

CAPÍTULO I

MARCO TEORICO

1.1 CEMENTO PORTLAND. Generalidades

El cemento Pórtland es un alúmino silicato de calcio, patentado por J. Aspdin en 1824, y denominado Pórtland por su semejanza a una piedra que abunda en esa localidad de Inglaterra. Se obtiene por calentamiento incipiente (aproximadamente 1300 °C) de una mezcla de minerales finamente molidos, formados por piedra caliza y arcilla. El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3m., de diámetro y 100 m., de largo. El Material obtenido denominado “clinker” se muele finamente adicionándole de un 2% a 3% de yeso para evitar que fragüe instantáneamente. Los compuestos del cemento así formado son:

Tabla I-1 COMPONENTES DEL CEMENTO PORTLAND

NOMBRE	FÓRMULA	FÓRMULA DE ÓXIDOS	PORCENTAJE (%)
Silicato dicálcico	Ca_2SiO_4	$\text{SiO}_2 * 2\text{CaO}$	32
Silicato tricálcico	Ca_3SiO_5	$\text{SiO}_2 * 3\text{CaO}$	40
Aluminato tricálcico	$\text{Ca}_4\text{Al}_2 \text{SiO}_6$	$\text{Al}_2\text{O}_3 * 3\text{CaO}$	10
Ferroaluminato tetracálcico	$\text{Ca}_4\text{Al}_2 \text{Fe}_2 \text{SiO}_{10}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Fe}_2\text{O}_3 * 4\text{CaO}$	9
Sulfato de calcio	Ca SO_4		2-3

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En estos compuestos el magnesio puede reemplazar al calcio, existen también silicatos y ferroaluminatos de sodio y potasio.

Para expresar la composición de un determinado cemento, generalmente se determinan en conjunto los óxidos que forman los compuestos antes mencionados.

Se denomina fraguado al proceso químico por el cual el cemento adquiere dureza pétreo (proceso irreversible), a diferencia de las calces grasas el fraguado del cemento es hidráulico porque se produce por reaccionar con el agua que provoca el fenómeno de hidrólisis de algunos compuestos y posteriores hidrataciones y recombinaciones. El fraguado se produce en dos etapas:

1. Fraguado: proceso que dura de minutos a 15 horas, en que la masa plástica adquiere rigidez.
2. Endurecimiento: proceso en que la masa rígida aumenta su dureza y resistencia mecánica que demanda de 28 días a varios años

El cemento Portland, es un tipo de cemento hidráulico, que al realizarse la mezcla con áridos, agua y fibras de acero se produce una transformación en la cual obtendremos una masa muy duradera y resistente, denominada hormigón.

Por tanto, es decir, es el que más se utiliza en la construcción y al ser un tipo de cemento hidráulico, su principal característica es la de fraguar y endurecerse al entrar en contacto con el agua. Como consecuencia de dicha reacción adquiriremos un inmejorable material con excelentes cualidades aglutinantes.

El hormigón es el segundo material más usado por el hombre, después del agua. Se estima que por cada habitante del planeta se producen como promedio 3 toneladas de hormigón cada año. Debido a su relativo bajo costo de producción y versatilidad, no se visualiza en el futuro cercano el remplazo del concreto por ningún otro material (Andrés 2014). Su proceso de elaboración, al igual que otros productos manufacturados por el hombre traen consigo una huella ecológica y por ende responsable de emisiones de CO₂ a la atmósfera. En el caso particular de la optimización del cemento, el criterio está asociado al empleo de subproductos industriales y uso de adiciones tanto al cemento como al hormigón, empleando materias primas que minimicen las emisiones de CO₂ o que se obtengan mediante procesos que consuman menos energía. El reto es diseñar proyectos en armonía con la naturaleza, utilizando el concepto de desarrollo sostenible. Esto implica el uso de materiales de alto rendimiento, respetuosos con el medio ambiente y producidos a un costo razonable (Pastor 2015).

En específico la industria del cemento ha sufrido transformaciones radicales en sus más de 100 años de historia. La diseminación de grandes plantas industriales productoras de cemento se produjo a finales del siglo XIX, la primera planta de América fue montada en Coplay, EEUU en 1871. En 1887 Henri Le Chatelier hizo un importante aporte a la mineralogía del cemento, al nombrar los principales minerales que se forman en su reacción de hidratación: Alita (silicato tri-cálcico), Belita (silicato bi-cálcico) y Celita (Alumino- ferrato tetra-cálcico). Por primera vez se describe la reacción de hidratación como un proceso de formación de productos cristalinos, resultante de la reacción entre el cemento y el agua. Finalmente, en 1917 se funda la American Society for Testing Materials (ASTM), que estableció una fórmula estándar para el cemento Pórtland (Hernández 2010).

Ante las preocupaciones existentes con respecto al cambio climático, diversos países y corporaciones reconocen la necesidad de implementar políticas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental y crear un modelo sostenible para la producción de cemento. Existe una estrategia común, sustentada en cuatro líneas de trabajo fundamentales:

(i) la mejora en la eficiencia de los procesos, (ii) el uso de fuentes alternativas de combustibles, (iii) la captura y almacenaje de CO₂ y (iv) la reducción del factor de clínquer mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios. En este sentido, las acciones a tomar para la reducción de las emisiones causadas por la industria del cemento deben ser consideradas desde un enfoque regional, atendiendo a las características geopolíticas y tecnológicas de cada país, organización o fábrica (Andrés 2014).

1.1.1 Definición de cemento según la norma boliviana NB011

Son conglomerantes hidráulicos, o sea materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo el agua.

Los cementos son materiales granulares muy finos y homogéneos, cuyo aceptable grado de uniformidad de propiedades y de comportamiento, solo se puede conseguir mediante procesos continuos de fabricación (selección, dosificación, molturación, homogeneización de materias primas y de productos intermedios y clinkerización de crudos), así como de realizaciones periódicas y frecuentes de control de la calidad, todo ello llevado a cabo mediante operaciones de autocontrol de los fabricantes, ejecutadas por personal cualificado y adiestrado y con maquinaria, equipos e instrumentos idóneos.

Tabla I-2: Clasificación y composición de cementos

Tipos de cemento			Proporción en masa % ⁽¹⁾				
			Componentes principales				Componentes adicionales ⁽²⁾
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Puzolana	Filler	Escoria	
Cemento Portland	Portland	I	95 a 100				0 a 5
	Portland con puzolana ⁽⁴⁾	IP	60 a 94	6 a 40			0 a 5
	Portland con filler calizo ⁽³⁾	IF	65 a 94		6 a 20		0 a 5
	Portland con escoria	IS	65 a 94				0 a 5
	Portland mixto	IM	65 a 94	6 a 35			0 a 5
Cemento puzolánico ⁽⁴⁾		P	45 a 60	40 a 55			0 a 5

Fuente: Norma Boliviana NB011-2012

- (1) En estos valores se excluyen: El regulador de fraguado y los aditivos.
- (2) Los componentes adicionales pueden ser puzolana, filler, caliza o escoria, a menos que sean componentes principales del cemento.
- (3) Para cementos tipo IF, se deben realizar el control del filler calizo mediante el método de azul de metileno.
- (4) El índice de actividad de la puzolana se debe realizar mediante el método de ensayo de la norma ASTM C311

1.2 LOS MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS (MCS).

Los materiales cementicios suplementarios (MCS) son una alternativa a la disminución en el consumo energético y en las emisiones de gases de efecto invernadero por

volumen del aglomerante, obteniéndose además ventajas desde puntos de vista ingenieril, económico y ecológico.

En general, estas materias primas cerámicas se presentan originariamente en la naturaleza formando acumulaciones minerales o rocosas, a partir de las cuales se extraen los materiales útiles para la fabricación cerámica, bien en su estado natural o bien sometiendo los materiales brutos a un proceso de lavado y enriquecimiento en su contenido mineral (Monzons.)

1.3 PUZOLANAS

Dentro del amplio grupo de los MCS se encuentran las puzolanas, según la normativa establecida por ASTM-C 608-92a se definen las puzolanas como materiales silíceos o aluminosos, los cuales por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementicias. De modo más amplio puede agregarse, que los productos formados son silicatos y aluminosilicatos hidratados, similares a los resultantes del fraguado del cemento Portland (Pérez 2014).

Los referentes internacionales permiten identificar que el empleo de materiales con propiedades puzolánicas preceden al uso del cemento, siendo los romanos precursores al utilizar un material derivado de la molienda de ladrillos de arcilla y ceniza volcánica “pulvisputeolanus” (Jacobo Martínez-Reyes, 2007).

Las puzolanas naturales pueden ser provenientes de rocas volcánicas, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de lava como las cenizas volcánicas, las tobas, la escoria y la obsidiana.

Además, existen rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Las puzolanas artificiales provienen de las cenizas que se producen en la combustión del carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad. Las arcillas calcinadas o activadas artificialmente como los residuos de quema de ladrillos u otros tipos de arcillas que hayan estado expuestas a temperaturas superiores a los 800 °C. Escorias de fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos debiendo ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

Las cenizas de residuos agrícolas se presentan como otro tipo de puzolana artificial. Entre estas se encuentran la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

1.4 ACTIVACION DE ARCILLA

1.4.1 Estructura y composición de los materiales arcillosos

1.4.1.1 Arcillas

Las rocas ígneas se originan por el enfriamiento de magmas, que surgen de masas fundidas procedentes del interior de la Tierra. Las arcillas son el producto de la disgregación parcial o total de las rocas ígneas por acción del agua, los agentes atmosféricos (fundamentalmente CO₂), la temperatura y la presión, durante muy largos períodos de tiempo (eras geológicas: millones de años). Por tal razón, el término arcilla no corresponde a una composición química o mineralógica definida; las arcillas son mezclas de diversas especies minerales, según la composición de la roca matriz y el proceso de meteorización sufrido (Kingery W.D. et al., 1976; Mari E.A., 1998). Por esto, el estudio de las arcillas y la evaluación de sus yacimientos, que por los mismos motivos presentan una elevada heterogeneidad, es complejo.

Las arcillas están formadas por distintas especies mineralógicas, que según su preponderancia le confieren sus peculiares características. Las arcillas además de los

minerales de arcillas propiamente dichos, poseen sílice libre que generalmente es cuarzo cristalino de tamaño mayor a 10 micrones, carbonatos de diversos tamaños, feldespatos generalmente alcalinos y alcalinotérreos, compuestos de hierro y titanio, sales solubles, materia orgánica y residuos carbonosos. Así, por ejemplo, el término caolín designa una arcilla con un elevado porcentaje de Caolinita y un bajo contenido de impurezas en general, especialmente óxido férrico; una arcilla illítica tendrá el mayor porcentaje del mineral illita y una arcilla esmectítica el mayor porcentaje de algunos de los minerales del grupo de las esmectitas, por ejemplo, Montmorillonita.

En 1995 la AIPEA (Asociación Internacional Pour L'Etude des Argiles) y la CMS (Clay Minerals Society) redefinieron el término "arcilla". De esta manera, la palabra arcilla se refiere al material "natural" compuesto fundamentalmente por "mineral de grano fino", el cual es generalmente "plástico" con apropiada cantidad de agua, que endurece cuando se lo seca al aire o calcina. Generalmente, la arcilla está constituida por "filosilicatos" pero puede contener otros materiales que imparten plasticidad y que endurecen con el secado.

Las arcillas son, por definición, sólidos de granos finos y muchas de sus aplicaciones derivan de él o son "filosilicatos" porque los iones de su estructura están arreglados en series de planos paralelos, los cuales están fuertemente unidos en forma de láminas.

1.4.1.2 Estructura y composición de arcilla

Las arcillas (silicoaluminatos hidratados), en cuya estructura química participan principalmente Silicio (Si), Aluminio (Al), Oxígeno (O) e Hidrógeno (H), pertenecen a la familia de los filosilicatos, cuya unidad estructural básica es el tetraedro compuesto por Silicio y Oxígeno; dichos tetraedros se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas llamadas tetraédricas que constituyen la red fundamental de los filosilicatos. Aunque la caolinita se encuentra dentro del grupo de las arcillas, desde el punto de vista de su estructura, tiene diferencias, ya que, en vez de tener dos filas de tetraedros y una de octaedros, ella tiene una sola fila de tetraedros de sílice y una octaédrica de óxido de aluminio, de allí el elevado contenido de este óxido (Pinto 2011).

De acuerdo con la manera en que en 2 ó 3 capas de los filosilicatos que conforman su estructura interna se agrupan y mantienen enlazados, las arcillas son divididas en dos grupos principales según se muestra en la Tabla 1.2.1 (Andrés 2014).

