

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

La historia del cemento es la historia misma del hombre en la búsqueda de un espacio para vivir con la mayor comodidad, seguridad y protección posible. El cemento es un conglomerante conocido desde tiempos muy remotos, aunque su aplicación como material hidráulico solamente ha sido llevada a cabo a partir del siglo XVIII.

“El uso de materiales de cementación se remonta desde los egipcios, quienes utilizaban yeso calcinado impuro, posteriormente, se hicieron mezclas de cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas, siendo este el primer concreto de la historia”. Años después, Isaac Jhonson, logra la formación del Clinker al quemar una mezcla de arcilla y caliza, produciendo de esta forma, la reacción necesaria para la formación de un compuesto fuertemente cementoso. (Labahn y Kohlhaas. (1985). *Prontuario del cemento*. Editores Técnicos Asociados S.A (5ª edición Española), Barcelona - España.)

En la actualidad, se conoce el cemento como un material finamente molido, de color gris que al mezclarse con el agua tiene la propiedad de fraguar o endurecer. Adicionalmente, se sabe que los cementos, están compuestos de diferentes componentes, que adecuadamente dosificadas mediante un proceso de producción controlado, le dan al cemento las cualidades físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado.

CEMENTO PORTLAND

Los cementos Portland son productos industriales compuestos por silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) y silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) en diversas proporciones, obtenidos artificialmente a partir de la cocción y fina pulverización de materiales de naturaleza inorgánica y mineral, y cuya propiedad fundamental radica en su comportamiento como conglomerantes hidráulicos; es decir, que fraguan y endurecen a causa de las reacciones químicas de hidratación de sus constituyentes con el agua, dando lugar a productos mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo el agua. (Fuente: NORMA BOLIVIANA, NB 011 (2012). *Cemento – Definiciones, clasificación y especificaciones*)

CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND ESTÁNDAR

Los cementos Portland, se fabrican en cinco tipos, cuyas propiedades se han normalizado sobre la base de la especificación ASTM C-150 de normas para el cemento Portland no adicionados.

TIPO I: Es el cemento destinado a obras de concreto en general, cuando en las mismas no se especifica la utilización de los otros 4 tipos de cemento.

TIPO II: Es el cemento destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiera moderado calor de hidratación.

TIPO III: Es el cemento de alta resistencia inicial. El concreto hecho con el cemento tipo III desarrolla una resistencia en tres días igual a la desarrollada en 28 días para concretos hechos con tipo I o tipo II.

TIPO IV: Es el cemento para emplearse cuando se desea bajo calor de hidratación.

TIPO V: Es el cemento para emplearse cuando se desea alta resistencia a los sulfatos

CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS PORTLAND ADICIONADOS

Estos cementos han sido desarrollados debido al interés de la industria por la conservación de la energía y la economía en su producción. La norma ASTM C-595 reconoce la existencia de cinco tipos de cementos mezclados:

- Cemento Portland de escoria de alto horno - Tipo IS.
- Cemento Portland puzolana - Tipo IP y Tipo P.
- Cemento de escoria - Tipo S.
- Cemento Portland modificado con puzolana - Tipo I (PM).
- Cemento Portland modificado con escoria - Tipo I (SM).

La Norma Bolivia NB-011 define y clasifica los cementos portland adicionados (ANEXO 5), En Bolivia el cemento estándar tipo IP, es el cemento con mayor aplicación en la construcción en general.

COMPONENTES PRINCIPALES DEL CEMENTO

Clinker y Adiciones como: la caliza, las escorias de horno alto, puzolanas, cenizas volantes, esquistos calcinados, humo de sílice y Componentes Minoritarios: Sulfato de Calcio y Aditivos (sustancias añadidas para mejorar las propiedades del cemento). De esta forma, el cemento tiende a ser uno de los materiales más utilizados en construcciones y el más importante en la

elaboración de concreto.

ADICIONES MINERALES

Las adiciones minerales son compuestos inorgánicos que son incorporados al cemento o directamente al concreto, en diferentes porcentajes, con el fin de mejorar sus propiedades en estado fresco y/o endurecido. Las razones de la incorporación de adiciones en la fabricación de cementos son variadas, destacándose las ecológicas aprovechamiento de un residuo o subproductos de otras industrias o procesos; menor generación de CO₂; etc. y la obtención de cementos con propiedades especiales, con costos de producción reducidos.

CLASIFICACIÓN DE LAS ADICIONES MINERALES

En general, las adiciones minerales pueden clasificarse como:

- Adiciones minerales activas. (Hidraulicidad latente, puzolánicas)
- Adiciones minerales inactivas. (Filler calcareo)

ADICIONES MINERALES ACTIVAS

Las adiciones activas son aquellos minerales naturales o artificiales que presentan la capacidad de hidratarse y formar productos de hidratación SCH (silicatos de calcio hidratado) de manera similar a los formados en la hidratación del cemento portland "puro". A su vez, estas pueden separarse en las que poseen hidraulicidad latente y las puzolánicas. Mientras que las primeras tienen la capacidad de hidratarse por sí mismas en presencia de agua y un agente catalizador, las segundas se hidratan a través de una reacción secundaria donde se combinan con el (OH)₂Ca formado durante la hidratación primaria, resultando compuestos SCH:

