



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

**REACTIVIDAD ALCALI-SILICE DE LAS COMBINACIONES CEMENTANTES CON
AGREGADOS PETROS DE LAS MINAS SILLAHUAN Y SALAZAR, RIOBAMBA**

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor

Jose Andres Cargua Huaraca

Tutor

Mgs. Jorge Eugenio Núñez Vivar

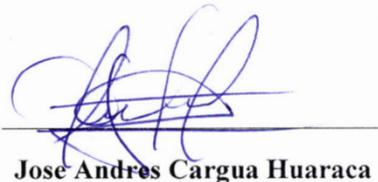
Riobamba, Ecuador: 2023

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **Jose Andres Cargua Huaraca**, con cédula de ciudadanía **060510572-5**, autor del trabajo de investigación titulado: **“Reactividad Álcali-Sílice de las Combinaciones Cementantes con Agregados Petros de las Minas Sillahuan y Salazar, Riobamba”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 21 de marzo de 2023



Jose Andres Cargua Huaraca

C.I: 060510572-5

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“Reactividad Alkali-Sílice de las Combinaciones Cementantes con Agregados Petros de las Minas Sillahuan y Salazar, Riobamba”**, presentado por **Jose Andres Cargua Huaraca**, con cédula de identidad número **060510572-5**, certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 21 de marzo de 2023

Ing. Ángel Edmundo Paredes García, Mgs
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Cristian Andrés Marcillo Zapata, Mgs
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Alexis Iván Andrade Valle, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Jorge Eugenio Núñez Vivar, Mgs
TUTOR



Firma

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación se lo dedico a mi madre, Olga Huaraca, que con su inmensurable esfuerzo, sacrificio, apoyo y amor incondicional pudo darme la oportunidad para cumplir una de mis metas.

A mis hermanos y hermana que han sido parte del apoyo emocional para poder continuar encaminado mis objetivos.

A los amigos que forme durante mi vida académica ya que fueron parte primordial del desarrollo estudiantil durante el transcurso del tiempo en la universidad.

AGRADECIMIENTO

Agradecer a la persona más importante en este mundo para mí por supuesto, mi madre que ha sabido guiarme y aconsejarme durante toda mi vida. Toda mi vida pasada, presente y futura se lo debo a mi madre. A mis hermanos que, aunque teníamos diferencias como todos, nos apoyamos para seguir adelante.

A las maravillosas personas que conocí durante mi vida en la universidad, amigos que han sabido apoyarme varias ocasiones para seguir adelante en mi meta.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por abrirme las puertas y permitirme el poder cumplir uno de mis objetivos.

Y, por supuesto, a los todos y cada uno de los docentes que han sabido compartir su conocimiento a los estudiantes y formarlos no solo profesionalmente sino también, en muchas ocasiones, ética y moralmente. Además, también a mi tutor Ing. Jorge Núñez por darme la oportunidad de realizar este proyecto de investigación.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	12
CAPITULO I	14
1.1. INTRODUCCIÓN	14
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.3. OBJETIVOS	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos	17
CAPITULO II	18
2. GENERALIDADES	18
2.1. DURABILIDAD	18
2.2. VIDA UTIL DEL HORMIGÓN	18
2.3. COMPONENTES DEL HORMIGÓN	20
2.4. FACTORES QUE AFECTAN A LA DURABILIDAD	20
2.5. ATAQUES FISICOS	21
2.5.1. Erosión	21
2.5.2. Congelación-descongelación	21
2.6. ATAQUE QUIMICO	21
2.6.1. Ataque de ácidos	21
2.6.2. Ataque de sulfatos	22
2.6.3. Ambiente químicamente agresivo	22
2.6.4. Reacciones químicas en los agregados	22
2.7. REACCION ALCALI-AGREGADO	23
2.7.1. Reacción álcali-sílice (RAS)	24
3. METODOLOGIA	26
3.1. Características de la investigación	26
CAPITULO IV	36
4. RESULTADOS Y DISCUSION	36
4.1. RESULTADOS	36
4.2. DISCUSIÓN	44
CAPITULO V	47
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
5.1. CONCLUSIONES	47
5.2. RECOMENDACIONES	49

REFERENCIAS	50
ANEXOS	53

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Minerales, rocas y otras sustancias potencialmente nocivas reaccionando con los álcalis del cemento.....	25
Tabla 2: Requerimientos de Granulometría.....	31
Tabla 3: Porcentaje de fluidez: Mina Sillahuan	32
Tabla 4: Porcentaje de fluidez: Mina Salazar.....	32
Tabla 5: Dosificación para elaboración de barras; Mina Sillahuan.....	33
Tabla 6: Dosificación para elaboración de barras; Mina Salazar	33
Tabla 7: Numero de especímenes por cada combinación agregado-cemento.....	33
Tabla 8: Análisis químico elemental, obtenido del ensayo del FRX del material cementante.....	36
Tabla 9: Análisis químico elemental, obtenido del ensayo de Fluorescencia de Rayos-X, del agregado pétreo.....	37
Tabla 10: Porcentaje de expansión como resultado del Método Acelerado de la Barra de Mortero	38
Tabla 11: Niveles de riesgo para que se produzca una reacción álcali-agregado	44
Tabla 12: Comportamiento de las combinaciones en función del límite establecido	46
Tabla 13: Ensayo 1, Mesa de flujo; Mina Sillahuan.....	53
Tabla 14:: Ensayo 2, Mesa de flujo; Mina Sillahuan.....	53
Tabla 15:: Ensayo 1, Mesa de flujo; Mina Salazar	53
Tabla 16: Ensayo 2, Mesa de flujo; Mina Salazar.....	53
Tabla 17: Porcentajes de Expansión Probeta 1	54
Tabla 18: Porcentajes de Expansión Probeta 2	55
Tabla 19: Porcentajes de Expansión Probeta 3	56
Tabla 20: Porcentajes de Expansión Probeta 4.....	57
Tabla 21: Porcentajes de Expansión Probeta 5	58
Tabla 22: Porcentajes de Expansión Probeta 6.....	59
Tabla 23: Porcentajes de Expansión Probeta 7	60
Tabla 24: Porcentajes de Expansión Probeta 8	61
Tabla 25: Porcentajes de Expansión Probeta 9	62
Tabla 26: Porcentajes de Expansión Probeta 10	63

Tabla 27: Porcentajes de Expansión Probeta 11	64
Tabla 28: Porcentajes de Expansión Probeta 12	65
Tabla 29: Porcentajes de Expansión Probeta 13	66
Tabla 30: Porcentajes de Expansión Probeta 14	67
Tabla 31: Porcentajes de Expansión Probeta 15	68
Tabla 32: Porcentajes de Expansión Probeta 16	69
Tabla 33: Porcentajes de Expansión Probeta 17.....	70
Tabla 34: Porcentajes de Expansión Probeta 18	71
Tabla 35: Porcentajes de Expansión Probeta 19	72
Tabla 36: Porcentajes de Expansión Probeta 20	73
Tabla 37: Porcentajes de Expansión Probeta 21	74
Tabla 38: Porcentajes de Expansión Probeta 22	75
Tabla 39: Porcentajes de Expansión Probeta 23	76
Tabla 40: Porcentajes de Expansión Probeta 24	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre el comportamiento del hormigón y la vida útil de la estructura .	19
Figura 2: Fases de desarrollo de la reacción álcali-sílice	23
Figura 3: Cuadro de procesos de la investigación.....	27
Figura 4: Comparación de deformación: Cemento IP con Agregados de las Minas Sillahuan y Salazar	39
Figura 5: Comparación de deformación: Cemento GU con Agregados de las Minas Sillahuan y Salazar	40
Figura 6: Comparación de deformación: Mina Sillahuan con Cemento Tipo IP y GU	41
Figura 7: Comparación de deformación: Mina Salazar con Cemento Tipo IP y GU.....	41
Figura 8: Comparación de la combinación Sillahuan con cemento tipo IP y GU Vs. expansión permisible	42
Figura 9: Comparación de la combinación Salazar con cemento tipo IP y GU Vs. expansión permisible	43
Figura 10: Agregado; lavado, tamizado y secado.	78
Figura 11: Flujo de mortero, $a/c=0.47$	78
Figura 12: Elaboración de las barras de mortero.....	79
Figura 13: Desencofrado de las barras	79
Figura 14: a) Recipiente; b) Hidróxido de Sodio (1N).....	80

Figura 15: Medición inicial de la barra	80
Figura 16: Recipiente herméticamente sellado y dispuesto a 80 °C	81
Figura 17: Barra, día 2 de inmersión en NaOH.....	81
Figura 18: Desgaste y desprendimiento de la barra, combinación; Mina Salazar-Cemento IP.....	82
Figura 19: Agrietamiento y desprendimiento, combinación; Mina Sillahuan-Cemento IP82	
Figura 20: Agrietamiento día 10, combinación; Mina Sillahuan-Cemento GU	83
Figura 21: Barras sumergidas en NaOH.....	83

ABSTRAC

Guaranteeing a safe and serviceable reinforced concrete structure is the duty of every engineer when designing and building it. Concrete structures are daily subjected to different physical or chemical attacks. Depending on the type of structure. Necessary studies are performed to ensure safety in the structure. Soil studies, and structural calculations are essential for this. However, the analysis of materials is also an important aspect of the design of civil work. Since there are some internal factors of each material that can compromise the entire structure.

Among the attacks that a structure can suffer, especially in concrete, we have the alkali-aggregate reaction, a chemical reaction that occurs in the internal system of the concrete between the cementitious material and the stone aggregate. In the presence of water, it produces a gel that expands, breaking the concrete from the inside. Among the alkali-aggregate reactions, we have the alkali-silica response, which is considered the most damaging. It is a reaction between the cement's alkali and the aggregate silica, causing an internal gel that expands and destroys the concrete structure from the inside, causing the system to tend to collapse.

In the present investigation, tests were conducted to determine the alkali-silica reaction potential of aggregates from the SILLAHUAN and SALAZAR mines in the city of Riobamba in combination with cementitious material type IP and GU corresponding to the HOLCIM and CHIMBORAZO brands, respectively. The X-Ray Fluorescence test was conducted to determine the chemical composition of each material, both the stone and the cementitious materials. And to determine the alkali-silica potential of the aggregate-cement combinations, the Accelerated Mortar Bar Method test was performed according to ASTM C 1567.

The expansions obtained by performing the test showed that the stone and cementitious materials have a high alkali-silica reactivity potential. The combinations of the Sillahuan and Salazar mines with IP type cement showed the most detrimental behavior. Likewise, the combination of the Salazar mine with GU type cement had an expansion that exceeds the limit established by the standard. On the other hand, the expansions presented by the combination of aggregates from the Sillahuan mine with GU cement were the most acceptable, below the established tolerance.

Keywords: durability, reactivity, alkali-silica, aggregate, cement, expansion.



firmado electrónicamente por:
MARCELA PATRICIA
GONZÁLEZ ROBALINO

Reviewed by:

Mgs. Marcela González Robalino

English Professor

c.c. 0603017708

RESUMEN

Garantizar una estructura de hormigón armado segura y servicial, es deber de todo ingeniero al diseñar y construirla. Las estructuras de hormigón diariamente están sometidas a diferentes ataques ya sean estos físicos o químicos, dependiendo del tipo de estructura se realizan estudios necesarios para garantizar seguridad en la estructura, los estudios de suelo, cálculos estructurales, son primordiales para ello. Sin embargo, el estudio de los materiales también es un aspecto importante dentro del diseño de una obra civil, ya que existen diversos factores internos de cada material que pueden comprometer a toda la estructura.

Dentro de los ataques que puede sufrir una estructura, especialmente en el hormigón, tenemos la reacción álcali-agregado, es una reacción química ocurrida en la estructura interna del hormigón entre el material cementante y el agregado pétreo. Esto en presencia del agua produce un gel que se expande rompiendo el hormigón desde el interior. Entre las reacciones álcali-agregado tenemos la reacción álcali-sílice, considerada la más perjudicial, es una reacción entre el álcali del cemento y la sílice del agregado, provocando un gel interno que se expande y destruye la estructura del hormigón desde el interior provocando que la estructura tienda al colapso.

En la presente investigación se realizaron ensayos para determinar el potencial de reacción álcali-sílice de agregados de las minas SILLAHUAN y SALAZAR de la ciudad de Riobamba en combinación con material cementante tipo IP y GU correspondientes a las marcas HOLCIM y CHIMBORAZO respectivamente. Con el fin de determinar la composición química de cada material, tanto como de los materiales pétreos como de los materiales cementantes, se realizó el ensayo de Fluorescencia de Rayos-X. Y, para determinar el potencial álcali-sílice de las combinaciones de agregado-cemento, se realizó

el ensayo Método Acelerado de la Barra de Mortero según lo dicta la norma ASTM C 1567.

Las expansiones obtenidas mediante la realización del ensayo demostraron que los materiales pétreos y cementante tienen un alto potencial de reactividad álcali-sílice. Las combinaciones de las minas Sillahuan y Salazar con cemento tipo IP demostraron tener el comportamiento más perjudicial. Asimismo, la combinación de la mina Salazar con el cemento tipo GU tuvo una expansión que sobrepasa el límite establecido por la norma. Por otra parte, las expansiones presentadas por la combinación de agregados de la mina Sillahuan con cemento GU fueron las más aceptables, por debajo de la tolerancia establecida.

Palabras clave: durabilidad, reactividad, álcali-sílice, agregado, cemento, expansión

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón armado se diseñan para que soporten varias adversidades ya sean estas de tipos climáticas, geotécnicas, térmicas, etc. En el Ecuador, como materia prima, el hormigón es uno de los componentes con los que se realizan la mayor parte de obras, por lo que estas deben cumplir con los requisitos mínimos para garantizar la seguridad. Uno de los parámetros a investigarse durante la construcción de una obra de hormigón son las reacciones químicas que se presentan, entre las más perjudiciales tenemos: reacción álcali-sílice (RAS); reacción álcali carbonato y reacción álcali-silicato; esta última es la menos conocida y que se presenta con menor frecuencia (Escobar, 2013).

La reacción álcali-sílice a diferencia de las otras es la que representa mayor relevancia y es más perjudicial para el hormigón provocando una expansión de este dando como resultado una reducción en la capacidad de tracción y flexión, disminución del módulo de elasticidad y una mínima reducción de la resistencia a la compresión. Consecuentemente él se degrada haciendo que este se presenten grietas en el hormigón lo que muchas veces provoca que la estructura quede totalmente inservible (Segarra, 2005).