Figura I-1: Distribución de los filosilicatos principales

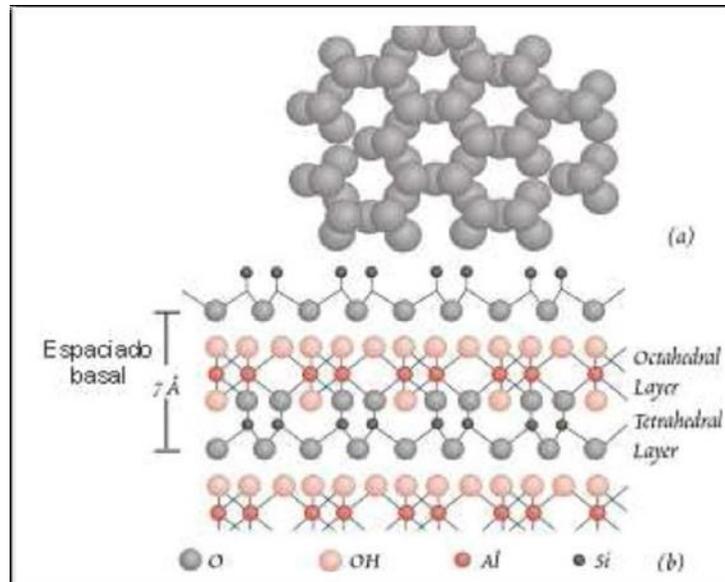
Grupo	Distribución de los filosilicatos principales minerales arcillosos que integran el grupo			
1:1	Sílice-alúmina	Caolinita		
2:1	Sílice-alúmina-sílice	Montmorillonita, Illita		

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		CARGA
BILAMINARES T : O 1:1		Caolinita		Antigorita	
	CANDITAS	Nacrita	SERPENTINA	Crisotilo	
		Dickita		Lizardita	
		Halloisita		Bertierina	X = 0
TRILAMINARES T : O : T 2 : 1	Pirofilita		Talco		X = 0
		Montmorillonita		Saponita	X = 0,2-0,6
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita	
		Nontronita			
	Vermiculitas		Vermiculitas		X = 0,6-0,9
	Illitas				X = 0,9
	MICAS	Moscovita		Biotita	X = 1
	Paragonita	MICAS	Flogopita		
			Lepidolita		

Fuente: Andrés, 2014.

Sucesivas capas de arcillas son conectadas entre sí según el vínculo generado por el balance de carga y la estructura interna de cada mineral arcilloso. En el caso de la caolinita, enlaces de hidrógeno o fuerzas del tipo Van der Waals son lo suficientemente fuertes para que no se produzca hinchazón en presencia de agua. En las illitas el enlace es muy fuerte por medio de cationes K^+ y las montmorillonitas, que pertenecen al mismo grupo de las illitas, se diferencian de estas por estar vinculadas por enlaces débiles a través de diferentes cationes como Na^+ y Ca^+ , que determinan la adsorción de agua en el espacio interlaminaar (Andrés 2014).

Figura I-2: Estructura de arcilla



Estructura de la caolinita. (a) Vista de la capa tetraédrica. (b) Vista de corte.

Fuente: Tironi, 2013.

1.4.1.3 Depósitos de arcilla en el mundo.

El mercado mundial de arcillas caoliníticas posee tres áreas de producción de gran importancia: los caolines sedimentarios de Georgia y Carolina del Sur en los Estados Unidos; los caolines primarios en Cornwall, zona del suroeste de Inglaterra; los caolines sedimentarios en el bajo Amazonas, Brasil. Estas arcillas caoliníticas son de alta calidad (elevado contenido de Caolinita y características físicas adecuadas) por lo que se las puede utilizar en la industria del papel. Otros depósitos de arcillas caoliníticas de importancia regional se encuentran en Australia, Argentina, República Checa, China, Francia, Alemania, Indonesia, Irán, México, Corea del Sur, España, Turquía y Ucrania. Las propiedades de este mineral han permitido su utilización en la industria del papel, materiales refractarios, cerámica, fibra de vidrio, cemento, caucho y plásticos, pinturas, catalizadores (Tironi 2013).

Los principales yacimientos en Estados Unidos se hallan en Tennessee y Kentucky; en Panola County, Mississippi; en el distrito nordeste del Condado Cherokee, Texas, y en el de Stanislaus, California. Su entorno sedimentario es muy parecido al de las ballclays europeas, siendo éstas de mayor finura.

Importantes yacimientos de ballclays se hallan en Devon y Dorset, en el sur-oeste de Inglaterra. Similares arcillas caoliníticas se presentan en LoughNeagh, Irlanda del Norte y en la cuenca de Hampshire.

En la cuenca del Don existe un gran filón de arcilla, cuyas características son comparables con las de las ballclays inglesas. Su contenido en alúmina es del 31-32 % y de óxidos de hierro, de un 1 %. En los Urales las arcillas caoliníticas están confinadas a la ladera este de la sierra.

En Alemania los yacimientos más importantes de arcillas caoliníticas y otras se explotan en las cuencas del Rin, entre Colonia y Koblenza, en Westerwald Highland. En Rheinland los yacimientos más valiosos y más extensos se hallan en el área de Kannebäckerland. En la cuenca superior del Rin, en el área de Rheinland-Pfalz, los yacimientos más grandes están en Hettenleidelheim y Eisenberg(Monzons.).

Tabla I-3: Distribución mundial de la aplicación de arcillas caoliníticas

Aplicación	Porcentaje
Industria del papel	45
Materiales refractarios	16
Cerámica	15
Fibra de vidrio	6
Cemento	6
Caucho y plásticos	5
Pinturas	3
Catalizadores	2
Otros	2

Fuente: Tironi, 2013.

De la **Tabla I-3** se desprende que la industria del papel es el mayor consumidor de arcillas caoliníticas, sin embargo, esta industria necesita de arcillas con un elevado contenido de Caolinita (denominadas caolín) e impurezas no abrasivas, para evitar el desgaste de los equipos utilizados durante el procesamiento. La presencia de impurezas duras como el cuarzo y los feldespatos, aumentará la abrasividad de la arcilla caolinítica (Kogel J.E. et al., 2006). El tratamiento de las arcillas caoliníticas para eliminar estas impurezas es técnicamente complejo y costoso. Por esto, la utilización de arcillas caoliníticas como puzolanas en cemento, es una buena alternativa cuando no poseen las características necesarias en la industria del papel.

Tabla I-4: Distribución de producción anual de arcillas caoliníticas en el mundo.

País	Miles de toneladas	País	Miles de toneladas
EEUU	8870	México	490
Reino Unido	2300	Turquía	450
Brasil	1700	España	400
República Checa	1050	Argentina	300
Irán	900	Francia	300
Alemania	700	Ucrania	300
Corea del Sur	670	Indonesia	250
China	600	Australia	250

Fuente: Tironi, 2013.

En cada región del mundo, la utilización de arcillas caoliníticas como puzolanas depende de varios factores: la presencia de impurezas que no favorecen su utilización en las industrias del papel, refractarios o cerámicas (**Tabla I.4.**); la existencia de depósitos del tamaño adecuado, fácil acceso, cercano a la zona de producción de

cemento y con propiedades constantes; la presencia de puzolanas naturales o artificiales en la región. Si los depósitos de arcillas caoliníticas se encuentran alejados, el impacto económico o medioambiental del transporte comienza a ser una desventaja. Por otro lado, la posibilidad de obtener propiedades constantes utilizando arcillas de depósitos de gran tamaño es una ventaja sobre otras puzolanas naturales (Kogel J.E. et al., 2006).

Las bentonitas a gran escala se utilizan como arena de moldeo en fundición; peletización de minerales; perforación de pozos petroleros; adsorción de impurezas en aceites; clarificación de vinos, jugos, sidras; pesticidas; catálisis; adsorbentes. En menor escala en cosméticos; cerámicos; detergentes; recubrimiento para papel; adhesivos; agentes emulsionantes; jabones; pinturas.

Los mayores yacimientos de bentonita de sodio se encuentran en el oeste de Estados Unidos en Wyoming, Montana y Dakota del Sur. Otros depósitos de menor magnitud son explotados en Argentina, Canadá, China, Grecia, República de Georgia, India, Marruecos, Sudáfrica y España. Los depósitos de bentonita cálcica son más comunes que los de bentonita sódica. En Estados Unidos se encuentran en Georgia, Alabama, Mississippi, Texas, Illinois y Missouri. Considerando otros países, las bentonitas cálcicas se producen en Inglaterra, Alemania, España, Italia, Grecia, Turquía, República de Georgia, República Checa, Ucrania, Japón, Argelia, Marruecos, Sudáfrica, China, India, Japón, Argentina y Brasil (Murria H., 2002). En la **Tabla I.5** se presenta la distribución de la cantidad de bentonita de ambos tipos (sódica y cálcica) producida en los distintos países mencionados.

Tabla I-5: Distribución mundial de la producción anual de bentonitas (USGS).

País	Miles de toneladas	País	Miles de toneladas
EEUU	4080	Japón	415
Grecia	1150	Ucrania	300
CIS	700	Brasil	275
Turquía	636	México	270
Italia	600	Otros	1300
Alemania	500		

Fuente: Tironi, 2013

1.4.1.4 Antecedentes de activación de arcilla

Cuando la arcilla es sometida a tratamientos térmicos adecuados, se forman en ella compuestos puzolánicos activos en virtud de las reacciones y las transformaciones en las que, junto a la estructura y constitución mineralógica de partida y a la composición química, juegan importantísimo papel como variables la temperatura y el tiempo de tratamiento (Calleja J., 1968).

Diversos autores han estudiado cómo influyen en las propiedades del cemento puzolánico (tipo IP), las variables involucradas en el proceso de obtención de puzolanas a partir de la calcinación de arcillas encontradas en su región:

DINAMARCA

He Ch. et al. (1995) realizaron comparaciones entre una arcilla caolinítica de Dinamarca y cinco arcillas estándar: Illita, Ca-Montmorillonita, Na-Montmorillonita, mica/esmectita y sepiolita. Además del tipo de arcilla, la otra variable estudiada fue la temperatura de calcinación, entre 550 y 950 °C. Los parámetros analizados fueron: demanda de agua (Agua/Cemento/Arcilla), superficie específica, porcentaje de fase amorfa, resistencia a la compresión a los 28 días. Para las arcillas caoliníticas y la Illita,

la demanda de agua no disminuye significativamente con el aumento de la deshidroxilación como en las otras arcillas. La capacidad de rehidratación se ve disminuida o destruida cuando la temperatura de calcinación tiene valores correspondientes a la deshidroxilación total. Obtuvieron una buena correlación lineal positiva entre Agua/C/A y superficie específica BET. Las arcillas caoliníticas y Na-Montmorillonita muestran un aumento importante en el porcentaje de fase amorfa con el aumento de la temperatura de calcinación, y una abrupta caída a los 900 °C, no así las otras arcillas. Analizando la resistencia a la compresión, la mejor actividad puzolánica para una arcilla caolinítica fue para una temperatura de calcinación de 650°C.

ISRAEL

Shvarzman A. et al. (2003), estudiaron una arcilla caolinítica local (Negev Minerals, Israel) en comparación con un caolín estándar (EEUU) y otra artificial. La superficie específica de la arcilla local sin calcinar fue de 18,3 m²/g. Analizaron el efecto de la temperatura de calcinación (entre 400 y 700 °C) dejando fijo el tiempo de calcinación en 5 horas. Determinaron un aumento del contenido de fase amorfa con el aumento de la temperatura de calcinación, y un aumento en la resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días al aumentar el contenido de fase amorfa.

GRECIA

Kakali G. et al. (2001), analizaron cuatro arcillas procedentes de diferentes regiones de Grecia, con diferente contenido de Caolinita. Las muestras fueron caracterizadas mediante análisis químico, DRX, FTIR, DTA. Determinaron que poseían diferencias en el contenido de Caolinita y en la cristalinidad de la misma. Estudiaron la actividad puzolánica mediante el ensayo de Chapelle, concluyendo que la cristalinidad de la Caolinita influye en la actividad puzolánica de la metacaolinita obtenida: cuando se utiliza Caolinita con elevada cristalinidad, se obtiene metacaolinita menos reactiva. El estudio de las arcillas griegas fue ampliado (Badogiannis E. et al., 2005 a), incorporando el análisis de la temperatura de calcinación (550 a 950 °C durante 3 horas) y la medición de la resistencia a la compresión en mezclas de cemento y arcilla

calcinada. Determinaron que para porcentajes medios de Caolinita (40 a 50%) y bajos de Alúmina (5 a 7%), la temperatura de calcinación que garantizaba la mejor actividad puzolánica era 650 °C, mientras que para mayores contenidos de Alúmina (22%), 850°C. También analizaron el porcentaje de reemplazo de arcilla calcinada (0, 10 y 20%), obteniendo como valor óptimo el 20 % (Badogiannis et al., 2005 b).

ESLOVAQUIA

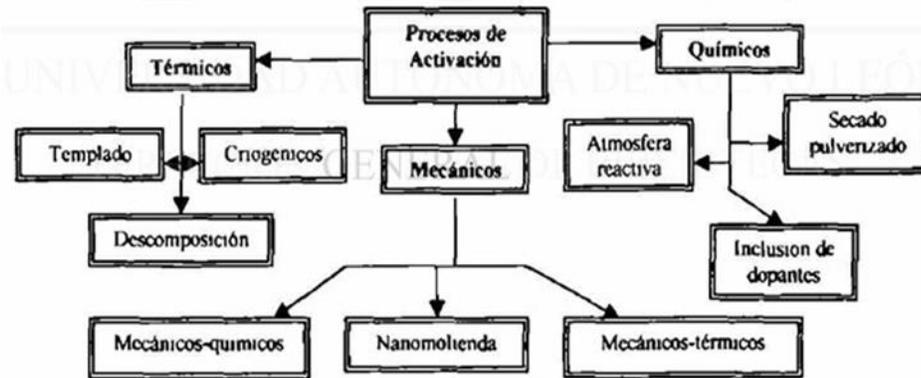
Janotka I. et al. (2010), estudiaron la actividad puzolánica de arcillas caoliníticas calcinadas de Eslovaquia, con contenido medio de metacaolinita (30 a 40%). Determinaron que la mayor actividad puzolánica medida mediante resistencia a la compresión en pastas de cemento, se correspondía con la muestra de mayor contenido de metacaolinita y mayor superficie específica.