Hidratación primaria: $C_nS + H_2O \Rightarrow \text{gel SCH} + (OH)_2Ca$

Hidratación secundaria: $SiO_2 + (OH)_2Ca + H_2O \Rightarrow \text{gel SCH}$

Fuente: **IECA** (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones) [Online]- [citado 06 junio, 2018]. Available from Internet: < <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/> >

Donde la SiO₂ lo aporta la puzolana y el (OH)₂Ca es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de (OH)₂Ca por lo cual es de esperar que los cementos u concretos que poseen estas adiciones presenten mayor resistencia final y durabilidad que los elaborados con cementos "puros"

ya que el $(OH)_2Ca$ tiene muy baja resistencia estructural. En el caso de la hidratación de la escoria granulada de alto horno, el agente catalizador es el ambiente alcalino generado durante la hidratación primaria. En forma similar a las puzolanas, durante la hidratación de esta adición mineral solamente se genera gel SCH por lo cual se espera mayor resistencia final y durabilidad:

Hidratación de la escoria: $C_3S_2 + H_2O \Rightarrow$ gel SCH

Entre estas adiciones podemos mencionar:

- Puzolanas Naturales:
 - Cenizas volcánicas
 - Tobas volcánicas (zeolitas)
 - Tierras de diatomeas (diatomitas)
- Puzolanas Artificiales:
 - Cenizas volantes
 - Arcillas activadas térmicamente
 - Microsílice (silica fume)
 - Cenizas de cáscara de arroz
- Escorias Siderúrgicas
 - Escorias granuladas de Alto Horno
 - Escorias peletizadas (melilitas)

ADICIONES MINERALES INACTIVAS

Son minerales que no forman productos de hidratación SCH aunque su utilización suele tener efectos benéficos sobre la hidratación de las partículas de clinker y las propiedades del concreto en estado fresco.

Dentro de este tipo de adición mineral se encuentra:

El "filler calcáreo" de utilización masiva desde hace algunos años en Europa (sobre todo Italia y Francia) y en Latinoamérica tenemos a Argentina.

VENTAJAS

- Mejores propiedades:
 - Mayor durabilidad.
 - Menor calor de hidratación.
 - Mayores resistencias a edades iniciales.
- Ahorro de energía no renovable
- Protección del medio ambiente
 - Reducción de la emisión de CO₂, SO₂, NO_x.
 - Uso de subproductos industriales.

ESPECIFICACIÓN DE COMPOSICIÓN DEL FILLER CALIZO

En el caso de la adición de filler calizos por encima del 5%, generalmente hasta un máximo del 30% como se establece en las normas europeas, se dan especificaciones para su composición en carbonato de calcio CaCO₃, mayor o igual al 75%, y según estudios presentándose las mejores performances con contenidos de CaCO₃ mayores del 90%. Además, se prescriben limitaciones para elementos perjudiciales, con valores muy exigentes para la presencia de arcillas y materia orgánica. Estos valores son Carbonato de calcio (CaCO₃) $\geq 75\%$, Arcilla $\leq 1.2\text{g}/100\text{g}$, materia orgánica $\leq 0.20\%$ masa debido a que los filler calcáreos con participación de partículas de arcilla provocan alteraciones en la reología de las pastas y concretos.

MICROFILLER CALIZO

El microfiller calizo es el producto mineral obtenido por molienda fina de las calizas para ser adicionado al cemento. Esta adición es considerada en las siguientes normas: NB-011 (Norma Boliviana), "NB 011 Cemento - Definiciones, especificaciones"; ASTM C 595, "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements"; y ASTM C 1157, "Standard Performance Specification for Blended Hydraulic Cement".

El microfiller calizo se puede obtener mediante los siguientes procesos:

1. Se obtiene como resultado de una complementaria molienda extra fina de la "harina cruda" clasificada y homogeneizada, que sirve a su vez para la fabricación del cemento. Es un proceso de molienda que se realiza individualmente del proceso seguido para obtener el cemento, este no

ingresa al horno.

2. Se obtiene como subproducto del proceso de Clinkerización del material calizo en los filtros de captación o mangas. Después de haberse obtenido el microfiller calizo, éste es añadido a la molienda de cemento. En esta etapa del proceso se muele el clinker producido en el horno rotatorio, en forma conjunta con el yeso y microfiller calizo.

Las características físicas del microfiller calizo, generalmente son:

- Su peso unitario está entre 800 a 1000 kg/m³.
- Su gravedad específica se encuentra entre 2,60 a 2,75 g/cm³
- Su color característico es gris claro.
- Su tamaño promedio de partículas es menor a 4 micras.
- Su tamaño es de 1/3 a 1/4 del tamaño promedio de las partículas del cemento.
- El valor de su finura Blaine es aproximadamente 10000 m²/kg.

Mecanismo de hidratación del microfiller en el cemento

Las investigaciones efectuadas para determinar el grado de actividad química del filler calizo son incipientes, pero permiten establecer su participación en la formación de productos de hidratación de la pasta de cemento y su relativa contribución a la resistencia mecánica del cemento Portland adicionado.

El carbonato cálcico acelera la hidratación del C₃S y es parcialmente incorporado en la fase C-S-H. La hidratación del cemento es acelerada por el CaCO₃. En la pasta el carbonato de calcio es incorporado en la hidratación del C₃A y en la fase C₃S.