La ciudad de Riobamba se encuentra en cercanías a minas de materiales pétreos por lo que se debería conocer el comportamiento físico y químico de estos áridos en contacto con los otros elementos que conforman el hormigón y así determinar el potencial de reacción álcali-sílice que estos tendrán al momento de la construcción. Existen varios métodos para la identificación de la RAS, el método acelerado de la barra de mortero (MABM) es un método eficaz para determinar la RAS (Falcone & Milanesi, 2016).

La presente investigación determinará la reacción álcali-sílice de los agregados de la mina Sillahuan y Salazar de la ciudad de Riobamba mediante al Método Acelerado de la Barra de Mortero de acuerdo con la ASTM C 1567 y los resultados obtenidos servirán para tener una perspectiva de los áridos que distribuyen estas minas y cómo reaccionarán ante las combinaciones con materiales cementantes (Villagomez, 2019).

1.2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La correcta selección del agregado para iniciar una obra es de vital importancia para asegurar la calidad de esta. Gran parte de las construcciones, especialmente de viviendas, en el Ecuador se lo realiza con hormigón. Debido a los cambios climáticos y la zona de alto riesgo sísmico a las que están sometidos estas construcciones se deben tener en cuenta todos los problemas externos e internos que se pueden generar en la construcción antes, durante y después de concluida la misma. En este contexto, las RAS son una de las patologías que se debe tener en cuenta para la construcción de una obra civil con hormigón para que esta cumpla con los estándares establecidos.

Es por esto por lo que, dentro de la investigación experimental, se abordará la reacción álcali-sílice como uno de los problemas para tener en cuenta al momento de elaborar hormigón para obras, mediante el MABM se ensayarán los agregados de dos de las minas que abastecen de material pétreo a la ciudad de Riobamba, Mina Sillahuan y Mina Salazar.

1.3.OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la relación álcali-sílice de las combinaciones cementantes con los agregados de las minas Sillahuan y Salazar de la ciudad de Riobamba

Objetivos Específicos

- Determinar la expansión producida por la reacción álcali-sílice de las combinaciones de los agregados de las minas Sillahuan y Salazar con cementos tipo IP y GU, mediante el uso del método acelerado de la barra de mortero
- Clasificar, en base a normas ecuatorianas y americanas, los materiales pétreos existentes en la mina Salazar de acuerdo con la reacción álcali-sílice que se determine mediante los ensayos

CAPITULO II

2. GENERALIDADES

2.1.DURABILIDAD

El hormigón es una mezcla de cemento, agregado fino, agregado grueso y agua, destacando que constituye gran parte de las obras civiles del mundo. Por ello, se debe asegurar su calidad para que la edificación cumpla con las especificaciones para las que fue diseñada. (NTE INEN 1762, 2015)

La durabilidad es una de las características del hormigón que determinan su vida útil. El ACI define a la durabilidad como: “la capacidad de un material para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, abrasión y otras condiciones de servicio” (American Concrete Institute, 2017).

Según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 1855 – 2015, la durabilidad del hormigón: “es la capacidad de soportar condiciones nocivas, que le permita cumplir con el tiempo de vida útil requerido en el proyecto. Para tal efecto, al diseñárselo, debe tomarse en consideración el uso y función que va a cumplir la estructura, el ataque de los agentes agresivos a los que puede estar expuesta, los efectos de fisuraciones producidos por variaciones exageradas de volumen y la resistencia a los efectos del intemperismo. No debe confundirse durabilidad con resistencia mecánica del hormigón” (NTE INEN 1855-2, 2015).

2.2.VIDA UTIL DEL HORMIGÓN

La vida útil de una estructura es el periodo de tiempo en el cual la estructura conserva y cumple los requisitos de seguridad, funcionalidad y aspecto cumpliendo el propósito para la que fue diseñada (Bedoya, 2010).

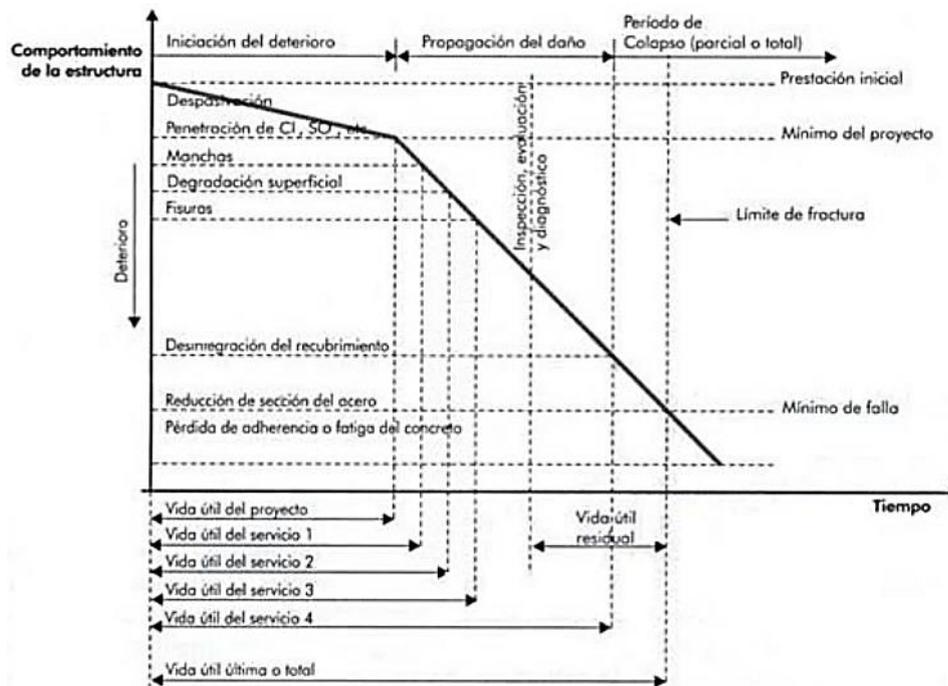


Figura 1: Relación entre el comportamiento del hormigón y la vida útil de la estructura
Fuente: Bedoya, R. (2010).

2.2.1. VIDA UTIL DEL PROYECTO

Es el periodo de tiempo para el cual la estructura fue diseñada. En esta etapa inicia un deterioro de la estructura, pero este deterioro no afectará su comportamiento (Bedoya, 2010).

2.2.2. VIDA UTIL DE SERVICIO

Es el tiempo que comprende desde el inicio de la construcción hasta que la estructura presenta un deterioro que el diseñador considera aceptable. Se presentarán daños como: manchas superficiales, fisuras, hongos (Bedoya, 2010).

2.2.3. VIDA UTIL TOTAL

Es el tiempo de la estructura que va desde el inicio de construcción de esta hasta el colapso total o parcial (Bedoya, 2010).

2.2.4. VIDA UTIL RESIDUAL

Es el periodo en el cual se desarrolla un estudio de patologías de la estructura donde constan inspección, evaluación y diagnóstico. Estos estudios se pueden realizar en

cualquier etapa de la vida útil de la estructura por lo que esta puede tener más de una vida residual (Bedoya, 2010).

2.3. COMPONENTES DEL HORMIGÓN

Elegir correctamente los materiales que constituirán el hormigón, será uno de los puntos más importantes a tomar en cuenta para garantizar que la estructura cumpla con las condiciones para las que fue diseñada. Todos los materiales, así como sus dosificaciones son importantes para conseguir dichas características (Estupiñan & Garcia, 2020).

2.4. FACTORES QUE AFECTAN A LA DURABILIDAD

Diversos son los factores que pueden afectar las características de la estructura incluyendo su durabilidad, un mal diseño estructural o un mal seguimiento del diseño en el campo son algunas de ellas (Garcia, 2020).

Con el avance de la tecnología se han demostrado que los factores que causan las patologías del hormigón no solo son por las condiciones en las que fueron elaboradas las infraestructuras, sino además por causas físicas, químicas, que afectan al hormigón interna y externamente comprometiendo a la estructura, deteriorándola e incluso puede llegar al colapso (Garcia, 2020).

Los factores que afectan a la durabilidad del hormigón se dividen tanto en internas como externas. Los factores externos abarcan las condiciones de servicio, exposición al medio ambiente, ataques químicos, erosiones, ciclos de congelación-descongelación y carbonatación. Los factores internos se encuentran dentro del mismo hormigón como álcalis del cemento (compuestos producidos a partir de metales alcalinos como potasio, sodio, calcio y magnesio), que reaccionan con los componentes químicos de los agregados (Garcia, 2020).

Los factores de mayor impacto al hormigón son:

- Ataques físicos: erosiones y heladas

- Ataques químicos: ácidos, sulfatos, ambiente químicamente agresivo y **las reacciones químicas de los agregados**
- Corrosión de metales en el hormigón.

2.5. ATAQUES FISICOS

2.5.1. Erosión

Estas son: abrasión y cavitación; ambos producidos en obras hidráulicas debido a la velocidad del agua, además de también este ocurre en pavimentos (Garcia, 2020).

2.5.2. Congelación-descongelación

Conocido como intemperismo, uno de los factores más dañinos para el hormigón si ocurre en un ciclo constante. Es producido por cambios de temperatura que llegan a menos de 0 °C congelando el agua interna de la pasta y a temperatura normal se produce un deshielo realizando un proceso de aumento y disminución de volumen al hormigón (Garcia, 2020).

2.6. ATAQUE QUIMICO

Los ataques químicos son los que ocasionan un mayor daño a la estructura además que es el más complejo de solucionar. Para que el ataque se produzca, el agua debe estar presente en forma líquida o gaseosa ya que esta es la que diluye los componentes agresivos formando una solución, esta solución debe entrar en contacto con otra sustancia para que se produzca una reacción (Bertolini et al., 2011).

2.6.1. Ataque de ácidos

La exposición del hormigón endurecido a ácidos resulta en un deterioro de este generando pérdidas de las propiedades físico-mecánicas del hormigón. Los factores que aceleran el ataque son: los que se relacionan con la solución (solubilidad de la sal de calcio, concentración, pH, difusividad del ácido y su sal), los relacionados con el material

cementante (tipo, cantidad, naturaleza del agregado, permeabilidad, curado y condiciones de servicio) y los externos como la temperatura (Valencia-Saavedra et al., 2018).

2.6.2. Ataque de sulfatos

Componentes como sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio se encuentran de forma natural en el suelo o disueltos en el agua que corre por el suelo o en los agregados

Hay dos reacciones que involucran sulfatos:

- Reacción del sulfato con hidróxido de calcio que se libera en la hidratación del cemento
- Reacción del sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado

Estas dos reacciones resultan en un incremento del volumen de sólidos y es la causa de la expansión y descomposición del hormigón expuesto a sulfatos. Sin embargo, para que el ataque de sulfatos sea significativo estos deben estar en una solución, en una concentración representativa y el hormigón debe estar en su forma sólida (Pire, 2013).

2.6.3. Ambiente químicamente agresivo

Para que exista una agresión el agente químico debe estar en forma de solución y en una concentración máxima a la permitida además de tener la posibilidad de ingresar al interior de la pasta de hormigón y mantenerse en un flujo continuo suficiente para que se produzca la reacción. Los ambientes agresivos constituyen aire, agua y suelos contaminados en los que se implanta la estructura de hormigón (Garcia, 2020).

2.6.4. Reacciones químicas en los agregados

Ocurre cuando los minerales silíceos de los agregados son atacados por los iones alcalinos presentes en la pasta del cemento. Esta reacción forma un gel que al absorber agua se expande considerablemente, y ya que la pasta de hormigón se encuentra endurecida se produce una tensión interna suficientemente fuerte para provocar que el hormigón se agriete (Veras & Oliveira, 2019).

La lixiviación es uno de los tipos de estas reacciones, esta ocurre cuando el agua disuelve componentes en el hormigón como el hidróxido de calcio que se encuentra en el cemento Portland y el cual es soluble en agua. Es altamente probable que este componente sea lixiviado desde el hormigón. Como consecuencia, se produce una apariencia arenosa en las superficies expuestas, este componente es más soluble en agua fría (Arribas et al., 2019).

El segundo tipo de estas reacciones es la reacción álcali-agregado (RAA).

2.7. REACCION ALCALI-AGREGADO

La reacción álcali-agregado (RAA) es una reacción química producido en el interior del hormigón endurecido entre los componentes alcalinos provenientes principalmente del cemento Portland y los agregados (Thomas et al., 2013).

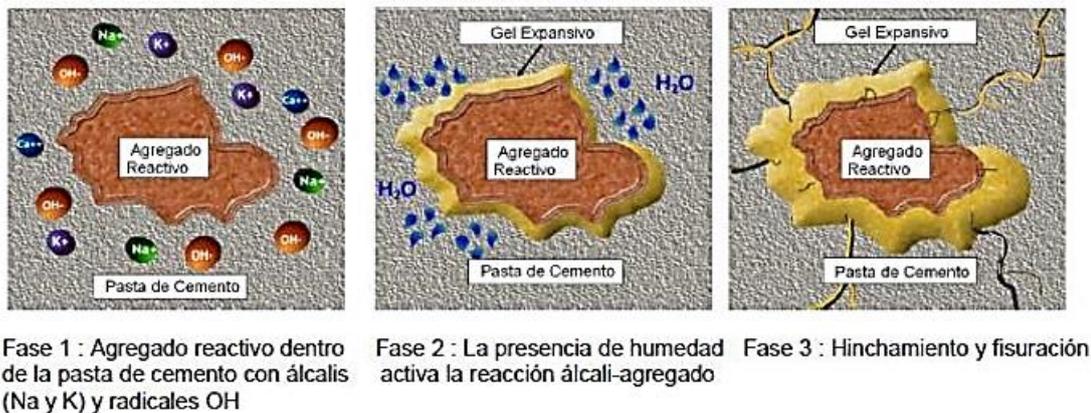


Figura 2: Fases de desarrollo de la reacción álcali-sílice

Fuente: Pasquel, E. (2014).

Se produce por la presencia de óxidos de sodio y potasio denominados álcalis y los componentes silíceos de los agregados, forman un gel alrededor de los agregados que al expandirse de forma gradual destruye la integridad de la estructura provocado que esta se agriete y se desintegre (**Figura 2**) (Pasquel, 2014).