Las características mineralógicas y estructurales de las arcillas dependen del proceso de formación sufrido, por lo que varían según la región. Diversos autores han estudiado las variables que influyen en la actividad puzolánica de las arcillas correspondientes a su país, coincidiendo en la importancia del porcentaje del mineral Caolinita, la temperatura de calcinación y el porcentaje de reemplazo en el cemento. No todos propusieron la cristalinidad de la Caolinita como una variable de estudio. Se considera interesante estudiar las arcillas argentinas como potenciales puzolanas, caracterizarlas y evaluar las variables a tener en cuenta en su utilización.

1.4.1.5 Procesos de activación en sólidos

Los procesos de activación buscan transferir a los sólidos propiedades especiales como catalizadores, adsorbentes o puzolanas. Los procesos más usados para activar a los sólidos y en especial las arcillas son el térmico, químico y mecánico.

Figura I-3: Proceso de activación en sólidos



Fuente: Carlos Jimenez (2016)

1.4.1.5.1. Procesos de activación térmica

Los procesos de activación térmicos se basan en el aumento de la reactividad del compuesto sólido debido a cambios de temperatura. Estos cambios de temperatura pueden producir cambios de fases en estructura cristalina o pérdidas de constituyentes volátiles, entre otros los procesos térmicos más utilizados se encuentran los siguientes:

➤ **Procesos Criogénicos**

Estos se basan en el aumento de la reactividad del sólido sometándolo a temperaturas extremadamente bajas, propiciando fragilidad en el sólido, el cual se fractura con facilidad creando defectos superficiales que resultan en la disminución del tamaño de partícula, haciendo que el sólido sea más reactivo.

➤ Proceso de templado del sólido (Quenching)

Este método se basa en el aumento de la reactividad del sólido mediante un cambio brusco en la temperatura. Esto se logra calentando el sólido a una temperatura alta para posteriormente enfriarlo rápidamente a temperatura baja y obtener el sólido reactivo.

El proceso logra que el sólido que tiene sus átomos en relativo movimiento, debido a las altas temperaturas, pase rápidamente a la temperatura más baja con una mayor imperfección en su enrejado cristalino comparado contra el sólido de partida. Esto sucede debido a que el sólido al calentarse y enfriarse rápidamente no permite el reacomodo de la estructura cristalina de la cual se partió, por lo tanto, el sólido queda en un estado meta estable de menor energía de activación, lo cual lo hace más reactivo

➤ Proceso de descomposición

Este método se basa en la activación in situ del sólido. Esto se logra a partir de la descomposición de un sólido que es calentado a la temperatura de descomposición de un compuesto gaseoso contenido en el mismo. El sólido acabado de formar tiene en su estructura defectos estructurales y superficiales que lo hacen reactivo comparado con el original.

1.4.1.5.2. Procesos de activación químicos

Los métodos químicos generan, a diferencia de los métodos físicos, defectos no estequiométricos, los cuales a su vez generan reactividad en dichos sólidos. A continuación, se presentan algunas formas químicas de activación de los sólidos.

➤ Activación en atmósfera reactiva

Este proceso de activación consiste en someter al sólido a una atmósfera reactiva líquida o gaseosa. Esta puede generar deficiencias o excesos de algún ion presente en el sólido generando defectos estequiométricos que hacen al sólido más reactivo. Este tipo de defectos lo presentan generalmente compuestos que tienen en su composición metales de transición.

➤ Método de inclusión de dopantes

En este método los cationes del retículo principal se sustituyen por cationes extraños (impurezas o dopantes) generalmente con un proceso de calentamiento, lo que trae como resultado la formación de defectos dependientes del estado de oxidación de la impureza o dopantes. Este método es muy usado en la industria cerámica para bajar la temperatura de sinterización de algunas cerámicas. En la industria del cemento se utiliza como dopante mineral de hierro para bajar la temperatura de formación de la alita y la belita los cuales son componentes fundamentales del cemento Portland.

➤ Secado pulverizado

Este método consiste en la incidencia de una dispersión acuosa (previamente pulverizada) sobre una cámara calentada a alta temperatura, esto hace que las gotas de dispersión en la cámara caliente se evaporen y se precipiten los granos de sólido con un tamaño de partícula menor y por lo tanto más reactivo. Es importante estudiar detalladamente los procesos de activación térmica y química, ya que estos servirán de base para explicar los procesos mecánicos de activación.

1.4.1.5.3. Procesos de activación mecánica

Con el desarrollo de los nuevos materiales y las nuevas tecnologías surge una nueva rama de la química llamada Mecano química. Esta se basa en la molienda como medio mecánico para activar químicamente el material, la cual puede ir desde cambios estructurales hasta descomposiciones químicas propias de las activaciones térmicas y químicas

La mecano química viene a sustituir los conceptos tradicionales de molienda, los cuales consideran que en la molienda solo se efectúan fenómenos físicos de reducción de tamaños de partícula. En cambio, los conceptos mecano químicos vislumbran a los molinos como reactores, en donde se puede llevar a cabo reacciones en estado sólido, así como descomposiciones y cambios en estructuras cristalinas.

Otro concepto importante de la Mecano química es el de llevar a los sólidos a tamaños de partículas del orden de nanómetros y que éstos pueden reaccionar en estado sólido,

en menor tiempo y a más baja temperatura sin importar su estructura cristalina. Como es de suponer, en este tipo de activación no existe una clasificación definida, debido a que los fenómenos que ocurren aquí caen dentro de los fenómenos de activación térmicos y químicos, o la combinación de ellos. El único concepto propio que se maneja son los de tamaños de partículas y distribución de la misma. Por lo tanto, la activación mecánica depende solamente de las características propias del material, así como del tipo de molino que se utilice, incluyendo sus condiciones de operación.

De tal forma, este tipo de activación se puede clasificar tomando en cuenta los principios de operación de los molinos y características intrínsecas del material en

- Activación mecánica- química
- Activación mecánica- térmica
- Activación por nano molienda
- Activación mecánica- química

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

El presente capítulo tiene como fin mostrar la metodología seguida en la evaluación de la activación térmica de materiales arcillosos mediante calcinación de la misma. Esto tiene como fin determinar si estos materiales se pueden activar térmicamente y ser utilizadas como puzolanas, además de determinar cualitativamente los parámetros que podrían afectar a la actividad puzolánica.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En el presente trabajo de investigación se utiliza como materia prima arcilla de las concesiones mineras pertenecientes a SOBOCE S.A. Ubicado en la carretera El Puente-Chinchilla, denominado ATE (actividad transitoria especial)-El Salto a 30 min. De planta de cemento El Puente.

Se estima una reserva de arcilla de 5670000 t aproximadamente; la apariencia física de la arcilla es color amarillento, de fácil molturación; las canteras cuentan con un acceso libre para poder extraer con facilidad y no necesita voladura.

Tabla II-1: Composición química de arcilla El Salto

Compuesto	Porcentaje(%)
SiO ₂	58,17
Al ₂ O ₃	19,15
Fe ₂ O ₃	6,36
CaO	2,78
MgO	0,94
SO ₃	1,14

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-1: Entrada a contera El Salto de El Puente



Fuente: Elaboración propia cantera SOBOCE SA., 2018.

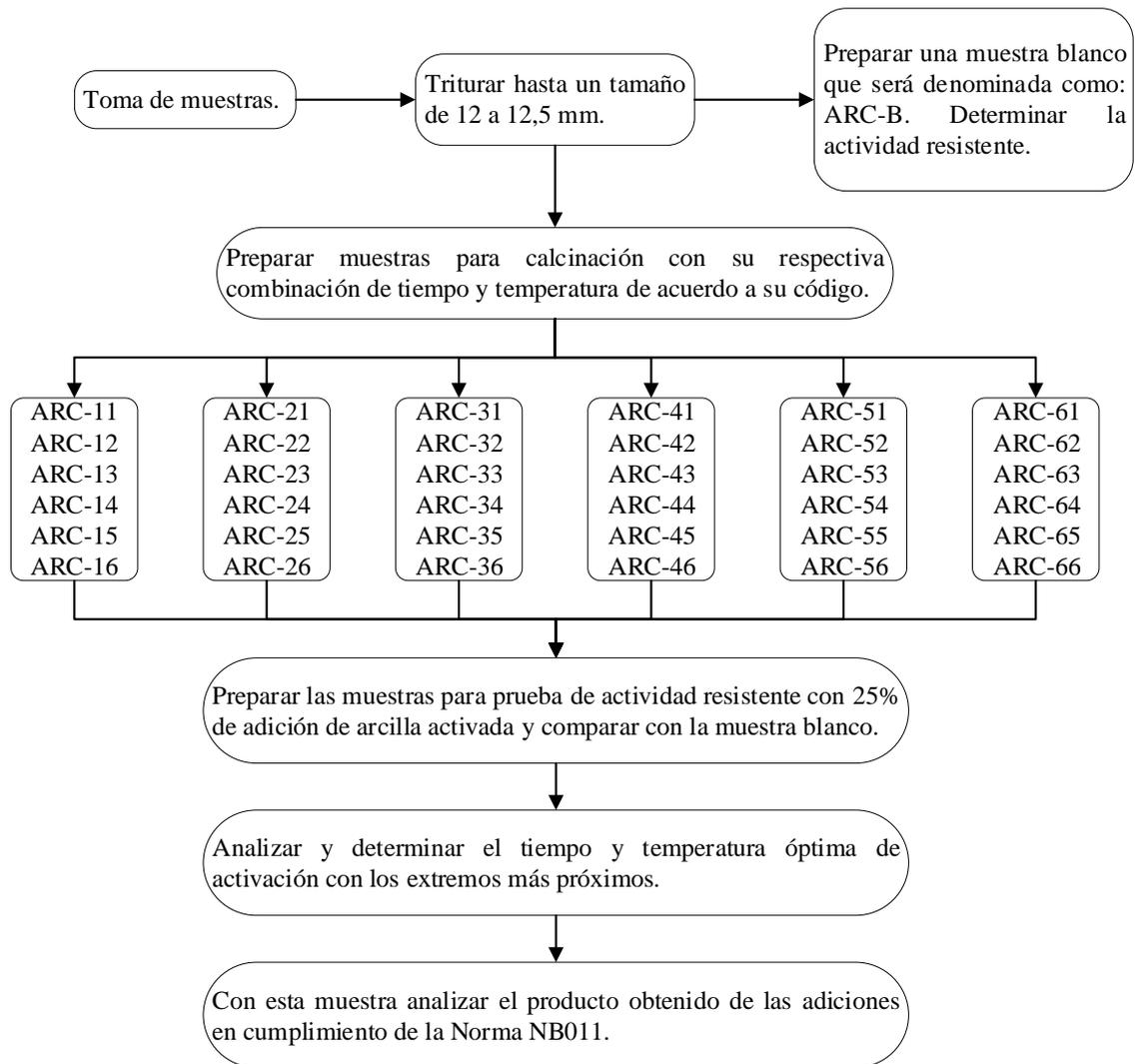
Fotografía II-2: Depósitos de arcilla “El Salto”



Fuente: Elaboración propia cantera SOBOCE SA., 2018.

2.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Figura II-1: Diagrama de flujo para activar arcilla



Fuente: Elaboración propia, 2018.

2.2.1 DESCRIPCIÓN DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La toma y preparación de muestras se realiza de acuerdo al **ANEXO 19** donde indica paso por paso como se preparó. Desde la extracción de canteras hasta obtener el producto final para luego analizarlo de acuerdo a la norma **NB011 (ANEXO 1)**.

El nuevo cemento se preparó de acuerdo a la siguiente dosificación.

Tabla II-2: DOSIFICACION DE MATERIALES PARA EL NUEVO CEMENTO

Compuesto	Cantidad en porcentaje (%)
Clinker	69
Yeso	6
Arcilla calcinada	25

Fuente: Elaboración propia, 2018.

2.3 PRUEBAS O MÉTODOS DESARROLLADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN

2.3.1 Pruebas físicas

2.3.1.1 Método de determinación de la fluidez

La prueba de fluidez se realiza de acuerdo a la norma boliviana NB 473 Cemento (**ANEXO 2**): Determinación de la fluidez.

Ajustar la cantidad de agua tal que produzca una fluidez de 110 +/- 5.

2.3.1.2 Método de determinación de la resistencia a compresión

Este método fue realizado de acuerdo a los pasos indicados en la norma boliviana NB-470 Cemento (**ANEXO 3**): Determinación de la resistencia a la compresión.

Mantener la temperatura de la cámara húmeda entre 20 °C a 23°C y humedad relativa mayor a 90%.