La hidratación del C₃A + CSH₂, en presencia del CaCO₃ produce la formación acelerada de la ettringita y su conversión en monosulfoaluminato hidratado.

Las resistencias tempranas de las pastas de cemento se incrementan por adiciones reducidas del CaCO₃. Pero a los 28 días las resistencias decrecen con contenidos mayores del 10%, circunstancia que se corrige con una mayor finura. Por otra parte, los filler mejoran las características de la zona de transición entre la pasta hidratada y el agregado, mediante una interacción superficial, logrando la modificación de su microestructura debido a que el hidróxido de calcio cristaliza en cristales

largos que se concentran en algunas zonas formando un puente entre los granos de material calcáreo logrando una estructura compacta.

Esto es lo que da lugar al aumento del grado de hidratación de la pasta de cemento.

Filler calizo como reemplazo parcial de cemento portland

Se realizó estudios en el mundo y fueron publicados por algunos autores, como se muestra a continuación:

Gutteridge y Dalziel concluyeron que la adición de materiales muy finos al cemento acelera el proceso de hidratación del mismo, a través de lo que se denomina el efecto filler. Este efecto se produce tanto para materiales inertes (rutilo) como para finos hidráulicamente inactivos (caliza), como para finos activos (escoria, ceniza volante, silica fume), siendo máximo cuando la adición es humo de sílice. (W. Gutteridge and J. Dalziel. "Filler Cement. The Effect on the Secondary Component on the Hydration of Portland Cement. Part 1: A Fine non - Hydraulic Filler". Cement and Concrete Research. Vol. 20, N° 5, pp. 778 - 782. 1990.)

Soroka y Stern a partir del estudio de mezclas de cemento y caliza molida, concluyeron que el filler calcáreo actúa como un acelerador de la velocidad de hidratación del cemento portland. Durante las primeras edades la cristalización del CH tiene lugar en el interior de la masa y también sobre la superficie de las partículas de filler que actúan como centros de nucleación. (I. Soroka and N. Stern. "Calcareous Fillers and the Compressive Strength of Portland Cement". Cement and Concrete Research. Vol. 6, N° 3, pp 367 - 376. 1976.)

Gegout et al por medio de DRX, siguiendo la intensidad relativa del pico ($2\theta = 18.10^\circ$) de hidróxido de calcio, en cementos mezclas con hasta 60 % de reemplazo de cemento por caliza, también arribaron a la conclusión que el filler acelera la hidratación del cemento portland. Además, por medio microscopía electrónica observaron que los cristales de hidróxido de calcio rodeaban los granos de CaCO_3 , pudiendo comprobar el efecto de nucleación de la caliza manifestado por Soroka. (P. Gegout, H. Hornain, B. Theret, B. Mortureux, J. Volant and Regourd. "Texture et Performance des Ciments Fillérisés". Proc. 8th International Congress of the Chemistry of Cement. Vol. IV, pp 197 - 203. Río de Janeiro. Brasil. 1986.)

Los productos de hidratación que se desarrollan en los cementos con filler calcáreo fueron estudiados por **Klemm y Adams** a través de la técnica de DRX. Ellos encontraron que desde el

primer día de hidratación se detecta la presencia de ettringita, en tanto que el carboaluminato sólo se pudo detectar después de los 7 días en la mayoría de las muestras estudiadas. Basados en las solubilidades de los compuestos formados, los autores suponen que la secuencia de reacción sería: ettringita, monocarboaluminato y monosulfoaluminato. La coexistencia de la ettringita y el monocarboaluminato, también fue observada por Gegout. (W. Klemm and L. Adams. "An Investigation of the Formation of Carboaluminate". Carbonate Additions to Cement. ASTM STP 1064, pp 60 - 72. Abril. 1990.)

La cantidad de caliza que se incorpora a los productos de hidratación resulta variable y es función del contenido de C₃A. **Klemm et al** encontraron que cuando incorporaba 15 % de caliza a un cemento con 6.4 % de C₃A cerca del 1.7 % del total de la caliza reacciona después de 129 días de hidratación. (K. Ingram and K. Daugherty. "Limestone Additions to Portland Cement: Uptake, Chemistry and Effects". Proc. 9th International Congress of the Chemistry of Cement. New Delhi, India. Vol. II, pp. 181 - 186. 1992.)

Por su parte, **Ingram** determinó que cerca del 3 % de la adición de caliza (5%) era incorporada a los 28 días de hidratación, cuando el cemento tenía 12.5 % de C₃A. Posteriormente, Ingram concluyó que el porcentaje de caliza incorporado en los productos de hidratación se incrementa considerablemente por la presencia de yeso. (K. Ingram and K. Daugherty. "Limestone Additions to Portland Cement: Uptake, Chemistry and Effects". Proc. 9th International Congress of the Chemistry of Cement. New Delhi, India. Vol. II, pp. 181 - 186. 1992.)

Todo lo expuesto demuestra que la caliza se comporta como un participante activo en las reacciones de hidratación y que la cantidad de caliza que puede incorporarse a los hidratos se incrementa a medida que aumenta el contenido de C₃A del cemento.

