

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DEL CONCRETO CON
AGLOMERANTE CAL-PUZOLANA Y ADITIVOS, COMO
SOLUCIÓN DE BAJO COSTO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR:
HILTON PILLACA CHÁVEZ**

**ASESORA:
M.Sc. ISABEL MOROMI NAKATA**

**Lima- Perú
2020**

© 2020, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

PILLACA CHÁVEZ, Hilton

hilton.pillaca.c@uni.pe

982066467

Dedicado a mis padres,
cuyo ejemplo de
esfuerzo y dedicación al
trabajo formaron gran
parte de mi persona.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a todas las personas que me ayudaron a sacar adelante esta investigación, a mi asesora cuyos comentarios y críticas contribuyeron a encaminar este estudio, y por supuesto al Laboratorio de ensayo de materiales LEM-UNI y CDMAN-UNI, "CENTRO DE DESARROLLO DE MATERIALES AVANZADOS Y NANOTECNOLOGIA", siendo en sus ambientes que pude desarrollar los ensayos necesarios para esta tesis.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN	4
ABSTRACT	6
PRÓLOGO	8
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS.....	13
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	14
1.1.- INTRODUCCIÓN.....	14
1.2.-OBJETIVOS	15
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	17
2.1.- CONCRETO	17
2.1.1.- Reseña histórica del cemento	17
2.1.2.- Fases del Clinker de cemento portland	19
2.1.3.- Proceso de hidratación del cemento portland	20
2.1.4.- Naturaleza del gel C-S-H.....	21
2.1.5.- Aditivos del cemento	23
2.1.6.- Adiciones al cemento	25
2.2.- MEZCLAS ALTERNATIVAS AL CEMENTO PORTLAND ORDINARIO	29
2.2.1.- Yesos aglomerantes	30
2.2.2.- Cales grasas o aéreas	30
2.2.3.- Cales hidráulicas.....	31
2.2.5.- Cementos portland	32
2.3.- ESTADO DEL ARTE	33
2.3.1.- Industria del cemento: estado actual y retos	33
2.3.2.- Mezcla de concreto a base de aglomerante cal-puzolana	38

2.3.3.- Concreto con cemento alcalino.....	42
2.4.- NORMAS TECNICAS.....	47
CAPÍTULO III: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES USADOS.....	48
3.1.- ELECCION DE MATERIALES.....	48
3.2.- PUZOLANA.....	48
3.3.- CAL HIDRÁULICA.....	58
3.4.- ADITIVOS Y ADICIONES.....	60
3.5.- AGREGADOS.....	62
3.5.1.- Análisis granulométrico – NTP 400.012.....	62
3.5.2.- Módulo de finura – NTP 400.011.....	62
3.5.3.- Tamaño máximo – NTP 400.011.....	63
3.5.4.- Tamaño máximo nominal – NTP 400.011.....	63
3.5.5.- Peso específico – NTP 400.021.....	63
3.5.6.- Peso Unitario Suelto – NTP 400.017.....	63
3.5.7.- Peso Unitario compactado – NTP 400.017.....	64
3.5.8.- Contenido de Humedad – NTP 339.185.....	65
CAPÍTULO IV: DISEÑO DE MEZCLAS.....	70
4.1.- DISEÑO DE MEZCLAS AGLOMERANTE CAL-PUZOLANA.....	73
4.1.1.- Primera etapa.....	74
4.1.2.- Segunda etapa.....	75
4.1.3.- Tercera etapa.....	80
CAPÍTULO V: ENSAYOS SOBRE EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	83
5.1.- ASENTAMIENTO – NTP 339.035.....	83
5.2.- PESO UNITARIO – NTP 339.046.....	85
5.3.- TIEMPO DE FRAGUADO – NTP 339.082.....	87
CAPÍTULO VI: ENSAYOS SOBRE EL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.....	92

6.1.- CURADO DEL CONCRETO – ASTM C192/C192 – 16	92
6.2.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN – NTP 339.034.....	94
CAPÍTULO VII: INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	102
7.1.- CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	102
7.1.1.- Tiempo de Fraguado	103
7.2.- CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	105
7.2.1.- Resistencia a la compresión	106
CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE COSTOS.....	114
CONCLUSIONES	117
ANÁLISIS FINAL.....	117
CONCLUSIONES.....	122
RECOMENDACIONES.....	125
BIBLIOGRAFÍA	127
ANEXOS	130

RESUMEN

El concreto elaborado con cemento portland es uno de los materiales más usados por la humanidad, sus propiedades son muy adecuadas para la construcción, por ello permiten satisfacer las necesidades de infraestructura que toda sociedad requiere. Se puede resaltar algunas de sus propiedades como su bajo costo, ya que existe en abundancia, además posee una gran versatilidad y capacidad de manipulación, gracias a lo cual puede tomar casi cualquier forma en que se vacíe, además de la propiedad de endurecer bajo el agua, siendo adecuada para obras de carácter hidráulico. Sin embargo, más allá de las buenas propiedades que el concreto hecho con cemento portland ofrece, existe serias cuestiones que en tiempos actuales se les debe prestar más atención, como lo son el gasto energético en su producción y las emisiones de CO₂ a la atmosfera, según se puede verificar en el portal del MINEM Perú. Este portal señala que para cada tonelada(t) de cemento producida, se emite 0.75t de CO₂ al ambiente, debido a ello la producción de cemento portland es responsable del 8% de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera y por ello se encuentra entre las industrias más contaminantes de las que desarrolla la actividad humana, antecedida por la industria energética; además existe serios problemas relacionado a la durabilidad del concreto, hay muchos factores que lo pueden afectar y reducir el tiempo de servicio. Por lo expuesto se verifica que se requieren alternativas al cemento portland ordinario(CPO); en este camino de búsqueda de aglomerantes alternativos, existe varios tipos de aglomerantes, en una línea los que se basan en las materias primas que al reaccionar en medio acuoso forman el gel resistente C-S-H, como lo son los aglomerantes de cal-puzolana y afines, en otra línea se tienen a los cementos alcalinos, belíticos, sulfobelíticos, etc., los cuales se basan en la reacción de materiales silicoaluminosos en presencia de medios acuosos fuertemente alcalinos. El primer tipo de estos materiales conglomerantes tiene los componentes de sílice (SiO₂), proveniente de las puzolanas y cal (CaO), los cuales en reaccionan en un medio acuoso formando en silicato cálcico hidratado (gel resistente C-S-H), entonces en teoría estos elementos reaccionan de manera parecida al CPO. El segundo tipo de conglomerantes inician con las investigaciones sobre los cementos alcalinos que datan desde los años 50's, estos a la fecha se posiciona como una clara alternativa al CPO; básicamente el mecanismo viene dado por la propiedad de disolución de

la sílice amorfa en medios fuertemente alcalinos ($\text{PH} > 12-13$), entonces al darse la activación gracias a temperaturas superiores a 60c° y humedad mayor al 90%, forma un gel resistente que aglomera la mezcla, uno de los principales es el gel N-A-S-H, que es el equivalente al gel C-S-H en los otros tipos de conglomerantes, sin embargo su génesis y la estructura mineralógica es muy diferente. Es así que existen alternativas al CPO y es responsabilidad de la industria generar cambios que propicien una actividad más sustentable y de esa manera aportar en los esfuerzos de la humanidad en frenar la contaminación ambiental.

ABSTRACT

The concrete made with portland cement is one of the most used materials by humanity, its properties are very suitable for construction, so they can meet the infrastructure needs that every society requires. It is possible to emphasize some of its properties like its low cost, since it exists in abundance, in addition it has a great versatility and capacity of manipulation, thanks to which it can take almost any form in which it is emptied, in addition to the property to harden under the water, being adapted for works of hydraulic character. However, beyond the good properties that concrete made with portland cement offers, there are serious issues that in these times should be paid more attention, such as energy consumption in its production and CO₂ emissions to the atmosphere, as can be verified in the portal of MINEM Peru. This portal points out that for every ton(t) of cement produced, 0.75t of CO₂ is emitted into the atmosphere. Due to this, the production of portland cement is responsible for 8% of the emissions of greenhouse gases into the atmosphere and therefore it is among the most contaminating industries that human activity develops, preceded by the energy industry; in addition, there are serious problems related to the durability of concrete, there are many factors that can affect it and reduce the time of service. For the exposed thing it is verified that alternatives to the ordinary portland cement (CPO) are required; in this way of search of alternative binders, several types of binders exist, in a line those that are based on the raw materials that when reacting in aqueous means form the resistant gel C-S-H, as they are it the binders of lime-puzzola and related, in another line are had to the alkaline, belitic, sulfobelitic cements, etc, which are based on the reaction of silicoaluminous materials in the presence of strongly alkaline aqueous media.

The first type of these conglomerating materials has silica (SiO₂) components, coming from pozzolans and lime (CaO), which react in an aqueous medium forming calcium silicate hydrate (C-S-H resistant gel), so in theory these elements react in a similar way to CPO. The second type of binders began with the research on alkaline cements that date from the 50's, to date it is positioned as a clear alternative to CPO; Basically the mechanism comes given by the property of dissolution of the amorphous silica in strongly alkaline means (PH>12-13), then when giving itself the activation thanks to superior temperatures to 60c° and

humidity greater to 90%, forms a resistant gel that agglomerates the mixture, one of the main ones is the N-A-S-H, that is the equivalent to the C-S-H in the other types of conglomerates, nevertheless its genesis and the mineralogical structure is very different. Thus, there are alternatives to CPO and it is the responsibility of the industry to generate changes that will lead to a more sustainable activity and thus contribute to the efforts of humanity to curb environmental pollution.

PRÓLOGO

El concreto, siendo uno de los materiales más usados en la construcción es también uno de los de mayor gasto energético en su producción y de gran emisión de CO₂ a la atmósfera por lo que la búsqueda de materiales alternativos al cemento portland se ha intensificado por la mayor preocupación en los aspectos relacionados con la reducción del uso de la energía y la contaminación ambiental.

Una de las líneas de investigación es la que se basa en las materias primas que al reaccionar en medio acuoso forman el gel resistente C-S-H, como lo son los aglomerantes de cal-puzolana y afines, y otra a los cementos alcalinos los cuales se basan en la reacción de materiales sílico-aluminosos en presencia de medios acuosos fuertemente alcalinos.

El presente trabajo muestra el estudio de estas alternativas y los factores que influyen en su comportamiento mecánico, cuyos resultados se espera contribuya al mejor conocimiento sobre el tema y permita continuar la investigación para el logro de propuestas favorables para su aplicación en la construcción.

MSc. Ing. Isabel Moromi Nakata

Asesora

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Consumo mundial de cemento en los últimos años (mill. TM).	37
Tabla 3.1: Granulometría porcentual de la puzolana molturada.....	51
Tabla 3.2: Porcentajes de compuestos presentes en la puzolana.	57
Tabla 3.3: Composición química cal hidráulica.	59
Tabla 3.4: Composición química del Sulfato de Potasio.....	61
Tabla 3.5: Composición química del Sulfato de Zinc.	61
Tabla 3.6: Composición química del Sulfato de Magnesio.	61
Tabla 3.7: Propiedades Físicas de los agregados.	67
Tabla 3.8: Método Agregado Global.....	69
Tabla 4.1: Diseño de mezclas etapa 1.	74
Tabla 4.2: Resistencias a la compresión en etapa 1.	75
Tabla 4.3: Diseño de mezclas etapa 2.	76
Tabla 4.4: Resistencia a la compresión – Etapa 2.....	78
Tabla 4.5: Diseño de mezclas – Etapa 3.....	81
Tabla 4.6: Diseño de mezclas cemento alcalino.	82
Tabla 5.1: Asentamientos.	84
Tabla 5.2: Especificación de capacidad del recipiente.	85
Tabla 5.3: Resultados ensayo de Peso Unitario.	86
Tabla 6.1: Norma sobre la edad de ensayo.	95
Tabla 6.2: Resistencia a la Compresión E-1.....	96
Tabla 6.3: Resistencia a la Compresión E-2.....	97
Tabla 6.4: Resistencia a la Compresión E-3.....	98
Tabla 6.5: Resistencia a la Compresión E-4.....	99
Tabla 6.6: Resistencia a la Compresión E-6.....	100
Tabla 6.7: Resistencia a la Compresión cemento alcalino.	101
Tabla 6.8: Resumen resistencia a la compresión.	101

Tabla 8.1: Costo de la puzolana.....	114
Tabla 8.2: Costo de materiales.....	114
Tabla 8.3: Materiales por diseño de mezclas.....	115
Tabla 8.4: Materiales por diseño de mezclas.....	116
Tabla 9.1 Composición química de los estudios comparados.....	118
Tabla 9.2 Cantidad de material muy fino en estudios comparados.....	119
Tabla 9.3 Cantidad de fase vítrea en estudios comparados.....	119
Tabla 9.4 Comparativo Fineza y F'c.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Faro de Eddystone.	18
Figura 2.2: Hidratación de partículas de cemento portland.	21
Figura 2.3: Modelo estructural compuesto para el gel C-S-H.	22
Figura 2.4: Representación del modelo C-S-H.	23
Figura 2.5: Balance de masas en la producción de 1.0 t de cemento.	34
Figura 2.6: Consumo y Producción de cemento, PBI de mundo (2006-2018P). 35	
Figura 2.7: Crecimiento de producción y consumo de cemento en Perú (mil TM)	36
Figura 2.8: Sistema ternario CaO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂	39
Figura 2.9: Ubicación de Materiales alternativos en el diagrama ternario CaO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂	41
Figura 2.10: Modelo conceptual de polimerización.	44
Figura 3.1: Cantera Tanturjo – Ayacucho.	49
Figura 3.2: Molturación de la puzolana.	50
Figura 3.3: Ensayo de lavado por la malla n°200.	51
Figura 3.4: Mallas usadas en Ensayo de Lavado.	52
Figura 3.5: Difractograma de la puzolana.	54
Figura 3.6: Cálculo de cuantitativo de la parte cristalina.	55
Figura 3.7: Equipo usado en el ensayo de Difracción de Rayos X.	56
Figura 3.8: Espectro de elementos químicos presentes.	57
Figura 3.9: Agregado fino evaluado en la Huso ASTM - C33.	66
Figura 3.10: Agregado grueso de acuerdo al Huso 56.	67
Figura 3.11: Tamices usados en la granulometría del agregado fino.	68
Figura 3.12: Procedimiento de pesado para el PUC.	68
Figura 3.13: Combinación en Método Agregado Global.	69
Figura 4.1: Insumos para la medición de PH.	72

Figura 4.2: Medición de PH solo Cal H (Izq.) y Cal H + Puz(Der.).....	72
Figura 4.3: Elaboración cubos de prueba – Etapa 2.....	77
Figura 4.4: Ensayo de resistencia a la compresión en cubos – Etapa 2.....	78
Figura 4.5: Cubos agrietados – Etapa 2.....	79
Figura 4.6: Ensayo E-5 a una edad de 3 días.....	82
Figura 5.1: Medición del asentamiento.....	84
Figura 5.2: Ensayo de Peso Unitario.....	86
Figura 5.3: Ensayo de medición del Tiempo de Fraguado.....	88
Figura 5.4: Tiempo de Fraguado en E-1.....	88
Figura 5.5: Tiempo de Fraguado en E-2.....	89
Figura 5.6: Tiempo de Fraguado en E-3.....	89
Figura 5.7: Tiempo de Fraguado en E-4.....	90
Figura 5.8: Tiempo de Fraguado en E-6.....	90
Figura 6.1: Poza de curado.....	93
Figura 6.2: Poza de curado cemento alcalino.....	94
Figura 6.3: Ensayo de resistencia a la compresión.....	95
Figura 7.1: Comparativa de la resistencia a la penetración.....	104
Figura 7.2: F'c de E-1 en el tiempo.....	106
Figura 7.3: F'c de E-2 en el tiempo.....	107
Figura 7.4: F'c de E-3 en el tiempo.....	108
Figura 7.5: F'c de E-4 en el tiempo.....	109
Figura 7.6: F'c de E-6 en el tiempo.....	110
Figura 7.7: Comparativa de los F'c en el tiempo.....	111
Figura 7.8: Comparativa F'c finales.....	112
Figura 7.9: Rotura de probetas de cemento alcalino.....	113
Figura 9.1: Condiciones comparadas puzolana propia y Lesday (2007).....	120
Figura 9.2: Tendencia del comportamiento Fineza vs F'c.....	121

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

%A: Porcentaje de arena o agregado fino.

%Abs: Porcentaje de absorción

a/c: Relación agua cemento.

CH: $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

C-S-H: Gel de silicato cálcico hidratado.

DRX: Difracción de Rayos X.

E-1: Diseño de mezcla aglomerante cal-puzolana.

E-2: Diseño de mezcla aglomerante cal-puzolana+2% Aditivo acelerante.

E-3: Diseño de mezcla aglomerante cal-puzolana+4% K_2SO_4 .

E-4: Diseño de mezcla aglomerante cal-puzolana+4% Na_2SO_4 .

E-6: Diseño de mezcla aglomerante cal-puzolana+4% MgSO_4 .

F'c: Resistencia a la compresión del concreto.

M.F: Modulo de finura

N-A-S-H: Gel silicoaluminoso alcalino hidratado.

CPO: Cemento Pórtland.

Pe: Peso Específico.

PU: Peso Unitario.

PUC: Peso unitario compactado.

PUS: Peso unitario suelto.

TMN: Tamaño Máximo Nominal.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- INTRODUCCIÓN

Es difícil imaginar el mundo de la construcción sin los elementos que permiten su extensión y creación de infraestructura necesaria para las actividades humanas. Uno de los más importantes es el cemento portland, que desde su invención hace ya casi 200 años, ha revolucionado los materiales de construcción, esto debido a sus grandes prestaciones y la abundancia de las materias primas, esta tecnología se ha establecido y extendido por todo el planeta. Sin embargo, las tendencias y necesidades cambian, hoy en día está demostrado que la contaminación del medio ambiente y el cambio climático son un problema muy importante, para combatir ello se hacen esfuerzos en todo el mundo, pero aún son insuficientes. La industria del cemento es una de las más contaminantes al ser responsable del 8% en emisiones de gases de efecto invernadero, en este contexto se exigen soluciones para combatir dichos problemas. El presente estudio busca mostrar alternativas a las mezclas de concretos hechos con cemento portland, para dicho fin se aplica la ciencia y los métodos modernos en determinar la naturaleza de los aglomerantes y plantear diseños de mezcla de concreto. En primer lugar, se investiga las mezclas a partir del conglomerante cal-puzolana, de modo que se busca aplicar los conocimientos que fueron generados desde los primeros morteros creados en los tiempos del imperio romano, ya que la prueba de que funcionan y resisten el paso del tiempo se puede apreciar hoy en día en las grandes estructuras como el Panteón de Agripa o Panteón de Roma; además se analiza la resistencia a la compresión, la cual se genera principalmente de la formación de gel C-S-H a partir de las reacciones hidráulicas que se forman en los componentes de la mezcla en presencia de un medio acuoso, esta característica es compartida también por hoy en día por el cemento portland con la diferencia que los productos del Clinker son mucho más reactivos y dejan mucho menos residuos sin reaccionar en comparación con las mezclas de cal-puzolana. En segundo lugar, se experimentó con un tipo de cemento alcalino en el cual tiene una manera muy diferente de generar sus elementos resistentes como lo es el gel N-A-S-H; ya en los años 50's el investigador Ralph K. Iler fue pionero en estudiar la química de la sílice y sus procesos de polimerización, así como Glukhovskiy (1959), define el mecanismo de reacción de elementos aluminosilicatos en presencia de soluciones alcalinas, cabe resaltar que durante años siguientes en

la URSS se investigó y aplicó los cementos alcalinos tal es así que en la actual Ucrania se construyó edificios con cementos alcalinos, pero por razones políticas estas investigaciones no se extendieron en la comunidad científica hasta los años 90's. En el caso de las mezclas con cementos alcalinos requieren consideraciones especiales en la preparación de la disolución alcalina y la temperatura de curado inicial de 80 °C.

Las líneas de investigación en el mundo actual apuntan a cementos híbridos con activadores alcalinos sólidos y adición de Clinker entre 10-20% lo cual le da los beneficios del cemento portland en cuestión de propiedades en estado fresco y resistencias iniciales, y las propiedades de los cementos alcalinos a edades más prolongadas sean durabilidad, menor retracción, resistencia a altas temperaturas y menores emisiones de gases de efecto invernadero. La presente investigación trata de aplicar los estudios que se tienen acerca de los concretos alternativos y complementarios al hecho con cemento portland, para dicho fin se usó puzolana correspondiente a la zeolita natural de la zona de Tantarjo – Pacaycasa – Ayacucho. Esta puzolana está presente tanto en la primera parte acerca de las mezclas con cal-puzolana y también aplicado al caso del cemento alcalino.

1.2.-OBJETIVOS

El presente estudio tiene como objeto mostrar alternativas a los aglomerantes que son de uso generalizado como el cemento portland, para ello se busca revalorizar las mezclas que se usaron desde la antigüedad como el formado por la cal-puzolana, y por otra parte experimentar el cemento alcalino. En ese sentido se plantea los siguientes objetivos:

-Mostrar el estado actual de la industria del concreto y su alto impacto en la contaminación del medio ambiente, especialmente en las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera.

- Mostrar científicamente el estado mineralógico, mecánico y químico de las materias primas y a partir de ello explorar el comportamiento químico, y como producto del análisis corroborado por lo teórico y los ensayos de laboratorio, determinar cuáles son los factores más importantes que gobiernan al aglomerante cal-puzolana y el cemento alcalino.

- Evaluar y diseñar mezclas de aglomerante cal-puzolana que contengan adiciones, los cuales, con el debido sustento teórico, puedan mejorar sus propiedades mecánicas.

- Evaluar en el laboratorio el desempeño mecánico de las mezclas de conglomerante cal-puzolana y cemento alcalino, para ello aplicar la Norma Técnica Peruana que corresponda a cada propiedad.

- Desarrollar un análisis comparativo que muestre los factores más incidentes en el comportamiento de los materiales silicoaluminosos como la puzolana natural.

- Explorar el comportamiento del cemento alcalino, fundamentando teóricamente y evaluando en el laboratorio su naturaleza.

- Abrir la puerta a nuevas investigaciones que apliquen investigaciones actuales a los materiales y realidad peruana, de modo que contribuyan a construir un camino de una industria de la construcción más responsable con el medio ambiente.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.- CONCRETO

El concreto es uno de los materiales más importantes y masivos de la construcción, Rivva (2000) define al concreto como un producto artificial compuesto que consiste de un medio ligante denominado pasta, dentro del cual se encuentran embebidas partículas de un medio ligado denominado agregado. La pasta es el resultado de la combinación química del material cementante con el agua. Es la fase continua del concreto dado que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto de este. Entonces se sabe que básicamente la pasta, que representa el cemento en contacto con agua, es responsable del endurecimiento, así mismo en un estado endurecido la pasta inicial se ve transformada en tobermorita (gel C-S-H), estringita, portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), y elementos sin reaccionar.

2.1.1.- Reseña histórica del cemento

La historia de los materiales cementantes comienza hace mucho tiempo, acompañando a las personas en la necesidad de infraestructuras que satisfagan sus necesidades de refugio, un hogar que les proporcione un espacio para vivir con seguridad y comodidad. En la época megalítica se utilizaban bloques de piedra de gran tamaño cuya estabilidad dependía de su colocación. Posteriormente, los egipcios emplearon ladrillos de barro o adobe secados al sol y colocados en forma regular, uniéndolos entre sí con arcilla del Nilo. Los griegos y romanos desarrollaron el uso de materiales derivados de la caliza. Se percataron de que ciertos depósitos volcánicos de la localidad de Pozzuoli (Italia), mezclados con cal y arena, producían mortero de gran fuerza capaz de resistir la acción del agua. Este tipo de mortero se usó para levantar construcciones como el Coliseo y el Partenón, así como un gran número de edificaciones distribuidas por todo el imperio romano. Con la caída del imperio, el interés por el conocimiento de los materiales cementantes desapareció, y hasta el siglo XVIII no hubo ningún avance tecnológico significativo, Sánchez (2017).

En 1756 Jonh Smeaton fue el encargado de construir el faro de Eddystone (Inglaterra). El emplazamiento de dicho faro, rocoso y prácticamente a nivel del mar, hacía necesario el empleo de un conglomerante capaz de resistir condiciones

agresivas del entorno, esto llevo a Smeaton a profundizar en el estudio de distintos tipos de calizas. Durante sus investigaciones observo que las calizas con mayores contenidos de impurezas arcillosas eran las que presentaba mejores propiedades mecánicas tras su calcinación, mientras que las más puras se desmoronaban por acción del agua. Las cales hidráulicas obtenidas por Smeaton se consideran un paso intermedio entre las cales hidratadas (no hidráulicas) utilizadas en la antigüedad, y el cemento Portland actual, Sánchez (2017).

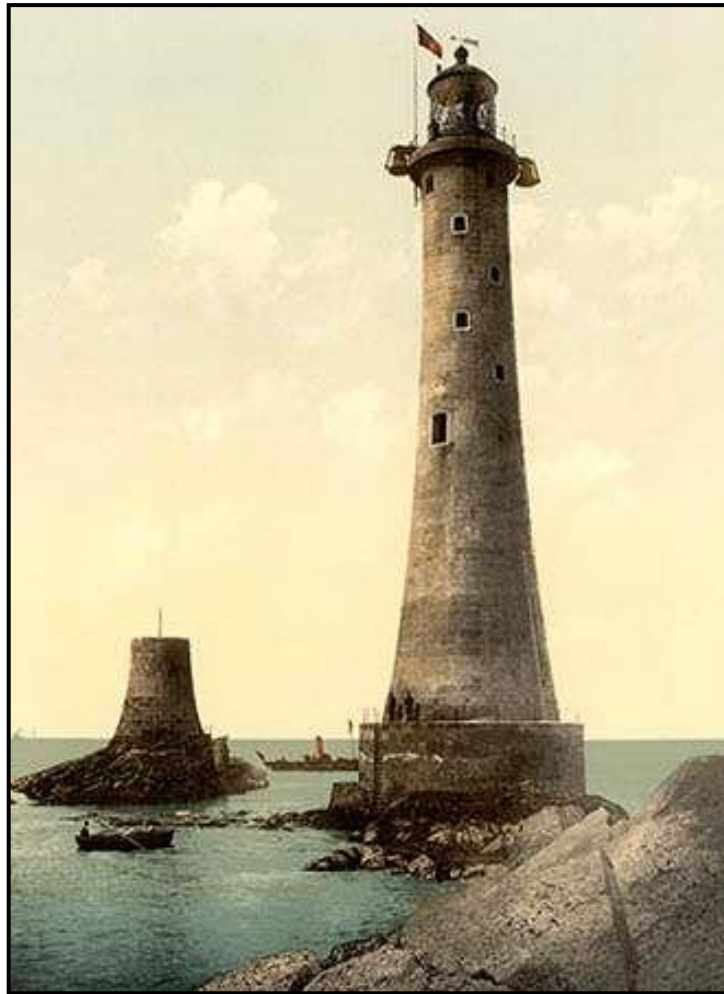


Figura 2.1: Faro de Eddystone.
Fuente: Web de la Enciclopedia Británica.

En 1817 el químico francés Vicat estableció un sistema de fabricación de cemento basado en calizas y arcillas previamente dosificadas y molidas conjuntamente. Dado que este sistema se sigue empleando en la actualidad, se considera que Vicat fue el padre del cemento, Sánchez (2017).

En 1824 Joseph Apsdin, patentó un proceso de calentamiento en horno de piedra caliza y arcilla que producía un cemento artificial que al hidratarse y endurecerse adquiriría la misma resistencia que la piedra de la isla de Portland. En 1845 I.C. Johnson descubrió que la mezcla calentada en exceso (calcinada) originaba un producto duro denominado Clinker y que moliendo finamente este producto se obtenía un mejor cemento, Ottazzi (2011). Es entonces que este producto, fruto de las investigaciones mencionadas se le denomina cemento portland y en gran medida es exactamente el mismo que se usa hoy en día.

2.1.2.- Fases del Clinker de cemento portland

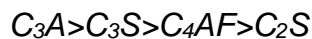
El Clinker de cemento Portland está compuesto fundamentalmente por cuatro constituyentes mineralógicos cristalinos: silicato tricálcico (C_3S) 50%-70%, silicato bicálcico (C_2S) 10%-20%, aluminato tricálcico (C_3A) 5%-10% y ferroatluminato cálcico (C_4AF) 5%-10%(%en peso). Los compuestos descritos son las fases mayoritarias en el cemento, sin embargo, existe algunos compuestos presentes en proporciones minoritarias que son descritos como impurezas, aproximadamente estas fases constituyen 4% del total y eventualmente se generan por lo general al estar presente en las materias primas o restos del combustible y también puede ser producto de las adiciones que se les añaden para mejorar la calcinación.

Las fases minoritarias de mayor importancia y que se encuentran recurrentemente son: cal libre (CaO) alrededor de 1.5% en peso de Clinker; Periclasa (MgO) aproximadamente 1.5% en peso, es un compuesto peligroso ya que su exceso reacciona lentamente con el agua y se convierte en brucita ($Mg(OH)_2$), tiene un carácter expansivo y si se encuentra en mayores concentraciones puede traer problemas al concreto; por último tenemos a los compuestos sulfatados, los que se puedan encontrar dependen de los álcalis que se puedan encontrar en las materias primas como podrían ser Na y K, ello adicionado con el azufre proveniente de los combustibles usados pueden generar diversas fases sulfatadas como son thenardita (Na_2SO_4), arcanita(K_2SO_4), langbeinita cálcica ($K_2SO_4 \cdot 2CaSO_4$), etc.

2.1.3.- Proceso de hidratación del cemento portland

La mecánica de hidratación del cemento entra en acción una vez que los componentes cemento entran en contacto con el agua, es ahí que de acuerdo al tipo de componente de las fases del Clinker adicionado con sulfato cálcico (yeso, añadido para regular el fraguado), dependerá las propiedades en estado fresco y endurecido, siendo la reacción de mayor o menor velocidad acorde a la naturaleza de cada componente del Clinker, todo ello finalmente se transformará en: tobermorita (gel C-S-H, responsable de más del 80% del endurecimiento), estringita, portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y componentes sin reaccionar.

Sánchez (2017), define las velocidades de las reacciones de hidratación de cada una de las fases del Clinker de cemento portland es diferente, y viene representada de mayor a menor de la siguiente manera:



En el orden de dichas reacciones de compuestos unitarios del cemento, en general dan como producto resistente gel C-S-H además de liberación de energía calorífica en su formación. Investigadores detallan el proceso de formación del gel C-S-H, iniciándose por la reacción del C_3A inmersas en las partículas de cemento, a partir de lo cual se produce la cristalización del gel C-S-H, a continuación, a medida que la hidratación avanza los cristales siguen su crecimiento y también los otros elementos como portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ o CH). En la Figura 2.2 se puede apreciar la hidratación de las partículas del cemento portland, se debe resaltar que la generación de las reacciones químicas se desarrollan en la superficie de las partículas, se podría decir entonces que estas reacciones químicas se desarrollan en el área específica del aglomerante, ya que estas no se disuelven en un medio acuoso, es ahí que surge la enorme importancia de que el aglomerante tenga la mayor finura posible que traerá como consecuencia una mayor área específica y por ende una mayor posibilidad de que reaccionen la mayor parte del aglomerante.

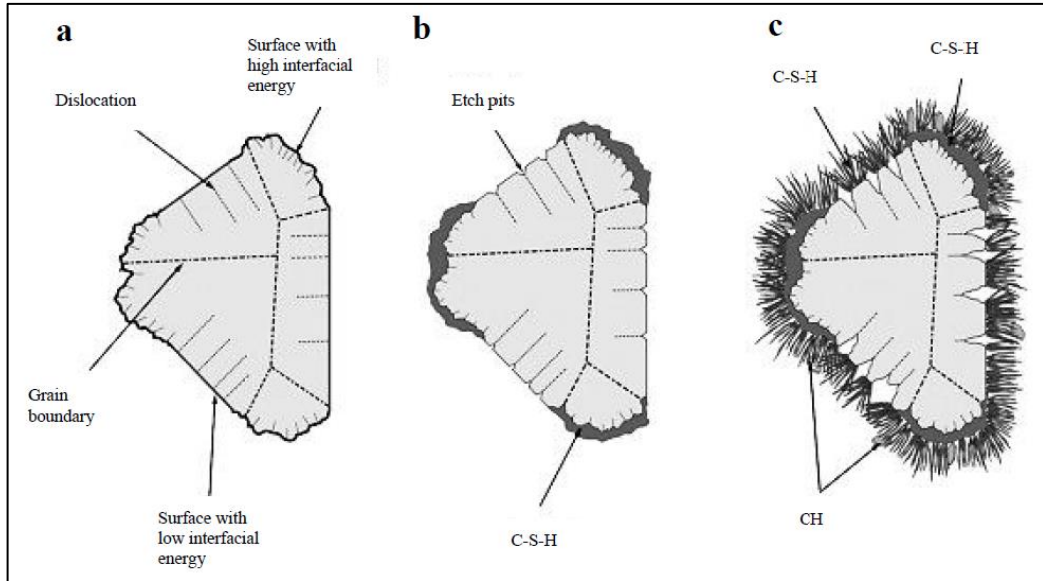


Figura 2.2: Hidratación de partículas de cemento Portland.
Descripción: Hidratación del C_3S a) partícula de C_3S anhidro; b) Inicio de la hidratación del C_3S y formación de C-S-H; c) Nucleación de portlandita y C-S-H.
Fuente: Sánchez (2017).

2.1.4.- Naturaleza del gel C-S-H

El gel C-S-H es la principal estructura formada a partir de la hidratación del cemento, si bien es cierto la etringita tiene cierta importancia al fraguado inicial, la diferencia al fraguado final y resistencias del concreto endurecido pertenecen en una proporción no menor del 80%, este gel C-S-H está compuesto por 2 clases de estructuras cristalinas: Tobermorita 1.4nm y jennita, a continuación, se describirá su naturaleza.

La tobermorita presenta una estructura tipo "Dreierketten", donde los tetraedros de sílice se repiten a intervalos de tres o cuatro unidades a ambos lados de una lámina central de Ca-O. Dos tetraedros de silicio (llamados par tetraédricos) comparten los oxígenos con la lámina de CaO, mientras que un tercero (tetraedro puente) comparte los oxígenos con el par tetraédrico. En el espacio interlamina se sitúan las moléculas de agua y los átomos de calcio adicionales (ver Figura 2.3). En la tobermorita la relación Ca/Si es de 0.83, pero este valor varía fácilmente en las formas menos cristalinas Sánchez (2017).

La jennita, al igual que la tobermorita, presenta una estructura basada en una capa central de CaO flanqueada por filas de silicatos (tipo Dreierketten), presentando también átomos de calcio y moléculas de agua entre las capas. La principal diferencia entre ambas estructuras es la presencia de grupos OH- sustituyendo a

tetraedros de sílice en la cadena simple Dreirketten, lo cual origina una considerable ondulación de la capa de CaO.