Efectuar el primer lavado de arena del río Mariposas empleando abundante agua hasta eliminación de impurezas.

Pesar la muestra de cemento y arenas, realizar la mezcla como indica la NB 470. Efectuar la rotura del mortero haciendo uso de una prensa hidráulica calibrada. Deben las pruebas estar dentro los rangos de la norma interna caso contrario dar parte inmediatamente a las instancias superiores para que se efectúen las correcciones necesarias.

2.3.1.3 Determinación de las superficies específicas Blaine

Se realizó la prueba de superficie específica Blaine de acuerdo a la norma boliviana NB 472 (ANEXO 5).

2.3.1.4 Determinación del retenido en malla 325

Se realizó el ensayo de sacar el factor de las mallas con frecuencia semanal y el retenido del molino cada tres horas cuando éste esté funcionando.

Dispone del siguiente material y equipos de acuerdo a la norma ASTM.

Dispositivo para la presión de agua provista de embolo, atomizador, tobera y manómetro en Psi.

Tamiz con malla 325 calibrado, teniendo como base un cemento patrón 114 Q o 46h. Balanza analítica.

Se pesa 2.00 gramos de muestra en la balanza analítica.

Se coloca la muestra pesada dentro del tamiz de la malla 325.

Se coloca el dispositivo para que el chorro de agua alcance una presión de 10 Psi.

Se pone en contacto el tamiz conteniendo la muestra con el chorro de agua a la presión indicada, agitando constantemente durante 1 minuto.

Se retira luego el tamiz y lavar las paredes con un chorro de agua destilada mediante una pizeta. Seca la muestra sobre una plancha a temperatura regular.

Se pesa la muestra retenida y calcular el % de retenido empleando el factor de corrección de la malla determinado al calibrar.

2.3.1.5 Determinación de la consistencia normal

La determinación de la consistencia normal se realizó cumpliendo estrictamente todos los pasos de la norma boliviana **NB 062 (ANEXO 4)**, variando únicamente la cantidad de cemento.

2.3.1.6 Determinación del tiempo de fraguado

La determinación para el tiempo de fraguado se realizó cumpliendo estrictamente todos los pasos de la norma boliviana **NB 063 (ANEXO 5)**.

2.3.1.7 Determinación del índice de actividad

La actividad puzolánica responde a un principio general. Dicho principio se basa en que la sílice y la alúmina, como componentes ácidos de materiales puzolánicos, reaccionan con la cal a condición de que sus uniones en dichos materiales sean lábiles. No pueden considerarse aparte las acciones de la sílice y de la alúmina, ya que la presencia de esta última favorece en gran medida la acción puzolánica, directamente por sí e indirectamente al implicar su presencia un mayor contenido de álcalis, que se fijan parcialmente en los nuevos productos resultantes de la reacción puzolánica, los cuales tiene el carácter de pseudogeles. El óxido de hierro se supone que actúa como alúmina, pero de una forma más atenuada y lenta. Las estructuras zeolíticas se atacan por la cal más rápidamente que las verdaderas puzolanas totalmente vítreas y la fijan en mayor cantidad que la correspondiente a un intercambio catiónico con álcalis, lo cual indica una ruptura de la estructura reticular y de los enlaces químicos, lo que da lugar a una participación de la sílice y de la alúmina, que es más fácil con las estructuras zeolíticas que en las vítreas. En efecto, por lo que se refiere a las puzolanas de origen mineral, su actividad se ha atribuido tanto a los constituyentes amorfos como a los cristalinos, y en particular a los de naturaleza zeolítica. La gran reactividad de las puzolanas tanto naturales como artificiales, depende además de su composición química y mineralógica, y de la cantidad de fase amorfa o vítrea, de su gran superficie reactiva, de la presencia de álcalis, alcalinotérreos y del grado de condensación de

grupos como SiO_4 , AlO_4 . Algo análogo sucede con las puzolanas de origen orgánico, dado que otros materiales de similar origen y composición son inactivos frente a la cal, la actividad de estas puzolanas de origen orgánico no es sólo cuestión de contenido en sílice hidratada, sino también del estado físico de división de la misma. Lo prueba, por una parte, el hecho de que las activas poseen una estructura natural porosa con una gran superficie específica interna, y por otra, la circunstancia de que ciertos ópalos y basaltos no activos cobran actividad cuando se molturan a gran finura y se someten a una gran lixiviación con ácido clorhídrico concentrado (10 normal). La sílice hidratada reactiva, componente eficaz de las puzolanas de origen orgánico, procede en su mayor parte de esqueletos de infusorios radiolarios y de algas marinas diatomeas, aparte de los citados ópalos y geiseritas. Pero no todas las puzolanas de esta procedencia, altas en sílice, tienen la misma actividad. En algunas de ellas se incrementa también someténdolas a calcinación, como sucede con el “moler” danés, con la “gaize” francesa del Valle de Mosa y con las “tierras blancas” italianas del norte del Lacio, muy ligeras y porosas, cuyo análisis microscopio revela cuarzo, mica y feldespato más o menos alterados, en una matriz amorfa de gel de sílice.

La determinación del Índice de Actividad Puzolánica con cemento se llevó a cabo aplicando la Norma ASTM C311. Se elaboraron cubos de 5cm de lado, con Cemento Portland ordinario y arena. Para la evaluación del índice de actividad puzolánica, la norma ASTM C618 precisa como valor mínimo un índice resistente igual o superior al 75% a 28 días para considerar un material como puzolana.

Moldear las probetas de la mezcla de control y de la mezcla de ensayo de acuerdo con el Método de Ensayo C 109. El cemento Portland usado en el ensayo del Índice de Actividad Resistente debe cumplir con los requerimientos de la Especificación C 150, con una resistencia mínima de 35 MPa a los 28 días y con un contenido de álcalis totales ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$) $0.8\% \leq 0.5\%$ En la mezcla de ensayo, reemplazar el 20 % del peso de la cantidad de cemento usado en la mezcla de control por el mismo peso de la muestra de ensayo. Hacer amasadas de seis cubos de la siguiente manera:

Mezcla de control:

740 gr. de cemento Portland

2035 gr. de arena normalizada graduada 358 ml. de agua

Mezcla de ensayo:

Se pesa 1600 gr. de cemento portland más 400 gr. de la muestra de ensayo, se somete a 30 minutos de molienda y se hace la siguiente mezcla de ensayo:

592 gr. de cemento Portland 148 gr. de la muestra de ensayo

2035 gr. de arena normalizada graduada ml. de agua requeridos para un flujo de ± 5 de la mezcla de control

2.3.2. Pruebas químicas

2.3.2.1 Método de determinación de pérdida por fuego

1. La determinación de la pérdida por fuego o por fusión consiste en:
2. Efectuar una pesada por separado de 1 gramo de muestra en crisol vacío, previamente calcinado, enfriado y tarado.
3. Introducir a la mufla a la temperatura de $950 \pm 50^\circ\text{C}$ durante 20 min
4. Efectuar el enfriado en el desecador.
5. Levantar el crisol con una pinza para evitar errores y llevar a la balanza.
6. Realizar el cálculo por diferencia de peso.
7. El cálculo se lo realiza de la siguiente manera:

(Peso inicial de la muestra – peso final de la muestra) *100= Perdida por calcinación.

Dónde:

Peso inicial de la muestra= muestra no calcinada

Peso final de la muestra= muestra después de la calcinación

2.3.2.2 Determinación de residuo insoluble en cementos (NB 061) (ANEXO11)

En este método, el residuo insoluble del cemento hidráulico es determinado a través de la digestión de una muestra de cemento en HCl, una posterior filtración y una nueva digestión con NaOH. El residuo resultante es calcinado y pesado.

Cuando se emplea este método en cementos mezclados, la muestra se considera totalmente descompuesta, cuando todo el Clinker del cemento ha sido completamente disuelto.

PROCEDIMIENTO

1. Pesar 1.000 g \pm 0.0001 g de muestra y colocar en un vaso de 400 ml
2. Agregar 25 ml de agua destilada fría y dispersar con ayuda de una varilla de vidrio.
3. Agregar 10 ml de HCl (1:1), agitar la muestra con movimientos circulares suaves.
4. Diluir la muestra con agua hasta 10 ml y llevar a una estufa hasta temperatura cercana a la ebullición, manteniendo así por 20 min.
5. Filtrar la solución en caliente a través de un papel filtro de textura media (#2), enjuagar repetidas veces el vaso, el papel y el residuo con agua caliente asegurándose de que no existan residuos en la varilla y el vaso original (el filtrado se guarda para la determinación de SO₃ si se requiere).
6. Luego colocar el filtro que contiene el residuo nuevamente en el vaso de 400 ml y con la ayuda de una varilla triturar el papel filtro.
7. Adicionar 10 ml de solución de NaOH de 100g/litro (10 %) y completar hasta 100 con agua caliente y llevar a una estufa por 20 min. Hasta temperatura próxima a la ebullición (durante la digestión, es conveniente agitar la mezcla de vez en cuando y macerar el papel filtro).
8. Adicionar unas gotas (3 ó 4) del indicador rojo de metilo.
9. Acidificar la solución agregando gota a gota de HCl (1:1) hasta cambio de color (amarillo a rojo), agregar unas 5 gotas en exceso de HCl (1:1).

10. Filtrar en caliente a través de un papel filtro de textura media (#2) y lavar con abundante agua caliente repetidas veces hasta obtener un residuo sin color.
11. Pesar un crisol de platino o porcelana vacío y registrarlo (Peso crisol).
12. Transferir el residuo y papel filtro al crisol de porcelana, doblar el filtro y secar en una estufa hasta eliminar la humedad.

2.4 DISEÑO FACTORIAL

Los diseños factoriales, son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una respuesta donde es necesario conocer que variables influyen significativamente en el sistema y como afectan. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando. Primero se recogen en una lista todas las variables que podrían influir en la respuesta. A continuación, se realizan una serie de experimentos en las cuales se fijan las variables que no interesa modificar, se anota el valor de las que no se puede controlar, y se varían las restantes. Finalmente, se obtiene la información comparando la variación de las respuestas entre experimentos.

En el diseño factorial se realizan todas las combinaciones posibles de los niveles de varios factores que intervienen en el experimento.

Los experimentos a realizarse incluyen todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores.

Factores o variables. Los fenómenos que potencialmente causan variación, y que son controlados por el experimentador, se denominan factores o variables. En este trabajo tenemos 2 fenómenos que presentan variación: El tiempo y temperatura. Por tanto, la variable respuesta será la resistencia a la compresión.

De acuerdo a esta bibliografía se tomó en cuenta para fijar los parámetros para los ensayos de este trabajo. Donde la temperatura estará fijada en un rango de 400 a 900°C. Y el tiempo estará entre 10 a 120 min.

Tabla II-3: Factores de nivel

Factores	Nivel					
	Temperatura de calcineración (°C)	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
400		500	600	700	800	900
Tiempo de calcineración (min)	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆
	10	30	45	60	90	120

Fuente: Elaboración propia, 2018.

El diseño factorial será diseñado de acuerdo al modelo:

$$6^k$$

$$6^2$$

Dónde:

6 = niveles

2 = factores o variables

Entonces se tendrá 36 combinaciones:

Tabla II-4: Combinaciones

Temperatura de calcinación (°C)		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
		400	500	600	700	800	900
Tiempo de calcinación (min)							
b ₁	10	a ₁ b ₁	a ₂ b ₁	a ₃ b ₁	a ₄ b ₁	a ₅ b ₁	a ₆ b ₁
b ₂	30	a ₁ b ₂	a ₂ b ₂	a ₃ b ₂	a ₄ b ₂	a ₅ b ₂	a ₆ b ₂
b ₃	45	a ₁ b ₃	a ₂ b ₃	a ₃ b ₃	a ₄ b ₃	a ₅ b ₃	a ₆ b ₃
b ₄	60	a ₁ b ₄	a ₂ b ₄	a ₃ b ₄	a ₄ b ₄	a ₅ b ₄	a ₆ b ₄
b ₅	90	a ₁ b ₅	a ₂ b ₅	a ₃ b ₅	a ₄ b ₅	a ₅ b ₅	a ₆ b ₅
b ₆	120	a ₁ b ₆	a ₂ b ₆	a ₃ b ₆	a ₄ b ₆	a ₅ b ₆	a ₆ b ₆

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla II-5: Combinación numérica Temperatura/Tiempo

Temperatura de calcinación (°C)		a1	a2	a3	a4	a5	a6
		400	500	600	700	800	900
Tiempo de calcinación (min)							
b1	10	400/10	500/10	600/10	700/10	800/10	900/10
b2	30	400/30	500/30	600/30	700/30	800/30	900/30
b3	45	400/45	500/45	600/45	700/45	800/45	900/45
b4	60	400/60	500/60	600/60	700/60	800/60	900/60
b5	90	400/90	500/90	600/90	700/90	800/90	900/90
b6	120	400/120	500/120	600/120	700/120	800/120	900/120

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla II-6: Variables Repuesta

Temperatura de calcinación (°C)		Tiempo de calcinación (min)					
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
		400	500	600	700	800	900
b₁	10	ARC11	ARC21	ARC31	ARC41	ARC51	ARC61
b₂	30	ARC12	ARC22	ARC32	ARC42	ARC52	ARC62
b₃	45	ARC13	ARC23	ARC33	ARC43	ARC53	ARC63
b₄	60	ARC14	ARC24	ARC34	ARC44	ARC54	ARC64
b₅	90	ARC15	ARC25	ARC35	ARC45	ARC55	ARC65
b₆	120	ARC16	ARC26	ARC36	ARC46	ARC56	ARC66

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Nota: Para las repeticiones número 2 y número 3 se tomarán en cuenta las muestras más representativas de acuerdo a los resultados de resistencia a la compresión de la primera repetición para realizar como mínimo dos repeticiones a cada muestra para tener más veracidad entre los resultados.