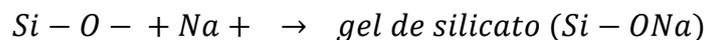
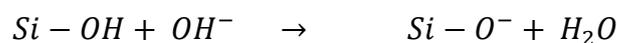
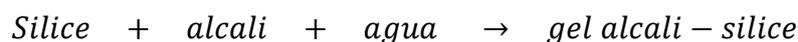
Existen dos tipos de RAA más representativas, la reacción álcali-carbonato (RAC), la reacción álcali-sílice (RAS) y una última que ocurre con mucho menos frecuencia; reacción álcali-silicato (Thomas et al., 2013):

- Reacción álcali-carbonato: reacción entre los álcalis del cemento Portland y algunas rocas carbonatadas, como dolomita, calcítica y calcita dolomítica, presentes en algunos agregados que causa una expansión o agrietamiento del hormigón.
- Reacción álcali-sílice: reacción entre los álcalis del cemento Portland y minerales o rocas silíceas, como el pedernal opalino, tridimita, cristobalita, calcedonia, el cuarzo colado y el vidrio volcánico ácido, presentes en algunos agregados dando como resultado un gel de silicato de sodio. El gel absorbe el agua provocando un aumento del volumen y presión en el hormigón que causa un agrietamiento y deterioro de este. (American Concrete Institute, 2017).

2.7.1. Reacción álcali-sílice (RAS)

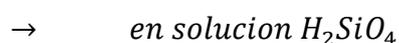
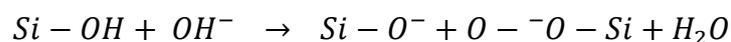
La RAS es la más común de las reacciones álcali-agregado además de la más destructiva por ende la más estudiada. Las reacciones que se producen son dos principales:

- Reacción 1



- Reacción 2

Gel alcali-silice + agua → expansion y desintegracion del hormigón



Para que se produzcan las reacciones álcali-sílice es necesario que las cantidades de sílice reactiva y álcalis sean significativas y la presencia de agua externa (Segarra, 2005).

Los factores que intervienen para que ocurra la RAS son:

Agregados: la composición y granulometría juegan un papel importante en esta reacción. En cuanto a su composición dependerá del tipo de mineral y origen de este, así como de cuan ordenada sea su estructura; si la forma de la sílice está bien cristalizada el ataque será superficial de lo contrario la reacción será más rápida (Segarra, 2005).

A continuación, en la **Tabla 1** se muestran algunos de las rocas potencialmente reactivos:

Tabla 1: Minerales, rocas y otras sustancias potencialmente nocivas reaccionando con los álcalis del cemento

TIPO DE ROCA	OBSERVACIONES
ROCAS IGNEAS	
Granitos	+30% de cuarzo deformado
Granodiorita	
Piedra pómez	
Ricitas	
Andesitas	Sílice o siliceintermedio
Dacitas	
Latitas	
Tobas volcánicas	
Basalto	Calcedonia, cristobalita
ROCAS METAMORFICAS	
Gneis	+ 30% de cuarzo deformado
Esquistos	
Cuarcitas	5% o más de sílice
Filitas	
ROCAS SEDIMENTARIAS	
Areniscas	5% o más de sílice, ópalo
Pizarras	
Sílice	
Diatomita	Ópalo, cuarzo criptocristalino
Cuarzo	

Elaborado por: Jose Cargua Adaptado de: Segarra, J. (2005).

CAPITULO III

3. METODOLOGIA

3.1. Características de la investigación

3.1.1. Nivel de investigación

El nivel de la siguiente investigación será descriptivo, debido a que los procesos de ensayos en los laboratorios se describirán de una forma detallada. Además, se observará y anotará el comportamiento de los especímenes elaborados en contacto con una solución química en temperatura controlada

3.1.2. Diseño de la investigación

En esta investigación se adoptará un diseño experimental, debido a que se realizarán ensayos de muestras de agregados y materiales cementantes estudiados para así determinar el comportamiento de estos en combinaciones específicas y medir así su expansión.

3.2. Técnicas, instrumentos y procedimientos

3.2.1. Técnicas

Las técnicas aplicadas para el desarrollo de la investigación serán las detalladas cuidadosamente en las normas:

- ASTM C 1567: Método de Prueba Estándar Para Determinar la Reactividad Potencial de Álcali-Sílice de Combinaciones de Materiales Cementicios y Agregados (Método Acelerado de Barra de Mortero)
- ASTM C 490: Práctica Estándar Para el Uso de Aparatos Para la Determinación del Cambio de Longitud de Pasta de Cemento Endurecido, Mortero y Concreto.

- NTE INEN 867: Áridos Para Hormigón. Determinación de la Reactividad Alcalina Potencial de Combinaciones Árido – Cemento (Método de la Barra de Mortero).
- NTE INEN 2502: Determinación Del Flujo En Morteros.

3.2.2. Instrumentos

Asimismo, los instrumentos utilizados para la elaboración de los ensayos serán calibrados y preparados de acuerdo con las especificaciones de las normas para evitar errores de precisión.

3.2.3. Procedimiento

Para el desarrollo de la investigación se elaboró un cuadro de procesos el cual servirá de guía con el fin de cumplir los objetivos de este proyecto. En la figura 3 se presenta dicho cuadro:

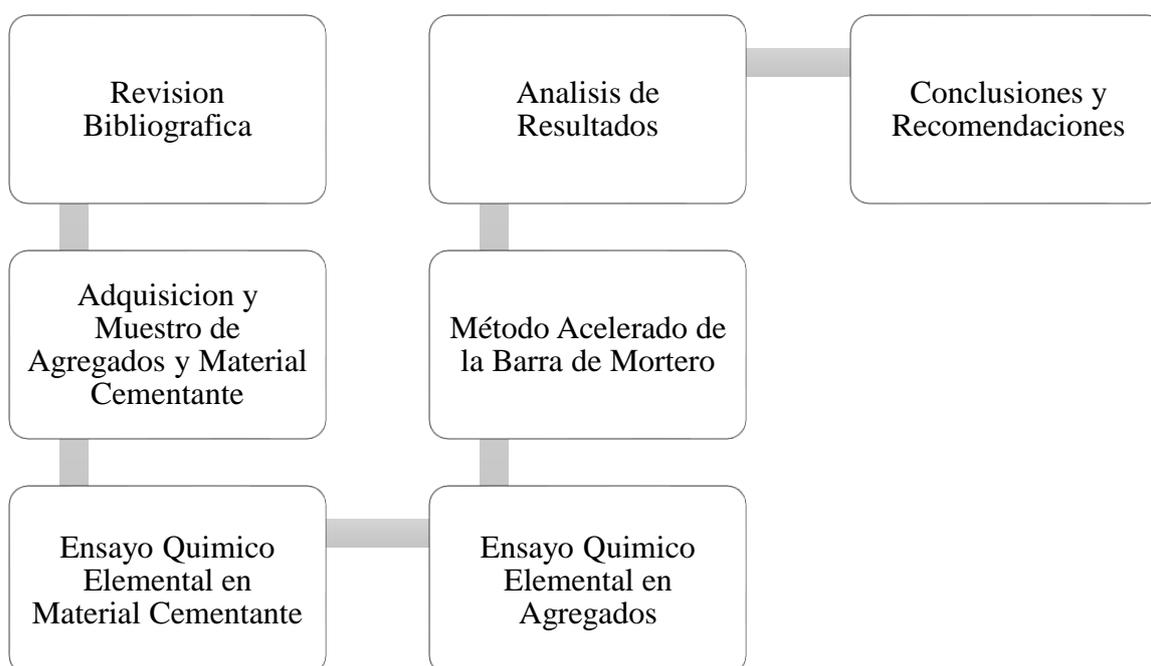


Figura 3: Cuadro de procesos de la investigación
Elaborado por: Jose Cargua

A. Revisión Bibliográfica

Se inició con una revisión bibliográfica tomando en cuenta los siguientes parámetros de búsqueda: las publicaciones revisadas se encontrarán dentro de la última década, los documentos revisados contemplarán aquellos relacionados con el método acelerado de la barra de mortero. Para esta revisión bibliográfica se usarán buscadores como Google Scholar, Scopus y entre otros buscadores científicos para obtener información más confiable.

B. Adquisición y Muestreo de Agregados

Para la adquisición del agregado se tomó en cuenta las minas que proveen de material pétreo a la ciudad de Riobamba, en este caso serán las minas; Sillahuan y Salazar. Adquirido el agregado necesario se procedió a triturarlo hasta obtener la granulometría requerida para los ensayos.

En cuanto al material cementante, se analizarán dos tipos que son el GU e IP, de las marcas más renombradas y comercializadas en la ciudad, estos son Cemento Chimborazo y Cemento Holcim respectivamente.

Los cementos que se usaran pertenecen a categorías diferentes y fue conveniente observar el comportamiento con los agregados pétreos. El cemento tipo IP pertenece a la categoría Cementos hidráulicos compuestos, la norma NTE INEN 151 los define como: un cemento hidráulico de dos o más compuestos inorgánicos, los cuales contribuyen a mejorar las propiedades de resistencia del cemento; entre estos tenemos los tipos: IS (Cemento portland de escoria de altos hornos), IT (Cemento compuesto ternario) e IP (Cemento portland puzolánico)(NTE INEN 151, 2012). Por otra parte tenemos los Cementos hidráulicos por desempeño, los cuales son usados en base a requisitos específicos de desempeño para aplicaciones generales o especiales, entre estos tenemos: HE (alta resistencia inicial), MS (resistencia moderada a sulfatos), HS (resistencia alta a sulfatos),

MH (moderado calor de hidratación), LH (bajo calor de hidratación) y GU (para construcción general) (NTE INEN 2380, 2011)(NTE INEN 2380, 2011)

Previo a la realización de los ensayos, el material cementante pasará por un proceso de tamizado para evitar grumos.

C. Ensayo Químico Elemental en Material Cementante

Los ensayos se realizaron por etapas. El primero de ellos fue un ensayo químico en el material cementante mediante la aplicación de fluorescencia de rayos-X (FRX) mediante la utilización del equipo Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X portátil marca Bruker S1 Turbo SD de la Universidad Técnica Particular de Loja, con esto se determinó los componentes que sean potencialmente reactivos para que se produzca una reactividad álcali-sílice.

El ensayo FRX es una técnica que permite identificar elementos de una muestra a partir de la lectura de la emisión de rayos X fluorescentes, estos ensayos se los realizan con Espectrómetros de Rayos X. Este ensayo consta de tres etapas:

- **Excitación:** se bombardearán los electrones de las capas internas de los átomos de la muestra con un haz de fotones de rayos X, expulsando dicho electrón y dejando una vacancia y al átomo en estado de excitación
- **Emisión de rayos X de la muestra:** el átomo excitado tiende a regresar a su estado fundamental para lo que se producen saltos de electrones de la capa exterior a la interior lo que provoca desprendimiento de energía en forma de rayos X característicos para compensar vacancia que dejó la excitación
- **Detección de rayos X:** al producirse el salto de electrones se generan rayos X fluorescentes característicos, debido a que cada elemento tiene diferente niveles de energía, los rayos X producidos se pueden medir y así determinar la concentración de elementos en la muestra (De la Cruz, 2018).

El ensayo FRX se realiza con la finalidad de identificar los elementos que compone cada muestra y, en este caso, comparar los valores con los requisitos máximos permisibles establecidos en la norma NTE INEN 490.

D. Ensayo Químico Elemental en Agregados

De igual manera se realizó un ensayo FRX en el agregado de ambas minas para determinar la composición química del material, e identificar la concentración de sílice en cada agregado. Se utilizarán para estos ensayos 5 gr de material pétreo que pase por el tamiz No 200.

E. Método Acelerado de la Barra de Mortero

Una vez determinados los componentes químicos, se realizó el ensayo: Método acelerado de la barra de mortero, para observar el comportamiento al combinar el agregado con el material cementante. Este ensayo se basará en la normativa ASTM C 1567, el cual establece que se elaboraran como mínimo 3 barras de mortero por cada combinación de cemento y agregado. En este caso se realizaron 6 barras de mortero entre agregado y cemento, una única combinación por cada material, dando un total de 24 barras, esto con el fin de obtener datos más representativos. Las medidas de las barras se realizaron de acuerdo a la norma ASTM C 490, el cual detalla que las dimensiones serán de 25 x 25 x 285 mm (ASTM C 490, 2017).

Para la elaboración de las barras de mortero es necesario cumplir con la granulometría detallada en la norma ASTM C 1567 la cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2: Requerimientos de Granulometría

Tamaño del Tamiz		Porcentaje de masa, %
Pasante	Retenido en	
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	10
2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	25
1.18 mm (No. 16)	600 μ m (No. 30)	25
600 μm (No. 30)	300 μ m (No. 50)	25
300 μm (No. 50)	150 μ m (No. 100)	15

Fuente: ASTM C1567-04. (2005).

Triturado y tamizado el agregado a las proporciones requeridas se procedió a realizar un lavado para librarlo de impurezas y material orgánico. Además, se tamizo de igual manera el cemento para remover grumos.

Según la norma ASTM C 1567 las barras se deben elaborar siguiendo las siguientes dosificaciones:

- Relación cemento/agregado: 1; 2.25
- Relación agua/cemento: 0.47

En cuanto a la primera dosificación se la realizó de acuerdo con la norma; sin embargo, la relación agua/cemento al realizar el ensayo de Mesa de Flujo de Trabajo de acuerdo con la norma NTE INEN 2502 se comprobó que la masa entra en el rango de seca. Entonces se procedió a realizar el ensayo hasta obtener una trabajabilidad aceptable del mortero.

Tabla 3: Porcentaje de fluidez: Mina Sillahuan

Mina Sillahuan		Mina Sillahuan	
Primera Medición		Segunda Medición	
a/c	% Fluidez	a/c	% Fluidez
0.47	72.9	0.47	73.4
0.5	85.9	0.5	87.6
0.53	95.9	0.53	95.1
0.58	123.9		

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 4: Porcentaje de fluidez: Mina Salazar

Mina Salazar		Mina Salazar	
Primera Medición		Segunda Medición	
a/c	% Fluidez	a/c	% Fluidez
0.47	75.4	0.47	78.4
0.5	79.5	0.55	93.8
0.55	90.4	0.58	96.9
0.58	93.4	0.6	114.1
0.6	112.6		

Elaborado por: Jose Cargua

Los resultados que se muestran en la tabla 3 y tabla 4 son, los porcentajes de fluidez obtenidos mediante la determinación de flujo en morteros, establecidos en la NTE INEN 2500. Se realizaron dos mediciones de cada mina y cada una con una relación de agua diferente, con esto se determinó un valor aceptable en el cual el mortero obtenido sea trabajable y moldeable. Se tomaron los valores a/c de 0.53 y 0.58 para trabajar con los agregados de las minas Sillahuan y Salazar respectivamente.