Existe un modelo representado por Andersen et al. (2004), en el cual se asume que en el gel C-S-H, el aluminio podría sustituir al silicio en los tetraedros puente. Desarrollándose el balance de cargas se ve que es posible por la introducción de átomos de elementos alcalinos o de calcio entre estas capas, este modelo se presenta a continuación:

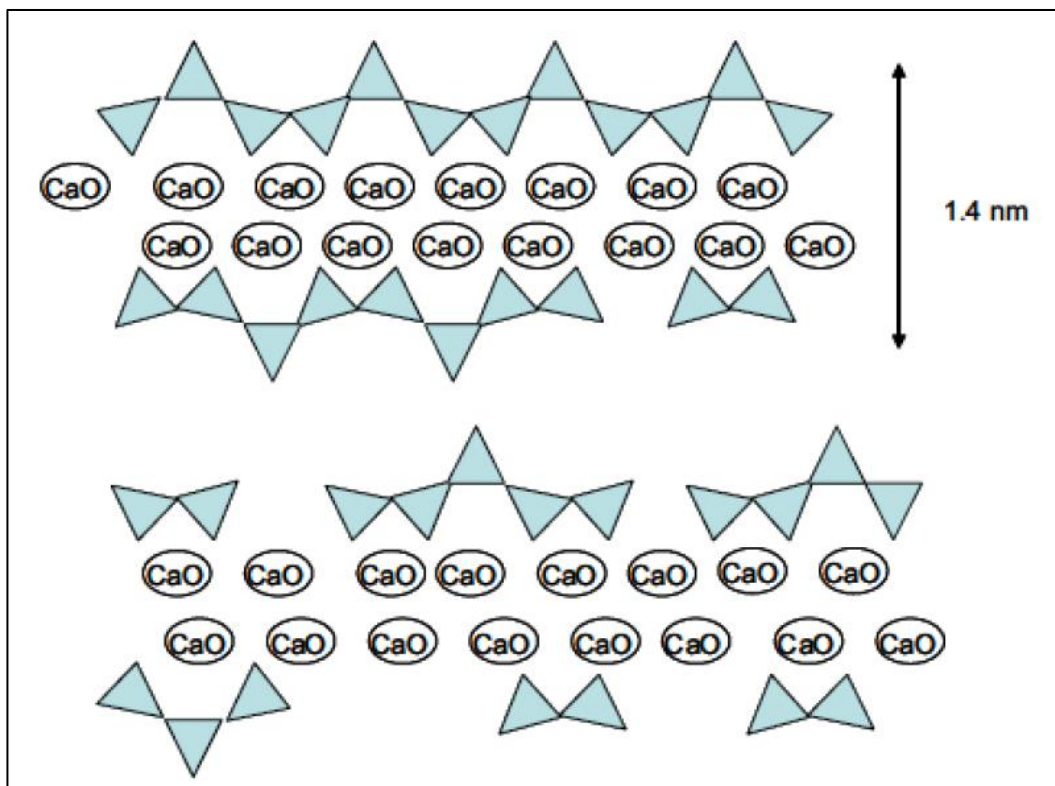


Figura 2.3: Modelo estructural compuesto para el gel C-S-H.

Descripción: Los espacios interlaminares están ocupados por átomos de calcio adicionales, grupos OH⁻ y moléculas de agua, los cuales no son representados en el modelo estructural.

Fuente: Sánchez (2017).

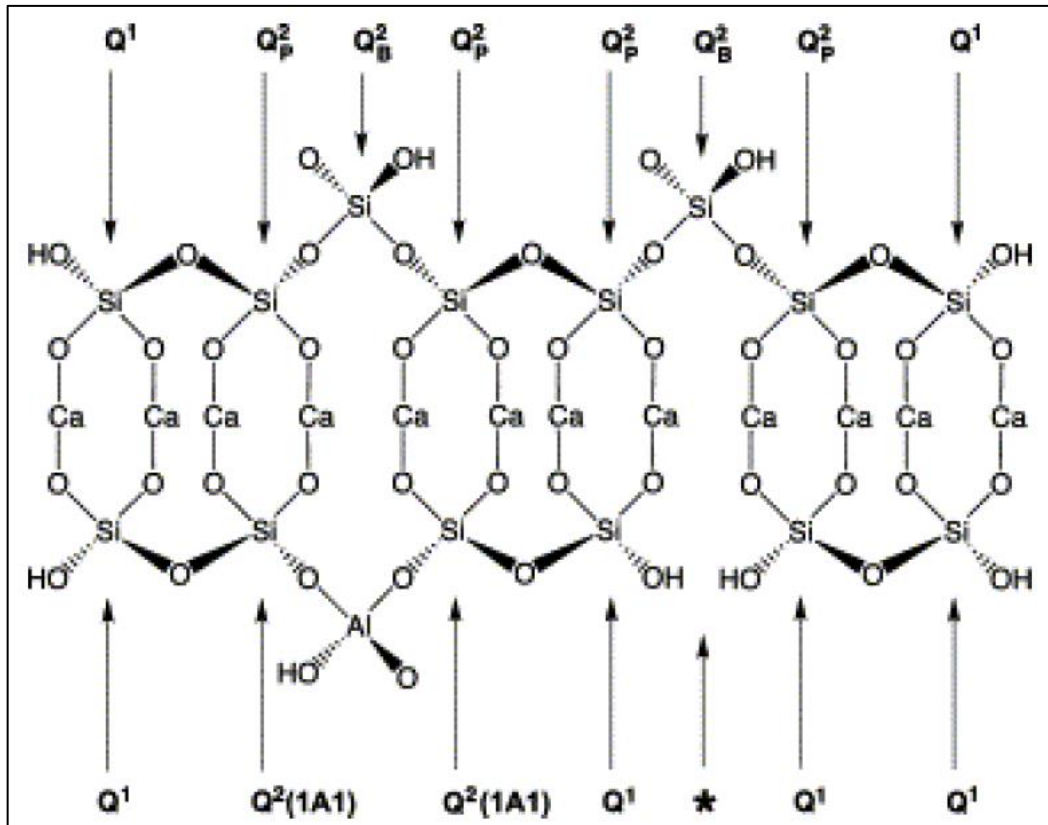


Figura 2.4: Representación del modelo C-S-H.
Fuente: Andersen et al. (2004).

2.1.5.- Aditivos del cemento

Un aditivo es definido por el comité 116R del American Concrete Institute, así también por la Norma ASTM C 125, como un material que, no siendo agua, agregado, cemento hidráulico, o fibra de refuerzo, es empleado como un ingrediente del mortero o concreto, y es añadido a la tanda inmediatamente antes o durante su mezclado, Rivva (2000).

En general se puede afirmar que son materiales que modifican las propiedades de las mezclas en la cual son aplicadas, estas modificaciones tienen que ser predecibles y pueden afectar al concreto en estado fresco o endurecido. Estas modificaciones que se buscan, surgen de una necesidad práctica y en muchos casos son el único camino para lograr los resultados deseados. Las propiedades que se modifican pueden ser plasticidad, cantidad de aire interior, rapidez o lentitud de fraguado, etc., para ello existe una gran cantidad de productos en el mercado; cabe resaltar que casi todos los aditivos están diseñados para

reaccionar con el calcio ya que forma parte de casi todos los productos de reacción del cemento, como lo son el gel C-S-H, portlandita y estringita.

-CONSIDERACIONES PARA EL USO DE ADITIVOS

El uso de aditivos en el caso de mezclas hechas in situ no implica modificaciones en la cantidad de cemento señalado en el informe de diseño de mezclas, además siempre debe ser coordinado y aprobado por el supervisor de obra. Entonces a consideración de la necesidad de tener esas propiedades especiales que se debe aplicarse el uso de los aditivos, también muchas veces se busca la aplicación por razones económicas ya que lograr algunas de las propiedades buscadas pueden implicar otras tecnologías que no serían viables económicamente; otra de las razones puede ser técnicas, como por ejemplo en el caso de la trabajabilidad, las mezclas necesitan una cantidad de agua de hidratación y otra lubricación, para un asentamiento normal de 3"- 4" requiere una cantidad de agua de lubricación que solo permite tener relaciones $A/C > 0.6$, tal es así, según E. Pasquel, que cuanto se plantea $A/C < 0.45$ no existe agua de lubricación con lo cual se hace imposible generar mezclas de este tipo en condiciones ordinarias, entonces es aquí donde se genera una necesidad genuina de usar aditivos.

En el presente estudio se usó el aditivo acelerante de fragua y resistencias iniciales (Sika Cem Plastificante, revisar anexo), el cual es libre de cloruros y está elaborado a base de sulfatos, los cuales están diseñados para reaccionar con las fases de aluminio y sulfato de calcio en el caso del cemento portland, con lo cual permite formar estringita en mayor velocidad y propiciar por la reacción del gel C-S-H. Si bien es cierto en las mezclas que se plantea no existe los componentes presentes en el Clinker, ya que básicamente se cuenta con sílice además de alúmina en fase vítrea y amorfa, cal, óxido de hierro, etc., existen los componentes para reaccionar en presencia de un medio acuoso y formar compuestos de estringita y gel C-S-H, los cuales generan el endurecimiento y la resistencia mecánica, sin embargo es de saber que las reacciones químicas son más lentas en comparación a las del cemento portland.

2.1.6.- Adiciones al cemento

De una forma un tanto simplista se ha tratado a veces de clasificar las adiciones al Clinker en activas e inertes y, sobre todo estas últimas, en nocivas, sin especificar en qué aspectos son una cosa u otra, y sin definir adecuadamente, o cuando menos son establecer criterios cualitativos y cuantitativos claros ni límites entre ellas, Calleja (1983).

Entre las adiciones consideradas químicamente activas figuran las escorias básicas granuladas de alto horno, con propiedades hidráulicas latentes o potenciales, las cuales se manifiestan por sí mismas y se desarrollan por activación alcalina y/o sulfática; y también las puzolanas naturales y artificiales (cenizas volantes y arcillas activadas), las cuales fijan cal a la temperatura ordinaria para formar compuestos hidráulicos que se suman a los producidos por el Clinker. Calleja (1983), define las siguientes adiciones:

- Las Escorias

Las escorias se forman como subproducto del proceso siderúrgico en el que aparece el arrabio o fundición como producto base, y como consecuencia de las reacciones entre la mena y la ganga del mineral – sobre todo esta última-, el coque y la caliza más o menos dolomítica utilizada como fundente y corrector, en el horno alto. La escoria contiene, a efectos de su utilización como adición al Clinker, una serie de compuestos deseables (silico-aluminatos cálcico-magnésicos del grupo de las melilitas), y otra serie de compuestos indeseables (sulfuros –de calcio, manganeso y hierro- y óxidos –ferroso, férrico y mixto: magnetita, de magnesio, titanio, azufre y alcalinos-), estos últimos en escasa proporción.

La composición química de las escorias varía, en consecuencia, entre límites amplios, predominando como es lógico la cal, la sílice, y la alúmina y la magnesia, las cuales forman una serie de minerales del citado grupo de las melilitas, entre los que se encuentran la alita y la velita, principales constituyentes del Clinker de cemento portland, junto con otros más o menos afines y complejos, pero vecinos próximos de aquellas en el diagrama triangular del sistema ternario C-A-S (cal, alúmina y sílice), y el sistema C-M-S (cal, magnesia y sílice), los cuales responden de la capacidad hidráulica de

las escorias. Naturalmente existe una gran gama de escorias que varían en los porcentajes de los componentes descritos consecuencia de las materias primas y procesos de los cuales es producto, así también los estados mineralógicos pueden variar de acuerdo a las condiciones que existan, por ello evidentemente antes de la aplicación y uso en adición al Clinker, por ello se debe evaluar su reactividad y los parámetros que exigen las normas vigentes.

- Las Puzolanas

Las puzolanas pueden ser naturales o artificiales, en lo que respecta a las primeras pueden ser rocas volcánicas de naturaleza diversa: traquítica alcalina, pumicitica, tobácea, etc., o también rocas de origen orgánico: tierras diatomeas (micro-organismos marinos) o de infusorios (protozoos radiolarios) de carácter fósil – “trípoli”, “kieselgur”-, con naturaleza y composición a base de sílice activa. Hay que hacer la importante salvedad de que no toda roca volcánica, por el solo hecho de serlo, es una puzolana natural.

En lo que respecta a la puzolana artificial, las más genuinas son las cenizas volantes de centrales termoeléctricas, recogidas de los humos y gases de combustión de los carbones, por precipitación en separadores electrostáticos; y más recientemente llamado “polvo de sílice” o “humo de sílice”, recuperado de los gases desprendidos en la obtención de aleaciones de ferrosilicio. Este material es casi exclusivamente silico por naturaleza y presenta una textura extraordinariamente fina.

La acción puzolanica es complementaria del hidrolisis de los silicatos del Clinker, por una parte, y contraria al deslavado o lixiviación de la cal hidratada de la pasta de cemento, por otra parte. De aquí que dicha acción, al formar compuestos hidráulicos con dicha cal, contribuya al desarrollo de la resistencia de los cementos que contienen puzolana, a plazos medios y largos; y que al fijar de forma estable dicha cal, evitando su disolución o ataque por medios agresivos externos, proporcione al hormigón una mayor durabilidad o resistencia química en múltiples aspectos. Hablando del mecanismo químico, la actividad puzolanica consiste en el ataque y corrosión de los gránulos o partículas del material puzolanico por la cal de hidrolisis de los silicatos del Clinker, que en disolución saturada o sobresaturada se encuentra en la fase líquida de la pasta de cemento, cuya alcalinidad –pH- se incrementa por la

acción (en su caso) de álcalis de la puzolana a dicha fase líquida. Se forman así, con la incorporación de agua, hidratos del tipo de los que forman en su hidratación los silicatos anhidros del Clinker –las tobermoritas-, con distinta basicidad –relación C/S(cal/sílice)-, pero, en general y en conjunto de menor basicidad que la propia tobermorita (gel C-S-H), lo cual es una ventaja a efectos de resistencia mecánica y química del cemento endurecido.

La actividad puzolánica se puede medir mediante ensayos adecuados, de naturaleza química –fijación de cal a partir de disoluciones, variación del residuo insoluble, etc.-, y de naturaleza mecánica –desarrollo de resistencias- a lo largo del tiempo de pastas y morteros de puzolana/cal o de puzolana/cemento, en comparación con otros equiparables de arena/cal o de arena/cemento. Consisten estos últimos en comparar el material presuntamente activo (la puzolana) con otro material prácticamente inerte (la arena silícica o cuarzo).

Entonces es sabido que una puzolana natural tiene propiedades diferentes entre cantera y cantera ya que de ello depende su origen y es lógico aseverar que de acuerdo a la cantidad de materiales que lo generan en la actividad volcánica y además de las condiciones de temperatura y presión extremas, se encuentre variabilidad del mismo. Podemos citar al estudio de E. Shiohama et al. en el cual en una primera parte se trata de evaluar si la puzolana natural arequipeña, similar en términos de génesis a la usada en el presente estudio (ubicada en Ayacucho), pero con variaciones sustanciales de concentración de materiales silicoaluminosos, sino que explora la posibilidad de mejorar las propiedades hidráulicas aplicando un tratamiento térmico, de los resultados se puede dilucidar que no hay variación significativa desde el punto de vista de capacidad hidráulica y reacción en las mezclas; esto debido a que las temperaturas a las que fue sometida la puzolana estuvieron en el orden de los 600 °C, y esto no se acerca a las condiciones de génesis de este tipo de roca volcánica, ya que se sabe que las rocas de las cuales se componen las puzolanas naturales sea tobas volcánicas, se generan a temperaturas mayores a los 1000 °C.

- Los Fillers

Los Fillers no son inertes de un modo absoluto, pues, cuando menos, ejercen en proporción limitada una acción física dispersante del cemento, la cual facilita y acelera la más completa hidratación de este. Lo que sucede es que, por “inercia”, se suele entender inercia química, esto es, incapacidad de reacción o interacción entre filler y el cemento. Es en este aspecto en el que cabría distinguir entre fillers químicamente inertes totales, como por ejemplo la sílice cuarzosa o arena sílicea muy fina, y los químicamente activos, entre los cuales se encuentran calizas finamente molidas; en el bien entendido de que tanto unas como otras son físicamente activas y no inertes, por la acción dispersante. Está ampliamente comprobado que en general, pequeñas adiciones de ciertas calizas de alrededor de 5%, añadidas al Clinker y molidas conjuntamente con él, proporcionan cementos con mejor plasticidad y comportamiento reológico en concretos que no las tienen, con menor retracción y tendencia a la fisuración, y sin menoscabo de las resistencias, o incluso con ligeras mejoras de las mismas.

Cabe añadir que así como las cenizas volantes son extremadamente idóneas para las adiciones y por su carácter puzolánico, existen otros subproductos industriales que tienen características similares que tienen gran potencial de aplicación como el catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como lo muestra el estudio de Torres (2014), , que es un residuo procedente de las unidades de ruptura catalítica en lecho fluido de la industria del petróleo, este residuo está conformado principalmente por un componente activo (Zeolita Y – tipo faujasita) en una matriz de aluminosilicato amorfo; su composición química es básicamente sílice y alúmina en porcentajes de un 90%.

Un concreto con cemento adicionado depende directamente de la calidad del Clinker ya que el C_3S (C_3S+C_2S), es el elemento más reactivo y activo de la mezcla, ello llevara las resistencias deseadas. Como se ha señalado existe adiciones activas y no activas, por ende, los tipos de cementos que tengas una adición que tenga las más altas cualidades para reaccionar con la cal, será que la mayor propiedad favorable generara, por ejemplo, las puzolanas como las cenizas volantes que están entre las materias que tienen las mayores capacidades de reaccionar con la cal en un medio acuoso y alcalino. Otro punto a señalar en los

concretos obtenidos a partir de cementos adicionados es que por lo general se considera una resistencia final igual o muy parecida al cemento original sin adición, sin embargo la ganancia de resistencias es muy diferente ya que el hecho es que te tiene básicamente 2 elementos que tienen velocidades de reacción muy diferentes, el C_3S y las adiciones, es más se sabe que en gran medida las adiciones activas reaccionan con los productos de la hidratación del Clinker y por tanto es comprensible que el mecanismo de ganancia de resistencia de los concretos con cemento adicionado sea más lento.

2.2.- MEZCLAS ALTERNATIVAS AL CEMENTO PORTLAND ORDINARIO

Si bien el cemento portland es el principal aglomerante usado como tal, existen otras opciones que dependieron del tiempo histórico en que se encontró la humanidad, esta historia de los aglomerantes también es la historia del cemento portland y de cierto modo son sus predecesores, de ello se habló más ampliamente en el inciso 2.1.1; sin embargo, es consecuente mencionar que los aglomerantes anteriormente tratados son consecuencia de las reacciones de hidratación entre el hidróxido de calcio y la sílice activa o como lo es en el caso del cemento portland, la reacción de los materiales que conforman el Clinker con agua, que finalmente conducen a producir materiales similares en términos del gel resistente C-S-H, pero además existen otros tipos de aglomerantes que han sido usados y aun hoy se usan frecuentemente como lo son las mezclas en base al yeso y cales, en el presente capítulo se detallará las propiedades de estos aglomerantes.

Entonces el interés se sitúa en aquellos materiales que desarrollan el hidrolisis con el agua y generan productos hidratados más resistentes, llámese aglomerantes hidráulicos. Según Gomá (1979), los aglomerantes tienen todos ello en común el prepararse con una mezcla homogénea en crudo (es decir, antes de su calcinación) compuesta por caliza en proporción dominante y arcilla. Estos crudos son luego calcinados a distintas temperaturas y forman los materiales calcinados o los clinker que, debidamente molturados (y con adición de un retardante en el caso del portland) se utilizan como aglomerantes. La arcilla es fundamentalmente un silicato de aluminio, la presencia de esta sustancia en estos materiales aporta óxidos distintos al CaO : Al_2O_3 y SiO_2 , generalmente aporta también Fe_2O_3 y otros minoritarios como MgO ; álcalis, etc.

La propiedad fundamental de todos ellos es el fraguado hidráulico, es decir, su capacidad de endurecer en el seno del agua. El texto de Gomá (1979) extiende en forma esquemática, la constitución básica de estos aglomerantes y sus elementos diferenciales se puede resumir así:

2.2.1.- Yesos aglomerantes

El $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de calcio dihidratado) se presenta en la naturaleza generalmente en terrenos triásicos bajo tres formas:

- 1.-Compacto microcristalino de pureza variable,
- 2.-Fibras cristalinas aciculares, muy puras,
- 3.-Maclas, cristales de gran tamaño, casi transparentes y muy puros.

Aunque escaso, existe también yeso en forma SO_2Ca (Sulfato cálcico anhidro), que se conoce también como *anhidrita*. Desde el punto de vista técnico, cualquier de estas tres primeras formas son adecuadas para obtener yeso aglomerante, siendo la única limitación su pureza, la cual debe de estar cerca del 90%. En el caso de contener anhidrita, se puede admitir hasta un límite no inferior al 80% de $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La solubilidad del dihidrato es aproximadamente de 1.8 g/l. Este producto natural no es aglomerante sin previa transformación en otras formas mediante calcinación. El yeso aglomerante se obtiene deshidratando a temperaturas relativamente bajas, entre 100 y 130° C, el $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, que se transforma en diversas fases y estados alotrópicos en función de la temperatura.

2.2.2.- Cales grasas o aéreas

Estos materiales tienen un antiquísimo origen, conjuntamente con el yeso fue el primer aglomerante propiamente dicho que ha empleado el hombre. En las construcciones de Egipto se empleó el yeso, probablemente mezclado con cal, pero fueron las culturas posteriores greco-romanas las que emplearon propiamente la cal grasa en los morteros, a los que añadían puzolanas procedentes del subsuelo italiano y de la propia Roma. Se asegura que la cal empleada por los romanos era precisamente la cal grasa tal como la entendemos hoy y no una cal hidráulica, que posee un contenido arcilloso.

Lo que es difícil de asegurar es si en alguna de las culturas más antiguas que la de Roma haya podido emplearse algún tipo de cal con alguna cualidad hidráulica. La composición química que la caracteriza es un porcentaje entre 60 a 90 % de $\text{CaO} + \text{MgO}$, además de un porcentaje alrededor de 5% de CO_2 , el resto de residuos finos.

La característica fundamental de las cales grasas es la ausencia de fraguado y de endurecimiento hidráulico. El endurecimiento en el aire tiene lugar a un largo plazo, a unos seis meses, tiempo necesario para que el anhídrido carbónico de la atmósfera penetre en su interior de modo que el endurecimiento transcurre del exterior al interior de la masa del mortero. En consecuencia, el empleo presenta dificultades en lugares poco aireados por la falta de anhídrido carbónico y también el lugar en que predomina un bajo grado de humedad.

La cantidad de agua de la masa puede fácilmente producir fisuraciones por secado demasiado rápido, al propio tiempo disminuye el endurecimiento. Las composiciones cal:arena tienen una sensible tendencia al agrietamiento y es tanto en cuanto mayor es el contenido de agua en la mezcla.

2.2.3.- Cales hidráulicas

Una mezcla homogénea, natural o artificial, de caliza CO_3Ca y arcilla $2 \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, con una proporción de esta última comprendida entre el 10 y el 22%, es calcinada a una temperatura comprendida entre 1050 y 1150° C en la que no aparece todavía la fase líquida. El producto calcinado así obtenido contiene silicatos, aluminatos formados por la reacción de los óxidos en estado sólido y un exceso de CaO libre.

Por las mismas razones expuestas al explicar la cal aérea, este óxido CaO libre debe ser, previamente a su empleo como aglomerante, transformado en hidróxido $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para evitar así su expansión en el hidrolisis.

Este “apagado” de la CaO libre deberá ser en este caso “selectiva”, es decir debe hidratarse todo el CaO , evitando hidratar en lo posible aquellos silicatos y

aluminatos que son los que le confieren su valor hidráulico en mayor o menor intensidad. Finalmente es molturado a una finura conveniente para su empleo.

2.2.4.- Cementos naturales

Una mezcla homogénea natural o artificial de caliza y arcilla, esta con una proporción del 22 al 26%, es calcinada a una temperatura comprendida entre los 1280° C y 1350° C a cuya temperatura se obtiene una fase líquida en mayor o menor grado. En presencia de este líquido se consigue mayor cantidad de silicatos u aluminatos y desciende considerablemente el contenido de CaO libre. Se obtiene así un producto aglomerado, al que llamamos Clinker de cemento natural, porque incluye una fase líquida cristalizada por enfriamiento. El producto así obtenido es molturado a la finura adecuada para su empleo.

2.2.5.- Cementos portland

Existe una mezcla de caliza y arcilla artificial con una curva granulométrica de 0 a 150 μ y homogenizada; con una proporción de arcilla muy próxima al 20% y “estrictamente dosificada” para poder conseguir, en cada caso, la combinación prácticamente total del CaO. Se calcina a la temperatura de clinkerización comprendida entre los 1400° C y 1650° C, lo que permite esta incorporación del CaO, específica en cada caso.

Se produce una cantidad de fase líquida del orden de un tercio del peso del material y se obtiene por enfriamiento el Clinker de cemento portland compuesto por silicatos, aluminatos y una pequeña cantidad de CaO, próxima al 1%.

En resumen, se puede afirmar que todas estas mezclas tienen como base fundamental al calcio y el modo en como su combinación con materiales proclives a desarrollar la hidrólisis en el seno acuoso, estos materiales son CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y MgO.

Según F. Goma, el contenido de SiO₂ % + Al₂O₃ % + Fe₂O₃ % en el aglomerante referido a su contenido de CaO %, dará un índice elemental inmediato:

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}, \text{ que permitiría conocer su hidraulicidad a partir de su}$$

análisis químico.

Su validez práctica se limita a los aglomerantes distintos al cemento portland. Este posee un valor hidráulico máximo que sobrepasa la siguiente escala de valores. Según el valor de este índice, es posible clasificar los aglomerantes distintos al portland, como sigue, Gomá (1979):

Cal grasa o aérea $I < 0,1$ no hidráulica

$$\text{Cales hidráulicas} \left\{ \begin{array}{l} 0,1 \text{ a } 0,16 \text{ débilmente hidráulicas} \\ 0,16 \text{ a } 0,31 \text{ medianamente hidráulicas} \\ 0,31 \text{ a } 0,42 \text{ propiamente hidráulicas} \\ 0,42 \text{ a } 0,50 \text{ eminentemente hidráulicas} \end{array} \right.$$

Cementos naturales $\geq 0,5$ eminentemente hidráulicos

Las reacciones de hidrolisis penetran tan solo unas 5u a los 28 días. Es pues un fenómeno de superficie, y en consecuencia la medida de la superficie específica, expresada normalmente en cm^2/gr de aglomerante, es una variable que influye en su valor hidráulico. Es necesario pues relacionar los anteriores valores para un mismo grado de finura.

2.3.- ESTADO DEL ARTE

2.3.1.- Industria del cemento: estado actual y retos

Como ya se ha señalado, el cemento tiene grandes propiedades en cuestión de rapidez de endurecimiento, fraguado bajo agua, bajo costo, versatilidad de uso y abundancia de materias primas, todas ellas propiciaron la extensión generalizada de su uso por todo el planeta.

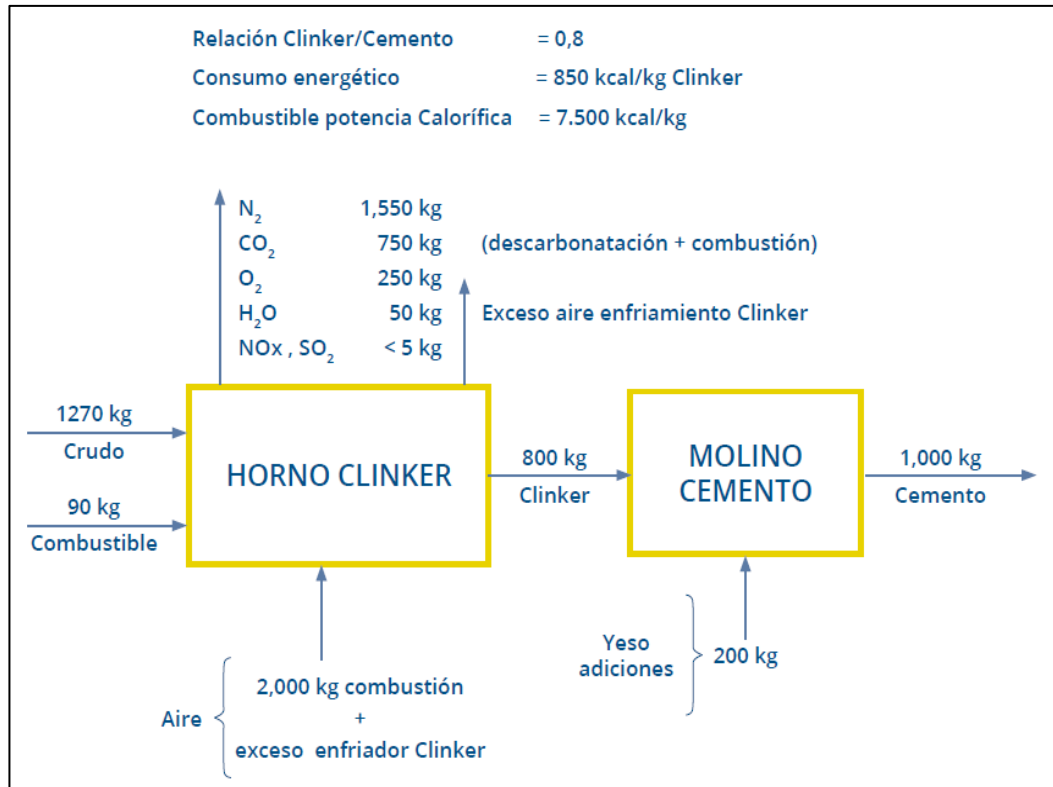


Figura 2.5: Balance de masas en la producción de 1.0 t de cemento.
Fuente: MINEM.

Sin embargo, no todo lo que respecta al cemento portland es propicio para un crecimiento sostenible y sin causas que no afecten negativamente a la actividad del ser humano y el planeta en su conjunto.

La principal consecuencia negativa es que en el proceso de producción industrial implica un gran gasto energético y consecuente a ello una gran emisión de CO₂ y por ende esta industria gravita en el cambio climático cuyas consecuencias hacia todas las especies es ampliamente conocidas.

Como se puede apreciar en el esquema de la Figura 2.5, según el MINEM por cada 2.0t de material producido, requiere 1t de combustible, lo cual produce 0.75t de gases de CO₂, de acuerdo a ello es de notar la enorme contaminación que produce la industria del cemento.

La industria del cemento cada vez es más grande esto debido al aumento de la población mundial, lo que conlleva al incremento de la necesidad de vivienda y la infraestructura que las naciones en ascenso que tienen un fuerte crecimiento

económico además de comercial, lo cual se puede apreciar en el Grafico 1, como por ejemplo china, el gigante asiático que tiene uno de los crecimientos económicos más altos y los proyectos de infraestructura que emprende son absolutamente gigantescos. Esto también se aprecia en la Figura 2.6, que se puede ver de manera analítica que el Perú se ubica en el puesto 35 al 2018, entre los países que más cemento consume.

La producción y consumo de nuestro país también se hace cada vez más grande, es conocido que en los últimos años las tasas de crecimiento económico son altas y están por encima de la media latinoamericana, lo cual se refleja en el consumo local de cemento, como en la Figura 2.7 se aprecia, lo cual es acorde incluso al crecimiento económico que si bien es cierto existe una desaceleración, aun las cifras son positivas.

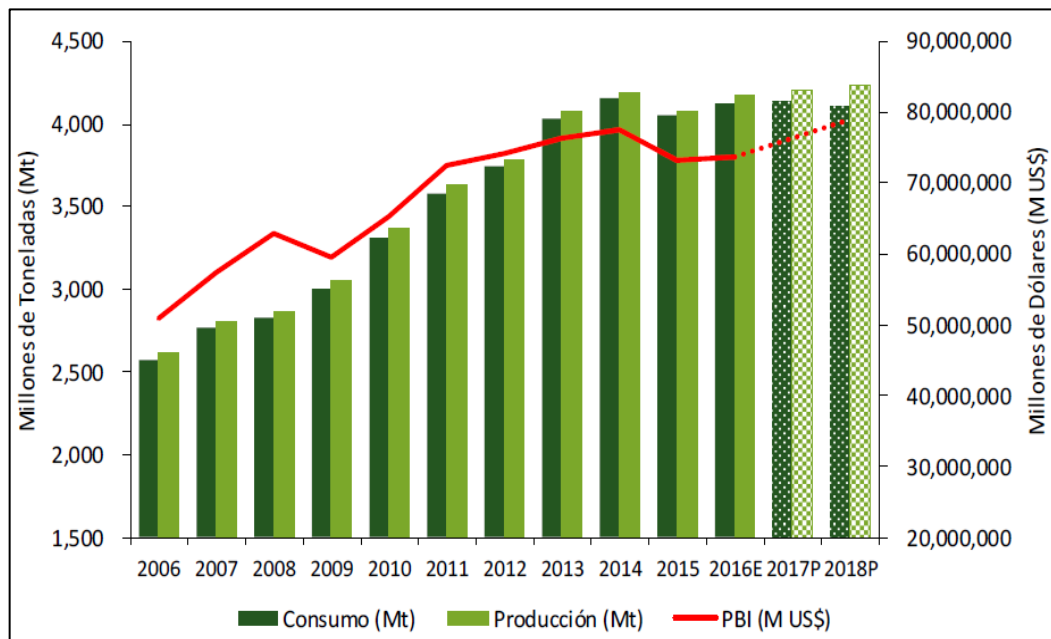


Figura 2.6: Consumo y Producción de cemento, PBI de mundo (2006-2018P).
Fuente: ASOCCEM.

Se deduce entonces que hoy más que nunca existe la mayor demanda de cemento y la tendencia es de ascenso, sin embargo, la enorme capacidad de contaminación intrínseca en la producción de cemento. El panorama mundial de consumo de cemento, lo cual se puede apreciar en la tabla 2.1, tiene una tendencia creciente en los países que tienen en los últimos años muestran

desarrollo en sus economías y esta lleva a una necesidad de mayor infraestructura, entre los cuales lidera China, por otro lado tenemos a Perú en un puesto 40 que, si bien es cierto, no está entre los que más consumen mundialmente, pero el consumo de cemento no deja de crecer año a año.

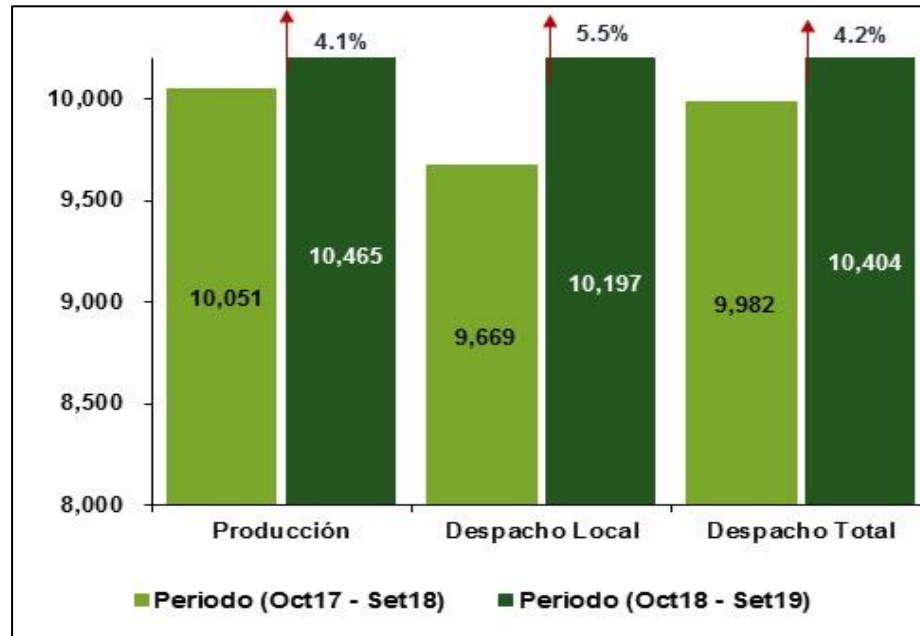


Figura 2.7: Crecimiento de producción y consumo de cemento en Perú (mil TM)

Fuente: ASOCEM

Todo ello nos lleva a pensar lo siguiente: si existe una gran demanda y habrá mucha más, como contrapesar esta necesidad frente a las regulaciones ambientales y normas cada vez más estrictas sobre emisión de gases de efecto invernadero y contaminación en general. Esta dicotomía nos obliga a pensar y generar nuevas tecnologías y métodos que mejoren, hagan más eficientes y también se creen alternativas al cemento portland, claro que en la actualidad se hacen esfuerzos para mejorar las prestaciones de las mezclas a través del uso de aditivos químicos y también de las adiciones, la realidad es que en general aun el empleo de Clinker es muy alto en cada tipo de cemento derivado del cemento portland ordinario.