2.5 PROCESO DE OBTENCIÓN DE CEMENTO IP-30 CON ADICIÓN DE ARCILLA ACTIVADA

El proceso de obtención del cemento IP-30 se detalla a continuación:

2.5.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ARCILLA.

Se realizó el muestreo en cantera El Salto y se optó por un método de toma de muestras aleatoriamente, como se muestra en la siguiente figura:

Fotografía II-3: Puntos de muestreo



Fuente: Elaboración propia, cantera El Salto Cemento El puente 2018.

Donde se caracterizó químicamente la arcilla en los trece puntos y se cuantificó las toneladas aproximadas de la misma.

Tabla II-7: Composición química de arcilla

Compuesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO₂	56,7	55,86	55,86	54,69	55,65	56,41	56,99	56,99	56,97	56,97	56,31	55,18	57,92
Al₂O₃	19,24	19,27	19,27	19,09	19,54	19,21	21,49	21,49	20,08	20,08	19,97	19,72	20,43
Fe₂O₃	7,27	7,05	7,05	7,28	7,28	7,09	6,19	6,19	7,41	7,41	8,29	7,19	8,2
CaO	1,39	1,28	1,28	1,43	1,36	1,7	0,84	0,84	0,7	0,7	0,66	1,52	0,46
MgO	1,44	1,34	1,34	1,4	1,43	1,49	1,36	1,36	1,34	1,34	1,43	1,35	1,43
Mn₂O₃	0,08	0,04	0,04	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05	0,03	0,13	0,06
TiO₂	0,81	0,8	0,8	0,79	0,81	0,79	0,84	0,84	0,83	0,83	0,86	0,79	0,87
P₂O₅	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,12	0,1	0,11
K₂O	3,64	3,61	3,61	3,64	3,66	3,64	3,89	3,89	3,74	3,74	3,59	3,65	3,75
Na₂O	0,91	0,96	0,96	0,85	0,89	0,9	0,95	0,95	0,99	0,99	0,98	0,91	1,01
SO₃	0,21	0,53	0,53	0,33	0,13	0,18	0,21	0,21	0,29	0,29	0,1	0,77	0,1

Fuente: Resultados en perla cemento Yura SA. Perú de muestras de arcilla de cantera El Salto cemento El Punte, 2018.

La cantidad de arcilla en los bancos de El Salto son aproximadamente 5670000 toneladas dato proporcionado por Esmical,

(ANEXO12).

2.5.2 DETERMINACIÓN DE MUESTRA DE ARCILLA A UTILIZAR PARA LA CALCINACIÓN

Para tener un proceso de activación de arcilla homogéneo, se tuvo que hacer una mezcla de arcillas de los diferentes puntos tomados como muestra de acuerdo al análisis químico obtenido se puede observar que la diferencia de la composición química de un punto a otro es mínima.

Fotografía II-4: Depósitos de arcilla premezclada en planta cemento El Puente



Fuente: Elaboración propia, planta cemento El puente 2018.

Luego se llevó a proceso de chancado alcanzando una granulometría de 12.5 mm., de la partícula más grande, también se pudo corroborar este dato con un tamiz de malla 12.5 en laboratorio.

Fotografía II-5: Granulometría de arcilla



Fuente: Elaboración propia, laboratorio de cemento El puente 2018.

2.5.3 PREPARACIÓN DE EQUIPOS PARA CALCINACIÓN.

Para realizar la calcinación se diseñó unos recipientes de acero inoxidable que sean resistentes a altas temperaturas.

Fotografía II-6: Recipientes de acero inoxidable



Fuente: Elaboración propia, 2018.

2.5.4 CALCINACIÓN DE ARCILLA.

Se preparó una mufla específicamente para la calcinación de marca FisherScientific con regulador de temperatura para poder controlarla; para controlar el tiempo se optó por un cronómetro con alarma manual de la marca Casio.

Antes de empezar con la primera prueba a calcinar se reguló la temperatura de la mufla a 400°C durante 10 min.

Calcinación de arcilla.

De acuerdo a la programación de muestras y combinaciones de tiempo con temperatura de calcinación.

Fotografía II-7: Recipientes de acero inoxidable



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Se calcinó de acuerdo a su código y para no alterar el calor de la mufla primero se calcinaron las muestras de 400°C y así sucesivamente hasta llegar a 900°C.

Se empezó con la calcinación de arcilla a 400°C y 10 min se continuó calcinando todas las muestras a diferentes tiempos manteniendo la temperatura para la eficiencia de la mufla.

De la misma manera se procedió con las demás muestras hasta finalizar.

En los recipientes se llenó un 80% de arcilla para ser calcinada:

Fotografía II-8: Recipientes con muestra de arcilla lista para calcinar



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-9: Arcilla calcinada a 400°C a distintos tiempos 10 min/30 min



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-10: Arcilla calcinada a 600°C



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-11: Arcilla calcinada a 600°C



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Cada muestra luego de ser calcinada fue etiquetada con su código correspondiente y almacenada hasta su molienda.

2.5.5. MOLIENDA.

Luego de calcinar las muestras de arcilla se lleva a molienda, donde se pulveriza junto con cemento portland de acuerdo a una dosificación establecida como uno de los objetivos principales de este proyecto.

De acuerdo con la dosificación definida los porcentajes de materias primas son:

Tabla II-8: Dosificación de materias primas

Nombre	Porcentaje (%)
Clinker	69%
Yeso	6%
Arcilla calcinada	25%
TOTAL	100%

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Se lleva a molienda por 30 min. El molino que se utiliza es un molino de bolas tradicional con una velocidad de 44 RPM.

Luego de retirar el cemento del molino se envasa y etiqueta respecto a su código.

Figura II-2: Dimensiones de molino de bolas

Fuente: Elaboración propia, 2018.

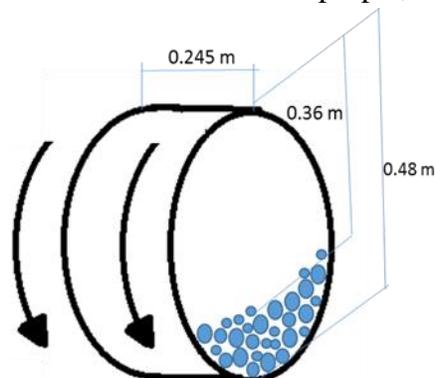


Tabla II-9: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOLINO DE BOLAS

Tensión	380 V	Diámetro interno	0.245 m
Intensidad	5 A	Velocidad máxima	61 RPM
Potencia	1,5 Kw	Peso total de bolas	36 Kg
Velocidad	44 RPM	Altura	0.48 m
Carga máxima de llenado	85%		
Carga mínima de llenado	30%		

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla II-10: CONFIGURACIÓN DE BOLAS PARA EL MOLINO

Diámetro de bolas (mm)	Peso de bolas (Kg)
50	1,6
40	5,8
30	8,7
20	12,3
18	7,9

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-12: Molino de bolas



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-13: Molino de bolas



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-14: Molino de Bolas



Fuente: Elaboración propia, 2018.

2.5.6 PREPARACIÓN DE MORTEROS

Para la preparación de morteros se sigue la norma boliviana NB 470 (**ANEXO 3**)

A continuación, se detallan los pasos de preparación:

- Pesar 2035g de arena normalizada
- Pesar 740g de cemento
- Pesar cantidad de agua requerida para el ensayo
- Poner todos los componentes en la mezcladora. Se utiliza una mezcladora automática donde está programada el tiempo y la rapidez de mezcla, una vez que el tiempo de mezclado termine se pasa la mezcla a una mesa de fluidez para corroborar que la masa de agua es suficiente. De ser positivo se continúa con la preparación de morteros. Para ello previamente se alistan los moldes limpios y cubiertos de aceite de linaza mezclado con diésel para que los morteros se retiren fácilmente.

Especificaciones de la mezcladora:

Fotografía II-15: Especificaciones de fábrica de mezcladora



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla II-11: Especificaciones de fábrica de mezcladora

Tensión	240 V
Intensidad	5 A
Frecuencia	50Hz
Fases	1

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-16: Preparación de morteros



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-17: Preparación de morteros



Fuente: Elaboración propia, 2018.

2.5.7 ROTURA DE MORTEROS

La rotura de mortero es realizada de acuerdo a la norma **NB011 (ANEXO 1)**, donde indica que para un cemento tipo IP30, las roturas de los morteros deben darse en las siguientes edades 1, 3, 7 y 28 días.

Este ensayo se realiza en una prensa automática en el laboratorio físico de cemento El Puente; en el siguiente capítulo se describirán los resultados de todas las muestras.

Fotografía II-18: Especificaciones de fábrica de prensa



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla II-12: Especificaciones de fábrica de prensa

Modelo	CIB-200-MD2/W
Nº de fábrica	132550
Año	2011
Tensión	380 V
Potencia	2Kw
Frecuencia	50/60 Hz
Fases	3
Neutro	Sí
Tierra	Sí

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-19: Mortero

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Los 3 mejores resultados que se obtengan en resistencia a la compresión medida en MPa se les realizará el análisis químico y físico requerido en norma NB011 como requisitos generales del cemento tipo IP30.

Fotografía II-20: Mesa de fluidez, consistencia normal.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-21: Mesa de fluidez, consistencia normal.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

2.5.8 Análisis químico y físico de la mejor muestra

Los análisis químicos que se realizaron a la mejor muestra se tomó como base la norma **NB011 (ANEXO 1)** la cual indica realizar los análisis de:

- Análisis químico-composición química

Fotografía II-22: PASTILLAS PARA SER LEIDAS EN FLOURESCENCIA DE RAYOS X



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Fotografía II-23: LECTURA DE COMPOSICION QUIMICA EN FLOURESCENCIA DE RAYOS X



Fuente: Elaboración propia, 2018.

- Pérdida por calcinación o pérdida por fuego % máximo
- Residuo insoluble % máximo
- Trióxido de azufre % máximo
- Oxido de magnesio % máximo

Todas especificaciones químicas se las realizo paso a paso como indica en la norma boliviana **NB061 (ANEXO 11)**.

Los análisis físicos realizados a la mejor muestra de cemento se tomaron como base la norma **NB011 (ANEXO 1)** la cual indica realizar los análisis de:

- Resistencia a la compresión norma **NB 470 (ANEXO 3)**
- Tiempo inicial y final de fraguado, norma **NB 063 (ANEXO 4)**
- Superficie específica, Blaine, norma **NB 472(ANEXO 6)**

Fotografía II-24: PERMEABILIMETRO HUMBOLDT



Fuente: Elaboración propia, 2018.

- Retenido en mallas: 325 y 200

Fotografía II-25: MALLAS 325 Y 200



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Estas especificaciones físicas se las realizo paso a paso de acuerdo a cada norma según el ensayo que corresponde.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ANALISIS DE LA MATERIA PRIMA

3.1.1 PRUEBAS FISICAS

3.1.1.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión de acuerdo a la norma **NB 470 (ANEXO III)** utilizando el 25% de arcilla sin calcinar fue denominada como la muestra blanco **ARC-B**, la cual la utilizamos para comparar con las demás muestras.

Tabla III-1: Resultado de arcilla sin calcinar

ARC-B lectura de resistencia a la compresión en MP			
1 Días	3 Días	7 Días	28 Días
11,69	20,48	23,11	26,19
Resistencias a la compresión, en MPa para una categoría resistente media de 30 MPa (resultados según la norma NB470)			
1 Días	Mínima 3 Días	Mínima a 7 Días	Mínima a 28 Días
-	10	17	30

Fuente: Elaboración propia, 2018.

3.1.2 PRUEBAS QUIMICAS

3.1.2.1 COMPOSICION QUIMICA

Se realizó el análisis de composición química de los trece puntos según el muestreo que se utilizó (TABLA II-7), para tener una muestra más homogénea se mezcló la arcilla de los trece puntos y se volvió a hacer el análisis químico y esa fue la muestra utilizada para todos los ensayos de resistencia a la compresión.

Figura III-1: Composición química de arcilla sin calcinar

Sociedad Boliviana de Cemento S.A.