Con todos los datos obtenidos, a continuación, se detalla un resumen con las dosificaciones obtenidas y dispuestas por la norma ASTM C 1567

Tabla 5: Dosificación para elaboración de barras; Mina Sillahuan

Dosificación Mina Sillahuan	
Agua	233.2
a/c	0.53
Cemento	440
Retenido #8	99
Retenido #16	247.5
Retenido #30	247.5
Retenido #50	247.5
Retenido #100	148.5

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 6: Dosificación para elaboración de barras; Mina Salazar

Dosificación Mina Salazar	
Agua	255.2
a/c	0.58
Cemento	440
Retenido #8	99
Retenido #16	247.5
Retenido #30	247.5
Retenido #50	247.5
Retenido #100	148.5

Elaborado por: Jose Cargua

Las dosificaciones mostradas corresponden a la utilizada para elaborar tres barras de mortero de acuerdo con las especificaciones de la norma. En total se elaboraron 24 barras de mortero, 6 por cada combinación de agregado y cemento tal y como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Numero de especímenes por cada combinación agregado-cemento

Numero de especímenes	Cemento IP	Cemento GU	Mina Sillahuan	Mina Salazar
6	X		X	
6		X	X	
6	X			X
6		X		X

Elaborado por: Jose Cargua

Se elaboraron las barras, y después del fraguado correspondiente se tomaron las barras en sus moldes correspondientes e inició el curado de estos por 24 horas. Se

desmoldaron las barras transcurrido el tiempo y el proceso de sumersión y medición de los especímenes se lo realizó tal y como establece la norma. El porcentaje de expansión se calculará de acuerdo con la siguiente expresión dispuesta en la norma ASTM C 1 567:

$$\Delta L = \left[\frac{(L_x - L_i)}{L_i} \right] * 100$$

Donde:

- ΔL = porcentaje de expansión a la edad x
- L_x = lectura de la barra de mortero a la edad x
- L_i = lectura cero o inicial de la barra

Preparado el mortero, se llenaron los moldes con dos capas uniformes que cubran toda la superficie del molde y en cada capa se proporcionará, con un apisonador, golpes en el mortero para compactarlo uniformemente y al finalizar con una espátula se enrasara al nivel del molde.

Realizadas las barras se las almacenaron durante un periodo de 2 horas hasta que fragüen y posteriormente se las sumergieron en agua por 24 horas para evitar la pérdida de humedad (ASTM C1567-04, 2005).

Transcurrido el tiempo, se desencofraron las barras e inmediatamente se sumergieron en un contenedor con agua, se selló el recipiente herméticamente y se colocó en el horno a $80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por un periodo de 24 horas. Pasadas las horas, se realizó una lectura inicial como referencia a las barras, teniendo en cuenta la perdida de humedad esta lectura no tomó más de 1 minuto. Tomada la lectura referencial, dentro recipiente se colocó solución de hidróxido de sodio tal que las barras queden completamente sumergidas y verticales, se sella el recipiente herméticamente para evitar perdida de solución por evaporación y se colocó en el horno 24 horas al día por un periodo de 14 días. Las lecturas, tal y como lo recomienda la norma, se registraron al menos 3 lecturas intermedias por cada semana transcurrida, tomando en cuenta

el tiempo de cada lectura y regresando inmediatamente las barras a la solución después de realizada la medición (ASTM C1567-04, 2005).

La solución de hidróxido de sodio [Na (OH)] tenía una concentración de 1N, es decir, una dosificación de 40 gr del compuesto por cada 960 cm³ de agua destilada (ASTM C1567-04, 2005).

Se realizaron la medición de 24 barras, entre las combinaciones de los agregados de las minas Sillahuan y Salazar, así como del tipo de cemento Holcim (IP) y Chimborazo (GU)

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1.RESULTADOS

Se realizó un ensayo de Fluorescencia de Rayos-X (FRX) en cada tipo de cemento que será usado para la elaboración de las barras de mortero. Estos resultados se muestran en la Tabla 3

Tabla 8: Análisis químico elemental, obtenido del ensayo del FRX del material cementante.

CEMENTO			
HOLCIM IP		CHIMBORAZO GU	
Al₂O₃ (%)	4.4	Al₂O₃ (%)	9.91
SiO₂ (%)	8.6	SiO₂ (%)	29.3
Na₂O (%)	-	Na₂O (%)	-
P₂O₅ (%)	1.22	P₂O₅ (%)	1.16
S (%)	1.39	S (%)	1.5
CaO (%)	76	CaO (%)	50
Fe₂O₃ (%)	1.5	Fe₂O₃ (%)	1.67
SnO₂(%)	-	SnO₂(%)	-
K₂O (%)	-	K₂O (%)	1.03
Co₃O₄ (%)	0.36	Co₃O₄ (%)	0.408
TiO₂ (%)	0.17	TiO₂ (%)	0.245
Sb₂O₃ (%)	-	Sb₂O₃ (%)	-
MnO (ppm)	744	MnO (ppm)	780
CeO₂ (%)	-	CeO₂ (%)	-
Ta₂O₅ (%)	-	Ta₂O₅ (%)	-
Cr₂O₃ (ppm)	221	Cr₂O₃ (ppm)	240
HfO₂ (%)	-	HfO₂ (%)	-

Elaborado por: Jose Cargua

En la tabla 8 se muestran la presencia de los compuestos en las dos tipos de cemento como resultado del ensayo FRX, por su baja concentración, existieron compuestos que no fueron detectados entre uno de ellos el Na₂O que forma parte del contenido equivalente de álcali en la muestra. En Durabilidad y Patología del Concreto (2011) se describe los rangos de álcali de acuerdo con la concentración que se presente en el material:

- Presencia de álcali alta, concentración de álcali de mayor de 1,0%
- Presencia de álcali media, concentración de álcali entre 0,60% y 1,0%

- Presencia de álcali baja, concentración de álcali menor de 0,60%

El contenido de álcalis, se lo determinará mediante la siguiente expresión:

$$\text{Contenido equivalente de alcalis}(\%) = \text{Na}_2\text{O}(\%) + 0.658\text{K}_2\text{O}(\%)$$

Con estos datos se comparó la presencia de álcali en el cemento, en cuanto al tipo GU, tiene una concentración de álcali media con un 0.68% y, aunque, en el tipo IP no se haya detectado álcali aun contiene componentes que son reactivos para que se dé la reacción álcali-sílice (Sánchez de Guzmán, 2011).

Además, para que se produzca una reacción álcali-sílice, conjuntamente del álcali del material cementante, es la sílice del material pétreo. Con esa premisa, se analizaron las muestras de los agregados provenientes de las minas con el ensayo FRX con el fin de determinar los componentes de cada agregado. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9: Análisis químico elemental, obtenido del ensayo de Fluorescencia de Rayos-X, del agregado pétreo.

AGREGADO			
SILLAHUAN		SALAZAR	
Al₂O₃ (%)	18.4	Al₂O₃ (%)	15.8
SiO₂ (%)	58.5	SiO₂ (%)	56.9
Na₂O (%)	4.41	Na₂O (%)	4.71
P₂O₅ (%)	-	P₂O₅ (%)	-
S (ppm)	363	S (ppm)	913
CaO (%)	6.7	CaO (%)	7.15
Fe₂O₃ (%)	2.32	Fe₂O₃ (%)	2.62
SnO₂(%)	-	SnO₂(%)	-
K₂O (%)	0.89	K₂O (%)	1.17
Co₃O₄ (%)	0.56	Co₃O₄ (%)	0.66
TiO₂ (%)	0.46	TiO₂ (%)	0.45
Sb₂O₃ (%)	-	Sb₂O₃ (%)	-
MnO (%)	0.1	MnO (%)	0.13
CeO₂ (%)	-	CeO₂ (%)	-
Ta₂O₅ (ppm)	410	Ta₂O₅ (%)	-
Cr₂O₃ (ppm)	-	Cr₂O₃ (ppm)	-
HfO₂ (ppm)	-	HfO₂ (ppm)	40

Elaborado por: Jose Cargua

Como se muestra en la tabla 9 los agregados de ambas minas tienen una considerable cantidad porcentual de sílice, que favorece a que la reacción álcali-sílice ocurra (Segarra, 2005).

Con los datos previos de los componentes tanto de los agregados pétreos como del material cementante se procedió a realizar las barras de mortero.

Se procedió primeramente con la granulometría necesaria para la elaboración. Para ello, el agregado triturado y pulverizado se tamizo y así se obtuvo lo necesario según la norma ASTM C-1567 cumpliendo con lo establecido en la tabla 2.

La tabla 10 muestran los resultados de la expansión para cada combinación de material cementante con agregado de cada mina, al realizar las mediciones por 21 días. Se considerará que la combinación agregado-cemento es potencialmente perjudicial si el porcentaje de expansión es mayor al 0.10% en la lectura del día 14, es decir 16 días después de la elaboración de las barras de mortero (ASTM C1567-04, 2005).

Tabla 10: Porcentaje de expansión como resultado del Método Acelerado de la Barra de Mortero

DIA	MINA SILLAHUAN		MINA SALAZAR	
	IP	GU	IP	GU
1	0.0351	-0.0317	0.0054	0.0153
2	0.0413	-0.0025	0.0347	0.0270
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	0.0584	0.0256	0.0559	0.0808
7	0.1234	0.0625	0.0882	0.1290
8	0.1291	0.0914	0.1163	0.1442
9	0.1321	0.1064	0.1158	0.1642
10	-	-	-	-
11	-	-	-	-
12	0.1662	0.1053	0.1661	0.1831
13	-	-	-	-
14	0.1665	0.0868	0.1998	0.1433
15	-	-	-	-
16	-	-	-	-
17	0.1508	0.0432	0.1146	0.0932

18	-	-	-	-
19	0.2113	0.0516	0.1191	0.1511
20	-	-	-	-
21	0.2319	0.0952	0.2011	0.2580

Elaborado por: Jose Cargua

En la figura 4 se compararon los porcentajes de expansión de las minas Sillahuan y Salazar al combinarlos con cemento Tipo IP. Se observa que en el día 14, la expansión de las barras de la mina Sillahuan es de 0.1665 % superando el 0.1% establecido por la norma y, por otro lado, en la Mina Salazar tiene un valor aun mayor, con 0.1998 % de expansión también supera límite establecido. Las barras mantuvieron un proceso de deformación positiva y negativa en los días subsiguientes y alcanzaron valores de expansión de 0.2319% y 0.2011% para las minas Sillahuan y Salazar, respectivamente.

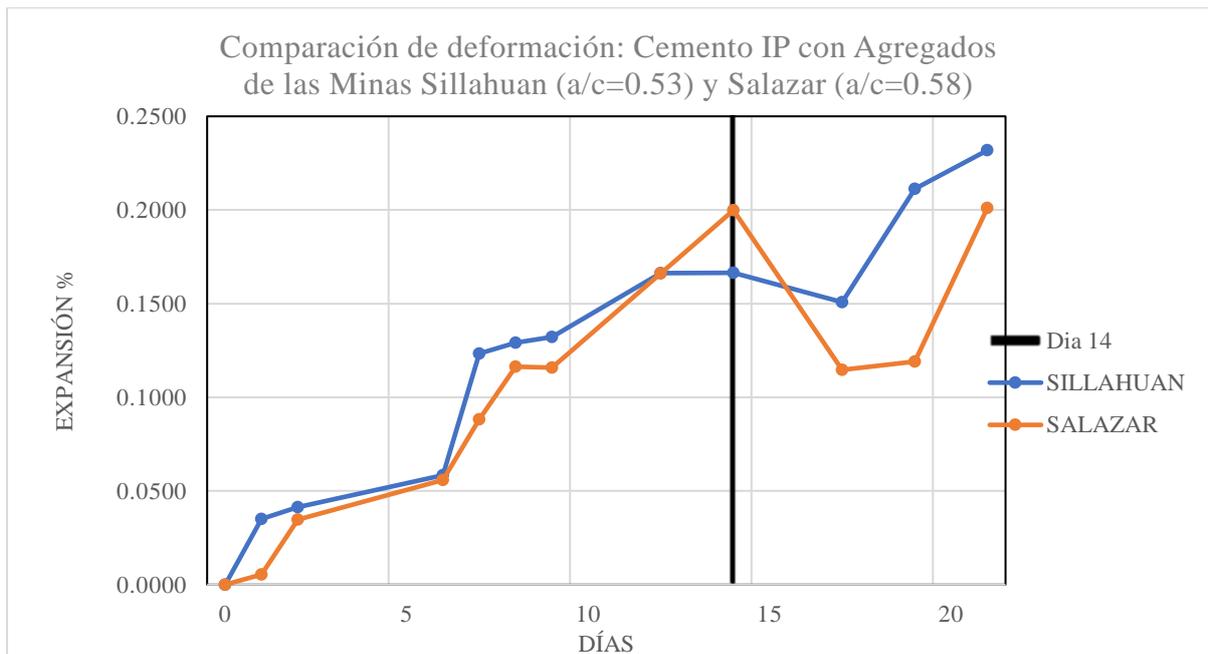


Figura 4: Comparación de deformación: Cemento IP con Agregados de las Minas Sillahuan y Salazar
Elaborado por: Jose Cargua

En la figura 5 se observa la comparación de deformación entre los agregados de ambas minas en combinación con el cemento Tipo GU. En la lectura establecida, se obtuvo valores de 0.0868 y 0.1433 para las minas Sillahuan y Salazar respectivamente, siendo de la primera un valor menor al establecido, mientras que el valor de la segunda supero el límite.