La presente investigación explora mezclas alternativas que entran dentro del rango de aglomerantes hidráulicos a base de cal hidráulica y puzolana natural, así como también se experimentó mínimamente con los llamados cementos alcalinos,

usando para estos fines a la misma puzolana y como activador alcalino a la solución de hidróxido de sodio, también conocido como soda caustica.

Tabla 2.1: Consumo mundial de cemento en los últimos años (mill. TM).

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016E	2017P	2018P
1	China	China	China	China	China	China	China	China	China
	1,850.00	2,050.00	2,171.00	2,400.00	2,466.39	2,339.00	2,395.07	2,347.06	2,280.56
2	India	India	India	India	India	India	India	India	India
	221.04	236.87	241.80	253.89	269.43	273.62	287.84	296.68	301.57
3	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA
	71.19	72.20	77.88	81.70	89.01	92.92	94.50	98.16	100.51
4	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Turquía	Turquía	Turquía
	60.01	64.97	69.32	70.97	71.70	65.32	67.00	70.64	71.76
5	Irán	Rusia	Rusia	Rusia	Rusia	Turquía	Indonesia	Indonesia	Indonesia
	54.80	57.40	65.20	69.70	70.95	65.00	62.07	65.23	67.85
6	Vietnam	Irán	Irán	Turquía	Turquía	Rusia	Egipto	Egipto	Vietnam
	50.20	56.40	57.56	63.40	64.20	62.97	58.77	64.10	63.82
7	Turquía	Turquía	Turquía	Indonesia	Indonesia	Indonesia	Brasil	Vietnam	Egipto
	50.00	55.70	56.70	58.01	59.91	61.99	57.24	60.04	63.20
8	Egipto	Vietnam	Indonesia	Arabia	Arabia	Arabia	Vietnam	Rusia	Brasil
	49.53	49.20	54.96	55.26	56.56	60.74	56.00	54.55	54.05
9	Rusia	Egipto	Arabia	Irán	Irán	Vietnam	Corea Sur	Corea Sur	Rusia
	49.40	48.69	52.67	54.77	53.58	55.68	55.85	54.29	53.43
10	Corea Sur	Indonesia	Egipto	Egipto	Egipto	Egipto	Rusia	Brasil	Irán
	45.49	48.00	49.20	48.00	51.30	53.66	55.65	53.39	53.16
11	Japón	Arabia	Vietnam	Japón	Vietnam	Corea Sur	Arabia	Irán	Corea Sur
	41.80	46.96	45.20	47.00	49.83	50.74	54.80	51.97	50.87
12	Arabia	Corea Sur	Japón	Vietnam	Japón	Irán	Irán	Arabia	Arabia
	41.32	44.65	44.30	46.41	46.42	48.60	50.00	49.86	50.15
13	Indonesia	Japón	Corea Sur	Corea Sur	Corea Sur	Japón	Japón	Japón	Japón
	40.78	42.10	43.94	45.10	43.71	43.38	41.61	43.63	45.44
14	Italia	México	México	México	México	México	México	México	México
	33.93	34.40	36.48	34.85	35.92	38.94	39.91	40.87	41.30
15	México	Italia	Tailandia	Tailandia	Tailandia	Pakistán	Pakistán	Pakistán	Pakistán
	33.90	32.80	26.80	30.08	29.30	32.04	34.70	37.91	40.83
33	Reino Unido	Reino Unido	Argentina	Perú	Argentina	Taiwán	Taiwán	Argentina	Argentina
	10.51	11.31	10.46	10.79	11.27	11.65	11.00	10.88	10.94
34	Argentina	Sudáfrica	Australia	España	Perú	España	Argentina	Perú	Taiwán
	10.19	11.23	10.30	10.74	10.87	11.49	10.82	10.39	10.84
35	Libia	Ucrania	Perú	Libia	España	Perú	Perú	Perú	Perú
	9.00	10.34	10.18	9.70	10.83	10.56	10.22	10.39	10.48
36	Ucrania	Colombia	Ucrania	Ucrania	Libia	Kazajstán	Australia	Australia	Australia
	8.97	10.16	9.80	9.60	10.00	9.60	9.50	9.80	10.00
37	Colombia	Siria	Canadá	Canadá	Australia	Australia	Myanmar	Myanmar	Myanmar
	8.93	9.76	9.50	9.12	9.37	9.43	9.00	9.42	9.75
38	Canadá	Canadá	EAU	Australia	Canadá	Myanmar	Kazajstán	Kazajstán	Kazajstán
	8.79	8.83	9.10	8.90	9.19	8.82	8.90	9.10	9.60
39	Siria	Perú	Libia	Venezuela	Ucrania	Canadá	Uzbekistán	Etiopía	Etiopía
	8.50	8.41	8.40	8.61	8.51	8.78	8.74	8.81	9.09
40	Perú	Venezuela	Venezuela	EAU	Kazajstán	Uzbekistán	Canadá	Uzbekistán	Canadá
	8.18	7.76	8.28	8.50	8.50	8.46	8.50	8.75	8.90

Fuente: ASOCEM.

2.3.2.- Mezcla de concreto a base de aglomerante cal-puzolana

En la presente investigación previo el uso de cal hidráulica y puzolana natural, de modo que, en la mezcla global de aglomerante, se tiene mayor sílice reactiva, por ello la mezcla se convierte en una composición más activa y proclive al hidrolisis, usando la clasificación del inciso 2.2 se puede afirmar que $I > 0.5$, obteniendo así la denominación de aglomerante inminentemente hidráulico. Si bien esta combinación de materiales de cal hidráulica y puzolana natural le da una clasificación que en dichos términos compite con los cementos naturales e incluso cemento portland, como se verá en la práctica, ello no es preciso ya que las velocidades de reacción comparando el aglomerante cal-puzolana y otros aglomerantes a base Clinker, son marcadamente diferentes y principalmente existe 2 diferencias que hace notable. La primera tiene que ver en la velocidad de reacción, una mezcla de aglomerante cal-puzolana tiene una velocidad de reacción muy baja, de una resistencia ganada equivalente a la media estándar de las mezclas con cemento portland que son evaluadas a los 28 días, en estas mezclas están alrededor de los 6 meses, de modo que términos prácticos como la fragua debe analizarse teniendo en cuenta este factor. En segundo lugar es la ganancia de resistencias, los materiales productos de la molienda del Clinker como el aluminato tricalcico, tetracalcico, etc., tiende a reaccionar en mayor medida gran parte de la presente ya que por el proceso de clinkerización le fue conferido una reactividad casi total, por ello una mezcla de aglomerante cal-puzolana está formado con materiales que tienen materias primas que en su mayoría son CaO , SiO_2 y Al_2O_3 , los cuales se encuentran en una fase amorfa o vítrea y demás condiciones que conducen a que los materiales cuenten únicamente con parte de ese material reactivo, por ende en condiciones similares de finura, cantidades presentes y relación A/C es comprensible que las propiedades en estado fresco y endurecido sean muy diferentes.

Se sabe también que el aglomerante cal-puzolana es capaz de formar materia resistente parecida a la que se obtiene en las reacciones del cemento portland, como lo son la estringita y gel C-S-H. En la Figura 2 se muestra el diagrama ternario referente a los materiales silicoaluminatos, llamado Diagrama Ternario del Sistema $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, en el cual se puede apreciar muchos de los compuestos estudiados, los cuales se forman a la variación del porcentaje

presente de cada uno de los componentes de CaO , Al_2O_3 y SiO_2 . Muchos de los compuestos mostrados en el diagrama de la Fig.2.8 son materiales que existen como tal en la naturaleza, surgen con la combinación de cantidades mayoritarias de CaO y SiO_2 , además de cantidades menores de Al_2O_3 y otros compuestos, formándose estos materiales conocidos como zeolitas, sobre este tema se afirma que compuestos como cristobalita, anortita, cuarzo y muchos otros existen de modo natural, aparte de este grupo, la industria también ha creado muchas zeolitas con propiedades específicas y bajo condiciones artificiales. Según el libro de Bosch (1997), que trata el tema de las zeolitas extensamente, la manera por la cual un material zeolítico se diferencia uno de otro varía por muchos factores, el autor considera después de analizar el libro en mención que los que más inciden son tres, lo cuales se detallarán a continuación:

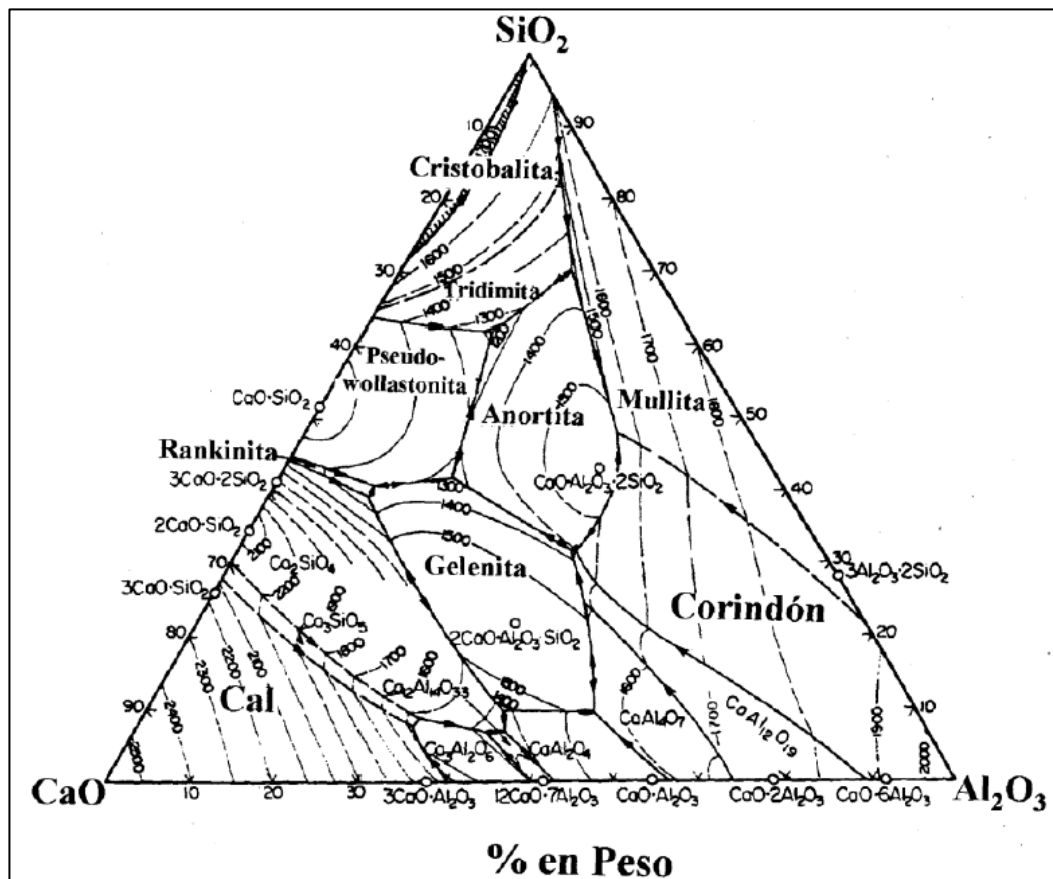


Figura 2.8: Sistema ternario $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$
 Fuente: Alvarado (2011).

- El primero de ellos son los porcentajes de compuestos, digamos la cantidad de moléculas del compuesto que forman el material zeolítico causa que las propiedades de manera significativa e incluso completamente diferente.
- El segundo factor le compete al estado cristalográfico del material, esto es el ordenamiento molecular como se formó, por ello puede ser de naturaleza cristalina o amorfa, para determinar esta propiedad existe métodos como la Difracción de rayos X, mediante la cual se puede determinar el porcentaje de material cristalino o amorfo que lo forman.
- Y por último como tercer factor se atribuye al ordenamiento cristalográfico con el que se encuentre el material zeolítico, esto quiere decir que mientras los ordenamientos de los átomos tengan una forma tridimensional o planar que represente figuras diferentes, entonces ello conllevará también propiedades diferentes.

A partir de los factores mencionados anteriormente se definen los materiales que generalmente se usan como adiciones y representan una alternativa a la conformación completa de Clinker en el aglomerante, en la Fig. 2.9 se muestra el diagrama ternario en el cual se puede apreciar que de acuerdo a la variación de porcentajes presentes de la combinación de $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ el material compuesto. Entre estos materiales descritos, tenemos a los que se usan como adiciones, ya que tienen las aptitudes para reaccionar con los subproductos de la hidrólisis del C_3S , C_2S y C_4A , además estos materiales pueden ser de origen natural como son las tobas volcánicas y cenizas volcánicas las cuales son llamadas puzolanas naturales, así también se puede apreciar otros materiales producto de la actividad industrial como la microsílíce, que por su composición tienen un alto contenido de sílice reactiva y extrema fineza.

Para el objetivo que se plantea de tener la mayor reacción posible de los insumos de entrada que conforman al aglomerante se tiene que tener otras consideraciones, se tiene los 2 elementos usados principalmente a la puzolana y el hidróxido de calcio; respecto al segundo material este tiene una naturaleza básica en un medio acuoso ya que se sabe que disuelto genera iones hidroxilo que le dan una alta alcalinidad, si bien el material de entrada con el que se contó

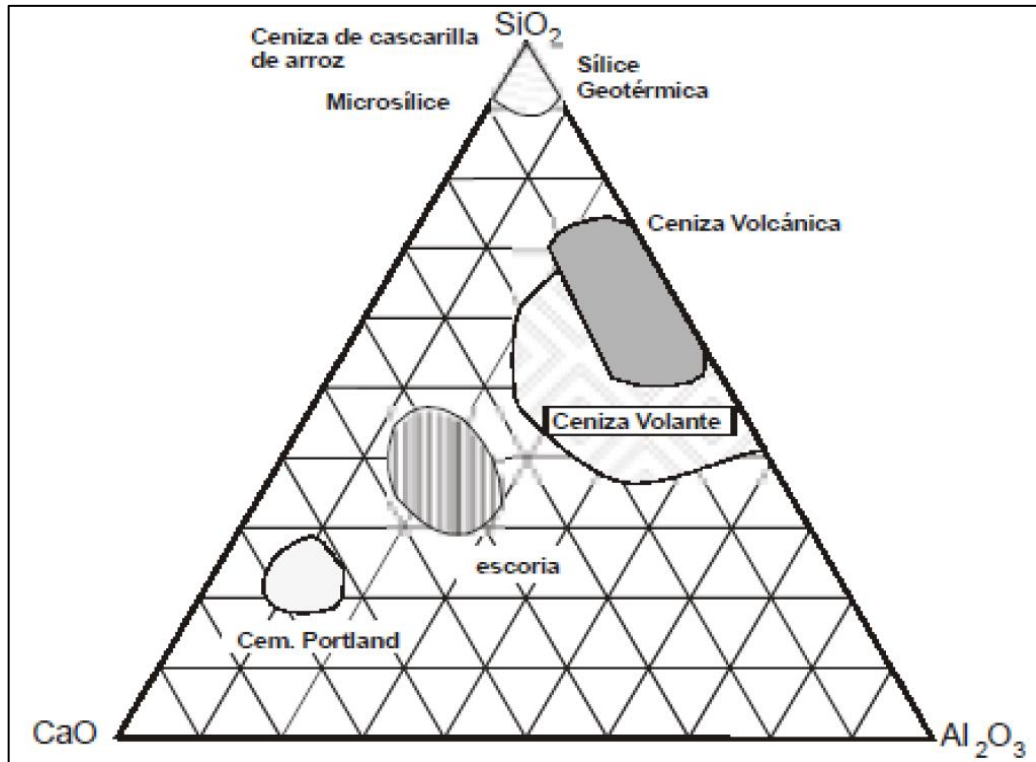
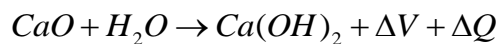


Figura 2.9: Ubicación de Materiales alternativos en el diagrama ternario CaO - Al₂O₃ - SiO₂
Fuente: Gaitán et al. (2013)

no es química mente puro sino una concentración aproximada de 50% de cal viva, en presencia de agua se “apaga” convirtiéndose en hidróxido de calcio y posteriormente en un medio acuoso se disuelve liberando los iones hidroxilo que generan el medio alcalino buscado y también liberando los iones de calcio listos para reaccionar con los materiales silicoaluminosos de la puzolana, este proceso se describe mediante las siguientes ecuaciones:

Apagado de la cal viva:

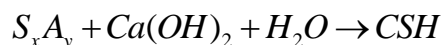


ΔV : Aumento de volumen

ΔQ : Desprendimiento de calor

(Gomá, 1979)

Para la reacción de elementos silicoaluminosos con el hidróxido de calcio:



(Taylor, 1979)

Por lo tanto, es posible la generación de elementos resistentes parecidos a los producidos en la hidratación del Clinker del cemento portland ordinario como el gel C-S-H, claro que no será en la misma medida ya que los elementos del Clinker son muy superiores en su capacidad de reacción, pero que tanto es posible lograr con puzolana y cal apagada como materiales de partida, es objeto del presente estudio.

2.3.3.- Concreto con cemento alcalino

El cemento alcalino es producto de la activación alcalina de productos silico-aluminatos, su origen es mucho más reciente que el cemento portland ordinario y tiene sus antecedentes en los años 50 en el cual Glukhovsky (1959), define el mecanismo de reacción de la activación alcalina.

Según Sánchez (2017), los cementos alcalinos se basan en la activación alcalina de aluminosilicatos y se caracterizan fundamentalmente por presentar bajos contenidos de Clinker, o ausencia total del mismo, y contener activadores sólidos o líquidos de naturaleza alcalina. Estos activadores, al mezclarlos con materiales silicoaluminosos de naturaleza amorfa o vítrea, fraguan y endurecen para dar lugar a un conglomerante con buenas propiedades mecánico-resistentes, los cuales además pueden contener otras propiedades como mayor resistencia a mantener sus propiedades mecánicas en situaciones de alta temperatura en comparación al cemento portland ordinario.

-Activación alcalina

La activación alcalina es un proceso químico mediante el cual materiales de naturaleza silicoaluminosa, con configuración parcial o totalmente amorfa o vítrea, tras ser sometidos a la acción de un medio alcalino, y tras un proceso de curado, dan como resultado un material con buenas propiedades cementantes. El producto principal que resulta de este proceso, y que es responsable de las buenas propiedades mecánicas, físicas y químicas que presentan estos materiales, es un gel silicoaluminoso alcalino con estructura tridimensional que, en el ámbito de la química del cemento, recibe el nombre de gel N-A-S-H ($x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), como producto secundario de reacción en estos sistemas cristalizan zeolitas de distinta naturaleza.

El primero en definir el mecanismo de activación es Glukovsky (1959), y plantea un mecanismo que consta de 3 etapas básicamente, estas son detalladas por María S. y se muestra a continuación:

- **Destrucción – Coagulación:** En el momento en el que los aluminosilicatos de partida entran en contacto con la disolución alcalina comienza a producirse la hidrólisis de los enlaces Al-O-Si y Si-O-Si, en ese instante, distintas especies de pequeño tamaño pasan de la sólida partida a la disolución que le rodea.
En medios fuertemente alcalinos, el $Al^{3+}(aq)$ se encuentra casi exclusivamente tetraédricamente coordinado y bajo la forma de $Al(OH)_4^-$, el ácido silícico ($Si(OH)_4$) se encuentra desprotonado en medio básico $(OH)_{4-x}Si_x^{x-}$. El hecho de que el $Al(OH)_4^-$ permanezca protonado, incluso en medio fuertemente alcalinos. Favorece que forme parte de los procesos de condensación. Finalmente, el catión $M^+(M=Na, K)$ procedente del activador alcalino empleado, para generar un medio lo suficientemente básico, compensa la carga negativa de estas especies.
- **Coagulación – Condensación:** En esta etapa la cantidad de productos disgregados aumenta considerablemente, lo que provoca un mayor contacto entre los mismos y consecuentemente la formación de una estructura de coagulación. La cercanía entre las distintas especies favorece las reacciones de condensación, dando lugar a especies oligoméricas cada vez más grandes. Estas reacciones de condensación se ven muy favorecidas por el bajo contenido de agua presente en el sistema cementante.
- **Condensación – Cristalización:** En esta última etapa se suceden las reacciones de policondensación y aparecen en el sistema las primeras micropartículas. Estas micropartículas, al igual que las partículas de la fase sólida inicial que no han reaccionado, actúan como germen de cristalización, promoviendo la precipitación de los productos de reacción.

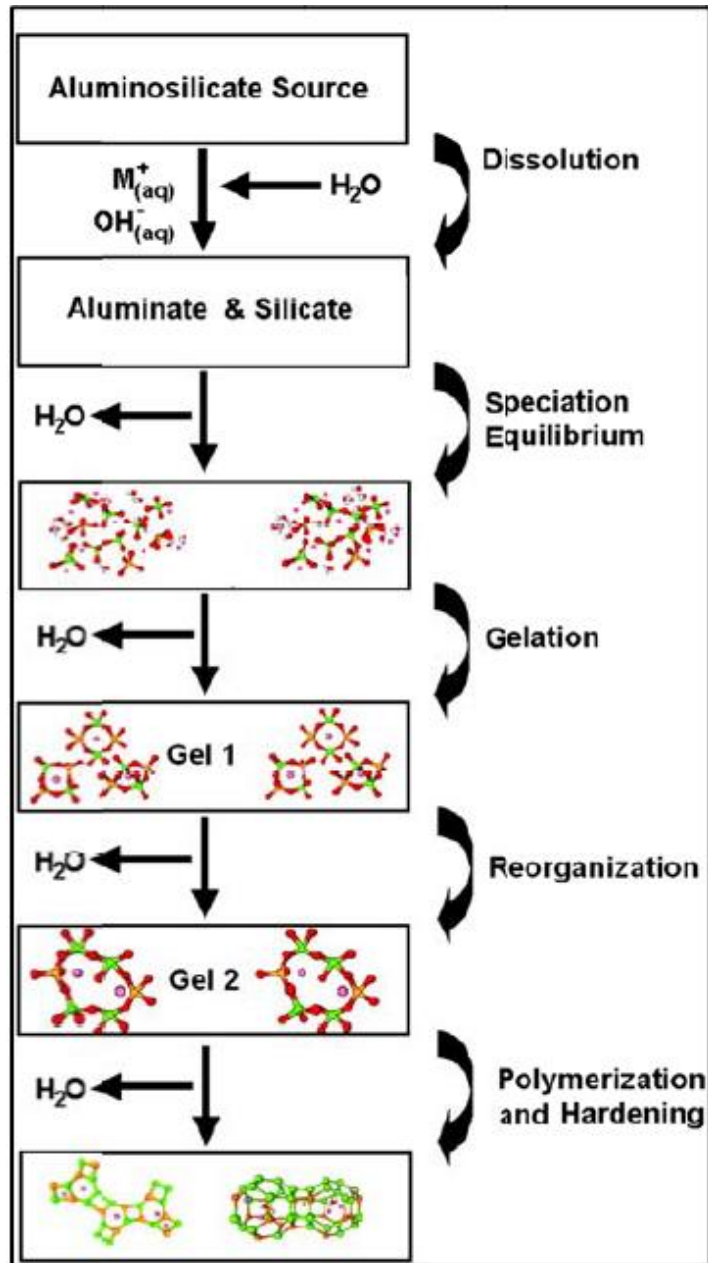


Figura 2.10: Modelo conceptual de polimerización.
Fuente: Sánchez (2017).

Además, para el caso en el cual se usa a las cenizas volantes como material silicoaluminoso de partida, los investigadores españoles A. Fernández y A. Palomo, plantean un mecanismo de reacción química para la activación alcalina de cenizas volantes (cenizas tipo F), el cual se muestra en la Figura 2.10, este es un material extremadamente idóneo para ser usado como base para adiciones y sobretodo conglomerantes alternativos ya que a diferencia de otros materiales tiene propiedades que mejoran su capacidad de reaccionar como lo es en primer lugar que es un subproducto o desecho industrial de las plantas termoeléctricas,

de modo que al aplicarlo a un uso de importancia en la construcción se generaría un valor de aprovechamiento a un material que de otro modo terminaría como desecho, en segundo lugar el empleo de cenizas en cementos alcalinos implican que no se hará mayor uso de gasto energético para su procesamiento ya que prácticamente tiene ya las propiedades características para una activación alcalina; en tercer lugar se puede señalar la fineza con que se presentan las cenizas volantes, esto se debe a que son captadas por un proceso electrostático aplicado a los gases de combustión, por ello tienen una fineza que es muy difícil de conseguir incluso con las molturas modernas, la ventaja directa es que le da un área mucho mayor de reacción y una posibilidad de que se queden menos elementos sin reaccionar.

Las características físico químicas de las cenizas volantes, Fernández (2003), después de realizar un estudio exhaustivo con un amplio número de cenizas, concluyeron que las características que deben presentar las cenizas volantes tipo F para poder ser utilizadas con buenos resultados en la elaboración de cementos alcalinos son las siguientes:

- Porcentaje de inquemados < 5%.
- $[\text{Fe}_2\text{O}_3] \leq 10\%$.
- $[\text{CaO}] \leq 10\%$.
- $[\text{SiO}_2]$ reactiva > 40%.
- $[\text{Partículas} < 45 \mu\text{m}] 80\% - 90\%$.
- Contenido en fase vítrea > 50%
- Relación $[\text{SiO}_2]_{\text{reactivo}} / [\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{reactivo}} \approx 1.6 \text{ ó } 2.2$.

Según Sánchez (2017), la solubilidad de las cenizas volantes varía considerablemente en función del pH de las disoluciones activadoras. En medios ácidos la solubilidad es alta, pero los hidratos formados no son estables y no es posible la formación de una estructura cementante. Sin embargo, para pH básico > 11 se consigue no solo la disolución del material, sino la formación de hidratos estables, incrementándose gradualmente las propiedades cementantes del material. Para lograr un rendimiento óptimo en el proceso de activación alcalina es necesario que el pH del sistema sea similar al que genera una disolución de NaOH 8M. En cuanto a la influencia de la temperatura y el tiempo de curado, el

incremento de la temperatura (65°C – 85°C) durante el proceso inicial de curado acelera considerablemente la velocidad de reacción de estos materiales, por lo que se denomina curado acelerado o activación térmica. Cuando la temperatura de reacción aumenta, el desarrollo de resistencias mecánicas también aumenta; sin embargo, existe un valor umbral a partir del cual el aumento de las resistencias mecánicas es más lento.

Respecto a los activadores alcalinos, se tiene variedad de ellos, y algunos incluso se están desarrollando para ser aplicados a la industrialización del cemento alcalino, Sánchez (2017), menciona los siguientes activadores alcalinos o alcalinotérreos:

- Hidróxidos (NaOH , KOH)
- Silicatos (Na_2SiO_3)
- Sales de ácido débil (Na_2CO_3)
- Sales de ácido fuerte (Na_2SO_4)

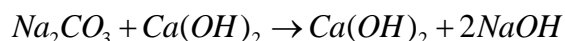
La idoneidad de estos activadores químicos o de algún otro dependerá básicamente de su capacidad de reacción y el costo que implique respecto a otros, ya que en términos generales los costos de los cementos alcalinos están dados por el costo del activador.

En el presente estudio se usó el hidróxido de sodio como activador alcalino en una prueba de activación de puzolana natural, la cual tiene similares propiedades a las de las cenizas volantes, que es el material sobre el cual existe mayores estudios, pero también tiene diferencias notables, como la fineza, estado amorfo lo cual llevan inevitablemente a una reducción de contenido sílice reactiva. A continuación, se extenderá la definición del hidróxido de sodio Sánchez (2017).

- **Hidróxido de sodio (NaOH):**

El hidróxido de sodio es una sustancia incolora e higroscópica que en contacto con el agua origina una reacción fuertemente exotérmica con una gran liberación de calor. En su mayor parte, el hidróxido sódico se consigue mediante la electrolisis cloro-álcali, sin embargo, también se puede obtener

por caustificación del carbonato de sodio. En la electrolisis cloro-álcali, el cloro y el hidróxido sódico se obtienen conjuntamente como productos principales mostrados en la ecuación que se aprecia en el siguiente párrafo. Sin embargo, mediante caustificación, la obtención de NaOH se lleva a cabo calentando una solución de Na₂CO₃ con la cantidad correspondiente de cal apagada (hidróxido de calcio). De esta forma precipita el carbonato de calcio insoluble, permaneciendo el hidróxido de sodio en la disolución.



2.4.- NORMAS TECNICAS

Para la determinación de las propiedades y procedimientos a lo largo del desarrollo de la investigación se usaron las normas técnicas peruanas, tanto en la determinación de las propiedades de los agregados, y para verificar los objetivos del concreto en estado fresco y endurecido. A continuación, se detallarán las NTP que guiaron los ensayos desarrollados en el laboratorio:

NTP 400.021 - Ensayo de Absorción y Peso Específico del agregado grueso

NTP 400.022 - Ensayo de Absorción y Peso Específico del agregado fino

- Contenido de humedad

NTP 400.017 - Peso Unitario Suelto

- Peso Unitario Compactado

NTP 400.012 - Análisis Granulométrico de agregados

NTP 400.018 - Materiales que pasan la Malla #200 (lab. METASIL)

NTP 339.035 - Ensayo de medición de Asentamiento

NTP 339.046 - Peso Unitario del concreto

NTP 339.090 - Tiempo de fraguado

NTP 339.034 - Compresión Axial

CAPÍTULO III: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES USADOS

3.1.- ELECCION DE MATERIALES

El planteamiento inicial fue investigar el comportamiento de mezclas de concreto con conglomerante alternativo al cemento portland ordinario, para ello se planteó el uso del conglomerante producto de la combinación de cal y puzolana natural que cuyas propiedades son las de un material silicoaluminoso inminentemente hidráulico, de lo cual se intuyó que reaccionarían los compuestos en presencia de un medio acuoso y llevándose la hidrólisis de los materiales, los cuales se previó que ganarían una resistencia gracias a la formación principal de estrringita y gel C-S-H, si bien se sabía que la velocidad de reacción de los materiales de partida en los productos resistentes, así como el grado de materiales sin reaccionar en el estado final sería más altos, es apremiante conocer cómo se comportan estas mezclas y que sean la base para futuras investigaciones que vayan en busca de métodos más específicos y procedimientos más particulares además de extender el estudio a la evaluación de otras propiedades físicas y químicas que implican el uso de este tipo de materiales. La investigación también explora de manera tangencial las mezclas de concreto con cementos alcalinos, en el mundo actual esta es una clara alternativa al cemento portland ordinario y plantea procesos que en el país aún no han sido investigados como lo es la activación de materiales silicoaluminosos, para esta presente investigación se buscó este proceso la activación para el caso particular de puzolana natural con la cual se contó.

Como se describió anteriormente, básicamente se trató con dos tipos de concreto, el primero de conglomerante de cal-puzolana y el segundo fue una mezcla exploratoria de cemento alcalino con base de activador químico al hidróxido de sodio y material silicoaluminoso a las mismas puzolanas, los detalles técnicos y de obtención de materiales se detallará a continuación.

3.2.- PUZOLANA

La puzolana elegida fue de origen natural, del tipo de toba volcánica, una zeolita natural, la cual provino de la cantera de Tantarjo, ubicada en el departamento de Ayacucho, provincia de Huamanga, Distrito de Pacaycasa. Esta cantera proveyó también a la industria del cemento, específicamente a Cementos Andinos, en la

cual se usa básicamente como insumo para producir cementos adicionados para ello se ingresa y homogeniza durante la moltura llevada a cabo conjuntamente con el Clinker, de modo que termina con una finura parecida y completamente integrada.

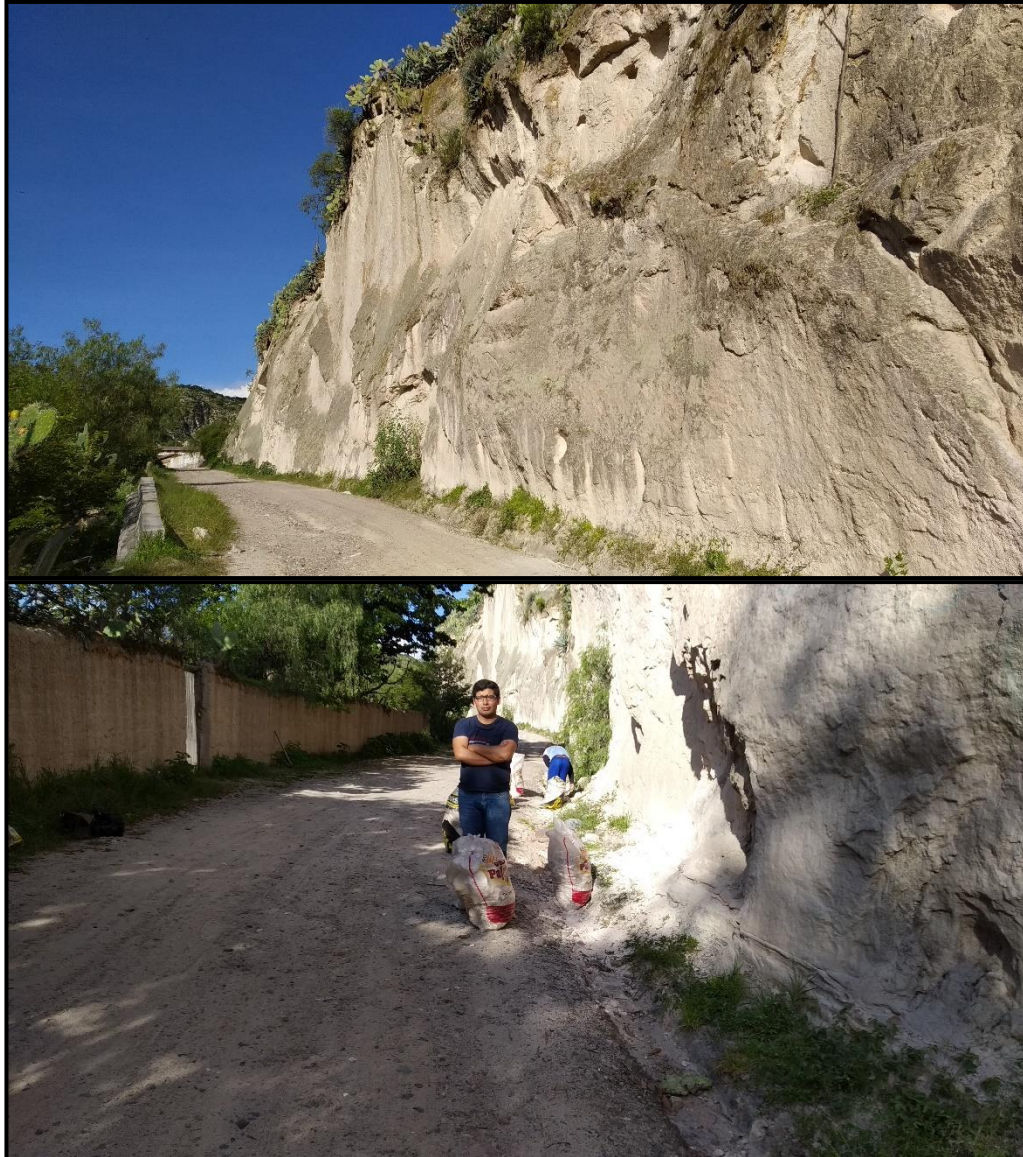


Figura 3.1: Cantera Tantarjo – Ayacucho.
Fuente: Elaboración Propia.