Informe de lectura química en fluorescencia de rayos X

Fecha de emisión del formato: 11/09/2013 Numero de revisión del formato: 03



Fecha:	20 de enero de 2018		Arcilla	
ESPECIFICACIONES QUIMICAS	SiO2	%	54,52	
	Al2O3	%	18,78	
	Fe2O3	%	7,12	
	CaO	%	1,95	
	MgO	%	1,32	
	Mn2O3	%	0,06	
	K2O	%	3,63	
	Na2O	%	0,88	
	SO3	%	0,40	

Aprobado por:	
Nombre	Policarpio Armata
Cargo	Supervisor de laboratorio
Fecha	21-01-2019
Firma	

Contacto Soboco
800-103-806
LÍNEA GRATUITA
www.soboco.com

Oficinas El Puente Comercialización: Av. Herman Siles Suazo, Barrio German Busch
Tel. (591-4) 6643580 / 6645041 • Fax (591-4) 6634233 • Casilla 159
Planta Industrial El Puente: Carretera al Norte Km. 110 • Tel. (591-4) 6133695 / 6133696 • Fax (591-4) 6133697
Planta Ready Mix: Av. Froilan Tejerina entre calles Pisagua y Padilla Tel: 6668545
Tarija - Bolivia




Fuente: Informe de datos químicos de laboratorio cemento El Puente, 2019.

Tabla III-2: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ARCILLA SIN CALCINAR

Compuesto	Porcentaje (%)
SiO ₂	54,52
Al ₂ O ₃	18,78
Fe ₂ O ₃	7,12
CaO	1,95
MgO	1,32
Mn ₂ O ₃	0,06
K ₂ O	3,63
Na ₂ O	0,88
SO ₃	0,40

Fuente: Informe de datos químicos de laboratorio cemento El Puente, 2019.

3.1.3 CUANTIFICACIÓN DE ARCILLA

La cantidad de arcilla en los bancos de El Salto son aproximadamente 5670000 toneladas dato proporcionado por Esmical (**ANEXO 12**).

Lo cual indica que la explotación de esta materia prima (arcilla) durará mínimamente 100 años ya que la producción de gasto de arcilla se estima 50000 toneladas por año de producción.

3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Para realizar el análisis se emplea el programa SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), el cual es un programa estadístico con la capacidad de trabajar con grandes bases de datos y una sencilla interface para la mayoría de los análisis.

Los datos introducidos al programa son las variables del diseño factorial independiente: Tiempo de calcinación, temperatura de calcinación y la variable respuesta o dependiente es la resistencia a la compresión a los 28 días

Tabla III-3: DATOS OBTENIDOS EN LA PRIMERA REPETICIÓN

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Resistencia(Mpa)
ARC-11	400	10	23,65
ARC-12	400	30	24,67
ARC-13	400	45	23,57
ARC-14	400	60	24,73
ARC-15	400	90	24,25
ARC-16	400	120	23,37
ARC-21	500	10	25,58
ARC-22	500	30	24,75
ARC-23	500	45	26,78
ARC-24	500	60	25,19
ARC-25	500	90	24,58
ARC-26	500	120	25,13
ARC-31	600	10	27,56
ARC-32	600	30	28,13
ARC-33	600	45	26,41
ARC-34	600	60	26,58
ARC-35	600	90	27,55
ARC-36	600	120	26,12
ARC-41	700	10	25,85
ARC-42	700	30	28,17
ARC-43	700	45	27,75
ARC-44	700	60	27,99
ARC-45	700	90	26,89
ARC-46	700	120	27,77
ARC-51	800	10	32,36
ARC-52	800	30	27,16
ARC-53	800	45	29,01
ARC-54	800	60	27,3
ARC-55	800	90	27,56
ARC-56	800	120	27,89
ARC-61	900	10	27,87
ARC-62	900	30	28,13
ARC-63	900	45	26,41

ARC-64	900	60	27,726
ARC-65	900	90	28,63
ARC-66	900	120	27,41

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla III-4: DATOS PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Resistencia(Mpa)
ARC-11	1	1	23,65
ARC-12	1	2	24,67
ARC-13	1	3	23,57
ARC-14	1	4	24,73
ARC-15	1	5	24,25
ARC-16	1	6	23,37
ARC-21	2	1	25,58
ARC-22	2	2	24,75
ARC-23	2	3	26,78
ARC-24	2	4	25,19
ARC-25	2	5	24,58
ARC-26	2	6	25,13
ARC-31	3	1	27,56
ARC-32	3	2	28,13
ARC-33	3	3	26,41
ARC-34	3	4	26,58
ARC-35	3	5	27,55
ARC-36	3	6	26,12
ARC-41	4	1	25,85
ARC-42	4	2	28,17
ARC-43	4	3	27,75
ARC-44	4	4	27,99
ARC-45	4	5	26,89
ARC-46	4	6	27,77
ARC-51	5	1	32,36
ARC-52	5	2	27,16
ARC-53	5	3	29,01

ARC-54	5	4	27,3
ARC-55	5	5	27,56
ARC-56	5	6	27,89
ARC-61	6	1	27,87
ARC-62	6	2	28,13
ARC-63	6	3	26,41
ARC-64	6	4	27,726
ARC-65	6	5	28,63
ARC-66	6	6	27,41

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla III-5: ANALISIS DE VARIANZA (ANOVA)

Variable dependiente: Resistencia a la compresión a 28 días.

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	f	sig
Regresión	70,737	2	35,368	24.626	0,000 ^a
Residual	47,396	33	1,436		
Total	118,132	35			

a = Variables predictoras tiempo y temperatura

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Cuando los factores son significativos se procede al cálculo del modelo matemático que represente la mejor experiencia realizada, para ello se hace una regresión lineal y se introducen las variables significativas y la interacción entre ellas, y el programa calcula los coeficientes para el modelo matemático, a continuación, se presenta estos datos:

Tabla III-6: COEFICIENTES^a

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes Tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95% para B		
	B	Error Típ.	Beta			Límite Inferior	Límite Superior	
1	(Constante)	24,37	0,612		39,795	0	23,124	25,616
	Tiempo	-0,147	0,117	-0,139	-1,261	0,216	-0,385	0,09
	Temperatura	0,807	0,117	0,761	6,904	0	0,569	1,045

Fuente: Elaboración propia, 2018.

De la **Tabla III-6** se obtiene que el modelo matemático sea el siguiente:

$$R = 24,37 - 0,147Tiempo + 0,807Temperatura$$

Este modelo matemático nos sirve para poder determinar las interacciones significativas de las variables para la resistencia a la compresión de cemento IP-30 con adición del 25% de arcilla calcinada.

A continuación, se muestra en la **Tabla III-7** la variable respuesta (Resistencia) experimental y la del Modelo.

Tabla III-7: RESULTADOS VARIABLE RESPUESTA

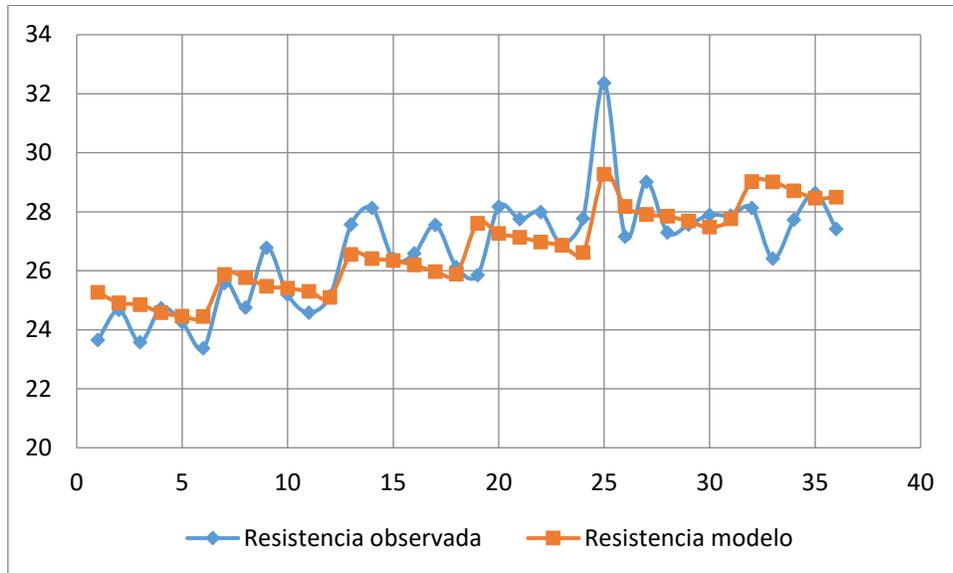
Muestra	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Resistencia(Mpa)	Modelo
ARC-11	1	1	23,65	25,26741
ARC-12	2	1	24,67	24,90841
ARC-13	3	1	23,57	24,84982
ARC-14	4	1	24,73	24,57356
ARC-15	5	1	24,25	24,46334
ARC-16	6	1	23,37	24,45149
ARC-21	1	2	25,58	25,86876
ARC-22	2	2	24,75	25,76135

ARC-23	3	2	26,78	25,47516
ARC-24	4	2	25,19	25,40617
ARC-25	5	2	24,58	25,29831
ARC-26	6	2	25,13	25,09648
ARC-31	1	3	27,56	26,55463
ARC-32	2	3	28,13	26,40854
ARC-33	3	3	26,41	26,34788
ARC-34	4	3	26,58	26,18975
ARC-35	5	3	27,55	25,97369
ARC-36	6	3	26,12	25,88663
ARC-41	1	4	25,85	27,61007
ARC-42	2	4	28,17	27,25771
ARC-43	3	4	27,75	27,13739
ARC-44	4	4	27,99	26,97691
ARC-45	5	4	26,89	26,86093
ARC-46	6	4	27,77	26,61105
ARC-51	1	5	32,36	29,27309
ARC-52	2	5	27,16	28,18457
ARC-53	3	5	29,01	27,9079
ARC-54	4	5	27,3	27,84545
ARC-55	5	5	27,56	27,67821
ARC-56	6	5	27,89	27,47757
ARC-61	1	6	27,87	27,75943
ARC-62	2	6	28,13	29,01596
ARC-63	3	6	26,41	29,0049
ARC-64	4	6	27,726	28,71328
ARC-65	5	6	28,63	28,45866
ARC-66	6	6	27,41	28,48814

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Se puede apreciar que los resultados obtenidos por el modelo son aproximados a los obtenidos en la parte experimental

Gráfica III-1: Rendimiento Experimental vs. Rendimiento Modelo



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la **Gráfica III-1** se puede observar mejor la varianza entre el Rendimiento Experimental obtenido y el Modelo aplicado, en la cual se observa que ambos siguen una ruta paralela, se puede concluir que los factores aplicados para el método dieron los resultados adecuados.

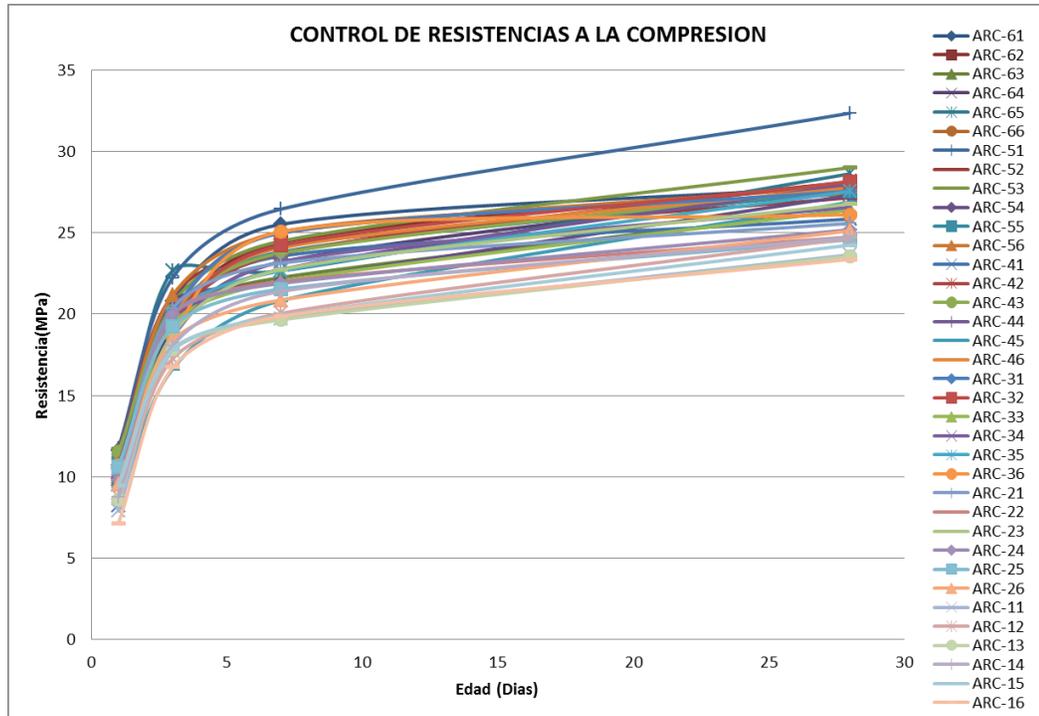
3.3 RESULTADOS DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN

Tabla III-8: RESULTADOS DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN- PRIMERA REPETICION