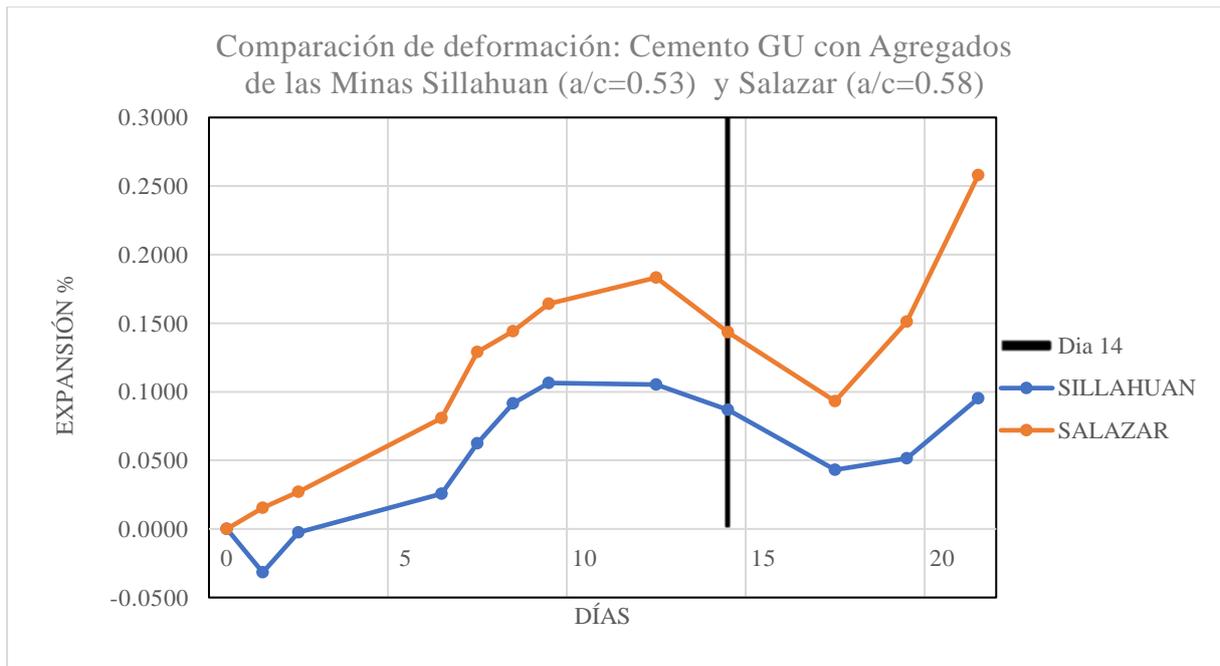


Figura 5: Comparación de deformación: Cemento GU con Agregados de las Minas Sillahuan y Salazar
Elaborado por: Jose Cargua

En la figura 6 se comparan los valores al combinar agregados de la mina Sillahuan con el cemento tipo IP y GU. Los valores son mayores con el cemento tipo IP superando el 0.1% al día 14 y manteniéndose por debajo de ese límite se encuentra la combinación con el tipo GU

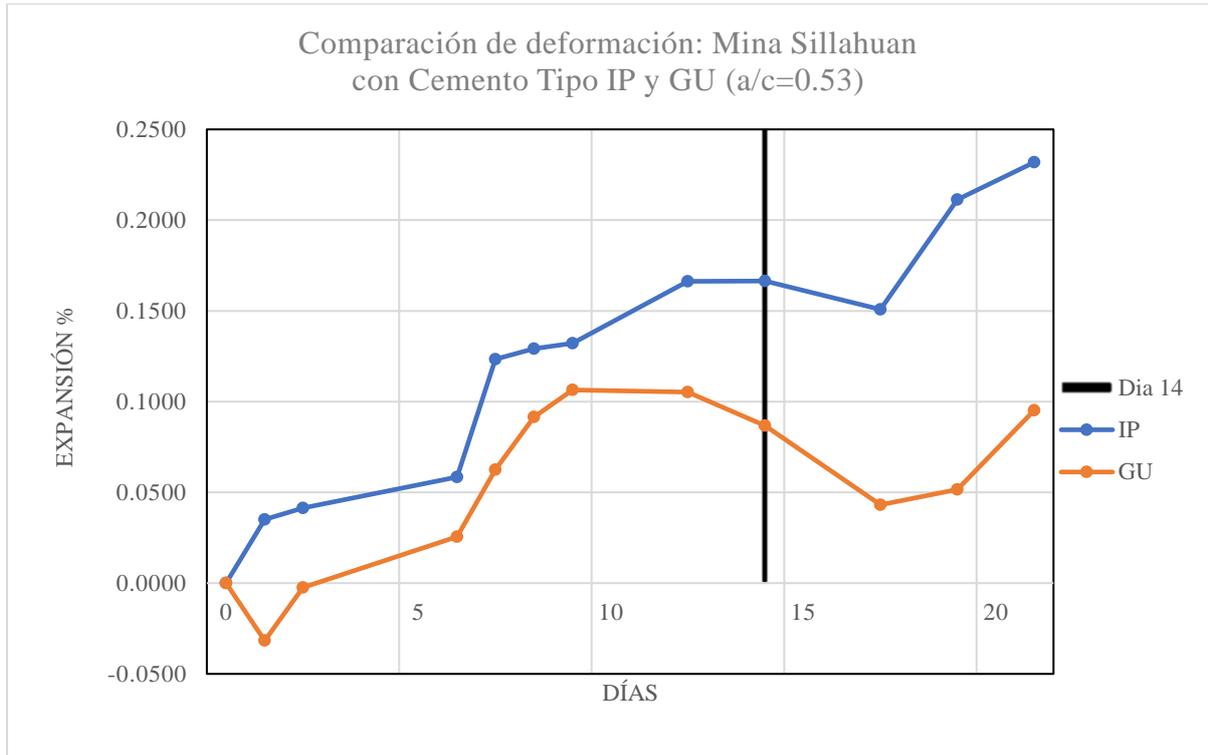


Figura 6: Comparación de deformación: Mina Sillahuan con Cemento Tipo IP y GU
Elaborado por: Jose Cargua

Al comparar la combinación de agregado de la mina Salazar con los dos tipos de cemento, como se muestra en la figura 7, se observa un comportamiento un tanto similar, ambas combinaciones superando el valor limite en la lectura del día 14.

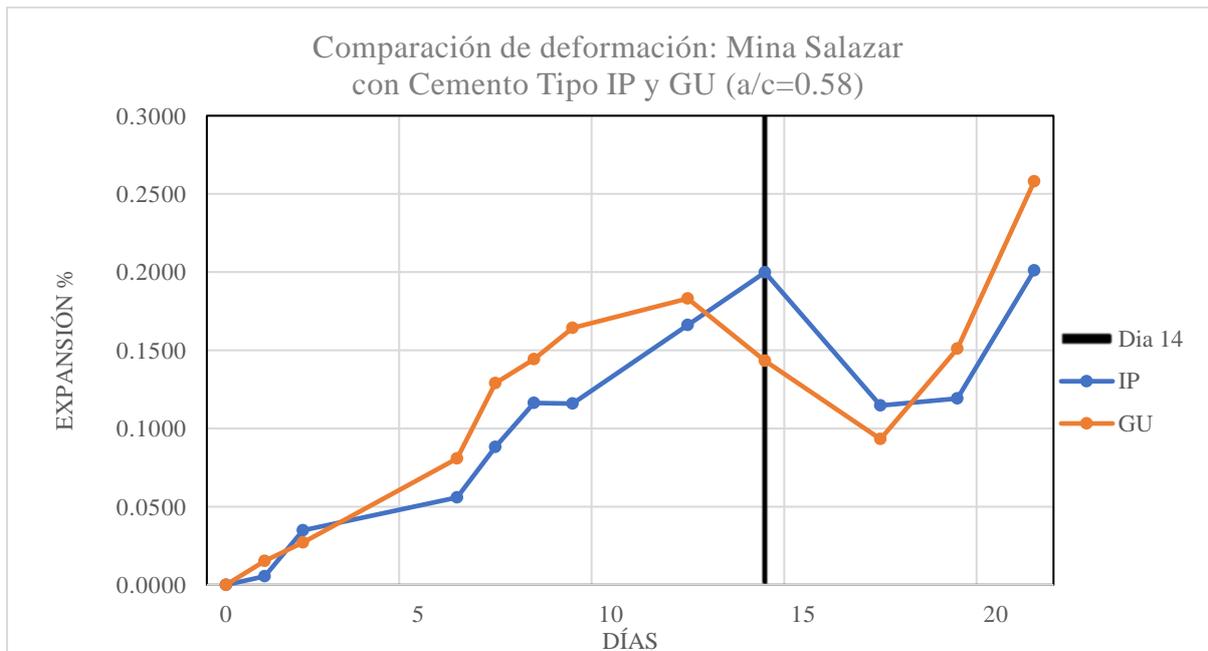


Figura 7: Comparación de deformación: Mina Salazar con Cemento Tipo IP y GU
Elaborado por: Jose Cargua

Se muestra en la figura 8. La relación entre las combinaciones de la Mina Sillahuan en combinación con el cemento tipo IP y GU, la línea anaranjada muestra el límite permisible para que la expansión promedio sea aceptable, la intersección entre el límite permisible (línea anaranjada) y el día 14 (línea negra) es el límite que se debe alcanzar al 14avo día de lectura. Como se puede observar la combinación con cemento GU tiene un valor aceptable en el día 14, con una expansión promedio de 0.868%, a diferencia de la combinación con IP que sobrepasa el límite con un valor de 0.1665%.

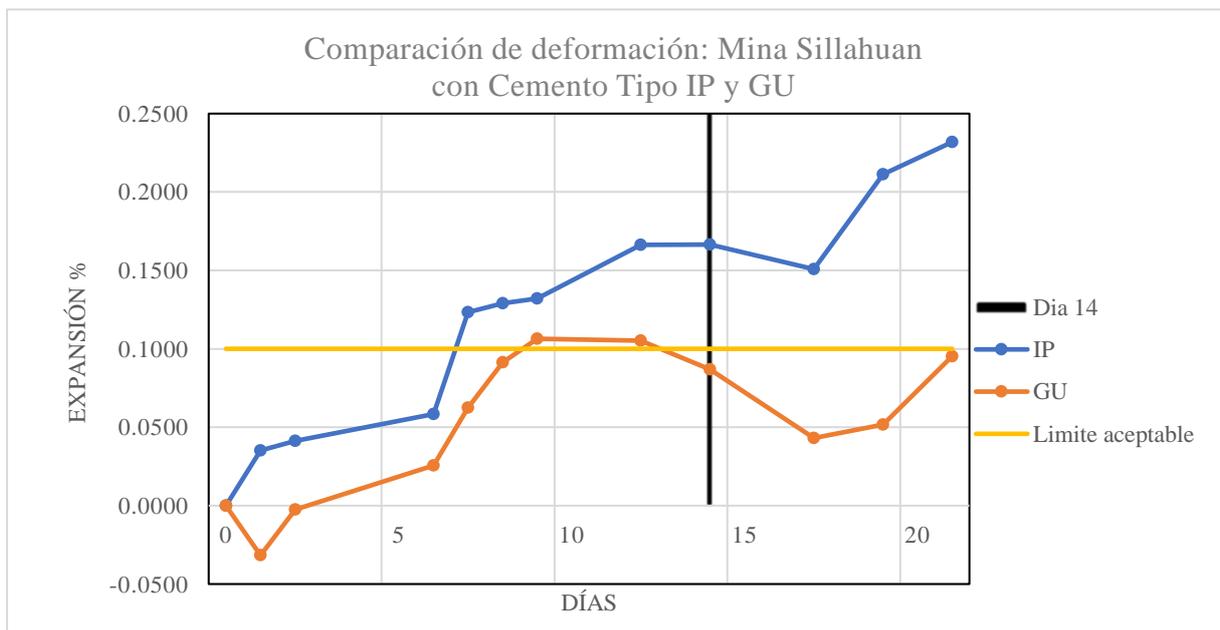


Figura 8: Comparación de la combinación Sillahuan con cemento tipo IP y GU Vs. expansión permisible
Elaborado por: Jose Cargua

Asimismo, se muestra en la línea horizontal el límite permisible y la línea vertical el 14avo día, en este caso ambas combinaciones, Salazar con cemento IP y GU, sobrepasan el límite aceptable por la norma al día de la lectura, con valores de 0.1998% para la combinación con IP y 0.1433% para la combinación con GU

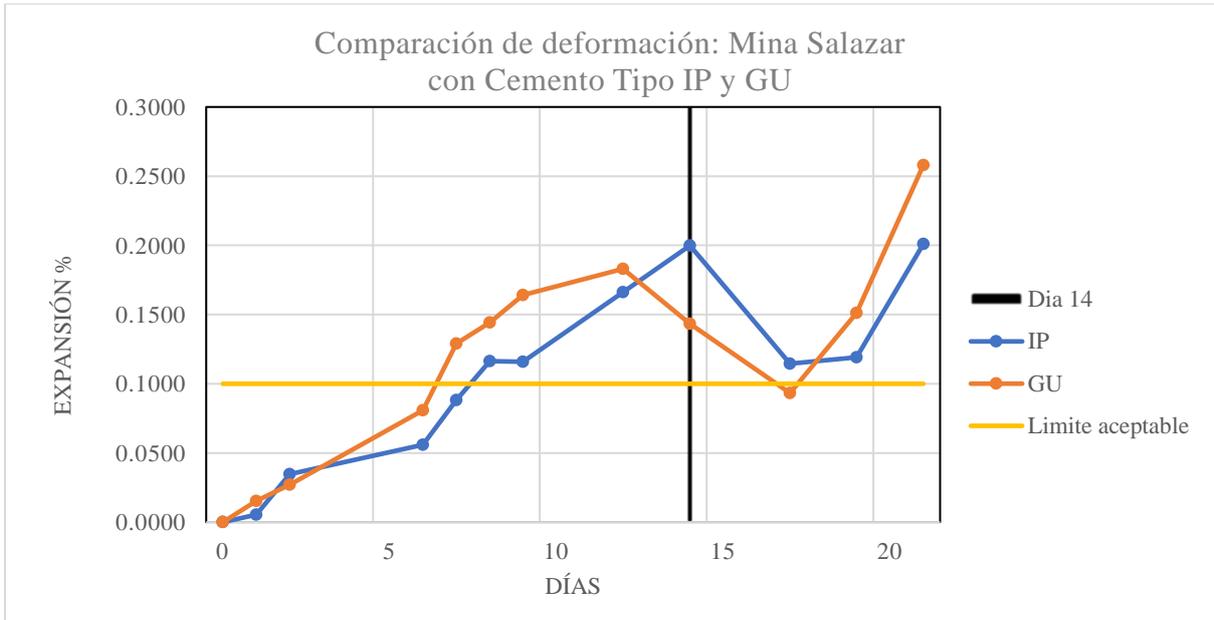


Figura 9: Comparación de la combinación Salazar con cemento tipo IP y GU Vs. expansión permisible
Elaborado por: Jose Cargua

4.2.DISCUSIÓN

La reactividad álcali-sílice, es de los ataques químicos más perjudiciales en una obra de construcción, ya que afecta al hormigón desde el interior, provocando grietas comprometiendo su durabilidad, resistencia, aspecto físico incluso podría provocar el colapso de la estructura en casos extremos.

Se realizaron ensayos individuales de los componentes que conformarán las barras de mortero, estos son: agregado pétreo (mina Sillahuan y Salazar y material cementante (tipo IP y GU) esto con el fin de predecir el comportamiento de cada material.

La siguiente tabla, nos muestra el nivel de riesgo de acuerdo a la cantidad de álcalis y la condición del agregado (Sánchez de Guzmán, 2011):

Tabla 11: Niveles de riesgo para que se produzca una reacción álcali-agregado

Nivel de Riesgo	Condición de la solución en los poros		Condición de los agregados		Condición de exposición del concreto	
	Altos Álcali	Bajos Álcali	Reactivos	Inocuos	Húmedo	Seco
Riesgo alto	X		X		X	
Riesgo medio	X		X			X
Riesgo Bajo		X	X		X	
Sin riesgo	X	X		X		X

Elaborado por: Jose Cargua **Adaptado de:** Sanchez de Guzman, D. (2011).