EXPERIENCIAS DE USO DEL POLVO PURGADO DEL FILTRO

Toda industria de proceso siempre tiene, por lo menos en una parte de su línea, una generación de un sub-producto no deseado, y no es excepción que en la fabricación de cemento, en la parte de calcinación, se obtiene cierta cantidad de polvo del filtro con alto contenido de álcalis, con destino a purga.

Este polvo es purgado porque contiene mayor porcentaje de SO₃ y álcalis en su composición química que una harina cruda de entrada normal, dicho porcentaje es lo suficientemente perjudicial si se alimenta al horno, debido a los serios problemas que ocasiona, como por ejemplo formación

de costras (obstrucción de ductos), irregularidad en las condiciones del horno, etc.

Al reincorporar el polvo del filtro al proceso de producción en la sección de molienda, mejora la eficiencia y la estabilidad del proceso de producción, evitando interrupciones, aumentando la productividad de la planta y sobre todo exponer al personal operativo a condiciones peligrosas de limpieza de la zona de pre-calcinación a alta temperatura.

En el mundo se utiliza el polvo de purga como adición al cemento en condiciones controladas es así que se muestran las siguientes experiencias.

De oficina española de patentes y marcas:

Tabla -1 Resistencia de cemento con adición de polvo de purga

Muestra (Edad: días)	Referencia cemento sin adición Resistencia (Mpa)	Cemento que contiene polvos de purga Resistencia (Mpa)
2	27	31
7	44	47

Fuente: Makris, Michel. TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA MODIFICADA 01.11.2005. Procedimiento de producción de Clinker de cemento con recuperación mejorada de los polvos. Technip France La Defense 6 170, place Henri Regnault 92973 Paris La Défense Cedex, FR.

La publicación de la oficina española de patentes y marcas, manifiesta que el uso de polvo de purga como adición en el cemento, después de la trituración a 3500 cm²/g de una mezcla al 95% de Clinker, 5% de yeso (muestra de referencia) y de una mezcla de 90% de Clinker, 5,5% de polvo mezclado (Clinker + purga), 4,5% de yeso, se obtiene los siguientes resultados con probetas de mortero normalizado. (Makris, Michel. TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA MODIFICADA 01.11.2005. Procedimiento de producción de Clinker de cemento con recuperación mejorada de los polvos. Technip France La Défense 6 170, place Henri Regnault 92973 Paris La Défense Cedex, FR.)

De la asociación de productores de cemento (Perú)

Tabla -2 Control de pruebas de cemento con adición de polvo de purga

FINURA	MALLA 100 (%)	MALLA 200 (%)	MALLA 325 (%)	BLAINE (gr/cm ²)
	0,06	1,01	9,19	3354
	0,06	0,97	9,82	3671
	0,05	0,75	8,9	4017
	0,05	0,82	8,74	4364
	0,04	0,79	8,85	4731

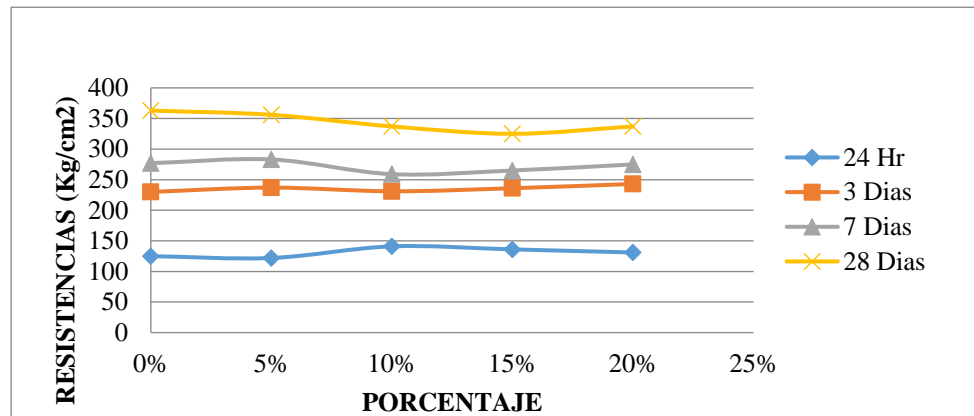
EDAD	RESISTENCIAS (Kg/cm ²)				
24 HORAS	125	122	141	136	131
03 DIAS	230	237	231	236	243
07 DIAS	277	283	259	265	275
28 DIAS	363	356	337	325	337
% POLVO FILTRO	0%	5%	10%	15%	20%
	PATRON	EP405	EP410	EP415	EP420

R. AGUA/CEMENTO (%)	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5
EXP. AUTOCLAVE (%)		0,08	0,08	0,07	0,06		
PESO ESPECIFICO (g/cm ³)	3,12	3,09	3,08	3,05	3,03	3,01	2,96
CONSISTENCIA NORMAL (%)	24,8	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,5
FRAGUADO INICIAL (h)	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
FRAGUADO FINAL (h)	4,35	4,35	4,4	4,4	4,4	4,5	4,55
POLVO DEL FILTRO (%)	0	5	10	15	20	25	30

Fuente: Ing. Prado F. Juan; Ing. Ortega S. Raúl Cementos Lima S.A. (1996, Noviembre). *Una alternativa para el uso de polvo del electrofiltro de una planta de cemento*. ASOCEM. Asociación de productores de cemento.