ARC-61				ARC-51				ARC-41			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
11,6	20,8	25,52	27,87	11,76	22,23	26,46	32,36	8,23	19,77	23,57	25,85
ARC-62				ARC-52				ARC-42			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
10,84	19,75	24,42	28,13	11,67	21,16	24,22	27,16	10,28	19,57	23,73	28,17
ARC-63				ARC-53				ARC-43			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
9,87	19,95	22,25	26,41	11,02	20,69	24,49	29,01	11,52	20,16	23,75	27,75
ARC-64				ARC-54				ARC-44			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
10,27	19	23,21	27,726	11,65	20,79	22,02	27,3	10,79	19,5	22,75	27,99
ARC-65				ARC-55				ARC-45			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
10,23	22,66	22,66	28,63	10,82	20,19	23,83	27,56	8,34	16,63	20,83	26,89
ARC-66				ARC-56				ARC-46			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
11,39	20,04	25,07	27,41	11,15	21,16	24,99	27,89	10,12	19,86	24,08	27,77
ARC-31				ARC-21				ARC-11			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
10,5	20,1	24,98	27,87	10,08	20,35	23,14	25,58	7,89	17,73	19,72	23,65
ARC-32				ARC-22				ARC-12			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
10,1	19,57	24,22	27,56	9,34	19,96	22	24,75	8,79	17,25	20,05	24,67
ARC-33				ARC-23				ARC-13			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
9,52	19,42	22,01	26,41	9,19	18,75	22,74	26,78	8,56	17,83	19,65	23,57
ARC-34				ARC-24				ARC-14			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
9,98	18,59	23,21	26,58	9,78	19,97	21,89	25,19	8,76	18,06	21,4	24,73
ARC-35				ARC-25				ARC-15			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
9,75	19,9	22,66	27,55	10,62	19,25	21,54	24,58	9,46	17,84	19,9	24,25
ARC-36				ARC-26				ARC-16			
1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días	1 Día	3 Días	7 días	28 días
10,72	18,56	25,07	26,12	9,53	18,36	20,87	25,13	7,12	16,72	19,86	23,37

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Gráfica III-2: CONTROL DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN CON ADICION DE ARCILLA AL 25% PRIMERA REPETICIÓN



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En las **Tabla III-8**, **Tabla III-9** y **Tabla III-10** se muestran los controles de resistencias en sus tres repeticiones a diferentes edades de cemento con adición del 25% de arcilla calcinada. En la **Tabla III-8** se muestran los datos de la primera repetición, en esta tabla se controla de acuerdo al nombre denominado a cada muestra y el tiempo 1, 3, 7, y 28 días donde claramente se puede observar tanto en la **Tabla III-8** como en la **Gráfica III-2** los resultados finales de resistencia a la compresión a 28 días los valores más altos y bajos, esta primera repetición sirvió como base para descartar algunas muestras para las siguientes repeticiones. Por tanto, para la segunda repetición se toma en cuenta las muestras de 700 a 900°C y con unos tiempos de 10, 30, 45, 60 min. Esta decisión se la toma de no repetir todas las muestras por un asesoramiento de Adrián Alujas (**ANEXO 10**) donde nos sugiere que de acuerdo y

basándose en la composición química de la arcilla la máxima activación térmica se daría entre esas temperaturas y tiempos, es así que se realiza la segunda repetición.

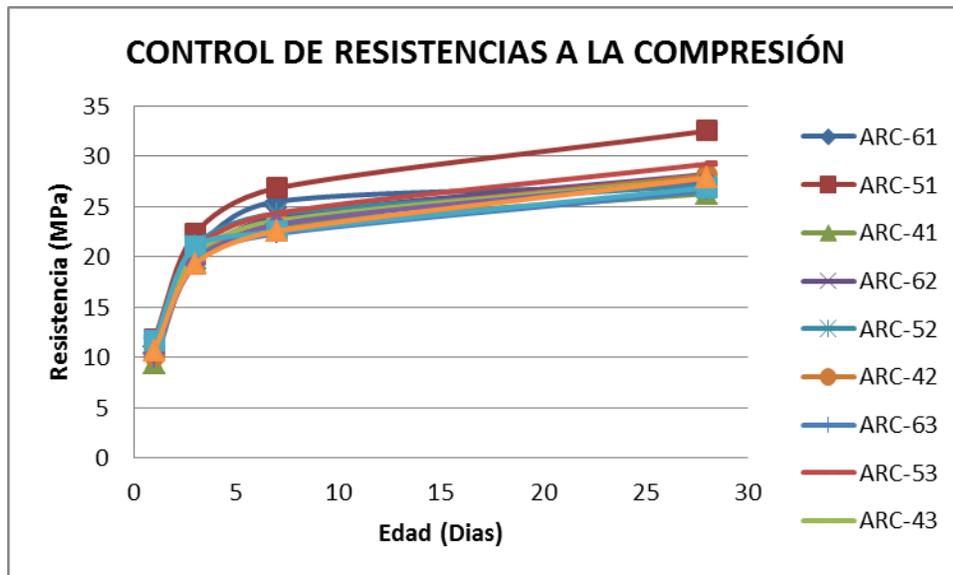
Estos datos también son corroborados por el análisis estadístico del diseño experimental, donde los picos más altos se repiten tres veces para tener la variable respuesta más certeros y adecuados tanto como en el modelo y experimentalmente.

Tabla III-9: RESULTADOS DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN-SEGUNDA REPETICION

ARC-61				ARC-51				ARC-41			
1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días
11,06	20,45	25,52	27,18	11,79	22,34	26,85	32,54	9,4	19,83	23,09	26,31
ARC-62				ARC-52				ARC-42			
1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días
10,87	19,45	23,97	28,24	11,13	21,16	24,32	27,15	10,21	19,54	23,46	28,12
ARC-63				ARC-53				ARC-43			
1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días
9,84	19,86	22,32	26,58	11,1	20,78	24,36	29,25	11,52	20,34	23,62	27,8
ARC-64				ARC-54				ARC-44			
1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días	1 Día	3 Dias	7 dias	28 días
10,36	19,24	23,23	27,69	11,62	21,1	22,54	26,89	10,71	19,3	22,57	27,87

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Gráfica III-3: CONTROL DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN CON ADICION DE ARCILLA AL 25% SEGUNDA REPETICIÓN



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la **Tabla III-9** y **Gráfica III-3** se muestran los datos de la segunda repetición donde los datos ya son más certeros ya que no tienen una diferencia de relevancia con la primera repetición.

Entonces de acuerdo a la norma **NB 011-Especificaciones del cemento (ANEXO 1)**. Para un cemento IP- 30 según norma la resistencia a una edad de 28 días debe ser mayor o igual a los 30 MPa.

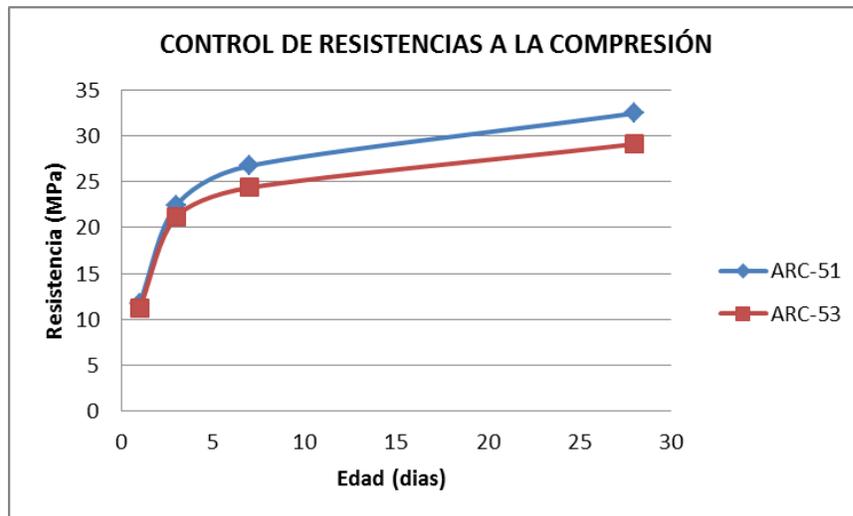
Una de las muestras sobre sale a las demás y cumple uno de los requisitos de la norma **NB011** es la muestra **ARC-51**, como también se puede observar a la muestra **ARC-53** con una resistencia considerable. Es así que realizamos la tercera repetición con estas dos muestras **ARC-51** y **ARC-53** para corroborar los datos y así tener la temperatura y tiempo de máxima activación.

**Tabla III-10: RESULTADOS DE RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN-
TERCERA REPETICION**

ARC-51			
1 Dia	3 Dias	7 dias	28 dias
11,7	22,41	26,74	32,46
ARC-53			
1 Dia	3 Dias	7 dias	28 dias
11,21	21,19	24,36	29,11

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Gráfica III-4: Control de resistencias a la compresión con adición de arcilla al 25% tercera repetición



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Llegando con estos resultados a las repuestas de los primeros objetivos planteados. Claramente se puede observar que la resistencia más alta en las tres repeticiones es: 32.36, 32.54 y 32.46 MPa. Pertenecientes a la muestra **ARC-51**, de acuerdo a la norma boliviana NB011 es aceptable, ya que el valor de la resistencia a compresión debe ser mayor o igual a 30 MPa a un tiempo de 28 días con este resultado se llega al objetivo principal de este proyecto determinando el tiempo y temperatura de activación de arcilla siendo estos parámetros **Tabla III-11**.

Tabla III-11: PARAMETROS ÓPTIMOS DE ACTIVACIÓN DE ARCILLA

MUESTRA	TIEMPO (Min)	TEMPERATURA(°C)
ARC-51	10	800

Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.4 VALORACION DE CALIDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO

Para la valoración de la calidad de producto obtenido se lo realiza de acuerdo a las especificaciones de la norma boliviana NB011, para cemento de tipo IP-30.

Se lo aplica a la muestra de cemento ARC-51 con el 25% de adición de arcilla calcinada.

3.3.1 ESPECIFICACIONES FISICAS PARA ARC-51

Las especificaciones físicas aplicadas al cemento con adición de arcilla según norma boliviana para cementos de tipo Ip-30 son los siguientes:

Tabla III-12: Categorías resistentes a los cementos (resultados según la norma NB470)

Categorías resistentes		Resistencias a la compresión, en MPa		
		Mínima a 3 días	Mínima a 7 días	Mínima a 28 días
Alta	40	17	25	40
Media	30	10	17	30
baja	25	-	15	25

Fuente: Norma boliviana NB011, 2019.

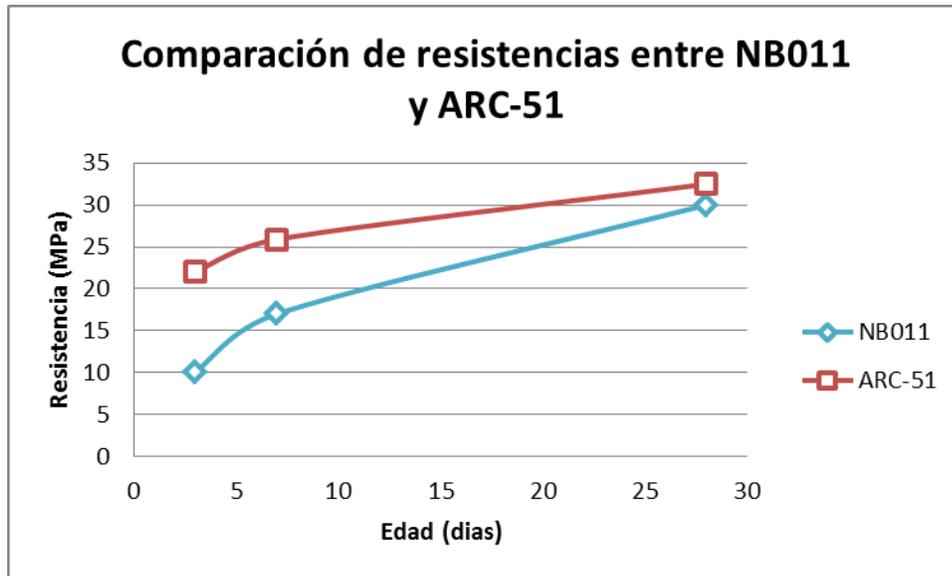
Tabla III-13: resistencias a la compresión del cemento ARC-51

Categorías resistentes		Resistencias a la compresión, en MPa		
		Mínima a 3 días	Mínima a 7 días	Mínima a 28 días
Media	30	22	25,9	32,5

Fuente: Elaboración propia, 2019.

NOTA: para realizar las especificaciones químicas y físicas del cemento ARC-51 y tener la máxima certeza de los resultados se vuelven a repetir los pasos desde molienda para tener resultados más concisos (**ANEXO 8**), como se puede observar en la **Tabla III 13** los resultados son diferentes a la **Tabla III-8, Tabla III-9 y Tabla III-10**, ya que para realizar dicha prueba física siempre habrá un error pequeño en la manipulación del operador al realizar esta prueba ya que se realiza de manera manual la compresión del mortero en el cubo al realizar los golpes de este, la cantidad de agua y otros factores que involucran pero este error debe ser mínimo y se puede apreciar en las tablas **Tabla III-8, Tabla III-9 Tabla III-10 y Tabla III-13** la resistencia a la compresión a los 28 días:32,36Mpa, 32,54Mpa, 32,46Mpa y 32,5Mpa.

Gráfica III-5: Comparación de los resultados de resistencia a la compresión entre la norma nb011 y el cemento arc-51



Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la **Gráfica III-5** se muestra una comparación de datos de resistencia a la compresión obtenidos a lo largo de la investigación y los datos obtenidos en la norma NB011, donde se puede observar que la mejor muestra obtenida sobrepasa los requisitos de resistencia a la compresión

Tabla III-14: Especificaciones físicas para cementos NB011

Categorías resistentes	Fraguado (según norma NB 063)		Superficie específica Blaine, en cm ² /g (según norma NB 472)
	Inicial, en min	Final, en h	
Alta	>45	< 7	>2800
Media y baja	>45	< 7	>2600

Fuente: Norma boliviana NB011, 2019.