Partiendo de la información de la tabla y con los resultados obtenidos de los ensayos individuales se obtuvo que:

- El cemento tipo IP mostro concentraciones no detectables de Na_2O o K_2O que no significa necesariamente que no los contenga, más bien implica que sus concentraciones son muy bajas, por ende, que su riesgo potencial ante la reactividad álcali-sílice es **“bajo riesgo o sin riesgo”**
- El cemento tipo GU mostro concentraciones no detectables, igual que el caso anterior, de Na_2O pero si una concentración de 1.03% de K_2O lo cual, calculando el contenido álcali equivalente dio de resultado 0.68% entrando en la categoría de presencia de álcali media. Como consecuencia, este material se posiciona en la categoría de **“riesgo medio”** ante la reactividad álcali-sílice
- En cuanto al primer agregado, mina Sillahuan, se obtuvo una concentración de sílice del 58.5%, lo cual entra en la categoría de agregados reactivos, es decir existe el riesgo potencial de una reacción álcali-sílice
- De igual manera, los agregados de la mina Salazar, presentaron una concentración de sílice de 56.9%, que también entran en la categoría de reactivos y existe un nivel de riesgos que exista la reacción.
- Además, tomando en cuenta las barras de mortero, se consideró que todos los materiales se encontrarán en un ambiente húmedo, lo que significa un nivel de riesgo entre alto y bajo, dependiendo de las otras condiciones.

Al analizar, ahora, los componentes en combinaciones y observar su comportamiento se observó lo detallado en la siguiente tabla asimismo como el límite permisible:

Tabla 12: Comportamiento de las combinaciones en función del límite establecido

	Límite de expansion	Combinaciones			
		Sillahuan-IP	Salazar-IP	Sillahuan-GU	Salazar-GU
Comportamiento inocuo	<10%			X	
Comportamiento perjudicial	>10%	X	X		X

Elaborado por: Jose Cargua **Adaptado de:** ASTM C1567-04. (2005).

Se observa que, de las cuatro combinaciones realizadas, solo una, tuvo un comportamiento aceptable. Las otras tres sobrepasaron el límite establecido por la norma y entran en el rango de potencialmente perjudicial para el hormigón (ASTM C1567-04, 2005).

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.CONCLUSIONES

- El Método de Prueba Estándar para Determinar la Reactividad Potencial de Alkali-Sílice de Combinaciones de Materiales Cementicios y Agregados (Método Acelerado de la Barra de Mortero), es un método de una duración de 16 días que, mediante la fabricación de barras de mortero las cuales estarán sumergidas en una solución de Hidróxido de Sodio con una concentración de 1N y en un horno a 80 °C; se puede determinar la expansión de combinaciones únicas entre agregados y material cementante. Se realizaron un total de 24 barras, el doble de lo que estipula en la norma con el fin de obtener datos más representativos, 6 por cada combinación entre agregado de las minas Sillahuan y Salazar con cemento tipo IP y GU. Al concluir el ensayo todas las barras realizadas sufrieron de una expansión, tal y como se resume en la Tabla 10. En la lectura del día 14, se comprobó efectivamente y con la ayuda de organizadores gráficos, las barras de mortero de las combinaciones realizadas tuvieron expansiones a lo largo de su eje. Además, se observaron contracciones de las barras en otros días de lectura.
- Las Normas ASTM C 1567 y la norma NTE INEN 867 – INEN 872 coinciden en la interpretación de los resultados obtenidos mediante los ensayos de la barra de mortero ya sea este el método acelerado o no.
 1. Por ende, para la primera combinación Sillahuan–IP con una expansión resultante promedio de 0.1665 % se lo considerará como un comportamiento expansivo potencialmente perjudicial en aplicaciones en campo

2. Para la combinación Sillahuan–GU con una expansión promedio al 14avo día de ensayo de 0.0868% se clasifica como inocuo y que presentará expansiones aceptables en obra
 3. Para la combinación Salazar – IP con una expansión promedio de 0.1998% se lo considera comportamiento expansivo potencialmente perjudicial para el hormigón en una obra de campo.
 4. Finalmente, para la combinación Salazar – GU con una expansión de 0.1433%, igualmente es clasificado como un comportamiento potencialmente perjudicial en aplicaciones de campo.
- El ensayo FRX se lo realizó como una parte complementaria del ensayo principal, esto con el fin de conocer los niveles de concentración de ciertos compuestos que pueden provocar una reacción álcali-sílice. En cuanto al material cementante tipo IP, la concentración de álcali es tan baja que no fue detectada, y para el cemento tipo GU se detectó una concentración equivalente de álcali de 0.68% lo que lo clasifica como un nivel intermedio de presencia de álcali. Para el agregado pétreo se atribuyen valores de sílice de 58.5% y 56.9% para las minas Sillahuan y Salazar respectivamente, lo que significa que son potencialmente reactivos para que se produzca una la reacción álcali-sílice. Se atribuye, especialmente a los niveles de sílice, las expansiones producidas durante el ensayo, ya que inicialmente se planteó que las expansiones serían mínimas debido a la ínfima concentración de álcali encontrada en el cemento.

5.2. RECOMENDACIONES

- El Método de Prueba Estándar para Determinar la Reactividad Potencial de Álcali-Sílice de Combinaciones de Materiales Cementicios y Agregados (Método Acelerado de la Barra de Mortero), es un ensayo de precisión y cuidado ya que se debe controlar la concentración del compuesto a usarse, la temperatura a la que debe conservarse y las dosificaciones de cada material utilizado. Se puede cometer errores en la preparación, por ello la necesidad de no hacer 3 barras como establece la norma, sino 6 barras obtener datos más representativos.
- El NaOH es un compuesto corrosivo, que puede disolver recipientes de vidrio, metal o ciertos plásticos, por ello se utilizaron recipientes plásticos de polietileno de alta resistencia para que pueda soportar, además del compuesto, la alta temperatura a la que fue sometido por un total de 16 días. Además, al estar sometido a esas temperaturas, es recomendable utilizar mascarillas por los gases que podrían ser nocivos, guantes industriales en caso de un derramamiento y gafas protectoras por la salpicadura, con el fin de resguardar la salud del investigador.
- La reactividad álcali-sílice es una patología que afecta muy severamente a las estructuras de hormigón por lo que dichas estructuras además de un diseño estructural eficiente es necesario conocer los componentes con los que se va a edificar la obra, por esto es necesario y recomendable realizar investigaciones de los agregados de las minas restantes que proveen de material a la ciudad de Riobamba a fin de garantizar la escogencia del material más adecuado para una obra de calidad.

REFERENCIAS

- American Concrete Institute. (2017). ACI Concrete Terminology. *American Concrete Institute*, 3.
- Arribas, K. V., Alonso, M. A., Fin, T., & Curso, D. M. (2019). *Durabilidad del Hormigón Bajo la Acción Combinada de Procesos de Lixiviación y Hielo / Deshielo*.
- ASTM C 490. (2017). Standard Practice For Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement paste, Mortar, and Concrete. *ASTM International*, i, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0490>
- ASTM C1567-04. (2005). Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). *Annual Book of ASTM Standards*, 04.02(May), 774–778. <https://doi.org/10.1520/C1567-21>.
- Bedoya, R. (2010). *Evaluación Patológica del Edificio de la Policía Nacional Ubicado en las Calles Jorge Drom y Unión Nacional de Periodistas, en la Ciudad de Quito* [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/3593/T-PUCE-3603.pdf?sequence=1>
- Bertolini, L., Carsana, M., Gastaldi, M., Lollini, F., & Redaelli, E. (2011). Corrosion Assessment and Restoration Strategies of Reinforced Concrete Buildings of The Cultural Heritage. *Materials and Corrosion*, 62(2), 146–154. <https://doi.org/10.1002/maco.201005773>
- De la Cruz, E. F. (2018). Fluorescencia de Rayos X y Su Aplicación en la Determinación de Elementos Químicos en Determinadas Muestras. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 56.
- Escobar, F. (2013). *Reactividad Potencial Álcali Sílice de las Combinaciones de Materiales*

- Cementantes y Agregados. Método de la Barra de Mortero.* [Escuela Politecnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5741>
- Estupiñan, D., & Garcia, J. (2020). Importancia del Concreto en el Campo de la Construcción. *Revista Formación Estratégica, 1*, 1–13. <https://orcid.org/0000-0003-0414->
- Falcone, D., & Milanesi, C. (2016). Aplicación del Método Acelerado de la Barra de Mortero en el Estudio de Combinación de Agregados. *VII CONGRESO INTERNACIONAL - 21ª REUNION TECNICA DE LA AATH*, 397–404. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/4922>
- Garcia, N. A. (2020). *Primordiales Problemas de la Durabilidad del Concreto: Una Revisión General* (Issue 2017) [Universidad Santo Tomas]. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- NTE INEN 151. (2012). Cemento Hidráulico. Definición de Términos. *Norma Técnica Ecuatoriana.*, 1–6.
- NTE INEN 1762. (2015). Hormigón. Definiciones y Terminología. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 10. www.inen.gob.ec
- NTE INEN 1855-2. (2015). Hormigones. Hormigón Preparado en Obra. Requisitos. *Inen. Nte*, 3.
- NTE INEN 2380. (2011). Requisitos de Desempeño Para Cementos Hidráulicos: NTE-INEN-2380. *Inen, 1*(Primera Edición), 5. <http://181.112.149.203/buzon/normas/2380.pdf>
- Pasquel, E. (2014). Reactividad Alkali-Silice El VIH del Concreto. *Reactividad Alkali-Silice El VIH Del Concreto, 1*.
- Pire, W. (2013). Estudio de Durabilidad al Ataque de Sulfatos del Concreto con Agregado Reciclado. *Core.Kmi.Open.Ac.Uk*, 137. <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/12818497.pdf>

- Sánchez de Guzmán, D. (2011). *Durabilidad y Patología del Concreto* (Asociación Colombiana de Productores de Concreto ASOCRETO (ed.); 2a ed.). ASOCRETO.
- Segarra, J. (2005). *Envejecimiento de Presas por Reacciones Expansivas en el Hormigón* [Universidad Politecnica de Cataluña]. <http://hdl.handle.net/2099.1/3315>
- Thomas, M. D. A., Fournier, B., & Folliard, K. (2013). Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book. *Book*, 224.
- Valencia-Saavedra, W. G., Angulo-Ramírez, D. E., & Mejía de Gutiérrez, R. (2018). Resistencia Química de Concretos de Activación Alcalina Ceniza Volante/ Escoria: Sulfatos y Acidos. *Informador Técnico*, 82(1), 67.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1351>
- Veras, D., & Oliveira, R. (2019). Evaluación de los Agregados Utilizados en la Región Metropolitana de Salvador en Cuanto a la Ocurrencia de RAA. *Revista Alconpat*, 2, 185–199.
- Villagomez, C. (2019). *Reactividad Alcali – Sílice, de las Combinaciones Cementantes con los Agregados Pétreos de las Minas Cerro Negro y Rio Chambo*. [Universidad Nacional de Chimborazo].

ANEXOS

Anexo 1: Datos y resultados de la mesa de flujo de mortero

Tabla 13: Ensayo 1, Mesa de flujo; Mina Sillahuan

MINA SILLAHUAN					
ENSAYO 1					
a/c	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	% Fluidez
0.47	17	20.3	18.9	16.7	72.9
0.5	18.7	22.3	25.7	19.2	85.9
0.53	23.3	22.9	24.4	25.3	95.9
0.58	31.5	31.2	31.2	30	123.9

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 14:: Ensayo 2, Mesa de flujo; Mina Sillahuan

MINA SILLAHUAN					
ENSAYO 2					
a/c	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	% Fluidez
0.47	18.1	15.7	23.2	16.4	73.4
0.5	19.2	24.4	23	21	87.6
0.53	24.7	22.1	25	23.3	95.1

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 15:: Ensayo 1, Mesa de flujo; Mina Salazar

MINA SALAZAR					
ENSAYO 1					
a/c	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	% Fluidez
0.47	15.1	16.1	23.9	20.3	75.4
0.5	24.3	21.8	18.5	14.9	79.5
0.55	23.1	23.2	22.2	21.9	90.4
0.58	23.2	23.1	24	23.1	93.4
0.6	28.1	28.2	28.1	28.2	112.6

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 16: Ensayo 2, Mesa de flujo; Mina Salazar

MINA SALAZAR					
ENSAYO 2					
a/c	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	% Fluidez
0.47	19.3	19.8	19.9	19.4	78.4
0.55	22.6	23.9	24.2	23.1	93.8
0.58	24.7	24.6	23.9	23.7	96.9
0.6	25.1	29.7	31.1	28.2	114.1

Elaborado por: Jose Cargua

Anexo2: Expansión de las probetas estudiadas

Tabla 17: Porcentajes de Expansión Probeta 1

PROBETA 1							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
				(mm)			(%)
0	285.96	285.90	285.93	285.95	285.94		
1	285.97	285.95	286.01	286.00	285.98	0.048	0.0166
2	286.04	286.03	286.04	286.04	286.04	0.102	0.0358
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.09	286.10	286.07	286.11	286.09	0.157	0.0551
7	286.12	286.10	286.12	286.13	286.12	0.183	0.0638
8	286.05	286.02	286.09	286.10	286.07	0.130	0.0455
9	286.11	286.15	286.10	286.14	286.13	0.190	0.0664
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.17	286.20	286.21	286.18	286.19	0.255	0.0892
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.21	286.18	286.18	286.17	286.19	0.250	0.0874
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.24	286.27	286.22	286.19	286.23	0.295	0.1032
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.39	286.47	286.45	286.40	286.43	0.493	0.1722
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.53	286.48	286.46	286.41	286.47	0.535	0.1871

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 18: Porcentajes de Expansión Probeta 2

PROBETA 2							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.30	286.32	286.30	286.31	286.31		
1	286.33	286.34	286.32	286.36	286.34	0.030	0.0105
2	286.30	286.29	286.33	286.31	286.31	0.000	0.0000
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.59	286.55	286.61	286.62	286.59	0.285	0.0995
7	286.92	287.01	286.95	286.96	286.96	0.653	0.2279
8	286.98	287.02	287.00	287.03	287.01	0.700	0.2445
9	286.95	286.87	286.90	286.89	286.90	0.595	0.2078
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.89	286.85	286.93	286.91	286.90	0.588	0.2052
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.98	287.05	287.07	287.04	287.04	0.727	0.2541
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.16	287.20	287.15	287.17	287.17	0.863	0.3012
18	-	-	-	-	-	-	-
19	287.52	287.58	287.58	287.61	287.57	1.265	0.4418
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.60	287.59	287.55	287.61	287.59	1.280	0.4471