En el proceso de extracción fue básicamente con herramientas manuales una cantidad aproximada de 600 kg, mientras que para la moltura se desarrolló en el laboratorio de la empresa METASIL, especialista en consultoría de procesos mineros, y se dividió en 2 etapas, molienda primaria con una chancadora de

quijadas con apertura de salida N°8, para la segunda se usó un molino de bolas de acero que durante un ciclo de 2h 45" con una capacidad de 15 kg por tanda, de ese modo se logró reducir la granulometría de tal manera que se tuvo un porcentaje que pasa la malla n°200 superior al 80% los cuales se verificaron mediante el tamizado de lavado por la malla n°200 y finalmente pesando los materiales en seco, concluido este proceso de molturación a el total de se trasladó este material al Laboratorio de Ensayo de Materiales de la UNI.



Figura 3.2: Molturación de la puzolana.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.3: Ensayo granulométrico por lavado usando la malla n°200.
Fuente: Elaboración Propia.

Se tomaron muestras de la puzolana que ha pasado por la molturación, se midió la granulometría en cada una de ellas y se pesó las cantidades que se retuvo, en dicho proceso se usó las mallas n° 100, n° 200 y por último la n° 325, los resultados se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Granulometría porcentual de la puzolana molturada.

	MAT. RET.(gr.)	RET. %	AC. RET.	AC. PASA
#100	4.1	5%	5%	95%
#200	10.7	13%	18%	82%
#325	15.3	18%	36%	64%
FONDO	52.9	64%	100%	0%

Fuente: Elaboración Propia.

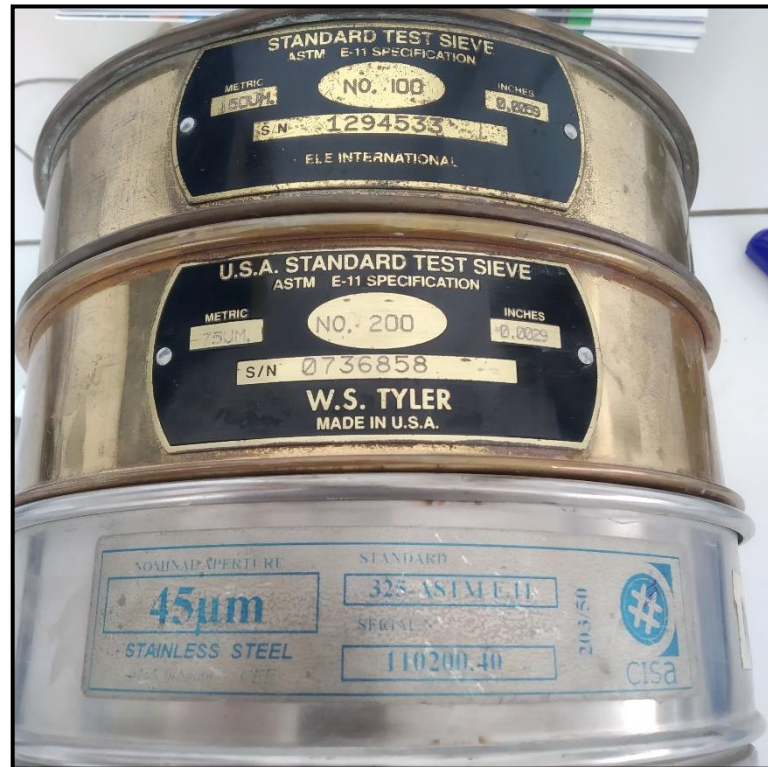


Figura 3.4: Mallas usadas en Ensayo de Lavado.
Fuente: Elaboración Propia.

Continuando la evaluación de las propiedades se procedió a los ensayos químicos y de difracción de rayos X para conocer el estado mineralógico de la puzolana, saber que compuestos zeolíticos y no zeolíticos están presentes, determinar las porcentajes que estado mineralógico amorfo y cristalino en el cual se encuentran y finalmente para conocer cuantitativamente los porcentajes de compuestos moleculares se tienen en el material puzolanico molturado, todo ello no habría sido posible sino por el apoyo del CDMAN-UNI, "CENTRO DE DESARROLLO DE MATERIALES AVANZADOS Y NANOTECNOLOGIA" (Center for the development of advanced materials and nanotechnology, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Rímac, Lima, Perú.), de la Facultad de Ciencias de la UNI, a los cuales estoy profundamente agradecido. A continuación, se muestra los resultados de los ensayos:

Difracción de Rayos X

Condiciones de la medida

Nombre de la muestra:	zeolita Ayacucho
Documento origen:	zeolita-ayacucho.raw
Equipo:	Bruker ADVANCE D8
Posición de inicio (2θ):	5.0000
Posición final (2θ):	89.9870
Tiempo de paso (s):	80.0000
Fuente de RX	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Potencia de la Fuente:	40 mA, 40 kV
Tipo de difracción:	Theta/Theta

Observación: en el difractograma se observa que la muestra es altamente amorfa. por la desviación de la línea base entre 16 y 34 grados 2θ . obteniendo una **crystalinidad de 29 %**. Obteniendo como resultado:

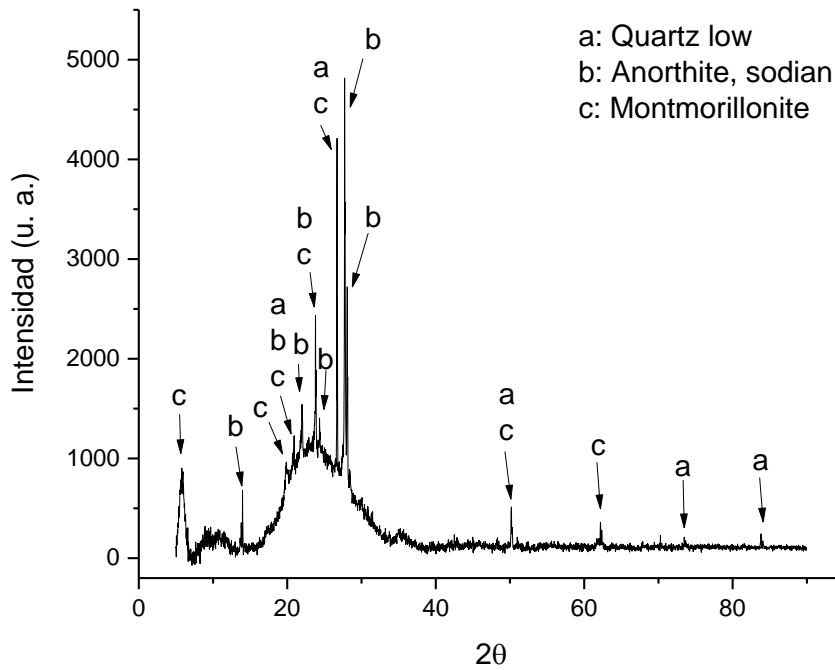


Figura 3.5: Diffractograma de la puzolana.
Fuente: Informe de análisis de muestras emitido por el CDMAN-UNI.

Resultados cuantitativos

Compuesto	Porcentaje
Quartz low	0.46
Anorthite, sodian	16.54
Montmorillonite	12.0
Amorfo	71.0

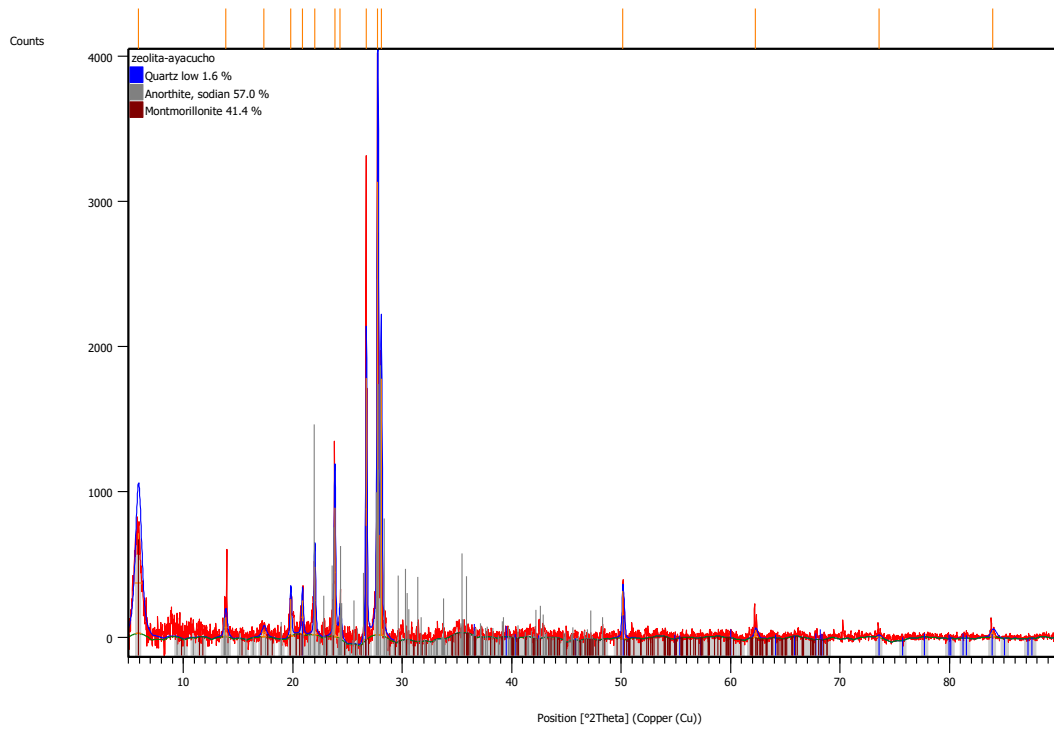


Figura 3.6: Calculo de cuantitativo de la parte cristalina.
 Fuente: Informe de análisis de muestras emitido por el CDMAN-UNI.

Concentración de la fase cristalina:

Compuesto	Porcentaje
Quartz low	1.6
Anorthite, sodian	57.0
Montmorillonite	41.4

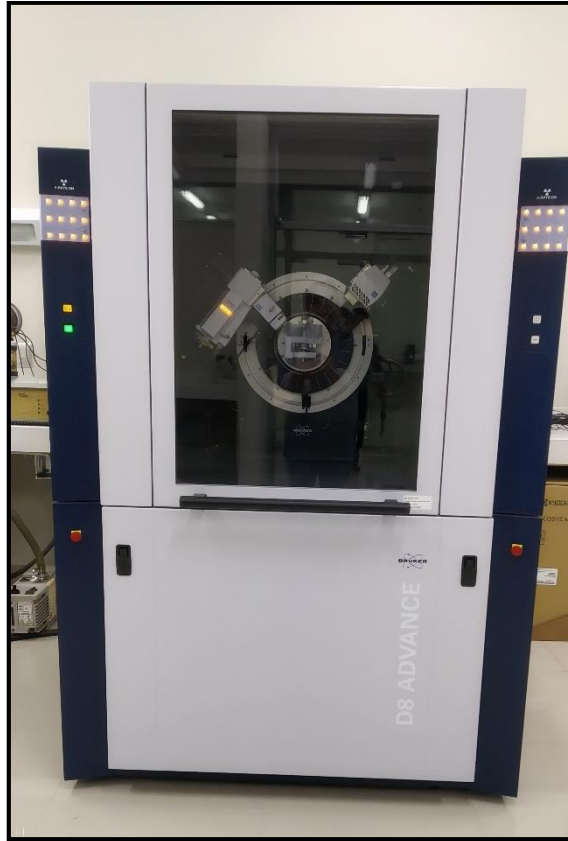


Figura 3.7: Equipo usado en el ensayo de Difracción de Rayos X.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis Químico EDS

Condiciones de la medida.

Nombre de la muestra:	diatomea01
Documento origen:	muestra1.pdf
Equipo:	Bruker Xflash 6/60
Voltaje:	20K V
Distancia de trabajo:	15mm
Magnificación:	x1000
método:	determinación de composición química en forma de óxidos.

Observación: se hizo la medida en toda el área de la región a la magnificación de 1000. se tomó tres zonas donde la muestra cubra toda la pantalla.

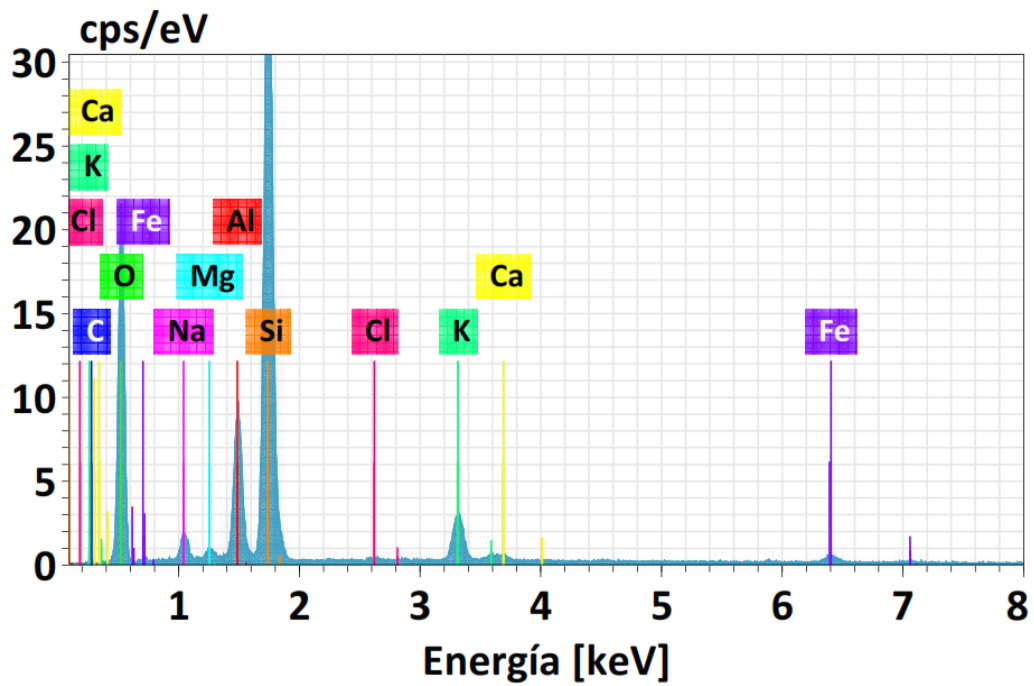


Figura 3.8: Espectro de elementos químicos presentes.
Fuente: Informe de análisis de muestras emitido por el CDMAN-UNI.

Tabla 3.2: Porcentajes de compuestos presentes en la puzolana.

compuesto	Porcentaje masa	Desviación estándar
Na ₂ O	3.64	0.26
MgO	0.98	0.08
Al ₂ O ₃	15.93	0.54
SiO ₂	72.23	1.81
K ₂ O	4.82	0.19
CaO	0.72	0.05
FeO	1.47	0.08
Otros	0.19	0.05

Fuente: Informe de análisis de muestras emitido por el CDMAN-UNI.

Evaluando los resultados de los ensayos hechos a la puzolana natural, se puede apreciar respecto al estado mineralógico, que consta en su mayor parte de una fase amorfa (71%) y una menor cantidad de fase cristalina (29%), además se

puede químicamente consta en su mayor parte de materiales silicaluminosos ya que juntos suman 88.16% en masa, asimismo la puzolana cuenta con un contenido muy bajo en cal libre 0.72%.

3.3.- CAL HIDRÁULICA

Se eligió este tipo de cal ya que cuenta con aproximadamente 50% de CaO como se muestra en la tabla 3.3, lo cual es idóneo para la mezcla con el material puzolanico que se busca formar un material solicoaluminoso con suficiente cal reactiva lograr así los insumos propicios a una mezcla eminentemente hidráulica.

La investigación de conglomerantes alternativos se fija en materiales que cuentan con posibilidades de reaccionar generando productos resistentes como los mencionados gel C-S-H o el gel N-A-S-H en el caso de los cementos alcalinos, sin embargo debemos hacer una diferenciación clara, de acuerdo a la manera en cómo se plantea el estudio y cómo reacciona cada material con otro, esto es que los estudios se hacen primeramente con sustancias químicamente puras y en ellas se puede ver como más exactamente cuál es el comportamiento de estas reacciones, ya que se quitan las impurezas que en caso de no ser inertes a las reacciones que se buscan analizar, podrían alterar las condiciones químicas, en casos funcionando como catalizadores, inhibidores o generando compuestos adicionales que conlleven a un análisis de erróneo de resultados; en segunda instancia las investigaciones se llevan sobre materiales de partida productos de la actividad industrial, ya sea como producto o deshecho, de modo que en esta etapa es posible apreciar el comportamiento de las reacciones con todas las interferencias que puedan presentarse ya que estos insumos generalmente contienen solo un porcentaje determinado de el/los compuestos en estudio los cuales están >50%, 60%, 80% u 90%, según sea el caso particular del compuesto en estudio. De estas afirmaciones se desprende que se debe ubicar adecuadamente en que caso se plantea el estudio ya que de ese modo se analizaran con mayor exactitud los resultados.

En el presente estudio se buscó aplicar hacia insumos que no son químicamente puros, de modo que se pueda apreciar el comportamiento de sus reacciones y

propiedades finales con ciertos porcentajes de pureza que son producto de la actividad industrial, en el caso de la cal, es cierto que existen una gran variedad de insumos que se tratan como tal, por ejemplo, la cal de obra que tan solo representa un 15% de pureza, cal nieve con alrededor de 40% de pureza. También cabe señalar que muchas de estas cales con mayor pureza, como la cal hidratada, comercializada para tratamiento de aguas cuenta con más de 95% de pureza y un costo de 60% superior a la cal hidráulica, sin embargo, casi todas las cales con pureza >60%, tienen un uso restringido y se clasifican como insumo fiscalizado por la SUNAT, esto debido a que su ilícito se aplica a la producción de narcóticos.

Rodeado por estas limitantes se eligió la cal hidráulica COMACSA, cuya composición se detalla en el siguiente cuadro:

Tabla 3.3: Composición química cal hidráulica.

Parámetro	Especificación	Método
Contenido de SiO ₂	10.0 – 16.5 %	LAB-PR-007
Contenido de Al ₂ O ₃	1.9 – 3.5 %	LAB-PR-007
Contenido de CaO	46.0 – 52.0 %	LAB-PR-007
Contenido de MgO	0.75 – 1.5 %	LAB-PR-007
Contenido de SO ₃	máx. 1.0 %	LAB-PR-007
Partículas > 45 µm (residuo tamiz ASTM No. 325)	5.0 – 11.0 %	LAB-PR-018
Densidad aparente	620 – 670 g/L	LAB-PR-011
Humedad	máx. 1.0 %	LAB-PR-023
Tiempo de fraguado inicial	80 – 160 min	LAB-PR-036
Tiempo de fraguado final	200 – 350 min	LAB-PR-036
Resistencia a la compresión 7 días: mortero 1:1:6	90 – 150 kg/cm ²	LAB-PR-037
Resistencia a la compresión 7 días: mortero 1:2:9	50 – 75 kg/cm ²	LAB-PR-037
Resistencia a la compresión 28 días: mortero 1:1:6	140 – 210 kg/cm ²	LAB-PR-037
Resistencia a la compresión 28 días: mortero 1:2:9	75 – 120 kg/cm ²	LAB-PR-037
Estabilidad de volumen	máx. 0.80 %	LAB-PR-038

Fuente: Especificaciones del fabricante, COMACSA.

3.4.- ADITIVOS Y ADICIONES

Existen estudios previos como el de Ismail et al. (2015), así como Gutiérrez (1989), en que se demuestra que compuestos de sulfatados de elementos alcalinos y algunos alcalinotérreos, los cuales generan en un primer momento estrigita estable y esto trae como consecuencia una mayor rapidez de fraguado, este punto es muy importante dado el caso de que este tipo de mezclas la velocidad de reacción es lenta comparado con el cemento portland ordinario, además en estos estudios se verifica que adicionalmente estas sales de sulfato pueden comportarse como catalizadores de las reacciones que generan los productos resistentes como el gel C-S-H, es por ello se eligió experimentar la adición de estas sales de sulfatos con base en elementos alcalinos y alcalinotérreos, estando disponibles en el medio los siguientes: sulfato de potasio (K_2SO_4), sulfato de sodio (Na_2SO_4), sulfato de zinc ($ZnSO_4$), sulfato de magnesio ($MgSO_4$), además también se usó un aditivo acelerante de fragua y resistencias (Sika Cem Acelerante PE) diseñado para el CPO, pero tomando en consideración que está compuesto a base de sulfatos, se vio por conveniente su uso.

Cabe señalar en el caso del sulfato de zinc ($ZnSO_4$), este no tiene como base a un elemento alcalino o alcalino terreo, por ello como se verá las adelante, en aplicación a una mezcla de concreto, este no fraguo en varios días como era previsible, comprobando así que compuestos aditivos ajenos a la configuración química prevista pues no causaran mayor impacto que una mezcla errónea.

Las sales de sulfatos alcalinos y alcalinotérreos adquiridas estuvieron presentes con una apariencia de polvo de cristales, a continuación, se detallan los insumos usados como aditivos:

Tabla 3.4: Composición química del Sulfato de Potasio.

Parámetro	Especificación	Resultados	Unidad
K ₂ O	50.00	50.44	% min.
S	18.00	18.15	% min.
Humedad	0.5	0.075	% max.
Cl	1.00	0.75	% max.
Solubilidad	99.7	99.8	% min.
pH	3.0 - 7.0	3.40	
Arsénico	10 max	No Detectado	ppm
Plomo	100 max	No Detectado	ppm
Mercurio	1 max	No Detectado	ppm
Cadmio	20 max	No Detectado	ppm

Fuente: Especificaciones emitidas por el fabricante.

Tabla 3.5: Composición química del Sulfato de Zinc.

Parámetro	Especificación	Resultados	Unidad
Zinc	21.00	21.10	%
Magnesio (Mg)	0.5	0.13	%
Plomo (Pb)	0.003	0.0019	%
Cobre (Cu)	0.1	0.07	%
Cadmio (Cd)	0.0025	0.0017	%
pH	4.00	4.75	min.
Azufre (S)	10.0	10.10	% min.
Insolubles en Agua	1.00	0.25	% max.

Fuente: Especificaciones emitidas por el fabricante.

Tabla 3.6: Composición química del Sulfato de Magnesio.

Parámetro	Especificación	Unidad
Pureza MgSO ₄ ·7H ₂ O	98.00	%
MgSO ₄	48.00 - 52.00	%
Magnesio (Mg)	9.7	% min.
Plomo (Pb)	0.001	% max.
Solubilidad	100	%
Arsénico (As)	0.0002	%max.
Hierro (Fe)	0.002	%max.
Cloro (Cl)	0.02	%max.
Óxido Magnesio MgO	16.0	% min.
Calcio (Ca)	340	ppm max

Fuente: Especificaciones emitidas por el fabricante.

3.5.- AGREGADOS

Los agregados que se usaron fueron provenientes de la cantera ubicado en la localidad de Jicamarca - UNICON y las cuales se trasladaron al Laboratorio de ensayo de materiales de la LEM-UNI donde se desarrollaron las pruebas pertinentes para determinar las propiedades mecánicas idóneas. Siendo el presente estudio, de tipo de exploración de materiales aglomerantes y por ende se centra en gran medida en la reacción química que entre los componentes que fueron elegidos para la pasta, no pueden reaccionar químicamente, respecto a ello, se da un juicio favorable a la limpieza de los agregados debido al poco contenido de finos y la certeza que nos da el proveedor acerca de la arena proveniente de un conglomerado así como de la piedra canchada, que para dicho fin se usaron rodas intrusivas con resistencia y neutralidad química óptima. Los resultados de los ensayos efectuados a los agregados en el LEM-UNI, a continuación, se describirá el marco normativo que parametrizan los ensayos de las propiedades de los agregados y posteriormente los resultados obtenidos:

3.5.1.- Análisis granulométrico – NTP 400.012

Las normas en las que se apoyan los términos usados se refieren a la NTP 400.011, NTP 339.047/y NTP 400.037. La norma describe el método de desarrollo del análisis de la granulometría del agregado grueso y menciona expresamente en el resumen del método, una muestra de agregado seco, de masa conocida, es separada a través de una serie de tamices que van progresivamente de una abertura mayor a una menor para determinar la distribución del tamaño de las partículas. Para el caso del agregado grueso con el que se contó, se usa las mallas de aberturas normalizadas 2", 1 ½, 1, ¾, ½ Y 3/8. Además de ello la norma ASTM C33:2011 define los milímetros granulométricos que determinen al agregado grueso a fin de que este sea idóneo para la elaboración del concreto.

3.5.2.- Módulo de finura – NTP 400.011

La norma menciona expresamente que es un factor que se obtiene por la suma de los porcentajes acumulados de material de una muestra de agregado en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividido por 100. Estos tamices son

1 ½ “, 3/4”, 3/8”, N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100, esta definición es aplicada al agregado grueso y fino.

3.5.3.- Tamaño máximo – NTP 400.011

Es el que corresponde al menor tamiz por el que pasa toda la muestra de agregado grueso.

3.5.4.- Tamaño máximo nominal – NTP 400.011

Es el que corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido.

3.5.5.- Peso específico – NTP 400.021

Peso específico es la relación, a una temperatura estable, de la masa (o peso en el aire) de un volumen unitario de material, a la masa del mismo volumen de agua a las temperaturas indicadas, los valores son adimensionales. El método se basa en coger una muestra según la NTP 400.010 y tomar la cantidad que sea necesaria dado por el tamaño máximo nominal (TMN), entonces la muestra de agregado se sumerge en agua por 24 h aproximadamente para llenar los poros esencialmente. Luego se retira del agua, se seca el agua de la superficie de las partículas, y se pesa. La muestra se pesa posteriormente mientras es sumergida en agua. Finalmente, la muestra es secada al horno y se pesa por tercera vez. Usando los pesos así obtenidos y formulas en este método de ensayo, es posible calcular tres tipos de peso específico y de absorción.

3.5.6.- Peso Unitario Suelto – NTP 400.017

La norma detalla lo siguiente: Llenar el recipiente hasta el reboce con una pala o cucharón, descargando el agregado de una altura que no exceda 50 mm encima del borde superior del mismo. Tener cuidado a fin de prevenir, como sea posible, la segregación del tamaño de partículas que constituyen la muestra. Nivelar la superficie del agregado con los dedos o una espátula de manera que cualquier proyección leve de las partículas más grandes del agregado grueso aproximadamente equilibren los vacíos mayores en la superficie por debajo de la

parte superior del recipiente. Determinar la masa del recipiente más su contenido, y la masa del recipiente vacío, y registrar los valores con exactitud de 0.05 kg. Para el cálculo se emplea la siguiente expresión:

$$M = (G - T) / V$$

Donde:

M: Densidad de masa del agregado, kg/m³

G: Masa total (Recipiente+agregado), kg

T: Masa del recipiente, kg

V: Volumen del recipiente, m³

3.5.7.- Peso Unitario compactado – NTP 400.017

La norma menciona expresamente que este método de ensayo es a menudo usado para determinar los valores de densidad de masa que son necesarios para usos en muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de concreto. El procedimiento indica que se debe llenar el recipiente a un tercio del total y nivelar la superficie con los dedos. Apisonar la capa de agregado con 25 golpes con la varilla de apisonado uniformemente distribuido sobre la superficie. Llenar el recipiente a los 2 tercios del total y nuevamente nivelar y apisonar como anteriormente. Finalmente, llenar el recipiente a sobre-volumen y apisonar nuevamente de la forma indicada líneas arriba. Nivelar la superficie del agregado con los dedos o una espátula de manera que cualquier proyección leve de las partículas más grandes del agregado grueso aproximadamente equilibre los vacíos mayores en la superficie por debajo de la parte superior del recipiente. Determinar la masa del recipiente más su contenido, y la masa del recipiente vacío, y registrar los valores con exactitud de 0.05 kg.

Para el cálculo se emplea la siguiente expresión:

$$M = (G - T) / V$$

Donde:

M: Densidad de masa del agregado, kg/m³

G: Masa total (Recipiente+agregado), kg

T: Masa del recipiente, kg

V: Volumen del recipiente, m³

- Porcentaje de absorción – NTP 400.021

La norma lo define como la cantidad de agua absorbida por el agregado después de ser sumergido 24 horas en ésta, se expresa como porcentaje del peso seco. El agregado se considera “seco” cuando éste ha sido mantenido a una temperatura de 110 °C ± 5 °C por tiempo suficiente para remover toda el agua sin combinar. Se calcula mediante a siguiente expresión:

$$Ab = \frac{PSS - PS}{PS} \times 100$$

Donde:

Ab: Porcentaje de absorción (%)

PSS: Peso saturado superficialmente seco, kg

PS: Peso seco, kg

3.5.8.- Contenido de Humedad – NTP 339.185

La norma indica secar la muestra completamente en el recipiente por medio de la fuente de calor elegida, teniendo cuidado de evitar la pérdida de las partículas. Un secado muy rápido puede causar que exploten algunas partículas resultando en pérdidas de partículas. Usar un horno de temperatura controlada cuando el calor excesivo puede alterar las características del agregado o cuando se requiera una medición más precisa. Si se usa una fuente de calor diferente al horno de temperatura controlada revolver la muestra durante el secado para acelerar la operación y evitar sobrecalentamiento localizado. Cuando se use un horno microondas, es opcional el revolver la muestra. Se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{100(W - D)}{D}$$

Donde:

P: Contenido total de humedad evaporable de la muestra, (%)

W: Masa de la Muestra húmeda original, gr

D: Masa de la muestra seca, gr

Definido las normas que regulan la medición de las propiedades físicas de interés de los agregados, a continuación, se muestra los resultados obtenidos:

- Granulometría:

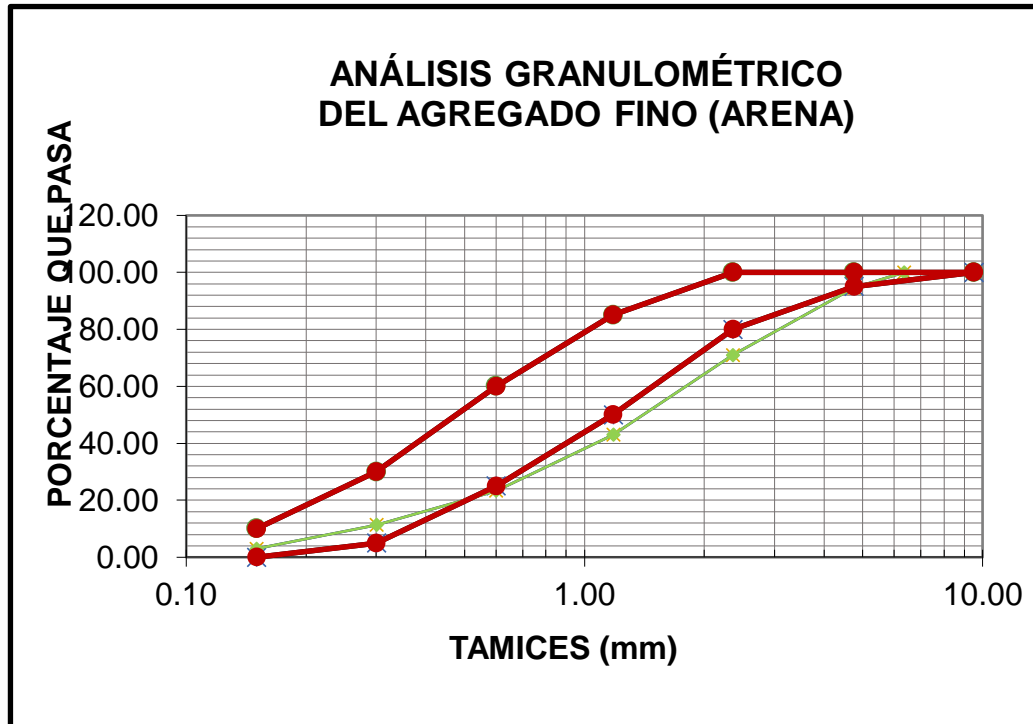


Figura 3.9: Agregado fino evaluado en la Huso ASTM - C33.
Fuente: Elaboración propia.

Además, se tiene las propiedades granulométricas adicionales:

MF	3.54
TM	3/8"
TMN	Nº4

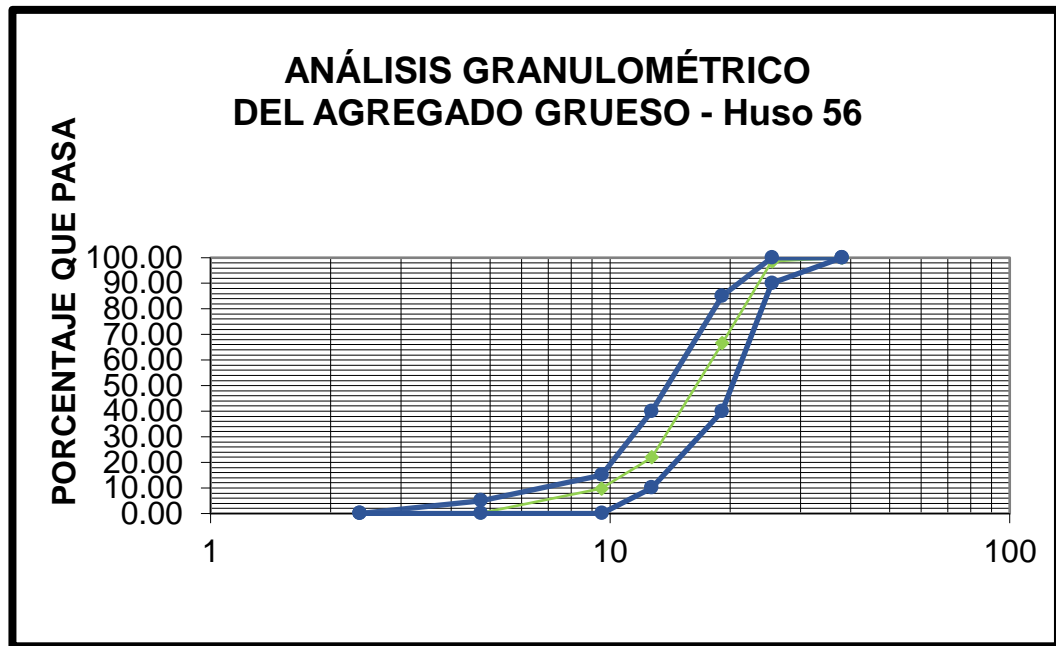


Figura 3.10: Agregado grueso de acuerdo al Huso 56.
Fuente: Elaboración propia.

Además, se tiene las propiedades granulométricas adicionales:

MF	7.23
TM	1 1/2"
TMN	1"

- Propiedades Físicas de los agregados:

Tabla 3.7: Propiedades Físicas de los agregados.