Se utilizó la **Tabla III-14**, como guía así también para comparar los datos obtenidos, de los cuales se detallan en la siguiente tabla.

- Tiempo de fraguado

Tabla III-15: Especificaciones físicas de cemento ARC-51

Categorías resistentes	Fraguado (según norma NB 063)		Superficie específica Blaine, en cm ² /g (según norma NB 472)
	Inicial, en min	Final, en h	
Media y baja	183	4,50	4370

Fuente: Elaboración propia, 2019.

También se realizó peso específico y retenido en malla 200 y 325

Tabla III-16: Especificaciones físicas retenido en malla y peso específico

Peso específico (g/ml)	Residuo en malla(g)	
	Malla 325	Malla 200
3040	6,53	0,89

Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.2.2 ESPECIFICACIONES QUÍMICAS DE CEMENTO ARC-51

Para las especificaciones químicas se tomó como base a cumplir los parámetros de la norma **NB011 (Tabla III-12)**, las características químicas o análisis químico se realiza de acuerdo a la norma **NB061 (ANEXO 11)**

Tabla III-17: Especificaciones químicas para los cementos

Características químicas (según norma NB061)	Tipos de cemento					
	I	IP	IF	IS	IM	S
Pérdida por calcinación, en % máximo	5	7	20	-	-	8
Residuo insoluble, en % máximo	5	-	5	-	-	-
Trióxido de azufre (SO₃), en % máximo	3.5	4	4	4	4	4
Óxido de magnesio (MgO), en % máximo	6	6	6	6	6	6
Puzolanidad para 8 o 28 días	-	-	-	-	-	Positiva

Fuente: Norma boliviana NB011, 2019.

3.2.2.1 Cálculo de pérdida por calcinación

$$\%PPC = \frac{W_{perdido} \times 100}{W_{muestra}}$$

$W_{perdido}$ = peso perdido o peso final en gramos

$W_{muestra}$ = peso de la muestra inicial en gramos

W_{crisol} = peso de crisol en gramos

$$W_{perdido} = (W_{crisol} + muestra) - (W_{crisol} + muestra calcinada)$$

$$W_{\text{crisol}} = 26.7634 \text{ g}$$

$$\text{Muestra} = 1 \text{ g.}$$

$$\text{Muestra calcinada} = 0,9614 \text{ g.}$$

$$W_{\text{perdido}} = (26,7634 + 1) - (26,7634 + 0,9614) \text{ g}$$

$$W_{\text{perdido}} = 0,0386 \text{ g}$$

$$\%PPC = \frac{0,0386 \times 100}{1}$$

$$\%PPC = 3,86 \%$$

3.2.2.2 Cálculos de trióxido de azufre

$$\%SO_3 = \frac{W_{\text{ceniza}} \times F \times 100}{W_{\text{muestra}}}$$

W_{ceniza} = peso de ceniza o peso final en gramos

W_{muestra} = peso de muestra o peso inicial en gramos

F = factor

$$W_{\text{ceniza}} = 5,28 \text{ g}$$

$$W_{\text{muestra}} = 100 \text{ g}$$

$$F = 0.3433 \text{ (ANEXO 11)}$$

$$\%SO_3 = \frac{5,28 \times 0,3433 \times 100}{100}$$

$$\%SO_3 = 1,81\%$$

3.2.2.3 Cálculos de óxido de magnesio

$$\%MgO = \frac{(V_2 - V_1) \times F \times 100}{0.04}$$

V_1 = Volumen inicial en ml

V_2 = Volumen final en ml

$F = \text{factor}$

$V_1 = 100 \text{ ml}$

$V_2 = 100,00462 \text{ ml}$

$F = 0,2674$ (ANEXO 11)

$$\%MgO = \frac{(100,00462 - 100) \times 0,2674 \times 100}{0,04}$$

$\%MgO = 3,09\%$

Tabla III-18: Característica químicas de cemento con adición de arcilla ARC-51

Características químicas (según norma NB061)	Tipos de cemento					
	I	IP	IF	IS	IM	S
Pérdida por calcinación, en % máximo	-	3,86	-	-	-	-
Residuo insoluble, en % máximo	-	18,5	-	-	-	-
Trióxido de azufre (SO₃), en % máximo	-	1,81	-	-	-	-
Óxido de magnesio (MgO), en % máximo	-	3,09	-	-	-	-
Puzolanidad para 8 o 28 días	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la **Tabla III-15** se muestran los resultados obtenidos de la caracterización química del cemento ARC-51, donde los resultados están dentro de las especificaciones químicas de la norma boliviana **NB011 (ANEXO 1)**.

3.4 ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLANICA DE ARCILLA CALCINADA A 10 MIN. Y 800°C

Para el índice de actividad puzolánica se tomó como base para el ensayo la norma europea **ASTM C-311 (ANEXO 7)**.

Para la mezcla de control se utilizó cemento portland puro, a continuación, se detallan los resultados de resistencia a la compresión a 28 días.

Tabla III-19: Resistencia a la compresión de cemento portland

Muestra	Resistencia a la compresión a 28 días
Cubo 1	37,91
Cubo 2	38,01
Cubo 3	37,88
Promedio	37,93

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la mezcla de ensayo como indica la norma **ASTM C-311 (ANEXO 7)**, reemplazar el 20 % del peso de la cantidad de cemento usado en la mezcla de control por el mismo peso de la muestra de ensayo, es decir se reemplazó el 20% con puzolana artificial (arcilla calcinada), donde se obtuvo los siguientes resultados a la resistencia de compresión a los 28 días.

Tabla III-20: Resistencia a la compresión de cemento portland con el 20% de puzolana artificial

Muestra	Resistencia a la compresión a 28 días
Cubo 1	33,42
Cubo 2	33,96
Cubo 3	34,01
Promedio	33,79

Fuente: Elaboración propia, 2019.

El cálculo del índice de actividad con cemento portland se realizó de acuerdo a la norma **ASTM C311 (ANEXO 7)**, de la siguiente manera:

Índice de actividad resistente con cemento portland = $(A/B) \cdot 100$

Dónde:

A = Promedio de la resistencia a compresión de los cubos de la mezcla de ensayo, MPa

B = Promedio de la resistencia a compresión de los cubos de la mezcla de control, MPa

Índice de actividad resistente de arcilla activada

Índice de actividad resistente con cemento portland = $\frac{A}{B} \cdot 100$

$A = 33,79 \text{ MPa}$ **Tabla III-20**

$B = 37,93 \text{ MPa}$ **Tabla III-19**

$$\text{Índice de actividad resistente con cemento portland} = \frac{33,79 \text{ MPa}}{37,93 \text{ Mpa}} * 100$$

$$\text{Índice de actividad resistente con cemento portland} = 89 \%$$

Con este resultado se deduce que la puzolana artificial tiene un índice de actividad positivo, por el cual es factible este proyecto, ya que en norma el mínimo valor para que la puzolana sea positiva y apta para utilizar como adición al cemento es del 75%.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados para el presente trabajo de investigación y a los resultados obtenidos, se llega a las siguientes conclusiones:

- Los parámetros óptimos de activación térmica de arcilla de El Salto:

Tabla-III 11, donde la muestra ARC-51, obtuvo la resistencia a la compresión más alta de todas las muestras ensayadas con un tiempo de 10 min y temperatura de 800°C.

Con estos datos de activación térmica, se llega a la conclusión que la arcilla de El Salto se convierte en una puzolana artificial apta para utilizar como aditivo en cementos de tipo IP.
- La cuantificación de la arcilla en la cantera El Salto-SOBOCE SA, fue realizada por la empresa ESMICAL. Donde los yacimientos de arcilla se estiman: 5670000 t. de reserva (**ANEXO 12**)
- El análisis químico de materia prima (arcilla), da como resultado la composición de: SiO₂ 54,52%, Al₂O₃ 18,78%, Fe₂O₃ 7,12%, CaO 1,95%, MgO 1,32%, Mn₂O₃ 0.06%, K₂O 3,63%, Na₂O 0,88%, SO₃ 0,40%, (**Figura III-1**) (**Tabla III-2**), por la cual se observa que la arcilla de El Salto es de baja caolinita.
- El índice de actividad resistente de la arcilla calcinada a 10 min y 800°C, el cual fue calculado de acuerdo a la norma europea **ASTM C311** (**ANEXO 7**), donde el resultado fue de 89% lo que indica que esta puzolana artificial es positiva, por lo tanto, es apta para utilizar como adición a cementos de tipo IP.
- El cemento IP-30, el cual se obtiene se analizó y valoró la calidad del producto obtenido en cumplimiento a todas las especificaciones que establece la norma boliviana de cementos **NB011** (**ANEXO 1**), la resistencia a la compresión del cemento **ARC-51** (**Tabla III-13**) es de 32,5 MPa a una de 28 días;

Especificaciones físicas de cemento ARC-51: tiempo inicial de fraguado 183 min., tiempo final de fraguado 4,5 hr., superficie específica Blaine 4370 cm²/g (**Tabla III-15**); peso específico 3040g/ml., malla 325 6,53g., malla 200 0,89g. (**Tabla III-16**).

Características químicas de cemento con adición de arcilla ARC-51: Pérdida por calcinación, en % máximo 3,86, Trióxido de azufre (SO₃), en % máximo 1,81, Óxido de magnesio (MgO), en % máximo 3,04, pérdida por fuego % máximo 3,86. (**Tabla III-18**). De acuerdo a estos datos se concluye que se obtuvo un cemento de buena calidad con adición de una puzolana artificial por lo tanto este proyecto es factible para realizarse a nivel industrial.

- La sustitución del Clinker por MCS es la alternativa con mayores perspectivas de aplicación a corto plazo para la reducción de las emisiones de CO₂ provocadas por la industria del cemento.
- El proceso de fabricación de algunos materiales de la construcción como el cemento portland contribuye al aumento del efecto invernadero debido a la emisión de gases de efecto invernadero (CO₂) a la atmósfera provenientes de la quema del combustible y de los procesos de calcinación, de ahí que la disminución del factor de clínquer con la adición de arcillas activadas térmicamente constituye una importante contribución desde el punto de vista económico y ambiental.
- Es el nuevo tipo de cemento que propone una alternativa para la sustentabilidad ambiental, en su elaboración se emplea arcilla calcinada, este material se puede encontrar de manera abundante, es un cemento ecológico que contiene menos Clinker y utiliza menor consumo de combustible en su elaboración, por tanto, se reducen las emisiones de CO₂ hasta en un 30%. Para producirlo no se requiere de grandes modificaciones en las plantas de cemento.
- La novedad del LC3 no solo radica en su potencial medioambiental, sino que además reduce los costos de producción por la factibilidad de los materiales y su resistencia puede compararse a la de cementos no mezclados como el Portland a pesar de tener un 25 por ciento menos de Clinker.

- Del estudio realizado se desprende la importancia de conocer la reactividad de las arcillas calcinadas utilizadas, siendo altamente beneficioso desde el punto de vista del comportamiento mecánico, la utilización de un porcentaje de reemplazo elevado (25-30%) cuando la muestra es muy reactiva. Si se dispone de arcillas calcinadas de menor reactividad, se aconseja la utilización de menores porcentajes de reemplazo (15%), pudiendo lograr a partir de los 28 días comportamiento similar al cemento portland y teniendo a menores edades (3 y 7 días) un buen desempeño.
- A lo largo de esta investigación también se pudo ensayar con diferentes granulometrías en la activación de arcilla dando como resultado que la arcilla se activa con mayor facilidad en una malla 12,5 ya que se tuvo mejores resultados que en una malla 325.
- La reactividad puzolánica de arcillas calcinadas depende del volumen de material potencialmente reactivo (directamente relacionado al contenido de Al_2O_3 y SO_2) y la magnitud del desorden estructural alcanzado durante la activación térmica (directamente relacionado a la pérdida de grupos hidroxilos).

4.2 RECOMENDACIONES

- Evaluar la sustitución máxima de arcilla calcinada en cemento IP30.
- Se recomienda activar la arcilla a una granulometría de 12,5 mm. Para tener una buena activación.
- Se sugiere a la empresa Cemento El Puente SOBOCE SA. Activar la arcilla a nivel industrial en un horno rotatorio para poder aprovechar la máxima activación térmica con la ayuda de la rotación, así poder alcanzar la máxima reactividad.
- Analizar la molienda industrial por separado como una alternativa a mediano plazo para estos cementos dentro de la producción cementera para obtener una activación de arcilla mecánica.
- Realizar una prueba industrial con los parámetros establecidos en laboratorio para la activación térmica de arcilla.
- El presente proyecto que sirva de base para implementar este nuevo cemento LC3 en el país, tener menos contaminación ambiental de CO₂ e incrementar las ganancias.
- Continuar investigando para mejorar el color de este cemento.
- Evaluar económicamente la factibilidad de este proyecto.
- Evaluar la cantidad de CO₂ desprendido en el proceso de activación de arcillas