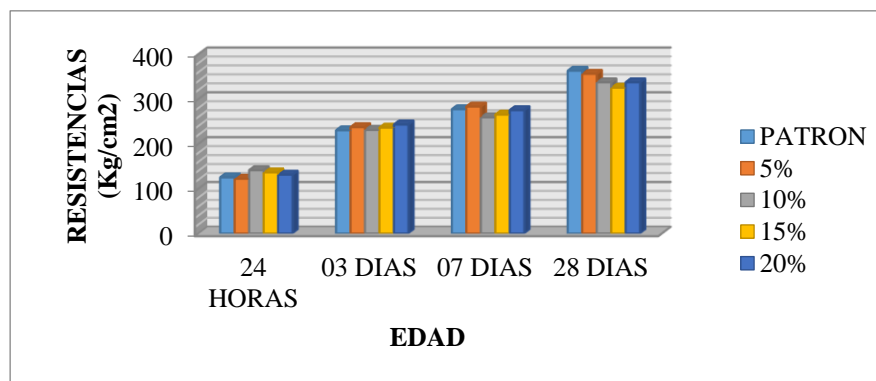
De acuerdo a los informes realizados por la división de control de calidad de Cementos Lima, en el año 1992 se empezó hacer pruebas con la mezcla de cemento portland y polvo de electrofiltro para 5% y 10 % y luego para 15%, 20%, 25% y 30% se decidió hacer pruebas para la mezcla con 10 % de polvo electrofiltro. Práctica que obtuvo resultados exitosos, ya que años posteriores las edificaciones construidas con este material no presentaron afloración, agrietamiento, desmenuzamiento, deformación o desintegración en ningún segmento, más por el contrario, presentando la misma resistencia cemento Portland tipo I, aun estando en contacto con el medio ambiente.

Figura -1 EP+POLVELEC 1996, 9no. Ensayo de resistencia vs porcentaje



Fuente: Ing. Prado F. Juan; Ing. Ortega S. Raúl Cementos Lima S.A. (1996, Noviembre). Una alternativa para el uso de polvo del electrofiltro de una planta de cemento. ASOCEM. Asociación de productores de cemento.

Figura -2 EP+POLVELEC 1996, 9no. Ensayo de resistencia vs. Tiempo.



Fuente: Ing. Prado F. Juan; Ing. Ortega S. Raúl Cementos Lima S.A. (1996, Noviembre). Una alternativa para el uso de polvo del electrofiltro de una planta de cemento. ASOCEM. Asociación de productores de cemento.

En la busca de opciones de uso para el polvo de purga para evitar pérdidas y producir ganancias en su utilización y/o transformación, se tiene la opción de utilizar este polvo purgado como agregado en la molienda para el cemento portland IP-30 con las condiciones de trabajo de planta El Puente, tomando en cuenta las características de las materias primas, Clinker, yeso y aditivo.

ASPECTOS A TOMAR EN CUENTA PARA LA ADICIÓN DEL POLVO DEL FILTRO AL CEMENTO

Dentro de las características mas importantes que tiene el polvo del filtro, se puede resaltar que la química es similar a la del filler calizo con elevada concentración de cloruros y elementos

alcalinos, además de tener alta finura.

Las elevadas concentraciones de cloruros pueden tener efectos negativos en el hormigón. Los cloruros pueden causar corrosión en las armaduras de acero, lo que puede reducir la resistencia estructural del hormigón. Además, las altas concentraciones de cloruros pueden provocar la formación de compuestos poco solubles en agua, lo que reduce su concentración efectiva en el medio.

Por lo tanto, la norma europea UNE-EN 197-1 establece que el contenido máximo de cloruros en el cemento Portland ordinario no debe superar el 0,10% en masa, como se muestra en el Anexo 15 del presente proyecto.

FABRICACIÓN DEL CEMENTO

Para la fabricación del cemento Pórtland se procede, de la siguiente manera:

La materia prima, material calizo y material arcilloso, se tritura, mezcla y muele hasta reducirla a un polvo fino. Los procedimientos de mezcla y molido pueden efectuarse en seco o en húmedo. La dosificación de los materiales debe ser la adecuada a fin de evitar perjuicio en la calidad.

El polvo fino pasa a un horno rotatorio donde es calentado lentamente hasta el punto de clinkerización. En la etapa inicial de proceso de calentamiento el agua y el Anhídrido carbónico son expulsados. Al acercarse la mezcla a las regiones más calientes del horno se producen las reacciones químicas entre los constituyentes de la mezcla cruda. Durante estas reacciones se forman nuevos compuestos, algunos de los cuales alcanzan el punto de fusión.

El producto resultante, clínker cae a uno de los diversos tipos de enfriadores o se deja enfriar al aire. Posteriormente, se combina con un porcentaje determinado de yeso y el conjunto se muele hasta convertirlo en un polvo muy fino al que se conoce como cemento Pórtland.

Elementos químicos más importantes en la fabricación del cemento

La composición química de las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento hidráulico está compuesta por varios elementos como son:

- Oxido de calcio (CaO) aportado por la cal.
- Dióxido de silicio (SiO₂), el cual se encuentra en la arcilla junto con el óxido de aluminio (Al₂O₃) y el óxido de hierro (Fe₂O₃).
- La adición del regulador del fraguado que es el yeso, el cual contiene trióxido de azufre

(SO₃).