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 19: Porcentajes de Expansión Probeta 3

PROBETA 3							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.60	286.59	286.61	286.63	286.61		
1	286.55	286.61	286.54	286.56	286.57	-0.043	-0.0148
2	286.57	286.60	286.58	286.54	286.57	-0.035	-0.0122
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.49	286.41	286.44	286.40	286.44	-0.172	-0.0602
7	286.78	286.80	286.75	286.75	286.77	0.162	0.0567
8	286.85	286.80	286.79	286.77	286.80	0.195	0.0680
9	286.88	286.90	286.84	286.85	286.87	0.260	0.0907
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.95	286.90	286.89	286.91	286.91	0.305	0.1064
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.90	286.91	286.86	286.88	286.89	0.280	0.0977
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.22	287.18	287.22	287.17	287.20	0.590	0.2059
18	-	-	-	-	-	-	-
19	287.15	287.24	287.21	287.20	287.20	0.592	0.2067
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.16	287.19	287.21	287.22	287.20	0.587	0.2050

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 20: Porcentajes de Expansión Probeta 4

PROBETA 4							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	285.82	285.80	285.81	285.80	285.81		
1	285.95	285.97	285.96	285.96	285.96	0.153	0.0534
2	286.01	286.05	286.03	286.00	286.02	0.215	0.0752
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	285.90	285.94	285.89	285.91	285.91	0.102	0.0359
7	286.13	286.16	286.14	286.16	286.15	0.340	0.1190
8	286.14	286.16	286.13	286.17	286.15	0.342	0.1198
9	286.17	286.16	286.20	286.21	286.19	0.377	0.1321
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.42	286.41	286.38	286.44	286.41	0.605	0.2117
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.29	286.33	286.31	286.33	286.32	0.507	0.1776
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.13	286.18	286.10	285.98	286.10	0.290	0.1015
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.25	286.13	286.17	286.21	286.19	0.382	0.1338
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.46	286.41	286.49	286.44	286.45	0.642	0.2248

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 21: Porcentajes de Expansión Probeta 5

PROBETA 5							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.64	286.66	286.65	286.65	286.65		
1	286.60	286.64	286.63	286.64	286.63	-0.022	-0.0078
2	286.66	286.66	286.65	286.68	286.66	0.013	0.0044
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.67	286.65	286.67	286.68	286.67	0.018	0.0061
7	286.75	286.72	286.73	286.73	286.73	0.083	0.0288
8	286.73	286.72	286.75	286.73	286.73	0.083	0.0288
9	286.80	286.78	286.77	286.77	286.78	0.130	0.0454
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	287.00	286.94	286.94	286.95	286.96	0.308	0.1073
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.95	286.98	286.93	286.97	286.96	0.308	0.1073
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.86	286.69	286.60	286.83	286.75	0.095	0.0331
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.78	286.75	286.75	286.78	286.77	0.115	0.0401
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.56	286.60	286.95	286.61	286.68	0.030	0.0105

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 22: Porcentajes de Expansión Probeta 6

PROBETA 6							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.49	286.47	286.49	286.47	286.48		
1	286.93	286.89	286.94	286.91	286.92	0.438	0.1527
2	286.92	286.91	286.87	286.88	286.90	0.415	0.1449
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	287.1	287.11	287.07	287.09	287.09	0.612	0.2138
7	287.2	287.16	287.18	287.18	287.18	0.700	0.2443
8	287.2	287.17	287.18	287.16	287.18	0.697	0.2435
9	287.19	287.21	287.21	287.18	287.20	0.717	0.2505
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	287.3	287.26	287.27	287.27	287.28	0.795	0.2775
13	-	-	-	-	-	-	-
14	287.2	287.18	287.18	287.17	287.18	0.702	0.2452
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.06	287.02	286.62	287.05	286.94	0.457	0.1597
18	-	-	-	-	-	-	-
19	287.24	287.26	287.25	287.3	287.26	0.782	0.2731
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.4	287.39	287.36	287.4	287.39	0.907	0.3168

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 23: Porcentajes de Expansión Probeta 7

PROBETA 7							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.91	286.89	286.92	286.90	286.91		
1	286.92	286.91	286.90	286.91	286.91	0.005	0.0017
2	286.98	286.96	286.96	286.95	286.96	0.058	0.0200
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	287.17	287.16	287.14	287.15	287.16	0.250	0.0871
7	287.39	287.36	287.39	287.35	287.37	0.468	0.1629
8	287.40	287.38	287.36	287.37	287.38	0.473	0.1647
9	287.39	287.37	287.38	287.38	287.38	0.475	0.1656
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	287.40	287.38	287.38	287.36	287.38	0.475	0.1656
13	-	-	-	-	-	-	-
14	287.27	287.28	287.24	287.24	287.26	0.353	0.1229
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.19	287.25	287.17	287.22	287.21	0.303	0.1054
18	-	-	-	-	-	-	-
19	287.17	287.25	287.14	287.23	287.20	0.293	0.1020
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.36	287.35	287.33	287.30	287.34	0.430	0.1499

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 24: Porcentajes de Expansión Probeta 8

PROBETA 8							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
				(mm)			(%)
0	287.17	287.15	287.13	287.15	287.15		
1	287.08	287.07	287.11	287.10	287.09	-0.060	-0.0209
2	287.11	287.10	287.09	287.09	287.10	-0.053	-0.0183
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	287.16	287.15	287.12	287.17	287.15	0.000	0.0000
7	287.20	287.15	287.18	287.15	287.17	0.020	0.0070
8	287.39	287.44	287.37	287.42	287.41	0.255	0.0888
9	287.41	287.42	287.39	287.43	287.41	0.263	0.0914
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	287.42	287.40	287.39	287.42	287.41	0.257	0.0897
13	-	-	-	-	-	-	-
14	287.35	287.39	287.36	287.40	287.38	0.225	0.0784
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.29	287.28	287.31	287.31	287.30	0.147	0.0514
18	-	-	-	-	-	-	-
19	287.47	287.33	287.39	287.45	287.41	0.260	0.0905
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.39	287.40	287.39	287.38	287.39	0.240	0.0836

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 25: Porcentajes de Expansión Probeta 9

PROBETA 9							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.62	286.60	286.59	286.60	286.60		
1	286.26	286.31	286.26	286.27	286.28	-0.327	-0.1143
2	286.36	286.36	286.38	286.38	286.37	-0.232	-0.0811
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.42	286.39	286.37	286.40	286.40	-0.207	-0.0724
7	286.58	286.57	286.60	286.58	286.58	-0.020	-0.0070
8	286.59	286.63	286.63	286.62	286.62	0.015	0.0052
9	286.67	286.64	286.64	286.65	286.65	0.048	0.0166
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.60	286.63	286.58	286.60	286.60	0.000	0.0000
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.60	286.63	286.60	286.61	286.61	0.008	0.0026
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.40	286.49	286.43	286.52	286.46	-0.142	-0.0497
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.37	286.39	286.43	286.40	286.40	-0.205	-0.0715
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.71	286.70	286.72	286.72	286.71	0.110	0.0384

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 26: Porcentajes de Expansión Probeta 10

PROBETA 10							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.22	286.24	286.22	286.21	286.22		
1	286.17	286.20	286.18	286.20	286.19	-0.035	-0.0122
2	286.34	286.33	286.34	286.36	286.34	0.120	0.0419
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.36	286.37	286.34	286.33	286.35	0.127	0.0445
7	286.56	286.51	286.57	286.57	286.55	0.330	0.1153
8	286.57	286.53	286.56	286.57	286.56	0.335	0.1170
9	286.63	286.66	286.60	286.65	286.64	0.412	0.1441
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.66	286.65	286.63	286.64	286.65	0.422	0.1476
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.70	286.64	286.67	286.69	286.68	0.452	0.1581
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.32	286.41	286.40	286.38	286.38	0.155	0.0542
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.42	286.41	286.37	286.38	286.40	0.172	0.0603
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.46	286.50	286.48	286.35	286.45	0.225	0.0786

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 27: Porcentajes de Expansión Probeta 11

PROBETA 11							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.37	286.40	286.38	286.39	286.39		
1	286.27	286.30	286.32	286.30	286.30	-0.088	-0.0306
2	286.46	286.40	286.39	286.43	286.42	0.035	0.0122
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.56	286.49	286.50	286.48	286.51	0.123	0.0428
7	286.49	286.54	286.51	286.49	286.51	0.123	0.0428
8	286.64	286.59	286.61	286.63	286.62	0.233	0.0812
9	286.73	286.68	286.67	286.70	286.70	0.310	0.1082
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.75	286.70	286.69	286.70	286.71	0.325	0.1135
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.63	286.57	286.60	286.61	286.60	0.218	0.0759
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.54	286.50	286.51	286.59	286.54	0.150	0.0524
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.54	286.56	286.55	286.55	286.55	0.165	0.0576
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.62	286.68	286.70	286.67	286.67	0.283	0.0986

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 28: Porcentajes de Expansión Probeta 12

PROBETA 12							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.37	286.33	286.37	286.35	286.36		
1	286.29	286.34	286.31	286.32	286.32	-0.040	-0.0140
2	286.41	286.39	286.38	286.36	286.39	0.030	0.0105
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.50	286.49	286.52	286.50	286.50	0.147	0.0515
7	286.50	286.50	286.53	286.51	286.51	0.155	0.0541
8	286.63	286.60	286.62	286.62	286.62	0.262	0.0917
9	286.70	286.67	286.65	286.69	286.68	0.322	0.1126
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.72	286.66	286.69	286.67	286.69	0.330	0.1152
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.55	286.59	286.61	286.62	286.59	0.237	0.0829
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.45	286.53	286.47	286.49	286.49	0.130	0.0454
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.60	286.51	286.57	286.55	286.56	0.202	0.0707
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.74	286.69	286.73	286.66	286.71	0.350	0.1222

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 29: Porcentajes de Expansión Probeta 13

PROBETA 13							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	287.70	287.68	287.72	287.70	287.70		
1	287.74	287.70	287.69	287.74	287.72	0.018	0.0061
2	287.79	287.78	287.85	287.84	287.82	0.115	0.0400
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	288.00	287.96	287.99	287.96	287.98	0.278	0.0965
7	288.14	288.10	288.11	288.16	288.13	0.428	0.1486
8	288.34	288.36	288.30	288.36	288.34	0.640	0.2225
9	287.99	288.10	288.09	288.11	288.07	0.373	0.1295
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	288.28	288.34	288.33	288.30	288.31	0.612	0.2129
13	-	-	-	-	-	-	-
14	288.16	288.23	288.21	288.18	288.20	0.495	0.1721
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.07	288.06	288.17	288.20	287.88	0.175	0.0608
18	-	-	-	-	-	-	-
19	288.47	288.45	287.51	287.48	287.98	0.278	0.0965
20	-	-	-	-	-	-	-
21	288.44	289.39	288.40	288.41	288.66	0.960	0.3337

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 30: Porcentajes de Expansión Probeta 14

PROBETA 14							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.43	286.50	286.47	286.48	286.47		
1	286.55	286.54	286.52	286.55	286.54	0.070	0.0244
2	286.66	286.67	286.63	286.68	286.66	0.190	0.0663
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.69	286.68	286.70	286.69	286.69	0.220	0.0768
7	286.77	286.79	286.74	286.76	286.77	0.295	0.1030
8	287.00	286.90	286.93	286.92	286.94	0.467	0.1632
9	287.01	287.04	286.98	286.96	287.00	0.527	0.1841
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.96	287.04	287.01	287.03	287.01	0.540	0.1885
13	-	-	-	-	-	-	-
14	287.20	287.16	287.15	287.19	287.18	0.705	0.2461
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.90	286.94	286.95	286.91	286.93	0.455	0.1588
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.74	286.81	286.61	286.75	286.73	0.257	0.0899
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.85	286.83	286.79	286.81	286.82	0.350	0.1222

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 31: Porcentajes de Expansión Probeta 15

PROBETA 15							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.49	286.55	286.50	286.53	286.52		
1	286.62	286.58	286.59	286.63	286.61	0.088	0.0305
2	286.78	286.75	286.72	286.77	286.76	0.238	0.0829
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.70	286.76	286.69	286.72	286.72	0.200	0.0698
7	286.88	286.94	286.91	286.95	286.92	0.403	0.1405
8	286.96	286.92	286.97	286.96	286.95	0.435	0.1518
9	286.84	286.89	286.88	286.89	286.88	0.358	0.1248
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	287.02	286.95	286.97	286.97	286.98	0.460	0.1605
13	-	-	-	-	-	-	-
14	287.05	287.07	287.11	287.13	287.09	0.573	0.1998
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.11	287.07	286.90	286.88	286.99	0.473	0.1649
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.96	286.99	287.01	286.94	286.98	0.458	0.1597
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.43	287.46	287.40	287.39	287.42	0.902	0.3150

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 32: Porcentajes de Expansión Probeta 16

PROBETA 16							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.74	286.70	286.75	286.73	286.73		
1	286.60	286.65	286.66	286.62	286.63	-0.097	-0.0340
2	286.80	286.76	286.77	286.74	286.77	0.037	0.0131
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.90	286.80	286.81	286.81	286.83	0.100	0.0349
7	286.94	286.89	286.92	286.88	286.91	0.178	0.0619
8	287.02	287.01	286.97	286.99	287.00	0.267	0.0933
9	287.12	287.13	287.08	287.05	287.10	0.365	0.1273
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	287.35	287.40	287.33	287.35	287.36	0.627	0.2188
13	-	-	-	-	-	-	-
14	287.79	287.83	287.84	287.86	287.83	1.100	0.3836
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.96	286.94	286.96	286.89	286.94	0.207	0.0724
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.99	287.02	287.01	287.06	287.02	0.290	0.1011
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.09	287.06	286.99	287.03	287.04	0.313	0.1090

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 33: Porcentajes de Expansión Probeta 17

PROBETA 17							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.65	286.66	286.61	286.62	286.64		
1	286.57	286.62	286.61	286.58	286.60	-0.040	-0.0140
2	286.67	286.68	286.70	286.64	286.67	0.038	0.0131
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.74	286.70	286.69	286.74	286.72	0.083	0.0288
7	286.77	286.71	286.75	286.71	286.74	0.100	0.0349
8	286.80	286.76	286.79	286.76	286.78	0.142	0.0497
9	286.79	286.83	286.81	286.84	286.82	0.183	0.0637
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	287.05	286.95	286.94	286.96	286.98	0.340	0.1186
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.81	286.88	286.89	286.70	286.82	0.185	0.0645
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	287.06	286.99	287.05	287.04	287.04	0.400	0.1396
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.94	287.05	286.97	287.01	286.99	0.358	0.1247
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.15	287.12	287.08	287.14	287.12	0.487	0.1701