PROPIEDADES DEL AGREGADO	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO
Peso Unitario Suelto	1427.94	1322.18
Peso Unitario compactado	1667.55	1553.14
Peso específico	2.60	2.71
% Humedad	3.59%	0.36%
%Absorción	0.91%	0.76%

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.11: Tamices usados en la granulometría del agregado fino.
Fuente: Elaboración Propia.

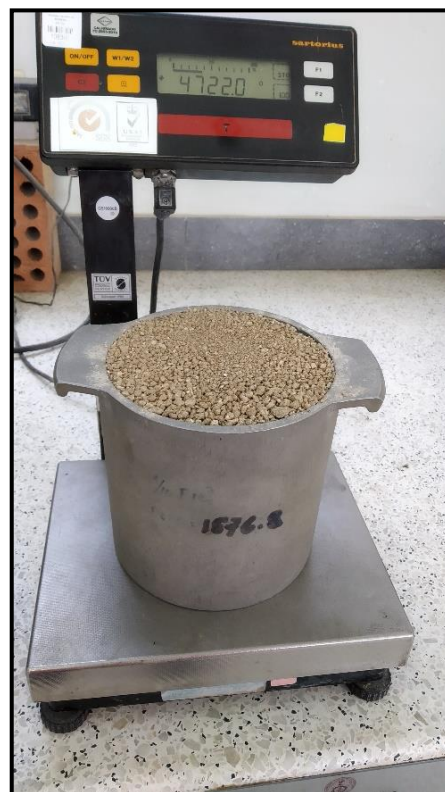


Figura 3.12: Procedimiento de pesado para el PUC.
Fuente: Elaboración Propia.

Respecto a los agregados también se evaluó la máxima combinación que tenga la mayor compactación de la arena y piedra en condición seco:

Tabla 3.8: Método Agregado Global.

AGREGADO GLOBAL	
RELACION ARENA/PIEDRA	PESO
45/55	21.71
50/50	21.74
55/45	21.5

Fuente: Elaboración propia.

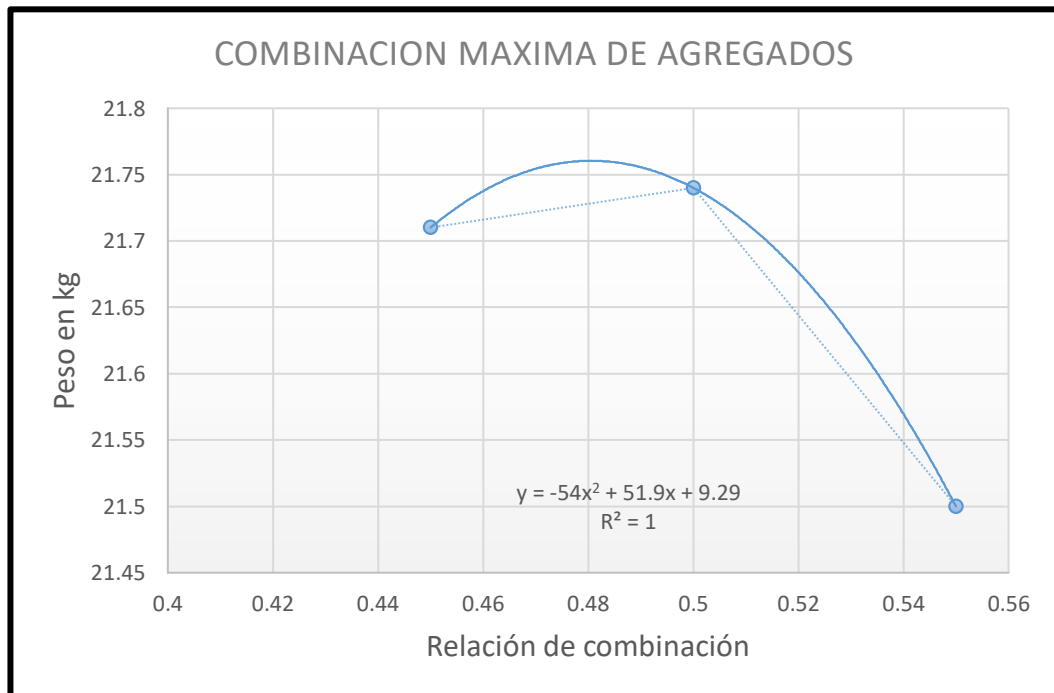


Figura 3.13: Combinación en Método Agregado Global.
Fuente: Elaboración Propia.

De la Figura 3.13 se extrae que mediante este método la combinación de agregados que proporciona mayor densidad y por ende la posibilidad de tener mayor resistencia en la relación Arena/Piedra = 0.48.

CAPÍTULO IV: DISEÑO DE MEZCLAS

Para determinar el óptimo diseño de mezclas en primera instancia para determinar un diseño preliminar en el cual se puedan apreciar el desempeño del conglomerante, se revisó estudios que marcaron precedente en el comportamiento que de este tipo de mezclas con materiales similares y además de procedimientos parecidos, ciertamente existe una gran cantidad de materiales silicoaluminosos que pueden ser empleados y comparten varias propiedades con las puzolanas, las cuales se han hecho gran cantidad de estudios, como lo son las cenizas volantes, escorias, puzolanas naturales, zeolitas usadas en el craqueo catalítico en la industria petrolera, etc. En este caso se revisó las que son más afines a lo planteado en esta investigación, las puzolanas provenientes de fuentes naturales, tobas y cenizas volcánicas, sin embargo hay que tener en cuenta que incluso en este caso, las puzolanas al ser naturales y pertenecer a un afloramiento natural, puede variar significativamente de un lugar a otro de modo que usando material proveniente de una u otra cantera se puede tener características distintas, como se muestra en el estudio de Shiohama et al. (1965), en el cual se trabajó con canteras arequipeñas y resulta que las concentraciones de materiales silicoaluminosos varían de 60% a 90% y además de acuerdo a la génesis de cada zona en particular es racional intuir que los rangos mineralógicos y porcentajes de material amorfo y cristalino también varía, claro que este punto en particular no se tocó en dicho estudio. También como ya se mostró en la parte teórica, las adiciones de sulfatos en un porcentaje de 4 a 5% generaron mejoras en la ganancia de resistencia, así como en el consumo de mayor material puzolánico generando los productos resistentes.

Como se vio en la parte teórica, la combinación de la puzolana con cal apagada genera elementos resistentes como es el gel C-S-H, adicionalmente se debe verificar las condiciones bajo las cuales se forman estas reacciones, uno de los factores más importantes es la alcalinidad, ya que un medio de estas características genera un ambiente propicio para las reacciones. En ese sentido se midió el PH la cal y algunas adiciones en un medio acuoso, la cual se mostrará a continuación:

- Medición de PH para únicamente cal hidratada:
Relación $a/c=0.35$
 $a=$ Agua= 100ml
 $c=$ cal hidratada=143gr
PH= 11.2

- Medición de PH para únicamente cal hidratada + puzolana:
Relación $(cal\ h)/(puz)=1$
Relación $a/c=0.50$
 $a=$ Agua= 143ml
 $c=$ cal hidratada+puzolana=286gr
cal hidratada=143gr
puzolana= 143gr
PH= 11.4

- Medición de PH para únicamente cal hidratada + puzolana + 5% KSO_4 (Sulfato de Potasio):
Relación $(cal\ h)/(puz)=1$
Relación $a/c=0.50$
 $a=$ Agua= 100ml
 $c=$ cal hidratada+puzolana=200gr
cal hidratada=95gr
puzolana= 95gr
 $KSO_4=10$ gr
PH= 11.9

- Medición de PH para únicamente cal hidratada + puzolana + 5% $ZnSO_4$ (Sulfato de Cinc):
Relación $(cal\ h)/(puz)=1$
Relación $a/c=0.50$
 $a=$ Agua= 100ml
 $c=$ cal hidratada+puzolana=200gr
cal hidratada=95gr
puzolana= 95gr
 $ZnSO_4=10$ gr
PH= 9.7



Figura 4.1: Insumos para la medición de PH.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 4.2: Medición de PH solo Cal H (Izq.) y Cal H + Puz(Der.).
Fuente: Elaboración Propia.

4.1.- DISEÑO DE MEZCLAS AGLOMERANTE CAL-PUZOLANA

De las mediciones se puede verificar que incluso con materiales ya combinados en mezcla de cal-puzolana, y adiciones como K_2SO_4 , se ve que el PH de la pasta se encuentra en valores superiores a 11, lo cual nos dice que, en el aspecto de generar un medio alcalino propicio para las reacciones, los materiales planteados cumplen los objetivos, salvo en el caso de la adición $ZnSO_4$, en cual el PH baja a 9.7, lo cual podría ser un indicio de que las reacciones se lleven a cabo de una manera más lenta.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se plantea el diseño de mezclas en 3 etapas para el aglomerante cal-puzolana, primero determina la relación de combinación entre la cal y puzolana en cuanto a su pasta como principal componente del aglomerante, de modo que se asegure la máxima reacción de los elementos iniciales y se genere una la cantidad mínima posible de elemento sin reaccionar en una etapa final; la idoneidad de estas mezclas son evaluadas en base a evaluar la resistencia a la compresión ya que de esta manera se asegura que mientras mayor sea el valor de resistencia, mayor será la cantidad de elementos resistentes formados. En una segunda etapa el diseño se enfoca en la evaluación de la mezcla aglomerante de cal-puzolana en adición de elementos que buscan jugar el rol de catalizadores de las reacciones, estos son básicamente sulfatos de elementos alcalinos o alcalino-térreos, los cuales como los estudios descritos por Gutiérrez (1989), en los cuales es de notar la efectividad del sulfato de potasio como agente catalizador de las reacciones; en esta etapa se determinó que porcentajes de sulfatos adicionados generan mayor actividad en las reacciones del aglomerante, para lo cual también se midió la resistencia a la compresión. En una tercera etapa se determinó las mezclas finales con la información de las etapas 1 y 2 de modo que se puedan evaluar mezclas con aglomerante cal-puzolana solamente y también de otras que contengan adiciones de sulfatos de elementos alcalinos y alcalino-térreos, al ser las mezclas definitivas se prevé evaluar la evaluación de las propiedades en estado fresco y también en el endurecido la medición de la resistencia mecánica de compresión en una edad de 7, 14, 28, 56 y 120 días. El resultado de los diseños preliminares se mostrará a continuación:

4.1.1.- Primera etapa

En esta etapa se busca determinar la proporción de combinación más eficiente para el aglomerante cal-puzolana, para lo cual se usa una relación $a/c=0.5$ debido a que en mezclas previas al planteamiento se notó que relaciones más bajas no presenta trabajabilidad aceptable, aun a la relación $a/c=0.5$ se verifica que tiene un asentamiento menor a 2", si bien es cierto este asentamiento no es aplicable a una mezcla estándar ya que se exige un asentamiento que varía entre 3" a 4", el objetivo de este ensayo está enfocado en el análisis del aglomerante, por ello para el objetivo se considera válido.

Tabla 4.1: Diseño de mezclas etapa 1.

MATERIALES	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
	CAL-PUZ=60%-40%	CAL-PUZ=55%-45%	CAL-PUZ=50%-50%
	RELACION A/C=0.5	RELACION A/C=0.5	RELACION A/C=0.5
	KG DE MATERIAL/ M3 CONCRETO	KG DE MATERIAL/ M3 CONCRETO	KG DE MATERIAL/ M3 CONCRETO
PUZOLANA	160	180	200
CAL HIDRAHULICA	240	220	200
ARENA GRUESA	841.5	841.5	841.5
PIEDRA CHANCADA	841.5	841.5	841.5
AGUA	200	200	200
ADIT. ACELERANTE	16	16	16

MATERIALES	PRUEBA 4	PRUEBA 5
	CAL-PUZ=45%-55%	CAL-PUZ=40%-60%
	RELACION A/C=0.5	RELACION A/C=0.5
	KG DE MATERIAL/ M3 CONCRETO	KG DE MATERIAL/ M3 CONCRETO
PUZOLANA	220	240
CAL HIDRAHULICA	180	160
ARENA GRUESA	841.5	841.5
PIEDRA CHANCADA	841.5	841.5
AGUA	200	200
ADIT. ACELERANTE	16	16

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se muestra el resultado de las resistencias a la compresión a los 7 y 14 días de edad:

Tabla 4.2: Resistencias a la compresión en etapa 1.

RESISTENCIAS (kg/cm ²)		
N° DE PRUEBA	F'C(7 D)	F'C(14 D)
PRUEBA 1	5.16	13.02
PRUEBA 2	7.26	14.71
PRUEBA 3	7.52	14.73
PRUEBA 4	8.31	16.82
PRUEBA 5	7.71	14.95

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a ello se extrae que la prueba 4 es la que ofrece los mejores resultados, de modo que para lo posterior en la investigación se adoptó para el aglomerante en proporción de cal-puzolana de 45%-55%.

4.1.2.- Segunda etapa

Para esta etapa el objetivo es determinar en primera instancia la elección de si se usa cal hidráulica o cal nieve para los ensayos de la etapa 3, esto debido a que estos son 2 de las presentaciones más comunes de la cal viva y para este caso contienen una porcentaje parecido, químicamente la cal hidráulica contiene 50% de cal viva aproximadamente, y la cal nieve contiene una cantidad de 45% aproximadamente, todo ello de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante; ahora si bien estos dos tipos de cales tienen proporciones de contenido de cal viva parecidos, y tal vez podría intuirse que su desempeño podría ser similar, esto no es así ya que no se está trabajando con elementos químicamente puros y hay casi 50% de materiales que pueden influir significativamente en como se desarrollan las reacciones químicas, por otro lado, al ser 2 tipos de presentaciones distintas, pueden tener estados mineralógicos diferentes que también generen comportamientos distintos de un tipo de cal comercial y la otra. En segunda instancia se busca explorar el comportamiento de diferentes tipos de relación agua/material cementante (A/C), así como el uso de sulfato de sodio del cual se espera que tenga la función de catalizadores de las reacciones químicas en la formación de compuestos resistentes, como lo demuestra el estudio de

Gutiérrez (1989), en esta etapa se plantea las proporciones de los diseños de mezclas y se aplica en cubos de 5cm de arista debido a un tema de disponibilidad del área de concreto, finalmente se evalúa la resistencia a la compresión a los 7 días de vaciado, seguidamente con los datos de resistencia se valoró cuáles son las proporciones más idóneas. Los detalles de los diseños de mezclas se muestran a continuación:

Tabla 4.3: Diseño de mezclas etapa 2.

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO	KG / M3 DE CONCRETO	KG / M3 DE CONCRETO	KG / M3 DE CONCRETO
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%
	RELACION A/C=0.5	RELACION A/C=0.5	RELACION A/C=0.5	RELACION A/C=0.5
PUZOLANA	240.0	230.4	240.0	230.4
CAL HIDRAHULICA	160.0	153.6	0.0	0.0
CAL NIEVE	0.0		160.0	153.6
SULFATO DE SODIO	0.0	16.0	0.0	16.0
ARENA GRUESA	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0
AGUA	200.0	200.0	200.0	200.0
ADIT. ACELERANTE	0.0	0.0	0.0	0.0
ADIT. PLASTIFICANTE	0.0	0.0	0.0	0.0
MATERIALES	PRUEBA 5	PRUEBA 6	PRUEBA 7	PRUEBA 8
	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%
	RELACION A/C=0.6	RELACION A/C=0.5	RELACION A/C=0.6	RELACION A/C=0.5
	PUZOLANA	220.8	230.4	220.8
CAL HIDRAHULICA	147.2	153.6	0.0	0.0
CAL NIEVE	0.0	0.0	147.2	153.6
SULFATO DE SODIO	15.3	16.0	15.3	16.0
ARENA GRUESA	1533.3	1600.0	1533.3	1600.0
AGUA	230.0	200.0	230.0	200.0
ADIT. ACELERANTE	0.0	0.0	0.0	0.0
ADIT. PLASTIFICANTE	0.0	6.0	0.0	6.0
MATERIALES	PRUEBA 9	PRUEBA 10	PRUEBA 11	PRUEBA 12
	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%
	RELACION A/C=0.6	RELACION A/C=0.65	RELACION A/C=0.6	RELACION A/C=0.65
	PUZOLANA	268.8	265.8	268.8
CAL HIDRAHULICA	179.2	177.2	0.0	0.0
CAL NIEVE	0.0	0.0	179.2	177.2
SULFATO DE SODIO	18.7	18.5	18.7	18.5
ARENA GRUESA	1400.0	1384.6	1400.0	1384.6
AGUA	280.0	300.0	280.0	300.0
ADIT. ACELERANTE	0.0	0.0	0.0	0.0
ADIT. PLASTIFICANTE	0.0	0.0	0.0	0.0

MATERIALES	PRUEBA 13	PRUEBA 14
	CAL-PUZ=40%-60%	CAL-PUZ=40%-60%
	RELACION A/C=0.60	RELACION A/C=0.6
PUZOLANA	280.0	280.0
CAL HIDRAHULICA	186.7	0.0
CAL NIEVE	0.0	186.7
SULFATO DE SODIO	0.0	0.0
ARENA GRUESA	1400.0	1400.0
AGUA	280.0	280.0
ADIT. ACELERANTE	0.0	0.0
ADIT. PLASTIFICANTE	0.0	0.0

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 4.3: Elaboración cubos de prueba – Etapa 2.
Fuente: Elaboración Propia.

El vaciado de estos cubos de prueba se desarrolló durante 3 días consecutivos, el primer día se vació los diseños 1,2,3 y 4, el segundo día 5,6,7 y 8, finalmente el

tercer día, de vacío los diseños 9, 10, 11, 12, 13 y 14, de modo que se pudo ver si requerían mayor o menor trabajabilidad, es así que inicialmente en el primer día los diseños de mezcla tienen 200L de agua/m³ de concreto, el segundo 230L y el tercer se llegó a considerar 280L para poder una relación A/C baja pero un mortero trabajable. Posteriormente a la edad de 7 días se procedió a la rotura de los cubos, los resultados resistencia a la compresión se pueden apreciar a continuación:

Tabla 4.4: Resistencia a la compresión – Etapa 2.

PRUEBA	RESULTADO F'C(7D) Kg/cm ²
1	7.68
2	8.56
3	10.19
4	AGRIETADO
5	15.73
6	17.57
7	AGRIETADO
8	AGRIETADO
9	AGRIETADO
10	AGRIETADO
11	AGRIETADO
12	AGRIETADO
13	17.27
14	9.08

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 4.4: Ensayo de resistencia a la compresión en cubos – Etapa 2.
Fuente: Elaboración Propia.

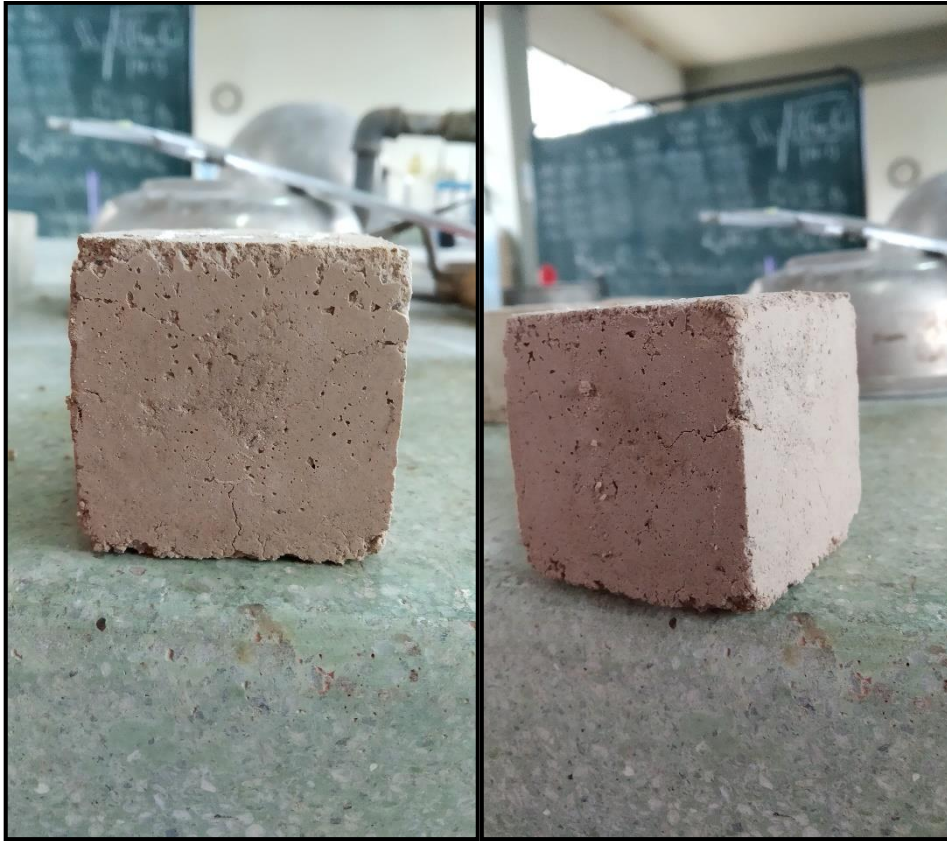


Figura 4.5: Cubos agrietados – Etapa 2.
Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados mostrados se puede ver que existen serias falencias con el uso de mezclas que contengan cal nieve, ya que fueron las que tuvieron los peores resultados, así que como primer aporte de la etapa 2 se expresa en descartar a la cal nieve como componente del aglomerante en la etapa 3. En segundo lugar, se puede ver la formación de grietas que le daban mucha fragilidad a las muestras que fueron afectadas, a tal punto que algunas de ellas se podían romper con la fuerza de la mano, es por ello que en la tabla de resistencia a la compresión no aparece los valores ya que las grietas eran tan profundas que permitían la rotura a una carga no registrada por la máquina. En tercer lugar, se puede rescatar los resultados con mejor performance, estas fueron los resultados de las pruebas 5, 6 y 13, estos resultados en principio tienen como base en el aglomerante a la cal hidráulica y puzolana, 4% de sulfato de sodio y por ultimo mantener la relación A/C lo más baja posible mientras el concreto mantenga una trabajabilidad aceptable de modo que exista la mayor pasta posible para la hidratación.

4.1.3.- Tercera etapa

Siendo esta etapa para plantear los diseños finales se cogió la información experimental de las etapas 1 y 2, estas son que la relación en el conglomerante cal-puzolana = 45%-55%, adición de 4% de sulfato de sodio y mantener una relación A/C menor a 0.6, sin embargo, con una cantidad de agua / M3 de concreto, superior a 280 de modo que se genere condiciones mínimas de trabajabilidad, además como. En ese base a ello se planteó 6 diseños finales los cuales conforman pluralidad y carácter científico para poder explorar los casos posibles optimizados con los materiales disponibles, el detalle se puede apreciar en la tabla 4.5, en el cual se tiene el diseño de mezcla 1 que está formado por una composición sin adiciones ni aditivos, como aglomerante únicamente a la cal-puzolana, además de agregados y agua, nótese que para se tiene 305L de agua por m3, esto es así debido al ajuste hecho en laboratorio para conseguir un asentamiento estándar de 3" a 4", a partir de ello también es aplicado a los otros diseños. En el diseño de mezclas 2 se tienen condiciones parecidas a la N°1, sin embargo, en este caso se evalúa el aditivo acelerante de fragua y resistencias iniciales, en el análisis de este aditivo se verifico que su base química es formada a partir de sulfatos aplicados a la reacción de elementos resistentes con base de calcio como lo es el gel C-S-H por ende se estimó que podría calificar para mejorar el desempeño de la mezcla. El diseño de mezclas 3 se coge como base a la mezcla N°1 y se considera el uso de una adición, el sulfato de sodio habiéndose probado su eficacia en la etapa N°2 y por ende evaluada en esta parte. Teniendo en cuenta que los compuestos de sulfatos con elementos alcalinos o alcalino-térreos tienen un potencial de reacción se consiguió aparte del sulfato de sodio, los compuestos de sulfato de potasio, sulfato de Zinc y sulfato de magnesio, estando estos disponibles en el mercado de compuestos industriales, son ello surgen los siguientes diseños de mezcla análogamente al N°3, se plantea el diseño de mezcla N°4 con sulfato de potasio, diseño de mezcla N°5 con sulfato de Zinc y finalmente el diseño de mezcla N°6 con sulfato de magnesio.

Tabla 4.5: Diseño de mezclas – Etapa 3.

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO
	ENSAYO 1
	CAL-PUZ=45%-55%
	RELACION A/C=0.55
PUZOLANA	305.0
CAL HIDRAULICA	249.5
PIEDRA CHANCADA	790.4
ARENA GRUESA	729.6
AGUA	305.0

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO
	ENSAYO 4
	CAL-PUZ=45%-55%
	RELACION A/C=0.55
PUZOLANA	292.8
CAL HIDRAULICA	239.6
SULFATO DE POTASIO	22.2
PIEDRA CHANCADA	790.4
ARENA GRUESA	729.6
AGUA	305.0

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO
	ENSAYO 2
	CAL-PUZ=45%-55%
	RELACION A/C=0.55
PUZOLANA	300.0
CAL HIDRAULICA	245.5
PIEDRA CHANCADA	790.4
ARENA GRUESA	729.6
AGUA	300.0
ADITIVO ACELERAN	10.9

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO
	ENSAYO 5
	CAL-PUZ=45%-55%
	RELACION A/C=0.55
PUZOLANA	292.8
CAL HIDRAULICA	239.6
SULFATO DE ZINC	22.2
PIEDRA CHANCADA	790.4
ARENA GRUESA	729.6
AGUA	305.0

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO
	ENSAYO 3
	CAL-PUZ=45%-55%
	RELACION A/C=0.55
PUZOLANA	292.8
CAL HIDRAULICA	239.6
SULFATO DE SODIO	22.2
PIEDRA CHANCADA	790.4
ARENA GRUESA	729.6
AGUA	305.0

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO
	ENSAYO 5
	CAL-PUZ=45%-55%
	RELACION A/C=0.55
PUZOLANA	292.8
CAL HIDRAULICA	239.6
SULFATO DE MAGNESIO	22.2
PIEDRA CHANCADA	790.4
ARENA GRUESA	729.6
AGUA	305.0

Fuente: Elaboración Propia.

Estos diseños de mezclas son los optimizados para los concretos con base cal-puzolana y como se verá en los siguientes capítulos sus propiedades tienen una considerable diferencia respecto a las mezclas con cemento portland ordinario, pero son similares, el único diseño de mezclas que no se logró medir sus

propiedades es la mezcla N°5 ya que después de 3 días transcurridos después de su vaciado, este lo fraguo, prueba de ello se puede apreciar en la Figura 4.6.



Figura 4.6: Ensayo E-5 a una edad de 3 días.
Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, también se planteó un diseño de mezcla la el concreto con cemento alcalino, con base de aglomerante formado por puzolana diluido en una solución de soda caustica, según Sánchez (2017), menciona que la cantidad optima para generar un medio lo bastante alcalino para generar el proceso de disolucion y posterior formacion de elementos resitentes como el gel N-A-S-H es a partir del ingreso del material silicaluminoso que para nuestro caso es la puzolana en una solucion acuosa 4 molar de hidroxido de sodio. Entonces despues de unas pruebas previas para obetenr un asentamiento estadar de 3" a 4", se plantea el diseño de mezclas:

Tabla 4.6: Diseño de mezclas cemento alcalino.

MATERIALES	KG / M3 DE CONCRETO
	ENSAYO CA - 1
	SOSA 4M
	RELACION A/C=0.50
PUZOLANA	460.0
HIDROXIDO DE SODIO	36.8
PIEDRA CHANCADA	807.0
ARENA GRUESA	745.0
AGUA	230.0

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO V: ENSAYOS SOBRE EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

En el presente capítulo se describe los ensayos considerados más importantes para analizar las propiedades del concreto con base aglomerante cal-puzolana, tomando para ello los diseños de mezclas de la etapa 3 en los ensayos 1, 2, 3, 4 y 6, ya que como se explicó la mezcla del ensayo 5 no logra fraguar después de varios días y aun después de 3 días tenían u como se verá a continuación, existe cierto símil con las propiedades del concreto con cemento portland ordinario, pero hay aspectos en que difieren significativamente.

5.1.- ASENTAMIENTO – NTP 339.035

Este es un método de medición de la trabajabilidad de la mezcla de concreto en estado fresco, la norma menciona que este método se aplica para concretos plásticos con agregados hasta 37.5mm (1 ½") de tamaño. Si el agregado es mayor, el método es aplicable cuando el ensayo se realiza con la porción de concreto que pasa el tamiz 37.5 mm, retirando los agregados mayores. El método se aplica de la siguiente manera, una muestra de concreto fresco mezclado, se coloca en un molde con forma de cono trunco, y se compacta por varillado en 3 capas, cada capa se compacta aplicando 25 golpes con la barra compactadora distribuidos y aplicados uniformemente en toda la sección de la capa. El molde se llena por exceso antes de compactar la última capa. Si como resultado de la operación de varillado hubiere una diferencia material, se debe añadir la cantidad suficiente para mantener un exceso de concreto sobre la parte superior del molde en todo momento. Luego se procede a enrasar rodando la barra compactadora sobre el borde superior del molde, Se continúa asegurando el molde firmemente contra la base y se elimina el concreto sobrante alrededor del molde para evitar interferencias con el movimiento del concreto que se asienta. El molde se retira hacia arriba permitiendo que el concreto se asiente. Se mide inmediatamente el asentamiento, determinado por la distancia vertical entre la posición inicial y la desplazada de la cara superior del cono deformado. En caso de que se presente una falla por corte, donde se aprecia una separación de una parte de la masa, este ensayo será desechado y debe realizarse uno nuevo con otra parte de la muestra. La medida en el centro de la superficie superior del concreto, se informa como el asentamiento del concreto.

Respecto a los diseños de mezcla que se plantearon, se pudo verificar en el laboratorio que todas cumplieron con tener un asentamiento de 3" a 4".



Figura 5.1: Medición del asentamiento.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5.1: Asentamientos.

DISEÑOS DE CONCRETO		Asentamiento promedio (pulg.)
E-1	A/C=0.55	4.05
E-2	A/C=0.55 + 2% Acel.	3.95
E-3	A/C=0.55+4%Na ₂ SO ₄	4.00
E-4	A/C=0.55+4%K ₂ SO ₄	3.80
E-6	A/C=0.55+4%MgSO ₄	3.40

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.- PESO UNITARIO – NTP 339.046

La norma establece el procedimiento del método para determinar la densidad del concreto en estado fresco con las siguientes consideraciones, el método de consolidación son apisonado y vibración interior, para concretos con un asentamiento mayor a 75 mm (3”), se debe aplicar el método de apisonado, para concretos con asentamiento entre 25 mm a 75 mm (1” a 3”), se aplica apisonado o vibrado y para concretos con asentamiento menor de 25 mm se debe aplicar el método de consolidación por vibración. Colocar el concreto en el recipiente de medición usando la cuchara estándar, se mueve la cuchara alrededor del perímetro interno del recipiente de medición para asegurar una distribución homogénea del concreto con segregación mínima. Llenar el recipiente de medición en el número de capas requeridas por el método de consolidación.

Tabla 5.2: Especificación de capacidad del recipiente.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso		Capacidad del recipiente de medición ^A	
Pulgadas	mm	Pie ³	L
1	25.0	0.2	6
1 ½	37.5	0.4	11
2	50	0.5	14
3	75	1.0	28
4 ½	112	2.5	70
6	150	3.5	100

^A Tamaños indicados de recipientes de medición que se usarán para ensayar hormigón (concreto) que contiene agregados de tamaño máximo nominal igual o más pequeño que los listados. El volumen real del recipiente será por lo menos 95% del volumen nominal listado.

Fuente: Extraído de NTP 339.046



Figura 5.2: Ensayo de Peso Unitario.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5.3: Resultados ensayo de Peso Unitario.

DISEÑOS DE CONCRETO		Peso Unitario P.U. (Kg/m ³)
E-1	A/C=0.55	2202.59
E-2	A/C=0.55 + 2% Acel.	2206.82
E-3	A/C=0.55+4%Na ₂ SO ₄	2200.47
E-4	A/C=0.55+4%K ₂ SO ₄	2208.94
E-6	A/C=0.55+4%MgSO ₄	2216.36

Fuente: Elaboración Propia.

5.3.- TIEMPO DE FRAGUADO – NTP 339.082

El tiempo de fraguado no existe como propiedad directa de una mezcla, sino que es una medida de las ganancias iniciales de resistencia mecánica que nos indica el momento en el cual se sobrepasa una resistencia al punzonamiento. La norma hace diferencia en 2 indicadores de este tiempo:

-Tiempo de fraguado inicial: Es el tiempo transcurrido en el cual la resistencia a la penetración presenta un valor de 500 psi.

-Tiempo de fraguado final: Es el tiempo transcurrido en el cual la resistencia a la penetración presenta un valor de 4000 psi.

El ensayo de tiempo de fraguado del concreto por resistencia a la penetración consiste en utilizar la parte menos gruesa del concreto, el cual se logra a través del tamizado del concreto por la malla N°4 – 4.76 mm, extrayendo el mortero presente en la mezcla. El mortero es llenado en dos moldes cilíndricos de seis pulgadas de diámetro y seis de alto, el molde se llena en una sola capa hasta una altura no menor de 10 mm debajo del borde superior del molde, luego se compacta por varillado con 28 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie, posteriormente se aplican golpes a los laterales del molde para eliminar el aire atrapado y nivelar la superficie.

La hora de inicio es aquel en el cual inician las reacciones de la pasta, este es el momento del contacto del conglomerante y el agua. Para este ensayo se tienen seis agujas y ellas tienen un área estandarizada de 1 pulg², ½ pulg², ¼ pulg², 1/10 pulg², 1/20 pulg², 1/40 pulg².

Según el grado de endurecimiento del mortero, se debe colocar en el aparato de presión la aguja del tamaño apropiado y esta se pone en contacto con el mortero. Se aplica una fuerza vertical gradual y uniforme en hacia la superficie del mortero, hasta lograr una penetración de 25 mm, en un tiempo de 10 ± 2 s, se registra la fuerza marcada por el aparato anotando también el tiempo transcurrido entre el inicio del ensayo y el momento de la penetración.

La norma recomienda una distancia libre entre la aguja que ingresa en el mortero y el lugar de cualquier penetración anterior, debe ser al menos dos veces el diámetro d de la aguja que se use, pero en ningún caso inferior a 15 mm, además debe haber una distancia libre entre la aguja y la pared del recipiente de por lo menos 25 mm.



Figura 5.3: Ensayo de medición del Tiempo de Fraguado.
Fuente: Elaboración Propia.