Cuantitativamente, el componente más importante del cemento es la cal, siguiéndola a gran distancia la sílice, a esta la alúmina y finalmente el óxido de hierro.

Los componentes principales incluyen:

Cal (óxido de calcio).....	CaO.....	60% al 67%
Sílice (anhídrido silícico).....	SiO ₂	17% al 25%
Alúmina (óxido aluminio).....	Al ₂ O ₃	3% al 8%
Oxido Férrico.....	Fe ₂ O ₃	0.5% al 6%

A continuación, se describen cada uno de estos componentes.

La Cal

Cuantitativamente es el componente más importante del cemento la roca caliza es la que proporciona principalmente el CaCO₃, el que a su vez proporciona la cal que interviene en la formación de los cuatro compuestos principales del cemento.

La roca caliza, al recalentarse se disocia en cal viva (CaO) y en anhídrido carbónico (CO₂).

Este proceso se efectúa rápidamente a 950°C, cuando el material adquiere un color rojo vivo.

La cal viva remanente no difiere mucho en su aspecto inicial pero ha experimentado una pérdida de peso del 44% debido al desprendimiento del anhídrido carbónico. Por ese motivo, su porosidad es mayor que la de la caliza original.

La Sílice

La sílice se presenta en forma más o menos pura como cuarzita, arenisca, o arena de cuarzo. La sílice es un material muy resistente completamente insoluble en agua, resistente al ataque de los ácidos excepto el fluorhídrico. Por acción del calor puede sufrir transformaciones en su forma cristalina, acompañadas de notables variaciones en volumen.

Químicamente, no sufre variación alguna. Al alcanzar los 1900°C se funde y al enfriarse se endurece, constituyendo una masa vítrea, conocida como vidrio de cuarzo.

Alúmina

La alúmina u óxido de alúmina (Al₂O₃) se relaciona con la arcilla que contiene dicho óxido en cantidad considerable. Se considera en la composición normal de la arcilla que el porcentaje de sílice es aproximadamente el doble del correspondiente a la suma de la alúmina y el óxido férrico, y el de la alúmina es el doble del de óxido férrico.

En la química de los cementos, la alúmina tiene importancia ya que al igual que la sílice puede

unirse en combinación geliforme con la cal y el agua.

Óxido de Hierro

El óxido férrico es el integrante más importante de los minerales férricos y la mayor parte de los minerales lo contienen. Todos los cementos poseen, aun en muy pequeñas cantidades, óxido férrico. Excepto el cemento blanco que debe estar libre de este óxido.

En la fabricación del cemento es necesaria la presencia del óxido férrico, en muy pequeña cantidad, para evitar dificultades en la fabricación del cemento dado que el Fe_2O_3 actúa como fundente permitiendo que las combinaciones químicas indispensables para la elaboración del cemento se efectúen a temperaturas muy inferiores frente a aquellas que de otro modo serían necesarias.

En la etapa de sinterización (tratamiento térmico a temperatura menor que el punto de fusión) durante la fabricación del clínker, se producen los componentes principales o potenciales que constituyen el 95% de dicho material, los cuales se conocen como mineral, debido a las impurezas de las materias primas. Al silicato tricálcico se le conoce como Alita (C_3S), al silicato dicálcico se le denomina Belita (C_2S), el ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF) es la ferrita y celita al aluminato tricálcico (C_3A). El motivo de añadir yeso al cemento es para retardar (controlar) el fraguado, ya que, si solo se muele el clínker, al mezclarlo con el agua fraguaría casi inmediatamente, y no permitiría ni su manipulación ni su instalación. La retardación de la hidratación inicial del cemento depende de la presencia de los iones $\text{SO}_4^{=}$. (ASOCEM, Asociación de Productores de Cemento (febrero, 2005). IX Simposium de Tecnología en la Industria del Cemento. “Ahorro de energía en la Molienda”. Ing. Jorge Acosta. Cementos Lima – Perú.)

COMPONENTES INDESEABLES EN EL CEMENTO

Los restantes componentes pueden decirse que son los indeseables en el cemento. A continuación, se comentan brevemente.

Óxido cálcico libre, CaO

La cal libre y el hidróxido cálcico coexisten normalmente en el cemento anhidro. Una parte de la primera se hidrata y pasa a la segunda durante el amasado, pero si el contenido en CaO libre del cemento es superior al 1,5 o 2 %, queda otra parte capaz de hidratarse en el transcurso del endurecimiento, es decir, a edades medias o largas, lo que puede producir fenómenos expansivos.

Óxido magnésico, MgO

La magnesia MgO puede presentarse en el clínker en estado vítreo (por enfriado enérgico) o en estado cristalizado (periclasa), siendo esta última forma realmente peligrosa, debido a su lenta hidratación para pasar a hidróxido magnésico $Mg(OH)_2$, en un proceso de carácter expansivo. Por ello se limita el contenido en magnesia a un 5 % como máximo.

Trióxido de azufre SO_3

El azufre proviene de la adición de piedra de yeso que se hace al clínker durante la molienda para regular su fraguado, pudiendo también provenir del combustible empleado en el horno. Un exceso de SO_3 , puede conducir al fenómeno de falso fraguado, por lo que conviene ser estricto en la comprobación de que no se rebasa la limitación impuesta por el pliego correspondiente. Un contenido en SO_3 , inferior al 4 % es aceptable.