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 34: Porcentajes de Expansión Probeta 18

PROBETA 18							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	285.90	286.00	285.96	285.97	285.96		
1	286.04	285.98	286.02	286.01	286.01	0.055	0.0192
2	285.90	285.92	285.98	285.95	285.94	-0.020	-0.0070
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.07	286.04	286.03	286.02	286.04	0.082	0.0289
7	286.06	286.07	286.07	286.09	286.07	0.115	0.0402
8	285.98	285.99	286.04	286.02	286.01	0.050	0.0175
9	286.15	286.17	286.12	286.14	286.15	0.188	0.0656
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.24	286.25	286.21	286.24	286.24	0.278	0.0970
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.33	286.31	286.34	286.37	286.34	0.380	0.1329
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.17	286.26	286.24	286.20	286.22	0.260	0.0909
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.40	286.33	286.36	286.37	286.37	0.408	0.1425
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.44	286.41	286.38	286.39	286.41	0.447	0.1565

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 35: Porcentajes de Expansión Probeta 19

PROBETA 19							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	285.66	285.72	285.60	285.68	285.67		
1	285.56	285.53	285.49	285.59	285.54	-0.123	-0.0429
2	285.71	285.67	285.61	285.63	285.66	-0.010	-0.0035
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	285.69	285.72	285.74	285.63	285.70	0.030	0.0105
7	286.07	285.89	285.98	285.92	285.97	0.300	0.1050
8	286.14	285.99	286.07	286.02	286.06	0.390	0.1365
9	286.43	286.33	286.35	286.29	286.35	0.685	0.2398
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.37	286.34	286.42	286.32	286.36	0.697	0.2442
13	-	-	-	-	-	-	-
14	285.94	285.99	286.07	286.00	286.00	0.335	0.1173
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.15	285.78	286.11	286.05	286.02	0.357	0.1251
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.18	286.11	286.17	286.17	286.16	0.493	0.1724
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.23	286.19	286.18	286.21	286.20	0.538	0.1882

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 36: Porcentajes de Expansión Probeta 20

PROBETA 20							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
				(mm)			(%)
0	286.08	286.16	286.12	286.18	286.14		
1	286.24	286.17	286.29	286.25	286.24	0.103	0.0358
2	285.94	286.12	286.01	286.08	286.04	-0.098	-0.0341
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.31	286.24	286.20	286.33	286.27	0.135	0.0472
7	286.54	286.33	286.46	286.44	286.44	0.308	0.1075
8	286.67	286.48	286.55	286.52	286.56	0.420	0.1468
9	286.32	286.21	286.36	286.34	286.31	0.173	0.0603
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.34	286.29	286.34	286.35	286.33	0.195	0.0681
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.40	286.32	286.36	286.35	286.36	0.223	0.0778
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.18	286.32	286.21	286.11	286.21	0.070	0.0245
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.17	286.16	286.35	286.25	286.23	0.098	0.0341
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.72	286.72	286.70	286.71	286.71	0.578	0.2018

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 37: Porcentajes de Expansión Probeta 21

PROBETA 21							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	286.33	286.37	286.34	286.35	286.35		
1	286.47	286.40	286.43	286.39	286.42	0.075	0.0262
2	286.52	286.55	286.51	286.49	286.52	0.170	0.0594
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.47	286.44	286.53	286.54	286.50	0.148	0.0515
7	286.61	286.57	286.56	286.55	286.57	0.225	0.0786
8	286.59	286.67	286.61	286.58	286.61	0.265	0.0925
9	286.49	286.55	286.51	286.58	286.53	0.185	0.0646
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.77	286.81	286.89	286.86	286.83	0.485	0.1694
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.66	286.75	286.73	286.71	286.71	0.365	0.1275
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.57	285.71	286.61	286.54	286.36	0.010	0.0035
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.61	286.57	286.63	286.59	286.60	0.253	0.0882
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.33	287.24	287.35	287.22	287.29	0.938	0.3274

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 38: Porcentajes de Expansión Probeta 22

PROBETA 22							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	285.61	285.72	285.70	285.69	285.68		
1	285.54	285.67	285.61	285.63	285.61	-0.067	-0.0236
2	285.70	285.66	285.63	285.68	285.67	-0.012	-0.0044
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	285.77	285.73	285.75	285.76	285.75	0.072	0.0254
7	285.83	285.89	285.87	285.87	285.87	0.185	0.0648
8	285.88	285.87	285.83	285.90	285.87	0.190	0.0665
9	285.99	285.87	285.91	285.90	285.92	0.238	0.0831
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.01	286.07	285.94	285.96	286.00	0.315	0.1103
13	-	-	-	-	-	-	-
14	285.91	286.02	286.03	285.99	285.99	0.308	0.1076
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	285.80	285.84	285.85	285.90	285.85	0.167	0.0586
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.40	286.43	286.57	286.50	286.48	0.795	0.2783
20	-	-	-	-	-	-	-
21	287.36	287.27	287.29	287.36	287.32	1.640	0.5741

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 39: Porcentajes de Expansión Probeta 23

PROBETA 23							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	285.59	285.67	285.65	285.64	285.64		
1	285.87	285.79	285.86	285.84	285.84	0.203	0.0709
2	286.01	285.92	285.91	285.91	285.94	0.300	0.1050
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.23	286.19	286.21	286.25	286.22	0.583	0.2039
7	286.37	286.34	286.29	286.33	286.33	0.695	0.2433
8	286.35	286.28	286.34	286.35	286.33	0.693	0.2424
9	286.83	286.69	286.75	286.70	286.74	1.105	0.3869
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.62	286.46	286.56	286.51	286.54	0.900	0.3151
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.28	286.33	286.31	286.29	286.30	0.665	0.2328
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	286.32	286.27	286.35	286.30	286.31	0.673	0.2354
18	-	-	-	-	-	-	-
19	286.17	286.10	286.05	286.02	286.09	0.447	0.1567
20	-	-	-	-	-	-	-
21	286.01	285.98	286.07	286.03	286.02	0.385	0.1348

Elaborado por: Jose Cargua

Tabla 40: Porcentajes de Expansión Probeta 24

PROBETA 24							
Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Variación	Expansión
	(mm)						(%)
0	285.49	285.57	285.54	285.55	285.54		
1	285.60	285.61	285.64	285.59	285.61	0.073	0.0254
2	285.63	285.61	285.67	285.69	285.65	0.113	0.0394
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	286.00	286.02	285.91	285.89	285.96	0.418	0.1462
7	286.07	285.99	286.01	286.08	286.04	0.500	0.1751
8	286.04	286.02	286.09	286.06	286.05	0.515	0.1804
9	285.91	286.03	285.95	285.98	285.97	0.430	0.1506
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	286.12	286.04	286.10	286.08	286.09	0.548	0.1917
13	-	-	-	-	-	-	-
14	286.17	286.04	286.07	286.12	286.10	0.563	0.1970
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	285.67	285.80	285.93	286.03	285.86	0.320	0.1121
18	-	-	-	-	-	-	-
19	285.99	286.04	286.07	286.07	286.04	0.505	0.1769
20	-	-	-	-	-	-	-
21	285.96	285.93	285.80	285.85	285.89	0.348	0.1217

Elaborado por: Jose Cargua

Anexo 3: Evidencia fotográfica



Figura 10: Agregado; lavado, tamizado y secado.

Elaborado por: Jose Cargua



Figura 11: Flujo de mortero, $a/c=0.47$

Elaborado por: Jose Cargua



Figura 12: Elaboración de las barras de mortero
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 13: Desencofrado de las barras
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 14: a) Recipiente; b) Hidróxido de Sodio (1N)
Elaborado por: Jose Cargua

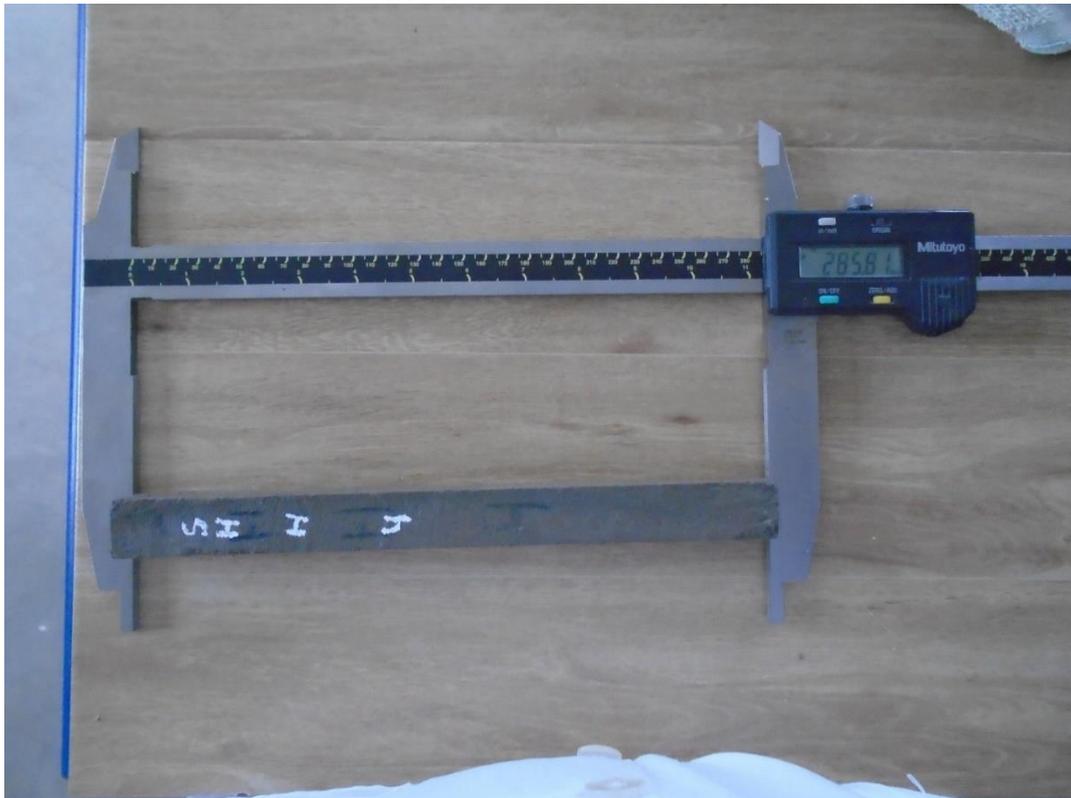


Figura 15: Medición inicial de la barra
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 16: Recipiente herméticamente sellado y dispuesto a 80 °C
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 17: Barra, día 2 de inmersión en NaOH
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 18: Desgaste y desprendimiento de la barra, combinación; Mina Salazar-Cemento IP
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 19: Agrietamiento y desprendimiento, combinación; Mina Sillahuan-Cemento IP
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 20: Agrietamiento día 10, combinación; Mina Sillahuan-Cemento GU
Elaborado por: Jose Cargua



Figura 21: Barras sumergidas en NaOH
Elaborado por: Jose Cargua

Anexo 4: Resultado de los Ensayos FRX Aplicadas a las Muestras



UTPL
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS LABORATORIO DE GEOQUÍMICA ANALÍTICA

Asunto: Informe de Fluorescencia de Rayos X

Método: Mining Light Elements (MLE)

Solicitante: José Andrés Cargua Huaraca

Fecha de entrega: 19 de julio de 2022.

En la siguiente tabla se presentan los valores de composición química, obtenidos mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) de las muestras correspondientes al **Exp. No. 031-2022**, empleando el equipo Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X portátil marca Bruker S1 Turbo SD.

MUESTRA	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	S (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
H	4,4	8,6	1,22	1,39	76	1,5
	SnO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Co ₃ O ₄ (%)	TiO ₂ (%)	Sb ₂ O ₃ (%)	MnO (ppm)
	ND	ND	0,36	0,17	ND	744
	CeO ₂ (%)	Ta ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (ppm)	HfO ₂ (%)		
	ND	ND	211	ND		
CH	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	S (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
	9,91	29,3	1,16	1,5	50	1,67
	SnO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Co ₃ O ₄ (%)	TiO ₂ (%)	Sb ₂ O ₃ (%)	MnO (ppm)
	ND	1,03	0,408	0,245	ND	780
	CeO ₂ (%)	Ta ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (ppm)	HfO ₂ (%)		
ND	ND	240	ND			
SA	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	S (ppm)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
	15,8	56,9	ND	913	7,15	2,62
	SnO ₂ (%)	K ₂ O (%)	Co ₃ O ₄ (%)	TiO ₂ (%)	Sb ₂ O ₃ (%)	MnO (%)
	ND	1,17	0,66	0,45	ND	0,13
	CeO ₂ (%)	Ta ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	HfO ₂ (ppm)		
ND	ND	ND	40			

SH	Al₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	P₂O₅ (%)	S (ppm)	CaO (%)	Fe₂O₃ (%)
	18,4	58,5	ND	363	6,7	2,32
	SnO₂ (%)	K₂O (%)	Co₃O₄ (%)	TiO₂ (%)	Sb₂O₃ (%)	MnO (%)
	ND	0,89	0,56	0,46	ND	0,1
	CeO₂ (%)	Ta₂O₅ (ppm)	Cr₂O₃ (%)	HfO₂ (%)		
	ND	410	ND	ND		

Estos resultados corresponden a la composición química de la muestra expresada en elementos mayoritarios (>1%), minoritarios (<1 a 0,1%) y trazas (ppm).

ND: No detectó.

Observaciones: El Na₂O y Carbono no es analizado por FRX, pero la muestra los puede contener.

Universidad Técnica Particular de Loja (U.T.P.L) y Laboratorio de Beneficio de Minerales se deslindan de toda responsabilidad civil, laboral y penal, derivado del protocolo de muestreo de las alícuotas ingresadas al laboratorio que puedan alterar los resultados del análisis, puesto que en este caso no fueron tomadas por un representante de la U.T.P.L.



Ing. Carlos Roberto Correa J.

Responsable de la Laboratorio de Geoquímica Analítica del Laboratorio de Beneficio de Minerales



San Cayetano Alto s/n Loja -
Ecuador
Telf.: (593 - 7) 3701444
Fax: (593 - 7) 2584893
informacion@utpl.edu.ec Apartado Postal:
11 - 01 - 608 www.utpl.edu.ec