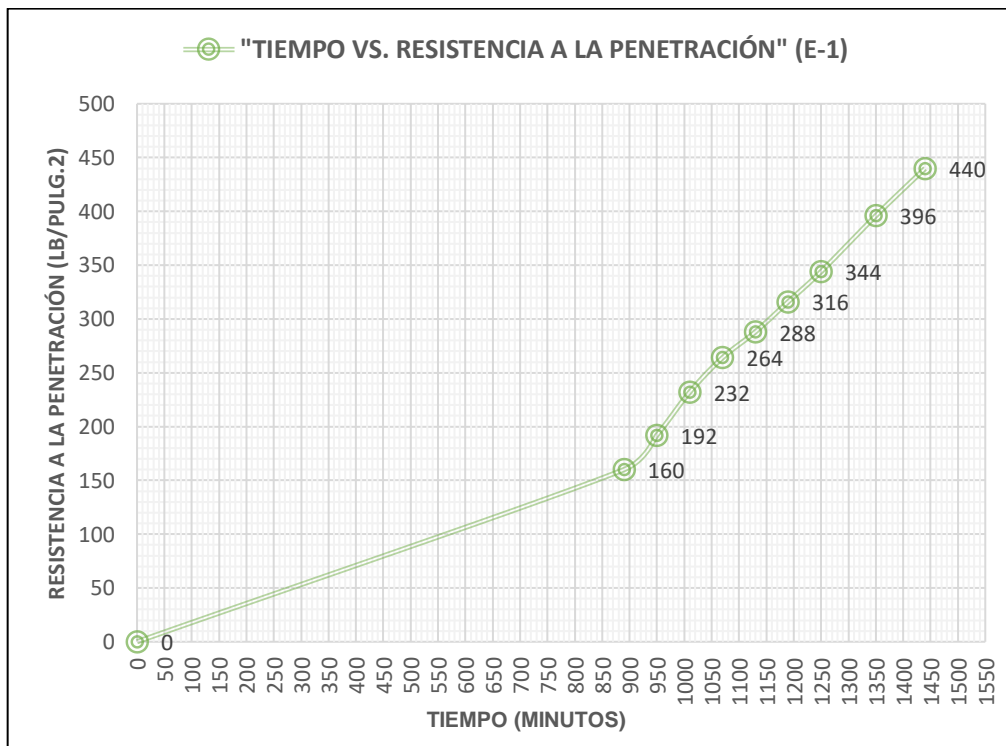


Figura 5.4: Tiempo de Fraguado en E-1.
Fuente: Elaboración Propia.

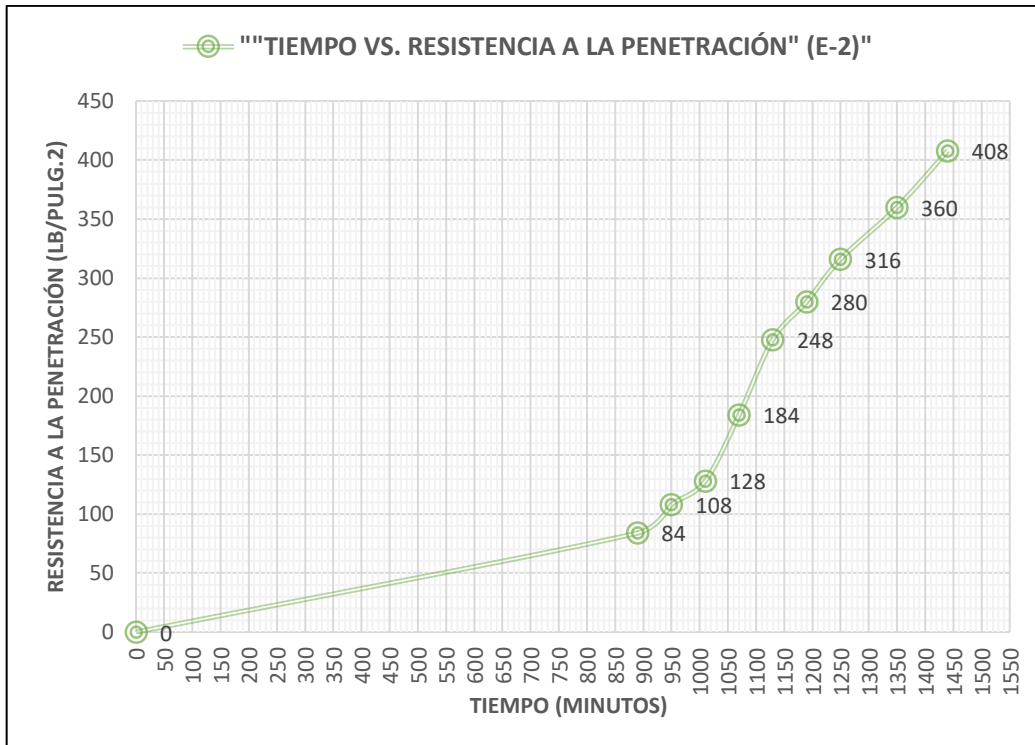


Figura 5.5: Tiempo de Fraguado en E-2.
 Fuente: Elaboración Propia.

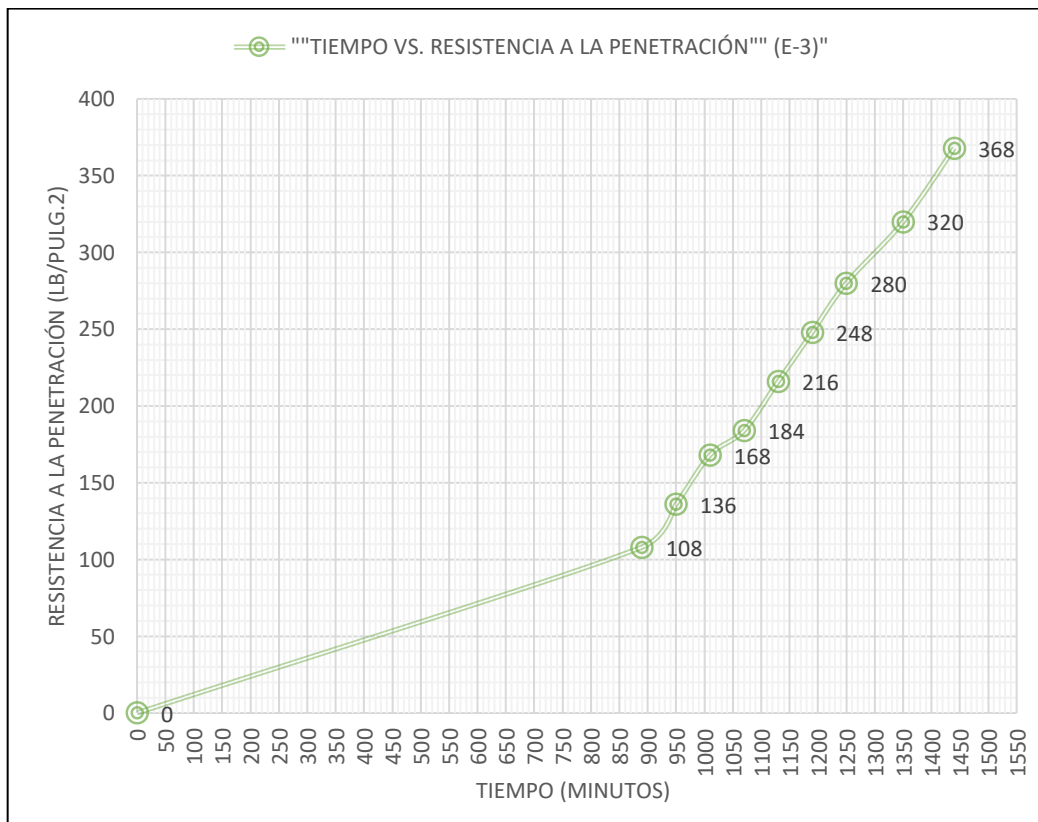


Figura 5.6: Tiempo de Fraguado en E-3.
 Fuente: Elaboración Propia.

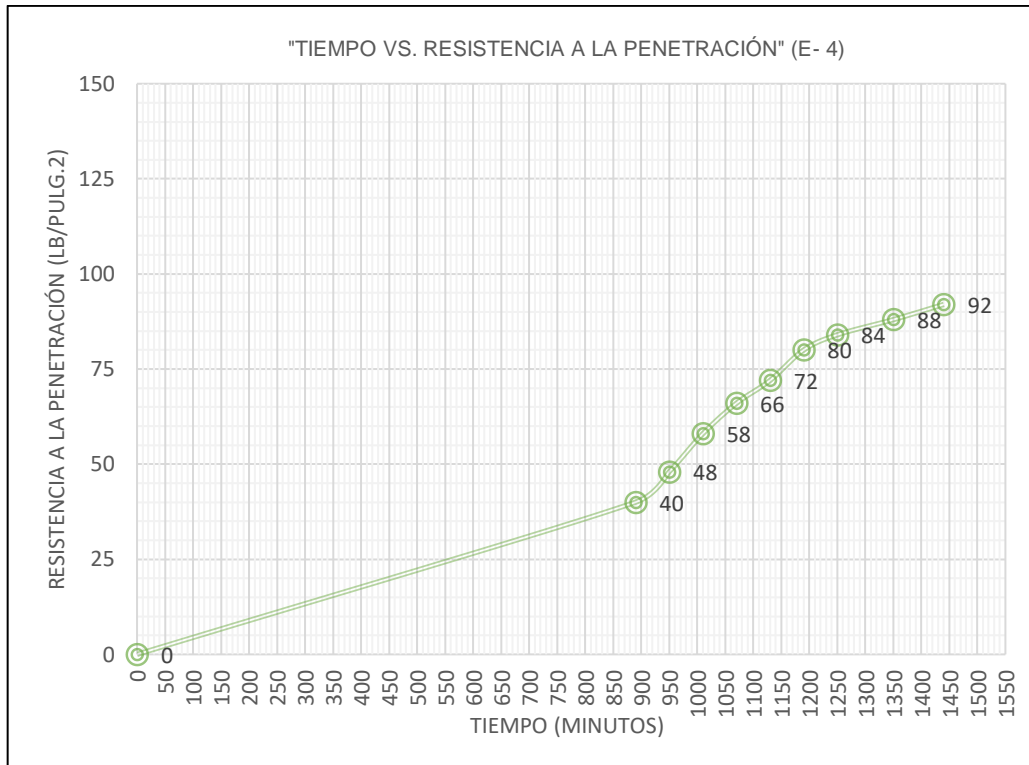


Figura 5.7: Tiempo de Fraguado en E-4.
Fuente: Elaboración Propia.

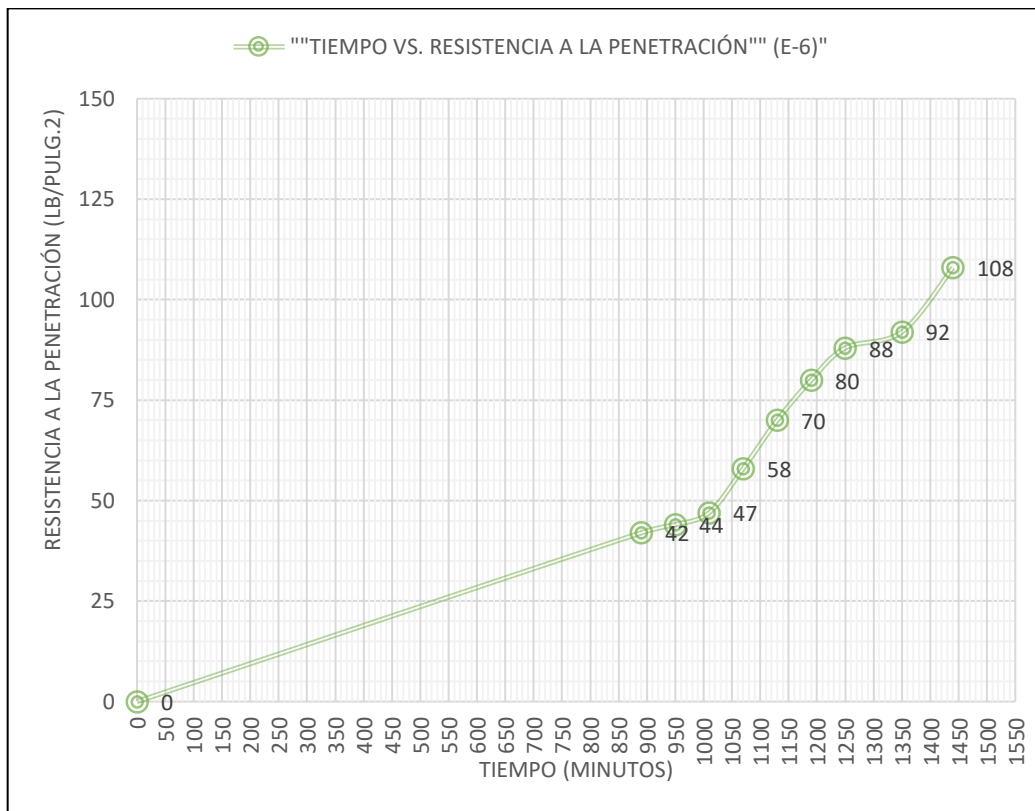


Figura 5.8: Tiempo de Fraguado en E-6.
Fuente: Elaboración Propia.

Claramente se puede apreciar que precisamente en esta propiedad conocida en ingeniería y establecida en la norma que el tiempo de fraguado inicial se da al momento que la muestra presenta una resistencia a la penetración de 500 lb/pulg² y finaliza a las 4000 lb/pulg², sin embargo se puede notar que incluso en los casos que tienen mejor performance, E-1, E-2 y E-3, no logran llegar hasta un valor cercano a las 500 lb/pulg², la explicación del porqué viene dado por el hecho de que el tiempo de fraguado no es una propiedad en sí misma, sino que es una medida de la ganancia de resistencia inicial, entonces siendo estos diseños de mezclas de características muy particulares, una de ellas es que la velocidad de la ganancia de resistencia es notablemente más lento, esto debido a que los compuestos presentes tienen una reacción más lenta que el CS₃ o demás elementos del Clinker, por ende es razonable que no se logre los valores establecidos en la Norma Técnica Peruana.

CAPÍTULO VI: ENSAYOS SOBRE EL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Existen muchas propiedades del concreto endurecido, pero siendo el presente estudio de carácter exploratorio y que los esfuerzos están enfocados principalmente a determinar los factores que determinan el comportamiento del concreto con base conglomerante de cal-puzolana además de una prueba sobre el cemento alcalino, siendo más amplio el muestreo que ofreció las etapas de diseño de mezclas debido a que existían muchas variables que influían en el comportamiento de estos tipos de concreto. Entonces para este fin en la etapa experimental de los concretos en estado endurecido, se eligió únicamente a la propiedad mecánica de resistencia a la compresión. Por supuesto no se puede dejar de mencionar las condiciones de curado que también se detallaran.

6.1.- CURADO DEL CONCRETO – ASTM C192/C192 – 16

La norma establece requisitos estandarizados para la preparación de materiales, la mezcla de concreto, la fabricación y curado de especímenes de concreto en condiciones de laboratorio. Para la etapa en que nos encontramos tocaremos el curado.

La norma menciona que, en un estado inicial, para prevenir la evaporación del agua del concreto no endurecido, cubra los especímenes inmediatamente después de terminar, preferiblemente con una placa no reactiva, no absorbente o una lámina de plástico impermeable duradero. Los especímenes se almacenarán inmediatamente después del acabado hasta la retirada de los moldes para evitar la pérdida de humedad de los especímenes. Para evitar daños a los especímenes, proteja el exterior de los moldes de cartón del contacto con arpillera húmeda u otras fuentes de agua hasta que los moldes sean retirados. Registre las temperaturas ambiente máximas y mínimas durante el curado inicial. Retire los especímenes de los moldes 24 ± 8 h después del vaciado

A menos que se especifique lo contrario, todos los especímenes deben curarse en húmedo a $23,0 \pm 2,0$ ° C desde la moldura hasta el momento de la prueba. El almacenamiento durante las primeras 48 h de curado deberá realizarse en un ambiente sin vibraciones. Cuando se aplica al tratamiento de especímenes

desmoldados, el curado húmedo significa que las muestras de ensayo deben tener agua libre mantenida en toda la superficie en todo momento. Cure los cilindros estructurales ligeros del concreto según la especificación C330 / C330M. Los materiales similares serán siempre más bajos que la temperatura en la atmósfera circundante si ocurre la evaporación.

Para la aplicación del método, se contó con una poza de curado, la cual se muestra a continuación:



Figura 6.1: Poza de curado.
Fuente: Elaboración Propia.

En el caso del curado de las probetas producto del diseño de mezclas para cemento alcalino tiene una forma muy particular de curado que difieren completamente del proceso estándar para mezclas de concreto con cemento portland ordinario. En la etapa de revisión bibliográfica se reconoce que el proceso

de activación alcalina depende de la disolución del material silicoaluminoso, en este caso la puzolana, en presencia de un medio fuertemente alcalino y posteriormente a un proceso térmico en temperaturas superiores a 60 °C, idealmente 80 °C, según el proceso descrito en la parte teórica. Entonces se plantea una solución 4M de hidróxido de sodio descrito en el inciso del diseño de mezclas y para el curado se plantea sumergir en la poza de curado a 70 °C, debido a que fue esta la temperatura máxima estable que se pudo lograr en el laboratorio. Se mantuvo por 5 días y seguidamente se desmoldo para luego curarse a temperatura ambiente en un ambiente con humedad superior al 80%.



Figura 6.2: Poza de curado cemento alcalino.
Fuente: Elaboración Propia.

6.2.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN – NTP 339.034

Esta Norma Técnica Peruana establece la determinación de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas y extracciones diamantinas de concreto. El

método consiste en aplicar una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una velocidad normalizada en un rango prescrito mientras ocurre la falla. La resistencia a la compresión de la probeta es calculada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección recta de la probeta. Los ensayos a compresión de probetas del curado húmedo serán hechos tan pronto como sea práctico luego de retirarlos del almacenaje de humedad. Los cilindros serán protegidos de pérdida de humedad por cualquier método conveniente durante el periodo entre el retiro del almacenaje de humedad y el ensayo. Los cilindros serán ensayados en condición húmedos.

Tabla 6.1: Norma sobre la edad de ensayo.

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24 h	$\pm 0,5$ h ó 2,1 %
3 d	± 2 h ó 2,8 %
7 d	± 6 h ó 3,6 %
28 d	± 20 h ó 3,0 %
90 d	± 48 h ó 2,2%

Fuente: NTP 339.034.

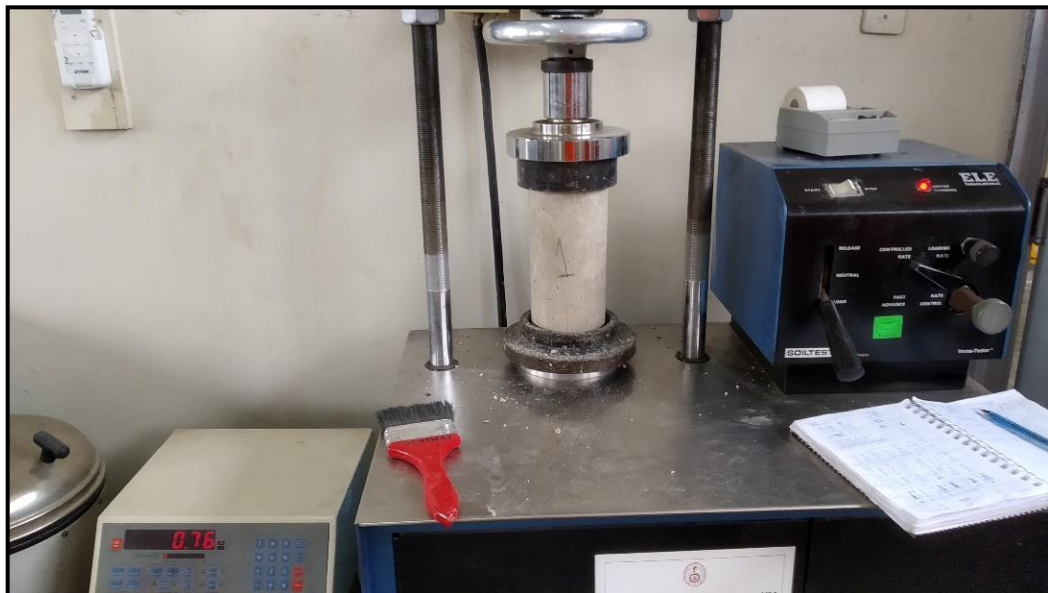


Figura 6.3: Ensayo de resistencia a la compresión.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.2: Resistencia a la Compresión E-1.

CONCRETO E-1 (A/C=0.55)							
EDAD (Días)	Nº de probeta ensayada	Diámetro medido (cm)	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Maxima Carga aplicada (kg)	F'C (kg/cm ²)	F'C promedio (kg/cm ²)
3	1	10.03	10.05	20.67	534.32	6.74	6.60
		10.07					
	2	10.04	10.06	20.51	505.77	6.37	
		10.07					
	3	10.02	10.04	20.62	530.24	6.70	
		10.06					
7	1	10.01	10.04	20.56	789.25	9.98	10.29
		10.06					
	2	10.04	10.03	20.63	803.52	10.17	
		10.02					
	3	10.03	10.05	20.77	850.43	10.72	
		10.07					
14	1	10.03	10.03	20.81	1027.86	13.02	13.17
		10.03					
	2	10.10	10.06	20.75	1046.21	13.16	
		10.02					
	3	10.00	10.02	20.58	1052.33	13.35	
		10.04					
21	1	10.05	10.03	20.53	1156.34	14.64	15.28
		10.01					
	2	10.08	10.05	20.55	1235.88	15.58	
		10.02					
	3	10.02	10.05	20.45	1237.92	15.62	
		10.07					
28	1	10.03	10.04	20.50	2769.51	35.00	31.49
		10.05					
	2	10.02	10.02	20.30	2357.55	29.90	
		10.02					
	3	10.01	10.02	20.60	2328.99	29.56	
		10.02					
60	1	10.08	10.07	20.55	3210.00	40.30	40.57
		10.06					
	2	10.04	10.04	20.76	2950.00	37.30	
		10.03					
	3	10.05	10.05	20.58	3500.00	44.10	
		10.06					
120	1	10.04	10.06	20.62	3520.00	44.33	45.03
		10.07					
	2	10.06	10.06	20.32	3490.00	43.95	
		10.05					
	3	10.05	10.03	20.45	3700.00	46.81	
		10.02					

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.3: Resistencia a la Compresión E-2.

CONCRETO E-2 (A/C=0.55 + 2% adit. acel.)							
EDAD (Días)	Nº de probeta ensayada	Diámetro medido (cm)	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Maxima Carga aplicada (kg)	F'c (kg/cm ²)	F'c promedio (kg/cm ²)
3	1	10.02	10.02	20.50	454.79	5.77	5.72
		10.01					
	2	10.03	10.04	20.30	456.83	5.78	
		10.04					
	3	10.06	10.05	20.60	444.59	5.61	
		10.03					
7	1	10.01	10.02	20.55	740.30	9.40	8.96
		10.02					
	2	10.03	10.03	20.76	701.55	8.89	
		10.02					
	3	10.03	10.04	20.58	681.16	8.60	
		10.05					
14	1	10.01	10.02	20.62	1052.33	13.36	13.95
		10.02					
	2	10.06	10.05	20.32	1203.25	15.17	
		10.04					
	3	10.01	10.03	20.45	1052.33	13.33	
		10.04					
21	1	10.03	10.03	20.53	1280.74	16.23	16.90
		10.02					
	2	10.05	10.04	20.55	1303.18	16.48	
		10.02					
	3	10.03	10.04	20.45	1423.50	18.00	
		10.04					
28	1	10.03	10.04	20.75	2435.04	30.79	32.07
		10.04					
	2	10.03	10.04	20.58	2757.27	34.83	
		10.05					
	3	10.01	10.02	20.53	2412.61	30.60	
		10.03					
60	1	10.03	10.03	20.55	3930.00	49.79	47.25
		10.02					
	2	10.09	10.08	20.45	3800.00	47.67	
		10.06					
	3	10.04	10.03	20.50	3500.00	44.30	
		10.02					
120	1	10.03	10.05	20.30	4200.00	53.00	52.38
		10.06					
	2	10.04	10.04	20.60	4300.00	54.37	
		10.03					
	3	10.02	10.02	20.55	3920.00	49.76	
		10.01					

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.4: Resistencia a la Compresión E-3.

CONCRETO E-3 (A/C=0.55 + 4% Na ₂ SO ₄)							
EDAD (Días)	Nº de probeta ensayada	Diámetro medido (cm)	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Maxima Carga aplicada (kg)	F'c (kg/cm ²)	F'c promedio (kg/cm ²)
3	1	10.03	10.04	20.58	571.03	7.22	7.63
		10.04					
	2	10.03	10.04	20.53	595.50	7.52	
		10.05					
	3	10.01	10.02	20.55	642.41	8.15	
		10.03					
7	1	10.04	10.03	20.45	954.44	12.08	12.07
		10.02					
	2	10.09	10.08	20.50	972.79	12.20	
		10.06					
	3	10.04	10.03	20.30	942.20	11.92	
		10.02					
14	1	10.03	10.05	20.60	997.27	12.58	12.94
		10.06					
	2	10.04	10.04	20.55	1031.94	13.05	
		10.03					
	3	10.02	10.02	20.50	1040.09	13.20	
		10.01					
21	1	10.02	10.02	20.30	1117.59	14.19	14.47
		10.01					
	2	10.03	10.04	20.60	1231.80	15.57	
		10.04					
	3	10.06	10.05	20.55	1080.88	13.64	
		10.03					
28	1	10.01	10.02	20.76	1490.80	18.92	22.28
		10.02					
	2	10.03	10.03	20.58	1998.61	25.32	
		10.02					
	3	10.03	10.04	20.62	1788.55	22.59	
		10.05					
60	1	10.01	10.02	20.32	2420.00	30.72	30.14
		10.02					
	2	10.06	10.05	20.45	2210.00	27.86	
		10.04					
	3	10.01	10.02	20.53	2510.00	31.83	
		10.03					
120	1	10.03	10.03	20.55	2300.00	29.14	29.82
		10.02					
	2	10.05	10.04	20.45	2350.00	29.71	
		10.02					
	3	10.03	10.04	20.75	2420.00	30.60	
		10.04					

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.5: Resistencia a la Compresión E-4.

CONCRETO E-4 (A/C=0.55 + 4% K ₂ SO ₄)							
EDAD (Días)	Nº de probeta ensayada	Diámetro medido (cm)	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Maxima Carga aplicada (kg)	F'c (kg/cm ²)	F'c promedio (kg/cm ²)
3	1	10.04	10.03	20.52	281.44	3.56	3.66
		10.02					
	2	10.09	10.08	20.41	299.79	3.76	
		10.06					
	3	10.04	10.03	20.52	289.59	3.67	
		10.02					
7	1	10.03	10.05	20.22	562.87	7.10	7.41
		10.06					
	2	10.04	10.04	20.14	597.54	7.56	
		10.03					
	3	10.02	10.02	20.56	595.50	7.56	
		10.01					
14	1	10.02	10.02	20.52	701.55	8.91	8.66
		10.01					
	2	10.03	10.04	20.85	683.20	8.64	
		10.04					
	3	10.06	10.05	20.50	668.92	8.44	
		10.03					
21	1	10.02	10.02	20.58	988.09	12.54	11.94
		10.01					
	2	10.03	10.04	20.53	924.87	11.69	
		10.04					
	3	10.06	10.05	20.55	917.73	11.58	
		10.03					
28	1	10.01	10.02	20.45	1584.61	20.12	19.57
		10.02					
	2	10.03	10.03	20.50	1531.59	19.40	
		10.02					
	3	10.03	10.04	20.30	1519.35	19.19	
		10.05					
60	1	10.01	10.02	20.60	1925.00	24.44	22.61
		10.02					
	2	10.06	10.05	20.55	1700.00	21.43	
		10.04					
	3	10.01	10.02	20.50	1730.00	21.96	
		10.02					
120	1	10.03	10.03	20.30	2320.00	29.39	28.34
		10.02					
	2	10.05	10.04	20.60	2340.00	29.59	
		10.02					
	3	10.03	10.04	20.55	2060.00	26.05	
		10.04					

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.6: Resistencia a la Compresión E-6.

CONCRETO E-6 (A/C=0.55 + 4% MgSO ₄)							
EDAD (Días)	Nº de probeta ensayada	Diámetro medido (cm)	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Maxima Carga aplicada (kg)	F'c (kg/cm ²)	F'c promedio (kg/cm ²)
3	1	10.03	10.05	20.55	603.66	7.61	7.63
		10.07					
	2	10.04	10.06	20.76	597.54	7.53	
		10.07					
	3	10.02	10.04	20.58	613.86	7.75	
		10.06					
7	1	10.01	10.04	20.62	705.63	8.92	9.09
		10.06					
	2	10.04	10.03	20.32	723.99	9.16	
		10.02					
	3	10.03	10.05	20.45	728.07	9.18	
		10.07					
14	1	10.03	10.03	20.53	1025.82	12.99	12.81
		10.03					
	2	10.10	10.06	20.55	980.95	12.34	
		10.02					
	3	10.00	10.02	20.45	1031.94	13.09	
		10.04					
21	1	10.05	10.03	20.60	1184.89	15.00	14.08
		10.01					
	2	10.08	10.05	20.41	1064.57	13.42	
		10.02					
	3	10.02	10.05	20.60	1096.18	13.83	
		10.07					
28	1	10.03	10.04	20.52	1796.71	22.71	22.03
		10.05					
	2	10.02	10.02	20.85	1696.78	21.52	
		10.02					
	3	10.01	10.02	20.50	1723.29	21.88	
		10.02					
60	1	10.08	10.07	20.58	2540.00	31.89	28.72
		10.06					
	2	10.04	10.04	20.53	2200.00	27.82	
		10.03					
	3	10.05	10.05	20.55	2100.00	26.46	
		10.06					
120	1	10.04	10.06	20.45	2720.00	34.25	30.98
		10.07					
	2	10.06	10.06	20.50	2300.00	28.97	
		10.05					
	3	10.05	10.03	20.30	2350.00	29.73	
		10.02					

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.7: Resistencia a la Compresión cemento alcalino.

CONCRETO ALCALINO (A/C=0.50 4M NaOH)							
EDAD (Días)	Nº de probeta ensayada	Diámetro medido (cm)	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Maxima Carga aplicada (kg)	F'c (kg/cm2)	F'c promedio (kg/cm2)
28	1	10.04	10.05	20.25	820.00	10.34	10.82
		10.06					
	2	10.03	10.03	20.42	910.00	11.53	
		10.02					
	3	10.04	10.05	20.35	840.00	10.59	
		10.06					

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.8: Resumen resistencia a la compresión.

RESUMEN F'c PROMEDIO (kg/cm2)						
EDAD (Días)	E-1 (A/C=0.55)	E-2 (A/C=0.55 + 2% adit. acelerante)	E-3 (A/C=0.55 + 4% Na2SO4)	E-4 (A/C=0.55 + 4% K2SO4)	E-6 (A/C=0.55 + 4% MgSO4)	CONCRETO ALCALINO (A/C=0.50 4M NaOH)
3	6.60	5.72	7.63	3.66	7.63	10.82
7	10.29	8.96	12.07	7.41	9.09	
14	13.17	16.90	12.94	8.66	12.81	
21	15.28	16.90	14.47	11.94	14.08	
28	31.49	22.28	22.28	19.57	22.03	
60	40.57	47.25	30.14	22.61	28.72	
120	45.03	52.38	29.82	28.34	30.98	

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO VII: INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Habiéndose mostrados los resultados de los diferentes ensayos desarrollados en el laboratorio, ahora es momento de analizar porque este tipo de mezclas tienen los comportamientos que han sido descritos, porque cumplen la norma respecto a algunas propiedades y respecto a otras no es así, además de explicar que factores influyen principalmente en los resultados, para ello se recordara cuestiones fundamentales expuestas en la parte teórica, pero también corroborándolo con los materiales de los que se dispuso ya que el comportamiento teórico describe un contexto formado por reacciones que tienen como agentes a compuestos químicamente puros, así a modo de síntesis se puede decir que describen un comportamiento ideal, sin embargo los ensayos desarrollados en el laboratorio no se aplicaron sobre compuestos químicamente puros, sino sobre compuestos que se venden en el medio y por lo general estos tienen con porcentaje importante de otros compuestos que pueden influir en menor o mayor medida según sea el caso. La forma de interpretación y análisis que se hará sobre los resultados será primero comparándola con el marco normativo del ensayo sobre el cual se obtuvo el resultado, seguidamente se compararan los diseños de mezcla entre sí proponiendo un gráfico según sea el caso que se requiera para mayor facilidad de explicar dicha idea.

7.1.- CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Las propiedades de las mezclas analizadas en estado fresco dieron resultados muy particulares que las diferencian con las mezclas de concreto convencionales que se usan, respecto a al peso unitario, se ve que los valores de densidad están alrededor de los 2200 kg/m^3 , lo cual nos da una idea de que estas mezclas son más ligeras, esto puede deberse principalmente a lo siguiente: primero que la relación A/C es relativamente baja (0.55) y la cantidad de agua presente en la mezcla está alrededor de los 300 litros/m^3 para las mezclas con base aglomerante cal-puzolana (E-1, E-2, E-3, E-4 y E-6), ello genera que exista mayor cantidad de pasta desplazando un poco al agregado en la conformación del concreto y a su vez aligerándola. En segundo lugar el aglomerante cal-puzolana es en sí más

ligero que el cemento portland ya que la puzolana con la que se llegó a contar tuvo una granulometría que indica que en la malla N°325 solo pasa 64% del material, en contraste el cemento portland cuenta con valores superiores al 90% que pasa la malla N°325, con ello se puede apreciar que siendo la puzolana no muy fina es predecible que la mezcla se consolidara con mayor cantidad de vacíos que en un estado fresco estarán compuestos por agua, lo cual influye que se tenga un valor de peso unitario más bajo.

En el análisis del asentamiento, se puede afirmar que respecto a lo estipulado en la norma, se encuentra en un rango 3" a 4" la cual se considera trabajable, sin embargo esto fue producto de ensayos previos en el cual se evaluó el asentamiento y elevo la cantidad de agua modificándose la cantidad de agua presente en la mezcla hasta llegar a la propuesta final estipulada en la parte de diseño de mezclas, cumpliendo finalmente el requisito de trabajabilidad a los 300 lt/m³ para los diseños de mezcla de E-1, E-2, E-3, E-4, E-6.

Respecto al tiempo de fraguado, este aspecto merece exponerlo de manera más detallada, ello se muestra a continuación.