Pérdida al fuego

Cuando su valor es apreciable, la pérdida al fuego proviene de la presencia de adiciones de naturaleza caliza o similar, que no suele ser conveniente. Si el cemento ha experimentado un prolongado almacenamiento, la pérdida al fuego puede provenir del vapor de agua o del CO_2 presentes en el conglomerante, siendo entonces expresiva de una meteorización del cemento.

Residuo insoluble

Proviene de la presencia de adiciones de naturaleza silíceas. No debe superar el 5 % para el Pórtland I.

(ASOCEM, Asociación de Productores de Cemento (febrero, 2005). IX Simposium de Tecnología en la Industria del Cemento. “Ahorro de energía en la Molienda”. Ing. Jorge Acosta. Cementos Lima – Perú.)

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1.DESCRIPCIÓN DE LA FÁBRICA DE CEMENTO “EL PUENTE” SOBOCE S.A.

1.1.1. Presentación de la fábrica de cemento El Puente

La fábrica de cemento El Puente, fue creada en el año 1982 con recursos de la entonces corporación regional de desarrollo de Tarija, CODETAR y fue instalada por el consorcio GAXT_FULLER S.A. de Francia. Inicio sus operaciones produciendo cemento en área de molienda con Clinker que se importaba del vecino país Argentina.

A finales de 1988 se concluyó la instalación del gasoducto desde el chaco hasta la planta “El Puente” lo que permite a partir de 1989 poner en marcha el horno de clinkerización y producir 1240 ton de Clinker en el primer mes.

Entre 1989 y finales de 1996, la producción de Clinker fue limitada hasta 35000 ton aproximadamente.

En febrero de 1997 SOBOCE S.A. adquiere el 100 % de la propiedad de la fábrica produciendo 51415 ton de Clinker en esa primera gestión.

Ese mismo año se pone en marcha el filtro de mangas de la línea del horno, reduciendo a valores permisibles la emisión de polvo hacia el medio ambiente.

En el año 2005 se inició el proyecto de ampliación de la producción de cemento El Puente, para llegar en un plazo de 30 meses a una capacidad de 250.000 toneladas de cemento por año con una inversión de 15 millones de dólares. Este proyecto fue compuesto por una primera etapa de implementación de una nueva molienda de cemento y una segunda, la ampliación de la capacidad de producción de clinker. Este emprendimiento surgió por la necesidad de atender la creciente demanda de cemento en el Sur del País.

El proyecto de ampliación denominado TR2, consistió en la instalación de una nueva línea de molienda de cemento en sustitución de la línea antigua y representó la más importante mejora tecnológica desde el año 1978.

El molino instalado en la Fábrica El Puente, fue fabricado por la empresa CHANDERPUR WORKS de la India, cuenta con tecnología de punta similar a la FLS Europea. El costo total de este importante proyecto ascendió a US\$ 2.200.000 y su implementación concluyó a fines del año 2006.

En el año 2007 se dio inicio al nuevo proyecto en planta El Puente para incrementar la capacidad de Clinker, ya en 2008 se inició las operaciones de la nueva línea de clinker en El Puente con 400 t/día adicional, incrementando la capacidad de producción de clinker en 222 %.

En el año 2011 con una inversión de más de 3,2 millones de dólares, se inició el proyecto TR4.1 “Ampliación de Molienda – Planta El Puente” que permitió, a partir de mayo del 2012, incrementar la capacidad de producción de cemento en 50% a través de la instalación de un sistema de pre-molienda.

Desde entonces a la fecha, optimizaciones permanentes del proceso han permitido alcanzar cifras por encima de su capacidad nominal nunca antes alcanzadas.

Siendo la capacidad de producción de Clinker actual de 233600 t por año y de 307368 t de cemento. Y la cantidad de polvo del filtro del horno que se purga anualmente es aproximadamente 1200 t al año, las cuales están almacenadas en el depósito de planta.

La fabricación de cemento en El Puente cuenta con un sistema integrado certificados con normas ISO 9001 gestión de calidad, ISO 14001 de gestión ambiental e ISO 45001 de seguridad y salud en el trabajo.

Las principales actividades de SOBOCE son la producción, comercialización de cemento, hormigón premezclado, prefabricados y agregados pétreos. Adicionalmente, integrando el proceso productivo, la empresa explota varios yacimientos mineros que concentran las materias primas requeridas para la producción de cemento: piedra caliza, arcilla, yeso, óxido de hierro y puzolana o toba.

Todas las marcas de cemento producidos por SOBOCE S.A. cuentan con el sello de calidad IBNORCA, que es la representación por la cual una empresa demuestra que sus productos cumplen permanentemente con los requisitos de una Norma Boliviana NB-011 y el reglamento técnico del cemento RM MDPyEP N°261.2018, aunque diferenciados por su resistencia y la adición de puzolana, que confiere al cemento propiedades adicionales, ofertando así los siguientes tipos de cemento:

Cemento IP-30

Fabricado para las construcciones en general, que deben caracterizarse por una alta durabilidad, gran resistencia a los sulfatos, a las acciones agresivas del ambiente y bajo calor de hidratación, sin embargo, puede ser trabajo en obras que contengan estructuras de hormigón de alto desempeño.

Este producto es comercializado en sacos de 50 kg, como también a granel.

