 90 ° ± 0,5 ° | 90 ° ± 0,5 ° | 90 ° ± 0,5 ° | 90 ° ± 0,5 ° |

(A) Medidos en los puntos ligeramente removidos desde la intersección. Medidos separadamente para cada compartimento entre todas las caras interiores y la planitud de la base y el tope del molde.

**Anexo 4: Equipo para prueba de expansión en autoclave**




**Fuente:** *Elaboración propia.*

- **Equipo de fluorescencia de Rayos X para determinación de óxidos del cemento.**




**Fuente:** *Elaboración propia.*