7.1.1.- Tiempo de Fraguado

Como ya se detalló en el capítulo 4, la norma NTP 339.082 establece un método indirecto del tiempo de fraguado mediante la medición de la resistencia a la penetración del mortero que compone una mezcla de concreto, para ello menciona que alcanzando un endurecimiento que manifieste una resistencia a la penetración de 500 lb/pulg², es ahí que ocurre el fraguado inicial y análogamente cuando la resistencia a la penetración alcance un valor de 4000 lb/pulg², se genera el fraguado final. Respecto a lo que menciona la norma hay que entender que dicha norma está escrita para una mezcla con aglomerante de cemento portland y por tanto esos valores no corresponden a una descripción del comportamiento de las mezclas de concreto con aglomerante cal-puzolana, ya que estas tienen una ganancia de resistencia a una velocidad, notablemente mayor. Respecto a esta velocidad de reacción tiene que ver con los componentes activos, mientras que el Clinker del cemento portland contiene C₂S, C₃S, C₄AF y C₃A, siendo el C₂S, C₃S mayoritario en su composición, lo cual se puede decir que en mayor medida el comportamiento del concreto está determinado por estos elementos; entonces siendo el silicato tricalcico extremadamente reactiva, permite a la mezcla

ganancias de resistencia a una mayor velocidad, tanto que es sabido que se le agrega una pequeña porción de yeso que controle el fraguado y permita una trabajabilidad para su vaciado. En análisis del concreto con aglomerante cal-puzolana, sabemos que la ganancia de resistencia está determinada por la reacción del hidróxido de calcio con los compuestos silicoaluminosos de la puzolana, las cuales en condiciones favorables generan el gel C-S-H, sin embargo, se debe resaltar que, por su naturaleza química, estos compuestos reaccionan a una velocidad menor, y esto se ve claramente en el presente ensayo

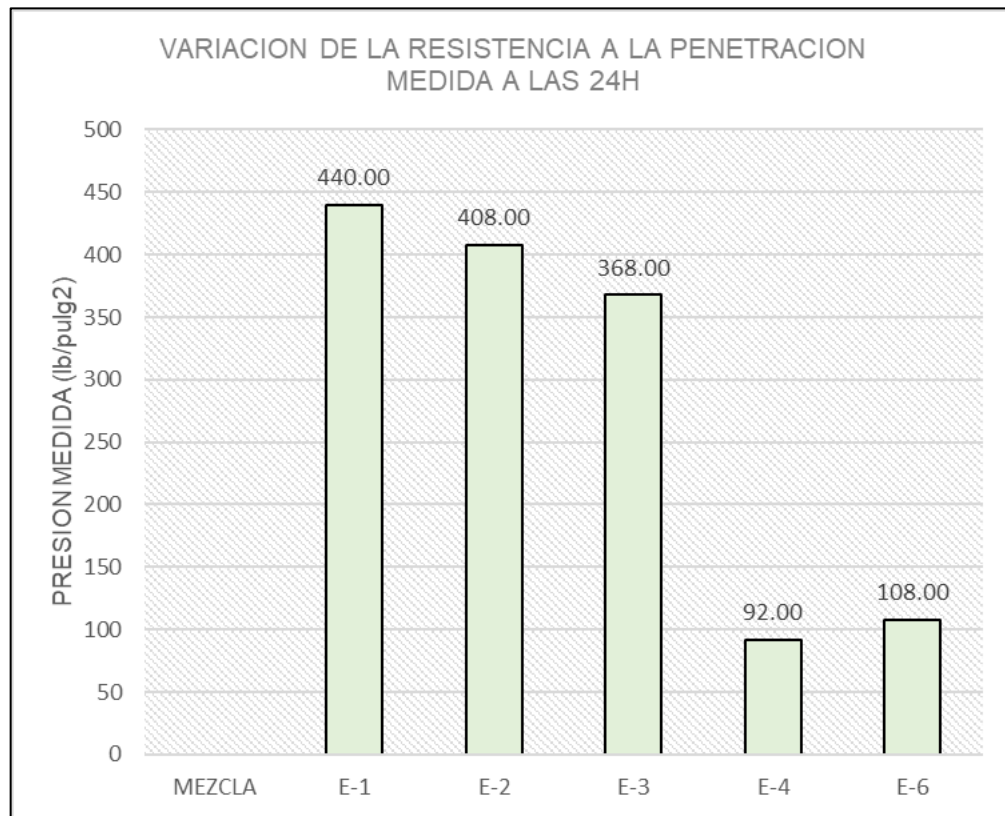


Figura 7.1: Comparativa de la resistencia a la penetración.
 Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 7.1 se puede notar que la mezcla con mejor performance es la mezcla E-1, la cual nos da para una medición última de 24h un valor de resistencia a la penetración de 440 lb/pulg², seguidas de E-2 y E-3 que muestran una menor resistencia y por tanto una menor velocidad de reacción de sus componentes. Cuando observamos los diseños E-4 y E-6 se puede notar una dramática disminución de resistencia a la penetración lo cual demuestra que los sulfatos de potasio y magnesio, lejos de acelerar las reacciones del aglomerante, lo ralentizan.

Respecto a la mezcla de cemento alcalino no se pudo verificar la ganancia inicial de y medir la resistencia a la penetración ya que el proceso de curado implica mantener condiciones de temperatura y humedad elevados.

7.2.- CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Durante la evaluación de la evolución de las propiedades en estado endurecido de las mezclas con aglomerante de cal-puzolana, se puede notar que, aunque de antemano se sabía que la ganancia de resistencia era mucho más lenta respecto a las mezclas con cemento portland, en promedio se intuía que sería 6 veces más lento, la realidad es que estos tipos de mezclas implican toda una serie de factores que no permiten alcanzar ni siquiera resistencias parecidas al cemento portland ordinario. El porcentaje de presencia de compuestos silicoaluminosos es mayoritario en la puzolana, sin embargo eso no lo es todo ya que implica para que sea reactivo tiene que tener un estado mineralógico cristalino, esto se refleja en el ensayo de difracción de rayos X, que expone que tiene un 71% de material amorfo y solo un 16 % de material cristalino, de esta manera ello configura que solo una pequeña parte de la puzolana tiene una reactividad aceptable y la mayoritaria porción amorfa determina que existirá mucho material sin reaccionar. Por otro lado la mayoría de estudios que se tienen sobre ensayos en los cuales se prueba la reactividad de materiales silicoaluminosos en presencia de hidróxido de calcio en un medio acuoso, fueron aplicados sobre el humo de sílice o ceniza volante y esta tiene grandes ventajas como lo es su mayor área de superficie específica y esto implica que los compuestos tengan mayores posibilidades de reaccionar, ya que tienen una granulometría muy fina que supera el 95% de material que pasa la malla N°325 incluso superando la fineza del cemento portland, esto muestra una clara ventaja respecto a la puzolana proveniente de una cantera natural que por su formación rocosa tiene la necesidad de requerir un proceso de molienda y se sabe que por medios mecánicos es extremadamente difícil llegar a una fineza parecida a las cenizas volantes. En resumen, las características que rigen el comportamiento de la mezcla con aglomerante cal-puzolana para este caso limitan mucho sus capacidades de reaccionar y esto se aprecia en la velocidad de ganancia de resistencia, así como con la baja resistencia final.

7.2.1.- Resistencia a la compresión

Como ya se ha mencionado, el hecho es que para las mezclas con aglomerante cal-puzolana la velocidad de reacción y la cantidad de compuestos con capacidad para reaccionar son bajos, lo cual trae consigo una lenta ganancia de resistencias en el tiempo, así como resistencias finales. Además, cabe mencionar que las normas NTP establecen valores de control del diseño de mezclas, así como para los concretos en estado fresco y endurecido que son para aplicarlos a los concretos con aglomerante de cemento portland y por ello esos valores no se pueden aplicar directamente sobre los concretos con aglomerante cal-puzolana. Teniendo lo anterior presente, se procederá al análisis de la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas que se plantearon:

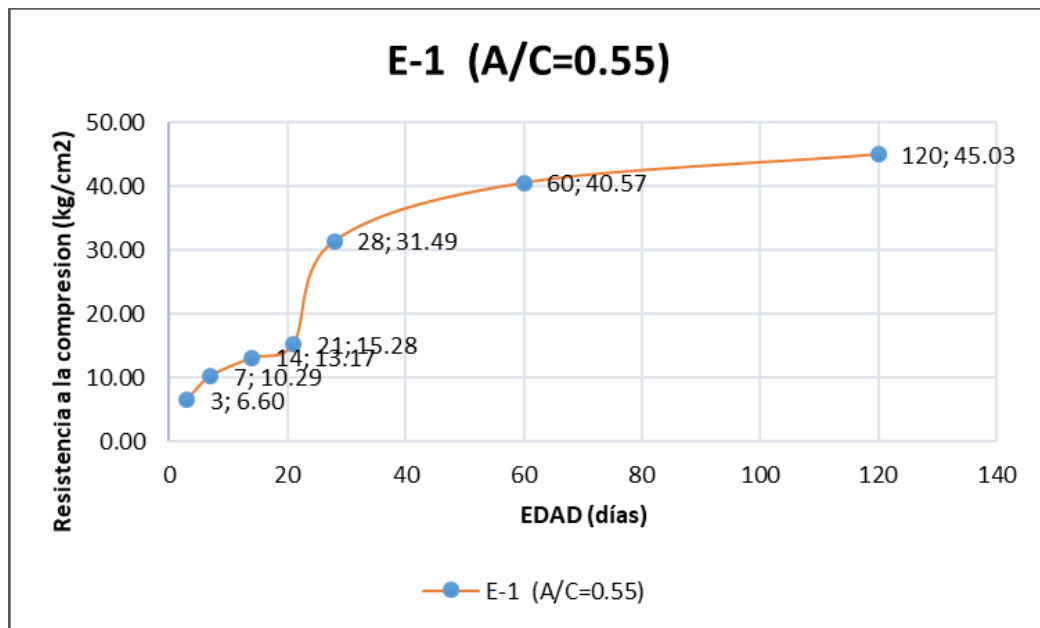


Figura 7.2: F'c de E-1 en el tiempo.
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.2 muestra la ganancia de resistencia para el diseño de mezcla E-1, ahí se puede notar que para el aglomerante conformado solo por cal-puzolana, existe una ganancia lenta ya que incluso en la medición de 120 días, la resistencia llega a F'c=45.03 kg/cm², estando este valor fuera de toda aplicación estructural. En la línea de tendencia de datos se muestra un salto importante entre los días 21 y 28, elevándose casi el doble de la resistencia en 7 días, este fenómeno se explica por el hecho de que en esa semana se aplicó con tratamiento térmico

elevando la temperatura de los 15 °C de la temperatura ambiente a los 70°C por esa semana, procedimiento por el cual se buscó incluir al proceso de curado a la mezcla de cemento alcalino. Este salto de la resistencia entre el día 7 y 21 el cual fue de 15.28 a 31.49 kg/cm², demuestra que el tratamiento térmico es un gran catalizador para la ganancia de resistencias en mezclas hidráulicas, viéndose este mismo efecto en los otros diseños de mezcla referidos al aglomerante de cal-puzolana.

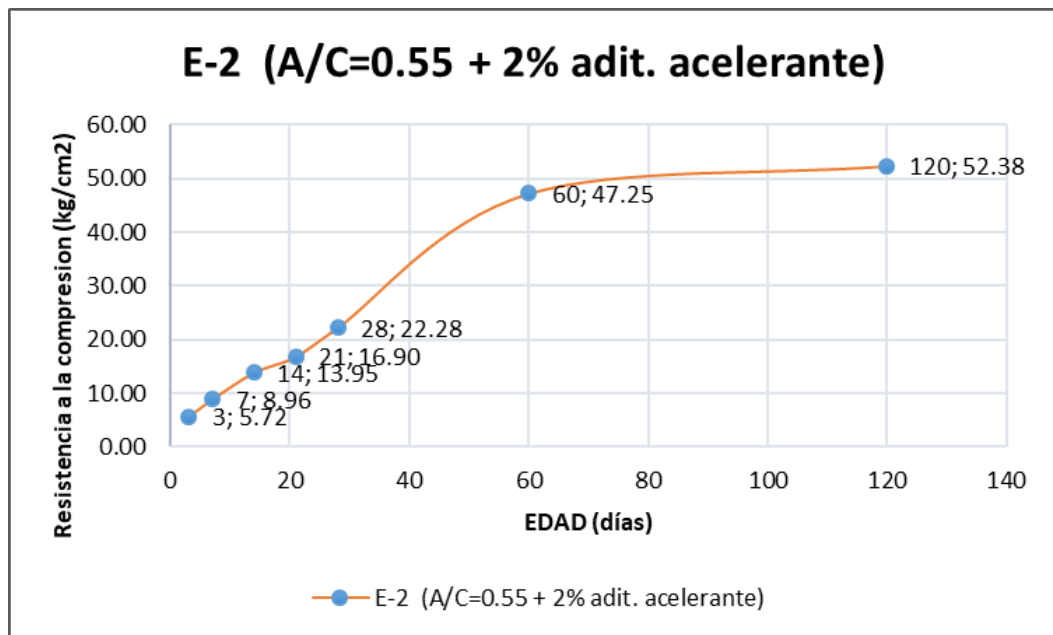


Figura 7.3: F'c de E-2 en el tiempo.
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.3 que está referido a la ganancia de resistencia de la mezcla E-2 de aglomerante cal-puzolana con 2% de aditivo acelerante de fragua y resistencia. Por las especificaciones técnicas del producto sabemos que la acción de aumento en la velocidad de reacción se produce debido a que el aditivo está hecho a base de compuestos de sulfatos, de modo que en un tiempo inicial favorecen la formación de estruñita generando mayores resistencias iniciales, claro que se debe entender que este aditivo solo toma el rol de catalizador de las reacciones, y siendo la naturaleza del aglomerante muy lenta en reaccionar, solo se ve pequeñas mejoras, tanto en una etapa inicial, como ya se analizó en la etapa de tiempo de fraguado, así como en resistencias finales, sin embargo en general esta mezcla es la que mejor performance ofrece. En el gráfico se puede ver que entre los días 28 y 60 existe un gran salto en la resistencia, esto debido al procedimiento

térmico que se explicó anteriormente que acelera significativamente la velocidad de reacción del aglomerante. Sin embargo, es de notar que los efectos se notan a partir de los 28 días esto se puede explicar mediante el hecho de que los efectos del aditivo causaron una ascendente ganancia de resistencia viéndose casi constante en las primeras 2 semanas y resistiéndose a un cambio brusco total, aunque si existe una mayor tendencia en la resistencia.

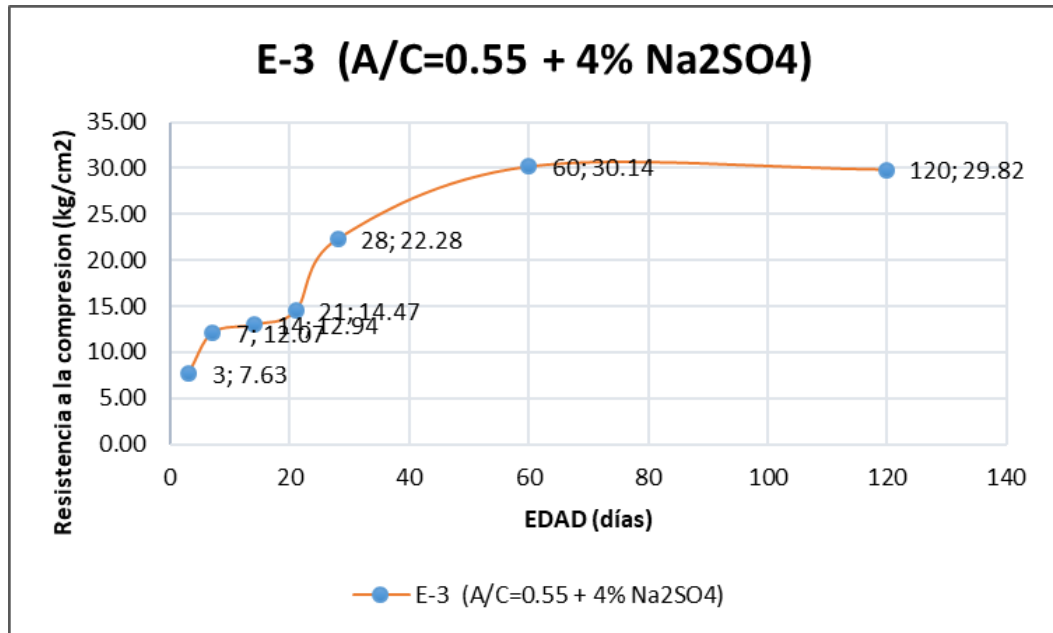


Figura 7.4: F'c de E-3 en el tiempo.
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.4 muestra el progreso de la ganancia de resistencia a la compresión de la mezcla E-3, lo particular en este caso es que surge de la adición de 4% de sulfato de sodio, en los primeros días muestra un desempeño mucho mejor que el resto de mezclas, sin embargo este ritmo de ganancia de resistencia se ralentiza considerablemente hasta los días 14 y 21, después del cual gracias al tratamiento térmico de la poza de curado, se eleva la resistencia para los días 28 y 60, aunque curiosamente para el ensayo de rotura a los 120 días se disminuye la resistencia someramente, lo cual nos indica que los cristales y compuestos resistentes en un primer momento para el caso de la adición de sulfato de sodio no es muy estable y que a una edad más prolongada llega a una regresión de sus efectos iniciales. Finalmente se observa la resistencia final evaluada a los 120 días que nos da un valor de 29.82 kg/cm², la cual es una resistencia muy baja comparada con mezclas estándar que se usan en una obra.

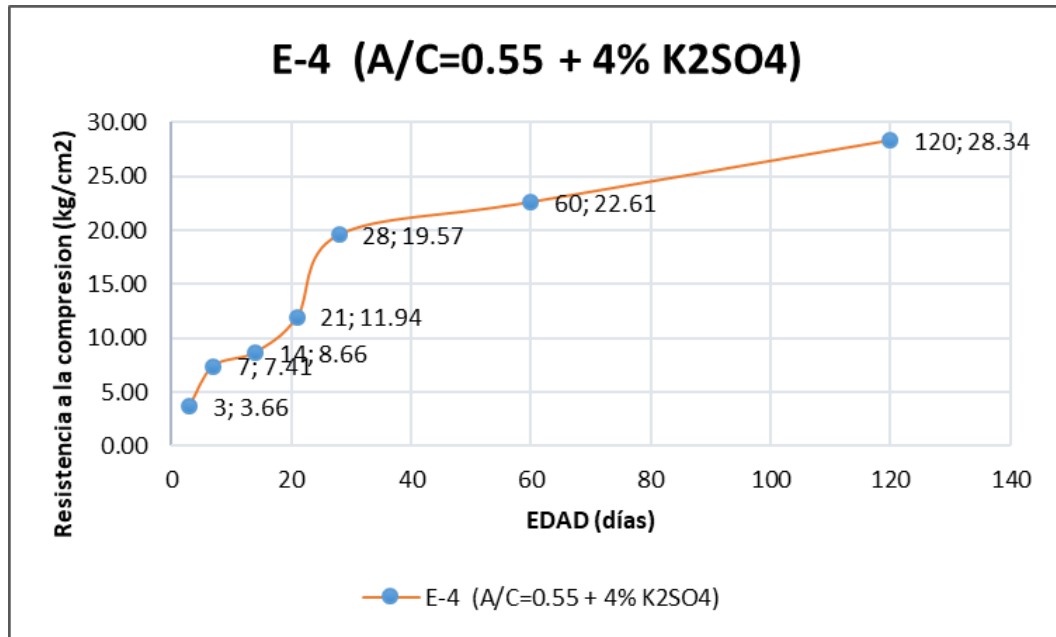


Figura 7.5: F'c de E-4 en el tiempo.
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.5 muestra la ganancia de resistencia a la compresión de la mezcla E-4 en el tiempo con la particularidad que esta mezcla tiene una adición de 4% de sulfato de potasio, aquí se puede notar una tendencia bastante parecida a la de la mezcla E-3, aunque una ganancia de resistencia más moderado en el día 3 y 7, a continuación, se ve una mejora notable entre los días 21 y 28 que como ya se explicó, responde al tratamiento térmico de la poza de curado. El comportamiento de esta mezcla resulta fuera de las expectativas iniciales ya que según se menciona en el estudio realizado por M. Gutierrez se demuestra la acción del sulfato de potasio como catalizador de las reacciones y sin embargo esta mezcla E-4 solo ofrece una velocidad de ganancia de resistencia baja. Respecto a la resistencia final promedio a la edad de 120 días nos da un valor de 28.34 kg/cm², lo cual también representa un valor bastante bajo para los estándares de mezclas que se usan en una obra.

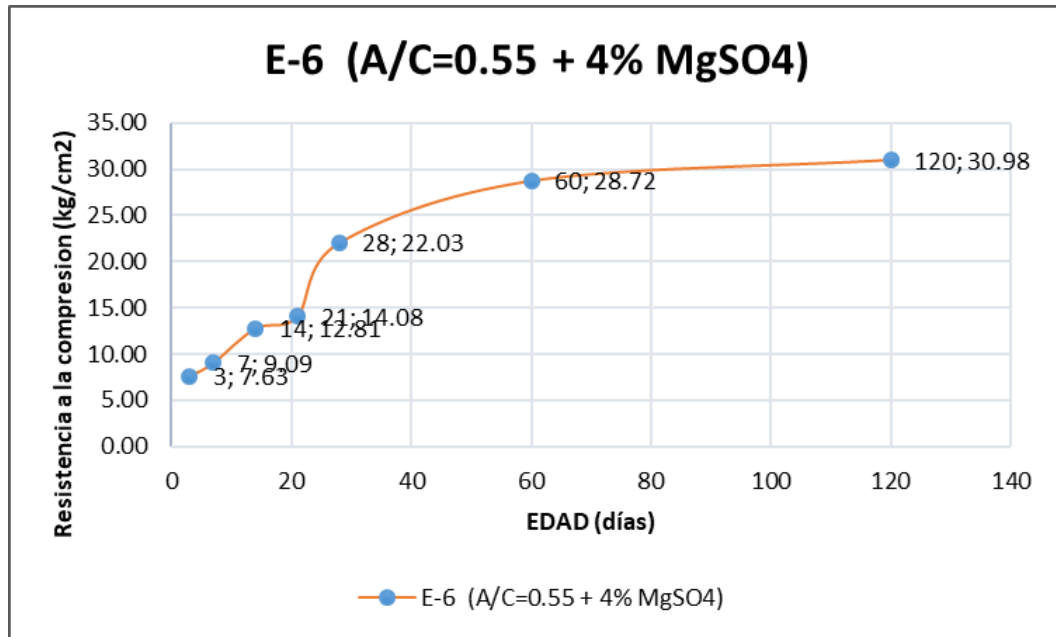


Figura 7.6: F'c de E-6 en el tiempo.
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.6 muestra la ganancia de resistencia a la compresión de la mezcla E-6 en el tiempo, en este caso esta mezcla tiene una adición de 4% de sulfato de potasio, el cual se esperaba acelere la ganancia de resistencias iniciales al liberar los iones sulfato en la mezcla, de modo que exista condiciones de generar estrigita estable en los primeros días, sin embargo, como se puede apreciar en las resistencias a la compresión medida en los días 3 y 7 son bajas, de modo que no se cumple el objetivo inicial de aplicar la adición de sulfato de magnesio. Para los siguientes días de edad 21, 28 y 60 días se ve un salto en la resistencia producto de elevar la temperatura a la poza de curado de 15 °C a 70 °C, lo cual afecta directamente a la velocidad de reacción del hidróxido de calcio con los elementos solicoaluminosos de la puzolana. En la resistencia final medida a los 120 días, se nota una tendencia a la horizontalidad de esta curva lo cual nos indica que esta resistencia medida llega a representar el máximo valor, siendo este de 30.98 kg/cm², lo cual es bastante bajo comparado con las mezclas habituales de la construcción.

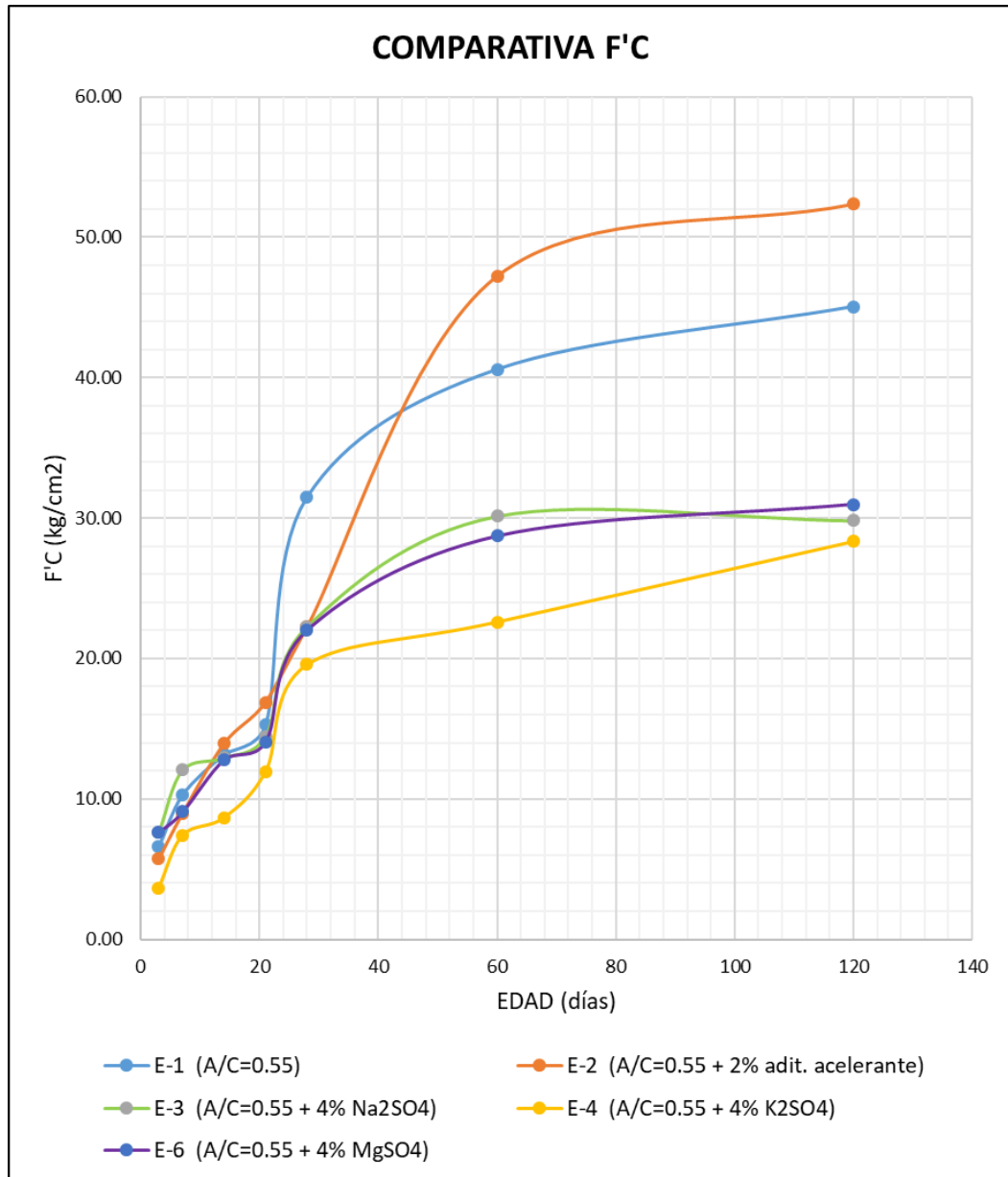


Figura 7.7: Comparativa de los F'c en el tiempo.
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.7 muestra la comparación de las líneas de tendencia de comportamiento de la resistencia a la compresión de las mezclas E-1, E-2, E-3, E-4 y E-6. En los primeros días edad, 3 y 7, se ve que destaca la mezcla E-3 aunque la resistencia media es de 12.07 kg/cm², lo cual para una edad de 7 días no deja de ser baja, pero se puede ver la acción del sulfato de sodio que generando más cantidad de iones sulfato genera estringita estable en estos días. En una edad media de 28 días se ve que destaca la mezcla E-1, esto se puede explicar de la manera siguiente, entre los días 21 y 28 se aplica un tratamiento térmico elevando

la temperatura del agua de la poza de curado y es lógico que la mezcla E-1 que tiene el aglomerante formado completamente por cal-puzolana sin ninguna adición y siendo el efecto de la temperatura eficaz al catalizar las reacciones de los compuestos que generen gel C-S-H, es lógico pensar que la primera mezcla en responder a estos efectos sea E-1. Para las resistencias finales a las edades de 60 y 120 días se nota que la mezcla que más destaca es E-2, siendo esta mezcla la que mejor combina el efecto inicial de formar estrigita estable a partir del 2% de aditivo acelerante de resistencias y el aglomerante de cal-puzolana para resistencias mayores.

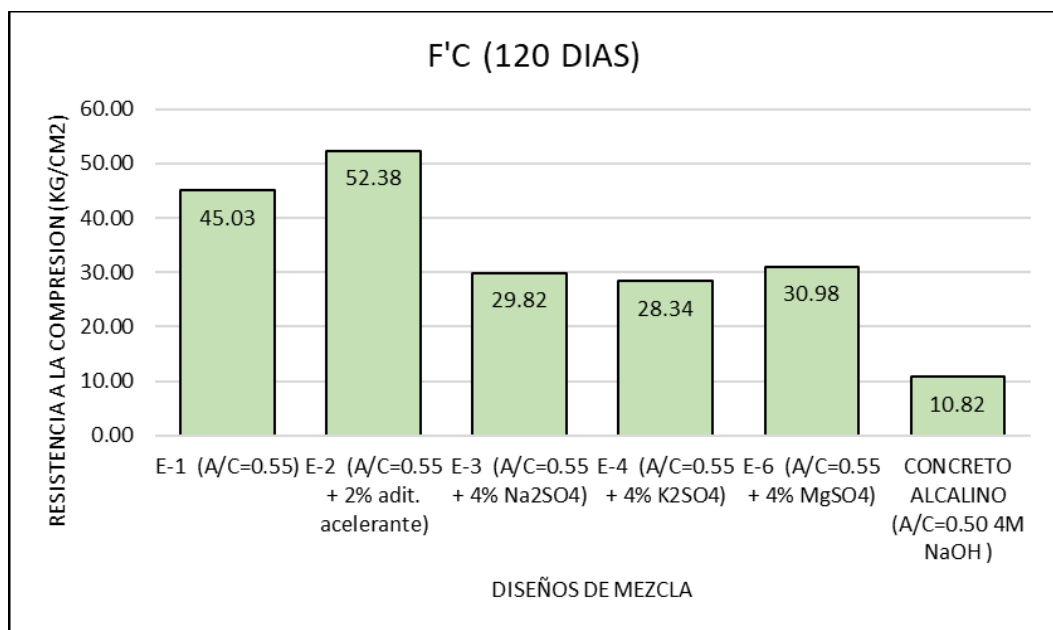


Figura 7.8: Comparativa F'c finales.
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.8 muestra las resistencias a la compresión finales medidas en el laboratorio, en este aspecto destacan E-1 y E-2, principalmente este último que tiene un valor de resistencia a la compresión de 52.38 kg/cm², siendo aun así bastante alejado de una mezcla con fines estructurales. Respecto a las mezclas E-3, E-4 y E-6, todas estas tienen adiciones de compuestos con sulfatos, que inicialmente se esperaba que le dieran mejores propiedades de resistencia, esto claramente no se cumplió y fueron los que dieron las resistencias más bajas. También se muestra la resistencia a la compresión de la mezcla de cemento alcalino, ciertamente la medición hecha proporciona un valor bastante bajo, solo 10.82 kg/cm², pero esto puede deberse en principio a que los materiales usados

como la puzolana no se ajusta completamente a los parámetros planteados por A. Jiménez, investigadora española que cuenta con muchos estudios sobre los cementos alcalinos, por otro lado, en el aspecto de curado se recomienda que este se realice a condiciones de 80 °C y una humedad superior al 95 %, entonces debido a la inexistencia de un ambiente de curado que cumpla con estas condiciones, se improvisó elevando la temperatura de la poza de curado hasta los 70 °C y sumergiendo las muestras en ella, sin embargo se presume que el proceso de curado no tuvo un efecto en todo el cuerpo de las probetas, como se puede apreciar en las La Figura 7.9, el color y consistencia interna indican que no se produjo completamente el curado, trayendo como consecuencia una muy baja resistencia, lo cual no se corresponde con los estudios hechos por A. Jiménez ni por M. Sánchez, que demuestran que mezclas de cementos alcalino con cenizas volantes generan resistencias al mismo nivel del cemento portland e incluso superior en el desempeño en algunas condiciones como la exposición a temperaturas elevadas.



Figura 7.9: Rotura de probetas de cemento alcalino.
Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE COSTOS

Un proyecto de investigación siempre debe estar acompañado de un análisis de costos que muestre la factibilidad de su aplicación, en ese sentido se ha elaborado el presente capítulo en base al sustento de los precios de los procesos analizados en producción, así como el de insumos en el mercado y que fueron usados en los diferentes tipos de mezclas. Sin embargo, se debe señalar que los valores resultantes de este análisis deben tomarse de forma referencial ya que el objetivo del presente estudio no fue determinar un proceso ni mezcla de determinados materiales que busquen una aplicación inmediata en el medio de la construcción, sino que lo que se busca es mostrar científicamente el comportamiento de estas mezclas alternativas al cemento portland con base de Clinker y además ser base para otros estudios futuros. En ese sentido se muestra los materiales usados con sus respectivos precios:

-Puzolana

Tabla 8.1: Costo de la puzolana.

COSTO DE LA PUZOLANA (S/. /KG)				
COSTO EN CANTERA	COSTO DE TRANSPORTE	COSTO DE MOLIENDA	COSTO DE DISTRIBUCION	TOTAL
0.01	0.04	0.10	0.05	0.20

Fuente: Elaboración Propia.

-A continuación, se muestra también los precios de materiales por kilogramo, esto debido a que el diseño de mezclas muestra el detalle de los materiales en kilogramos

Tabla 8.2: Costo de materiales.

COSTO DE LOS MATERIALES (S/. /KG)								
AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO	PUZOLANA NATURAL	CAL HIDRAULIC	ADITIVO ACELERANTE	SULFATO DE SODIO	SULFATO DE POTASIO	SULFATO DE MAGNESIO	HIDROXIDO DE SODIO
0.05	0.04	0.20	0.56	6.24	4.15	3.18	3.40	3.80

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8.3: Materiales por diseño de mezclas.

CANTIDAD DE MATERIALES KG / M3 DE ACUERDO A LOS DISEÑOS DE MEZCLA						
MATERIALES	MEZCLAS					
	E-1 (A/C=0.55)	E-2 (A/C=0.55 + 2% adit. acelerante)	E-3 (A/C=0.55 + 4% Na ₂ SO ₄)	E-4 (A/C=0.55 + 4% K ₂ SO ₄)	E-6 (A/C=0.55 + 4% MgSO ₄)	CONCRETO ALCALINO (A/C=0.50 4M NaOH)
AGREGADO GRUESO	790.40	790.40	790.40	790.40	790.40	807.00
AGREGADO FINO	729.60	729.60	729.60	729.60	729.60	745.00
PUZOLANA NATURAL	305.00	300.00	292.80	292.80	292.80	460.00
CAL HIDRAULICA	249.50	245.50	239.60	239.60	239.60	0.00
ADITIVO ACELERANTE	0.00	10.90	0.00	0.00	0.00	0.00
SULFATO DE SODIO	0.00	0.00	22.20	0.00	0.00	0.00
SULFATO DE POTASIO	0.00	0.00	0.00	22.20	0.00	0.00
SULFATO DE MAGNESIO	0.00	0.00	0.00	0.00	22.20	0.00
HIDROXIDO DE SODIO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.80

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla 8.4 muestra el costo de 1 m³, de ahí se puede verificar que la mezcla E-1 es la más barata, aunque no muy alejada de la mezcla alcalina. Si bien es cierto, los costos del concreto mostrado en este capítulo se acercan a los precios estándar de una mezcla elaborada con cemento portland, hay que entender que los concretos alternativos que se plantearon y experimentaron tienen como fin mostrar alternativas a aglomerantes como el cemento portland y plantear metódicamente los procedimientos que nos llevaron a obtener los resultados que ya se mostraron, sin embargo este estudio no pretende implantar una mezcla que reemplace al cemento portland, sino mostrar que existen otros materiales que generan reacciones químicas de elementos resistentes, los cuales podrían continuar un desarrollo más dirigido a crear un producto industrial y de esa manera contemplar una aplicación en el campo de los materiales de construcción.

Tabla 8.4: Materiales por diseño de mezclas.

COSTO DE MEZCLAS S/. /M3							
DETALLE DE MATERIALES		MEZCLAS					
MATERIALES	COSTO DE MATERIALES /KG	E-1 (A/C=0.55)	E-2 (A/C=0.55 + 2% adit. acelerante)	E-3 (A/C=0.55 + 4% Na ₂ SO ₄)	E-4 (A/C=0.55 + 4% K ₂ SO ₄)	E-6 (A/C=0.55 + 4% MgSO ₄)	CONCRETO ALCALINO (A/C=0.50 4M NaOH)
AGREGADO GRUESO	0.05	35.57	35.57	35.57	35.57	35.57	36.32
AGREGADO FINO	0.04	25.54	25.54	25.54	25.54	25.54	26.08
PUZOLANA NATURAL	0.20	61.00	60.00	58.56	58.56	58.56	92.00
CAL HIDRAULICA	0.56	139.72	137.48	134.18	134.18	134.18	0.00
ADITIVO ACELERANTE	6.24	0.00	68.02	0.00	0.00	0.00	0.00
SULFATO DE SODIO	4.15	0.00	0.00	92.13	0.00	0.00	0.00
SULFATO DE POTASIO	3.18	0.00	0.00	0.00	70.60	0.00	0.00
SULFATO DE MAGNESIO	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00	75.48	0.00
HIDROXIDO DE SODIO	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	139.84
TOTAL		261.82	326.60	345.97	324.44	329.32	294.23

Fuente: Elaboración Propia.

CONCLUSIONES

ANÁLISIS FINAL

Tomando como base lo expuesto en la parte teórica, se puede resaltar que al tratar el comportamiento de la puzolana y su interacción en las mezclas hidráulicas depende principalmente de tres aspectos: primero las condiciones químicas en que se encuentra la puzolana, lo cual está relacionado con la cantidad de sílice reactiva en la puzolana. En segundo lugar, la granulometría en que se encuentra. Por último en tercer lugar se debe considerar el grado de cristalinidad. Teniendo en cuenta estos tres factores se puede prever el comportamiento químico y mecánico de las mezclas. En ese sentido se efectuaron los ensayos necesarios en estos tres aspectos y mediante un análisis cuantitativo y cualitativo se llevará a continuación a cabo una comparación con los estudios desarrollados por Fernández (2003), y Lesday (2007), de modo que se pueda tener una referencia notable de como actuó los tres factores mencionados en el presente estudio y determinar la incidencia de cada uno de estos.

En principio se debe remarcar el objeto que los estudios de referencia para el análisis comparativo no tratan exactamente con puzolana natural, pero si lo hacen con materiales muy parecidos que están dentro de la categoría de compuestos silicoaluminosos con potencial de reacción hidráulica, por ejemplo, en Fernández (2003), se desarrolla una caracterización de la ceniza volante, mientras que en Lesday (2007), se analiza la actividad aglomerante de la ceniza de paja de caña de azúcar en combinación con cal. Entonces teniendo presente lo señalado, se procede a realizar el analizar el análisis comparativo.

-Aspecto Químico

En este punto se aplican los ensayos para determinar las cantidades de componentes químicos que tienen mayoría en las diferentes muestras analizadas, ello se puede apreciar en la Tabla 9.1, de la cual se puede apreciar que los componentes mayoritarios en los tres estudios son la sílice y alumina e incluso se ve que en el caso de la puzolana natural que se usó en este estudio, tiene mayores porcentajes que el los otros dos, sumando un total de 88.16%, en comparación con la ceniza volante que suman 77.89% y la ceniza de caña de azúcar que conforma un valor de 67.99%. Claro que se debe medir también la cantidad de

sílice reactiva, lo cual se relaciona con la fase vítrea o amorfa en que se encuentra la muestra, pero ello se analizará más adelante.

Tabla 9.1 Composición química de los estudios comparados.

Composición química en los estudios			
Compuesto	Porcentaje masa		
	Puzolana Propia	Fernandez (2003)	Lesday (2007)
SiO ₂	72.23	53.09	64.73
Al ₂ O ₃	15.93	24.80	3.29
K ₂ O	4.82	3.78	4.20
Na ₂ O	3.64	0.73	0.37
FeO	1.47	8.01	3.55
MgO	0.98	1.94	3.62
CaO	0.72	2.44	11.40
Otros	0.21	5.21	8.84

Fuente: Elaboración Propia – datos extraídos de Fernández (2003), y Lesday (2007).

-Aspecto granulométrico

Este punto tiene que ver en gran medida con la influencia que tiene la finura, más específicamente con la cantidad de material que pasa la malla N° 325, ya que las partículas que están por debajo de esta malla son las que generan mayor superficie específica. En el caso de la puzolana natural que se usó en el presente estudio solo llegó a un 64 % que pasa la malla N° 325, respecto a Fernández (2003), se tiene un valor de 92% y Lesday (2007) que muestra un valor de 85%. Antes de centrar el enfoque en la puzolana natural, hay un experimento muy interesante que se detalla en el estudio de Fernández (2003), este consiste en evaluar el desempeño de las cenizas volantes cuando solo se usa las partículas que pasan la malla N°325, los resultados indican que las resistencias mecánicas de la mezcla se elevan un 50% aproximadamente, lo cual muestra la enorme importancia de la granulometría.

Tabla 9.2 Cantidad de material muy fino en estudios comparados.

PORCENTAJES DE MATERIAL QUE PASA LA MALLA Nº325		
Puzolana Propia	Fernandez (2003)	Lesday (2007)
64%	92%	85%

Fuente: Elaboración Propia – datos extraídos de Fernández (2003), y Lesday (2007).

Precisamente en este aspecto es que la puzolana se aleja más de los otros dos estudios, y comparada con el estudio de Lesday (2003), que desarrolla una mezcla de ceniza de caña de azúcar con cal, análoga al presente estudio, sin embargo las resistencias a la compresión son notablemente diferenciadas, siendo la resistencia a la compresión obtenida en Lesday (2003), un valor de 132.56 kg/cm² y el presente estudio se obtuvo 52.38 kg/cm², teniendo un porcentaje de partículas que pasa la malla Nº 325 de 85% y 64%, respectivamente.

-Aspecto micro estructural

Este punto también es uno de los más importantes ya que los valores de composición en la fase vítrea o también conocido como la fase amorfa, determinan la reactividad de la sílice y alúmina presente en las puzolanas o cenizas volantes. Como ya se expuso en la parte de ensayos hechos a los materiales, la fase amorfa de la puzolana natural alcanza un valor de 71%, obtenido mediante la Difracción de Rayos X, respecto al estudio de Fernández (2003), se obtiene una cantidad de fase amorfa de 74% y la investigación de Lesday (2007), arroja un valor de 87.3% según se deja constancia en la tabla 9.3. De los valores que manifiestan las investigaciones en comparación, la tercera descrita destaca y permite que tenga mayores posibilidades de generar reacciones químicas.

Tabla 9.3 Cantidad de fase vítrea en estudios comparados.

PORCENTAJES DE FASE VITREA		
Puzolana Propia	Fernandez (2003)	Lesday (2007)
71%	74%	87%

Fuente: Elaboración Propia – datos extraídos de Fernández (2003), y Lesday (2007).

Se debe tener en cuenta que como resumen del estudio de Fernández (2003), establece los parámetros que quedan tener las cenizas volantes para ser consideradas como potenciales materiales silicoaluminosos con reactividad hidráulica:

- $[\text{Fe}_2\text{O}_3] \leq 10\%$.
- $[\text{CaO}] \leq 10\%$.
- $[\text{SiO}_2]$ reactiva $> 40\%$.
- [Partículas $< 45 \mu\text{m}$] 80% - 90%.
- Contenido en fase vítrea $> 50\%$
- Relación $[\text{SiO}_2]_{\text{reactivo}} / [\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{reactivo}} \approx 1.6$ ó 2.2 .

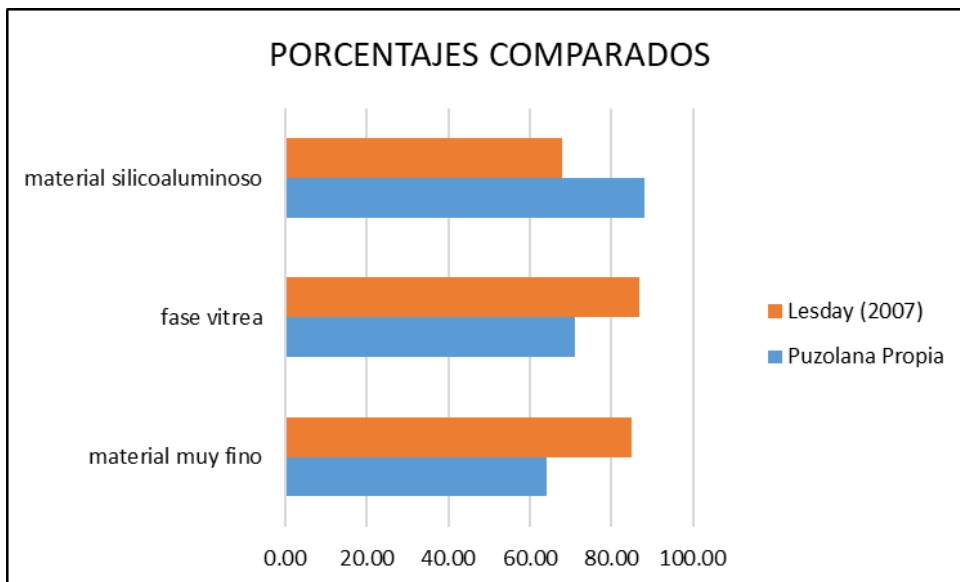


Figura 9.1: Condiciones comparadas puzolana propia y Lesday (2007).
Fuente: Elaboración Propia.

Se comparó las características de la puzolana natural usada en este estudio con los parámetros propuestos por Fernández (2003), y se tiene que la puzolana cumple con todas las características sugeridas a excepción de la granulometría que según dicho estudio se debe pasar la malla N°325 superior a 80% - 90%.

Entonces en este aspecto granulométrico se procedió a desarrollar una inferencia a partir de los datos mostrados en la tabla 9.4, si bien es cierto no se tuvo una puzolana con 100% que pasa la malla N°325, a partir de Fernández (2003), se sabe dicha condición puede mejorar las capacidades hidráulicas en alrededor de

50%, en consecuencia, se plantea que las resistencias se elevarían un 30% para mezclas de este tipo.

Tabla 9.4: Comparativo Fineza y F'c.

	Fineza(<45μ) %	F'c kg/cm2
Puzolana Propia	64.00	52.38
Lesday (2007)	85.00	132.56
Inferido de Fernandez (2003)	100	172.33

Fuente: Elaboración Propia.

En la revisión de tendencia mostrada en la Figura 9.2 y en comparación de Lesday (2007) y Fernández (2003), se puede apreciar la importancia de la fineza, llámese, cantidad de material que pasa la malla N°325 (<45μ),

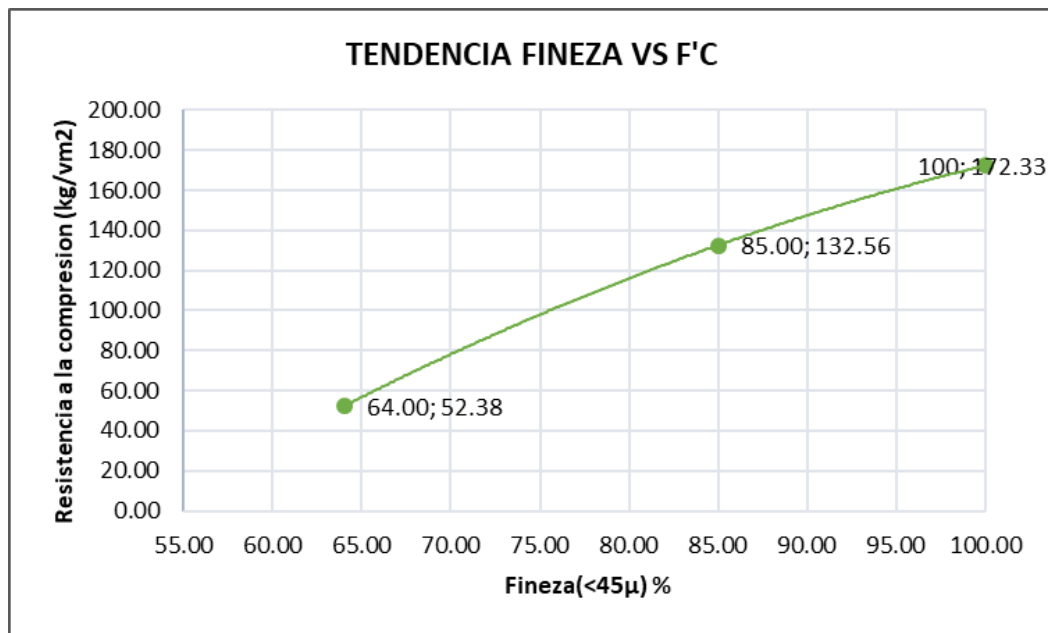


Figura 9.2: Tendencia del comportamiento Fineza vs F'c.

Fuente: Elaboración Propia.

CONCLUSIONES FINALES

A estas alturas ya se puede verificar el comportamiento de estas mezclas alternativas al cemento portland, si bien es cierto el aglomerante cal- puzolana está lejos de alcanzar las prestaciones del cemento portland, tiene propiedades aglomerantes que no debes ser descartadas y podrían usarse en determinadas condiciones. Por otro lado, en el camino de buscar aglomerantes alternativos se hizo el ensayo de resistencia a la compresión sobre una mezcla de cemento alcalino, esta tiene un gran potencial de ser explorado, si bien es cierto existen muchos estudios a nivel global que describen científicamente su comportamiento, valdría la pena aplicarlo a un contexto local. A continuación, se plantea las conclusiones del presente estudio.

-Se reconoce que en el presente estudio se desarrolló los experimentos con los materiales disponibles, pero para fines de aplicación se pueden tener mejores resultados partiendo de materias más reactivas, por ejemplo, desarrollar un estudio de canteras que incluyan un análisis químico EDS y difracción de rayos X, y gracias a esos 2 ensayos se pueda determinar la cantera que cuente con los materiales silicoaluminosos más reactivos.

-Otro de los factores más importantes que determinan la capacidad de reacción es la granulometría, un punto fundamental ya que una granulometría más fina determina un área específica mayor la cual hace que más moléculas estén en contacto con el medio acuoso y las otras moléculas. Para el caso de la puzolana usada en este estudio, se logró una granulometría de que 64% pasa la malla N°325 mediante el uso de un molino de bolas de acero, siendo este insuficiente para los estándares industriales que exigen 90 e incluso 95% que pasa la malla N°325, siendo esta granulometría extremadamente difícil de alcanzar con medios mecánicos corrientes.

-El presente estudio permite afirmar que la velocidad de reacción del conglomerante cal-puzolana es extremadamente más lenta que un aglomerante de cemento portland y en una etapa final permite muchos elementos sin reaccionar, ello se refleja en que las mezclas tuvieron en el ensayo de medición de tiempo de fraguado, que incluso se midió a las 24h, diera la resistencia a la

penetración un valor máximo de 440 lb/pulg² y un valor máximo para la resistencia a la compresión de 52.38 kg/cm².

-En las pruebas de resistencia a la compresión hechas a todos los diseños de mezcla se ve un claro efecto del tratamiento térmico en la poza de curado, según el procedimiento se logró elevar 55 °C y se mantuvo durante una semana, este procedimiento trajo consigo notables mejoras en la resistencia de las mezclas de aglomerante cal-puzolana.

-Las pruebas de resistencia a la compresión de la mezcla de cemento alcalino fueron muy bajas, un valor de 10.82 kg/cm², esto no significa que este tipo de mezclas no tengan una naturaleza resistente ya que estudios como Fernández (2003) y Sánchez (2017) demuestran que tiene capacidades iguales e incluso superiores en algunos aspectos en comparación con el cemento portland, sino que para esta prueba no se logró generar que los compuestos resistentes se desarrollen en todo el cuerpo de la probeta de prueba, lo cual se puede verificar en la Figura 7.9.

-El método de curado que se aplicó a la prueba de cemento alcalino muestra que no fue el más adecuado ya que no se logró generar el gel N-A-S-H en todo el íntegro de las probetas de prueba, entre otras razones que son análogas a lo analizado para el conglomerante cal-puzolana ya que el material silicoaluminoso que se tomó como base para el cemento alcalino fue la misma puzolana. Específicamente recordar lo sostenido en la parte del análisis final que la puzolana propia cumplió los parámetros expuestos en Fernández (2003), a excepción de la granulometría, lo cual también para el caso de cemento alcalino es extremadamente importante.

-Respecto a los costos por metro cúbico que se expuso en el capítulo 8, se debe aclarar que representan un análisis de los materiales que se usaron, pero no debe compararse con los precios de mercado del concreto con cemento portland, ya que no es el objetivo del presente estudio, sino el de mostrar alternativas y describir científicamente el comportamiento de estos aglomerantes.

-Existe un gran potencial en la investigación del cemento alcalino, el presente estudio prueba que se generaron reacciones que dieron lugar a compuestos resistentes que se intuye se deban al gel N-A-S-H, este dio una dureza muy notable en las partes de las probetas de ensayo que se pudo auscultar. Existe experiencias en el mundo como las el Instituto Eduardo Torroja de España en los cuales ya se aplica para procesos industriales como lo son las Traviesas monobloque para líneas de ferrocarril.

-Finalmente se puede afirmar que el futuro de la construcción exige nuevas tecnologías y métodos que seas sostenibles y eficientes, a través de la comprensión de las reacciones químicas del cemento portland, las mezclas hidráulicas, los cementos alcalinos y los geopolímeros, se puede plantear alternativas que tengan una aplicación práctica y apoyen a crear una industria más sostenible.

RECOMENDACIONES

-Para investigaciones posteriores sobre materiales silicoaluminosos que se quieran aplicar se recomienda cumplir los requisitos estipulados en el inciso 2.3.3 acerca de las características que deben tener este tipo de materiales.

-En cuanto al uso de puzolanas naturales se recomienda desarrollar estudios previos de composición química y difracción de rayos X sobre las canteras disponibles, posteriormente elegir la mejor cantera evaluando el porcentaje de material cristalino más alto y por supuesto verificar que contenga el mayor porcentaje posible de sílice y óxido de aluminio presente en el material.

-En cuanto al empleo de las puzolanas naturales se recomienda poner mucha atención en la molturación, ya que se debe llegar a granulometrías extremadamente finas, que pasen 90% la malla N°325 y como se vio en el desarrollo de esta investigación, ello es muy difícil.

-Se recomienda investigar otros materiales silicoaluminosos que tienen un gran potencial de reaccionar con el hidróxido de calcio o también como base para el cemento alcalino disolviéndose en medios fuertemente alcalinos, materiales como las cenizas volantes, cenizas orgánicas, zeolitas usadas en el proceso de craqueo catalítico (FCC), etc.

-Se recomienda aplicar mejores métodos de curado del cemento alcalino, basándose en normas como las europeas, que ya cuentan con un marco técnico sobre este tipo de tecnologías ya que de ello depende gran parte de la activación de estos materiales silicoaluminosos.

-Siendo casi desconocido el conocimiento y aplicación del cemento alcalino en países como el nuestro, es muy recomendable aplicarlo a nuestro medio, de modo que los procesos y métodos se puedan aplicar a las condiciones que existen como las particularidades de las materias prima locales.

-Se recomienda también para investigaciones posteriores la línea de los cementos mixtos que ofrecen grandes ventajas, entre ellas la posibilidad de aplicarlo a

temperatura de ambiente, esto se logra combinando en proporciones mayoritarias de cemento alcalino y partes menores de Clinker (10 a 20 %), de este modo se consigue las ventajas del cemento alcalino al consumir mucho menos Clinker y por ende reducir la contaminación, mejorar la adherencia con el acero de refuerzo y ser más resistente a altas temperaturas, por otro lado el Clinker ofrece proveer las resistencias a temprana edad y temperatura ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón Presentación José Luis, “Estudio del concreto de alta resistencia y alta performance con incorporación de sílice en polvo y aditivo superplastificante”, Tesis pregrado Facultad Ingeniería Civil Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1997.
- Alvarado Navarro Jesús, “Sustitución del SiO₂ en el sistema CaO - Al₂O₃ - SiO₂, por el MnO₂ y su posible aplicación como pigmento cerámico”, Tesis maestría Facultad de Ciencias Química Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, 2011.
- Andersen M. D., Jakobsen H. J., y Skibsted J., “Characterization of white Portland cement hydration and the C-S-H structure in presence of sodium aluminate by Al and Si MAS NMR spectroscopy”, Cement and Concrete Research, Dinamarca, 2004.
- Bosch Pedro e Isaac Schifter, “La Zeolita, una piedra que hierve”, Fondo de Cultura Económica, México, 1997.
- Calleja José, “Adiciones y cementos con adiciones”, Revista Materiales de Construcción de España – N° 190-191, Madrid, 1983.
- Gaitán Arévalo Juniet Rebeca y Tórrez Rivas Belkiss Jessenia, “Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar proveniente del ingenio Monte Rosa sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de morteros de cemento tipo GU”, Tesis pregrado Facultad de Ingeniería Química Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, 2013.
- Fernández Jiménez Ana María y Palomo Sánchez Ángel, “Caracterización de la ceniza volante. Reactividad potencial como cementos alcalinos” Editora ELSEVIER, Madrid, 2003.

-
- Galván Vivanco Tatiana Katty, “Factibilidad y estudio del concreto con aditivo plastificante adicionado con cal hidratada al 10%, 20% y 30”, Tesis pregrado Facultad Ingeniería Civil Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2017.

 - Glukhovsky V. D., “Soil Silicates”, Tesis Doctoral - Editorial Budivel'nik, Kiev, 1959.

 - Gomá Fernando, “El Cemento Portland y otros aglomerantes”, Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona, 1979.

 - Gutierrez de Gonzales Luz Maria, “Estudio de la reaccion en el sistema puzolana natural-Ca(OH)₂ en presencia de agua”, Tesis de Maestría Facultad de Ciencias Químicas Universidad Autónoma de Nuevo Leon, Monterrey, 1989.

 - Ismail Shaik, Sashidhar C. y Pavan Kumar D., “Efectos de los sulfatos en presencia de agua en las características de resistencia de las mezclas de cemento”, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Anantapur, 2015.

 - Lesday Martínez Fernández, Rafael Quintana Puchol, José Fernando Martirena Hernández, “Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante”, Revista Ingeniería de Construcción Vol. 22 N°2, PAG. 113-122. Edición Agosto, Santa Clara, 2007.

 - Morales Arce Gretter, “Influencia del empleo del sulfato de sodio como activador químico en morteros de cementos con adiciones cal-puzolana.” Tesis pregrado Facultad de Construcción Departamento de Ingeniería Civil Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, 2010.

 - Muñoz Solano Ricardo, “Estudio comparativo de concreto elaborado con puzolana natural y concreto con cementos puzolánicos atlas en la ciudad de Huancayo”, Tesis pregrado Facultad Ingeniería Civil Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2017.

-
- Ottazzi Passino Gianfranco, “Diseño en Concreto Armado”, Asociación Capitulo Peruano del Instituto Americano del Concreto ACI-PERU, Lima, 2011.
- Rivva Lopez Enrique, “Naturaleza y materiales del concreto”, Capítulo Peruano del ACI, Lima, 2000.
- Sánchez Herrero María José, “La activación alcalina como procedimiento para el desarrollo de nuevos cementos belíticos” Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Educación a Distancia, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, 2017.
- Shiohama Yaka Enrique y Zeballos Marroquin Ángel, “Empleo de la puzolana de uchumayo, (Arequipa) como material de reemplazo del cemento, en la elaboración de concretos económicos”, Tesis pregrado Facultad Ingeniería Civil Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1965.
- Taylor H. F. W., “La Química de los Cementos”, Editorial URMO, Bilbao, 1979.
- Torres Castellanos Nancy, “Estudio en estado fresco y endurecido de concretos adicionados con Catalizador de Craqueo Catalítico usado (FCC)”, Tesis Doctoral Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014.
- Villanueva Flores Silvia Mónica, “Estudio de la calidad de concreto en la construcción de viviendas y pavimentos de vías del cono norte de Lima, uso del concreto premezclado”, Tesis pregrado Facultad Ingeniería Civil Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2003.
- Villegas Martínez Carlos Alberto, “Utilización de puzolanas naturales en la elaboración de prefabricados con base cementicia destinados a la construcción de viviendas de bajo costo”, Tesis maestría Facultad Ingeniería Civil Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2012.

ANEXOS

HOJAS TÉCNICAS DE INSUMOS



COMACSA
Cia Minera
AGREGADOS CALCÁREOS S.A.

HOJA TÉCNICA

Código : VNT-HT-088
Versión : 05
Válido desde : 03-12-2018
Página : 1 de 1

Cal hidráulica Comacsa

Agregado con propiedades puzolánicas, con una gran plasticidad, lo cual le permite dar excelentes condiciones de trabajabilidad, se pueden desarrollar trabajos de albañilería mas rápidos, con gran facilidad y menos esfuerzo. Además, desarrolla gran resistencia a la compresión diferenciándose de otros agregados o de las cales hidráulicas normales

Especificaciones

Parámetro	Especificación	Método
Contenido de SiO ₂	10.0 – 16.5 %	LAB-PR-007
Contenido de Al ₂ O ₃	1.9 – 3.5 %	LAB-PR-007
Contenido de CaO	46.0 – 52.0 %	LAB-PR-007
Contenido de MgO	0.75 – 1.5 %	LAB-PR-007
Contenido de SO ₃	máx. 1.0 %	LAB-PR-007
Partículas > 45 µm (residuo tamiz ASTM No. 325)	5.0 – 11.0 %	LAB-PR-018
Densidad aparente	620 – 670 g/L	LAB-PR-011
Humedad	máx. 1.0 %	LAB-PR-023
Tiempo de fraguado inicial	80 – 160 min	LAB-PR-036
Tiempo de fraguado final	200 – 350 min	LAB-PR-036
Resistencia a la compresión 7 días: mortero 1:1:6	90 – 150 kg/cm ²	LAB-PR-037
Resistencia a la compresión 7 días: mortero 1:2:9	50 – 75 kg/cm ²	LAB-PR-037
Resistencia a la compresión 28 días: mortero 1:1:6	140 – 210 kg/cm ²	LAB-PR-037
Resistencia a la compresión 28 días: mortero 1:2:9	75 – 120 kg/cm ²	LAB-PR-037
Estabilidad de volumen	máx. 0.80 %	LAB-PR-038

Esta información se refiere al material indicado y podría no ser válida cuando el material es usado con otros materiales o en otros procesos. Debido a los numerosos factores que pueden afectar la aplicación de nuestros productos, esta información no exime al cliente de efectuar sus propias investigaciones y pruebas. Es responsabilidad del cliente asegurarse de la validez y suficiencia de esta información para su uso particular.

Este es un producto químico industrial y debe ser utilizado con todos los cuidados usuales de la industria. Debe ser almacenado en lugar fresco y seco, en sus envases originales cerrados, protegido del sol, fuentes de calor y humedad. En las condiciones adecuadas de almacenamiento y en sus envases originales el producto mantiene todas las propiedades descritas en esta hoja técnica.



Cia. Minera Agregados Calcáreos S.A. +511 202-6363
Av. Universitaria Norte N°5140 +511 202-6364
Urb. Industrial Infantas-Los Olivos-Lima-Perú

www.comacsa.com.pe

BUILDING TRUST



HOJA TÉCNICA

Sika® Cem Acelerante PE

Acelerante de fragua y resistencias para mezclas de Concreto Y Mortero

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Aditivo líquido de acción acelerante sobre tiempo de fraguado y resistencias mecánicas del concreto.

Cumple norma ASTM 494, tipo C.

USOS

Sika® Cem Acelerante PE debe usarse cuando se requiera:

Obtener concreto con altas resistencias a temprana edad, reducir el tiempo de desencofrado y facilitar el rápido avance de las obras, colocar concreto en ambiente frío o efectuar reparaciones rápidas en todo tipo de estructuras.

CARACTERÍSTICAS / VENTAJAS

- El Sika® Cem Acelerante PE reduce los tiempos de desencofrado.
- Se obtienen resistencias más altas a temprana edad.
- Pronto uso de estructuras nuevas.
- Rápida puesta en uso de estructuras reparadas.
- Sika® Cem Acelerante PE contrarresta el efecto del frío sobre las resistencias y el fraguado.
- Aumenta los rendimientos en la elaboración de prefabricados.

NORMAS

ESTÁNDARES

Sika® Cem Acelerante cumple con la Norma ASTM C 494, tipo C.

DATOS BÁSICOS

FORMA

COLORES


Transparente tonalidad amarilla.

PRESENTACIÓN

- Envase PET x 4 L
- Balde x 20 L

Hoja Técnica
Sika® Cem Acelerante PE
21.01.15, Edición 3

1/3

ALMACENAMIENTO	CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO / VIDA ÚTIL Un año en lugar fresco y bajo techo en su envase original bien cerrado.
DATOS TÉCNICOS	DENSIDAD 1.38 kg/L +/- 0.01 USGBC VALORACIÓN LEED Sika® Cem Acelerante PE cumple con los requerimientos LEED. Conforme con el LEED V3 IEQc 4.1 Low-emitting materials - adhesives and sealants. Contenido de VOC < 420 g/L (menos agua)
INFORMACIÓN DEL SISTEMA	
DETALLES DE APLICACIÓN	CONSUMO / DOSIS Dependiendo del grado de aceleramiento deseado, Sika® Cem Acelerante PE se dosifica del 1% al 4% del peso del cemento (aproximadamente de 300 mL a 1200 mL por bolsa de cemento de 42.5 Kg). De acuerdo con nuestra experiencia y como una guía en el uso de Sika® Cem Acelerante PE, se puede decir que con una dosificación del 4% se obtienen resistencias mecánicas a 3 días equivalentes a 7 días y a 7 días las equivalentes a 15 días. Este efecto puede variar con el tipo y la edad del cemento, como también con la temperatura del ambiente. Recomendamos hacer ensayos previos para determinar la dosificación óptima en cada caso.
MÉTODO DE APLICACIÓN	MODO DE EMPLEO Sika® Cem Acelerante PE viene listo para usarse, agregándose al agua de mezcla. PRECAUCIONES Limpie todas las herramientas y equipos de aplicación con agua inmediatamente después de su uso. Los datos técnicos indicados en esta hoja técnica están basados en ensayos de laboratorio. Los datos reales pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.
BASES	Todos los datos técnicos recogidos en esta hoja técnica se basan en ensayos de laboratorio. Las medidas de los datos actuales pueden variar por circunstancias fuera de nuestro control.
RESTRICCIONES LOCALES	Nótese que el desempeño del producto puede variar dependiendo de cada país. Por favor, consulte la hoja técnica local correspondiente para la exacta descripción de los campos de aplicación del producto.
Información de Seguridad e Higiene	Para información y asesoría referente al transporte, manejo, almacenamiento y disposición de productos químicos, los usuarios deben consultar la Hoja de Seguridad del Material actual, la cual contiene información médica, ecológica, toxicológica y otras relacionadas con la seguridad.
<p>Hoja Técnica Sika® Cem Acelerante PE 22.01.15, Edición 3</p>	
<p>2/3</p>	
<p>BUILDING TRUST </p>	

NOTAS LEGALES

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y el uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, en base al conocimiento y experiencia actuales en Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y transportados; así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra en donde se aplicarán los productos Sika son tan particulares que de esta información, de alguna recomendación escrita o de algún asesoramiento técnico, no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad particular, así como ninguna responsabilidad contractual. Los derechos de propiedad de las terceras partes deben ser respetados.

Todos los pedidos aceptados por Sika Perú S.A. están sujetos a Cláusulas Generales de Contratación para la Venta de Productos de Sika Perú S.A. Los usuarios siempre deben remitirse a la última edición de la Hojas Técnicas de los productos; cuyas copias se entregarán a solicitud del interesado o a las que pueden acceder en Internet a través de nuestra página web www.sika.com.pe.

“La presente Edición anula y reemplaza la Edición Nº 2

la misma que deberá ser destruida”

PARA MÁS INFORMACIÓN SOBRE Sika® Cem Acelerante PE :

1.- SIKI PRODUCT FINDER: APLICACIÓN DE CATÁLOGO DE PRODUCTOS



2.- SIKI CIUDAD VIRTUAL



Sika Perú S.A.
Concrete
Centro Industrial "Las Praderas
de Lurín S/N - Mz "B" Lote 5 y
6, Lurín
Lima
Perú
www.sika.com.pe

Hoja Técnica
Sika® Cem Acelerante PE
22.01.15, Edición 3

Versión elaborada por: Sika Perú S.A.
CG, Departamento Técnico
Telf: 618-6060
Fax: 618-6070
Mail: informacion@pe.sika.com



© 2014 Sika Perú S.A.

PANEL FOTOGRÁFICO

Fotografía N°01: Cantera Tanturjo.



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°02: Molienda de la puzolana.



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°03: Ensayo de granulométrico por lavado sobre la puzolana.



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°04: Difractómetro Bruker ADVANCE D8 usado para el ensayo de Difracción de rayos X sobre la puzolana.



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°05: Ensayos sobre los agregados.



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°06: Vaciado de mezcla en LEM-UNI.



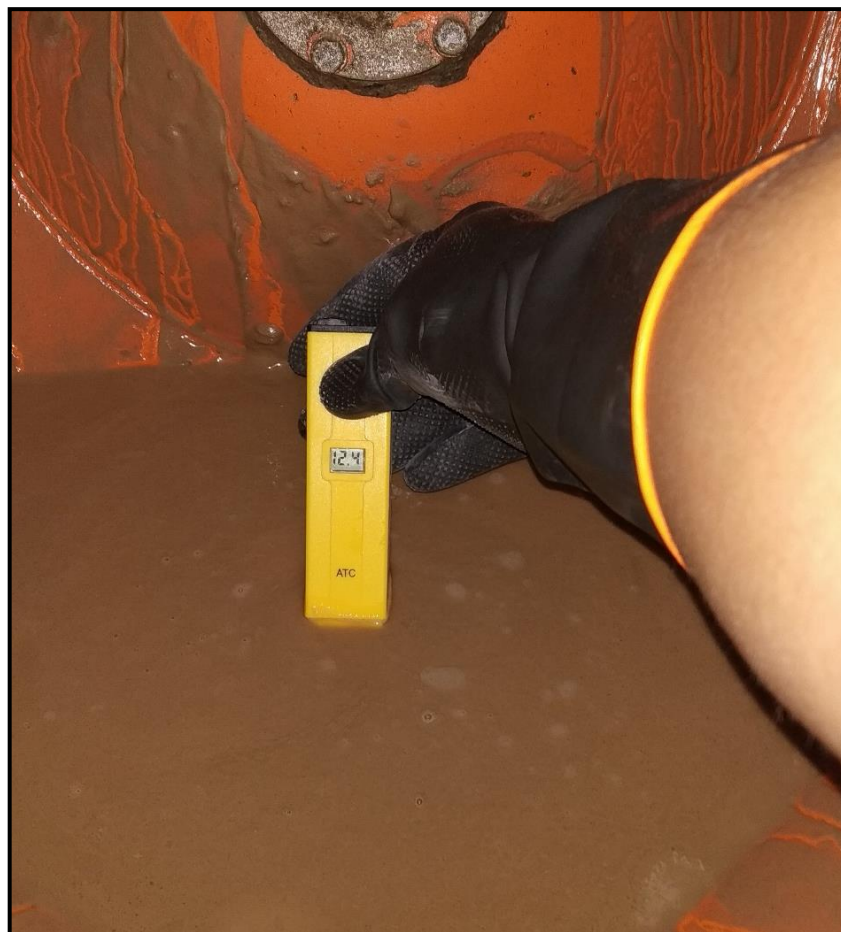
Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°07: Asentamiento del concreto fresco



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°08: Medida de PH de la pasta alcalina.



Fuente: Elaboración Propia

Fotografía N°09: Vaciado de concreto en los moldes.



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°10: Poza de curado a 70 °C.



Fuente: Elaboración Propia.

Fotografía N°11: Ensayo de resistencia a la compresión.



Fuente: Elaboración Propia.