Cemento IP-40

Es destinado a obras que requieren un hormigón con características de alto desempeño, así como también un nivel alto de resistencias.

Su despacho se lo realiza principalmente a granel, sin descartar la opción del despacho en sacos de 50 kg.

Características Actuales de la fábrica de cemento El Puente SOBOCE S.A.

La Sociedad Boliviana de Cemento S.A. (SOBOCE S.A.) fue fundada el 24 de septiembre de 1925 y actualmente es la empresa líder en la producción y comercialización de cemento, hormigón premezclado, áridos, prefabricados y servicios para el sector de la construcción a nivel nacional. (Soboce 2021 Memoria, <https://www.soboce.com/>)

Actualmente tiene una capacidad instalada de molienda para la producción de más de 3 millones de toneladas de cemento al año, una participación de mercado del 46% y presencia a nivel nacional.

SOBOCE S.A. cuenta con tres Plantas productoras de cemento ubicadas en los departamentos de La Paz, Santa Cruz y Tarija.

Adicionalmente, cuenta con doce Plantas de hormigón premezclado localizadas en diferentes ciudades del país, dos Plantas de producción de agregados pétreos, una en La Paz y la otra en Cochabamba y dos Plantas de producción de prefabricados, una en La Paz y otra en Santa Cruz.

Misión de SOBOCE S.A.

La Misión es la razón de ser de la empresa; por lo tanto, la misión de SOBOCE S.A es:

“Satisfacer con excelencia las necesidades de
nuestros clientes con productos y servicios asociados
al cemento y sus aplicaciones, siendo para ellos la
mejor opción.”

Comprometiéndonos a:

- Garantizar a nuestros accionistas una constante generación de valor y una rentabilidad satisfactoria y sostenible.
- Promover para nuestro personal un adecuado ambiente de trabajo, participativo y de alta comunicación, donde pueda desarrollarse integralmente y sea reconocido por su desempeño.

- Contribuir al desarrollo de la comunidad y proteger el medio ambiente.
- Desarrollar Relaciones duraderas y de mutuo beneficio con nuestros clientes y proveedores.

Visión de SOBOCE S.A.

Hemos fortalecido nuestro liderazgo en la industria boliviana del cemento; somos una organización rentable y competitiva; vivimos una cultura de alto desempeño y somos una empresa socialmente responsable.

“Nuestra empresa es el mejor lugar para trabajar en Bolivia.”.

1.1.2. Localización

La fábrica productora de cemento en el sur de Bolivia, está ubicada en el Municipio de “EL PUENTE” de la provincia Méndez del Departamento de Tarija, en el denominado valle de San Juan del Oro distante a 110 Km de la ciudad de Tarija, cuenta con una población aproximada de 11000 habitantes. (Ver anexo 2)

Su radio de influencia abarca varias comunidades, cuyos pobladores utilizan la cercanía de la localidad a la ciudad y la facilidad de transporte, para aprovecharla como un lugar donde pernoctar y gozar de servicios básicos como agua potable y luz eléctrica.

El puente se encuentra a 2345 m.s.n.m. con una precipitación media anual de 293 mm., una temperatura promedio de 19 °C., humedad relativa de 48% y vientos predominantes del Norte al Este.

Las principales fuentes de ingreso de la población son la agricultura y los empleos directos e indirectos que la fábrica “El Puente” les proporcionan a los pobladores.

La fábrica de cemento El Puente es una empresa netamente productiva, que tiene como actividad principal la fabricación de cemento portland adicionado, utilizando recursos naturales de la zona en la que se encuentra instalada.

1.1.2.1. Localización de canteras

En cantera se realizan los denominados bancos de materias primas que son plataformas que se

realizan con el fin de que se pueda tener un material lo más puro posible y que no se mezcle con otro tipo de materia prima.

Una de las ventajas competitivas que tiene la fábrica de cemento El Puente, es la cercanía a sus principales materias primas, que van desde aproximadamente 4 Km a 10 Km, obteniendo costos de internación asequibles y la posibilidad de realizar mejor control de calidad de materiales.

En el ANEXO 16 concesiones de materia prima y conformación en cantera, se detalla la ubicación de los bancos de materia primas.

1.1.3. Estructura y organización

La estructura organizacional se refiere a la forma en que se dividen, agrupan y coordinan las actividades de la organización en cuanto a las relaciones entre los gerentes y los empleados, entre gerentes y gerentes y entre empleados y empleados. Los departamentos en Planta El Puente se estructuran como se indica en el Anexo 9.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La tecnología que la fábrica de cemento El Puente SOBOCE S.A. utiliza para la elaboración del cemento es del tipo vía seca con una capacidad aproximada de 310000 toneladas por año.

El proceso tiene lugar a través de siete áreas de producción:

- Explotación e internación de materias primas
- Trituración.
- Prehomogenización.
- Molienda de Crudo.
- Homogenización.
- Descarbonatación.
- Clinkerización.
- Dosificación y Molienda de Cemento.
- Envase y despacho de producto.

Figura 1-1 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de cemento



Fuente: Elaboración propia, 2023

1.2.1. Explotación e internación de materias primas

El proceso de explotación de materia prima está a cargo de la empresa ESMICAL S.A.

Los principales pasos de la explotación de materias primas son los siguientes:

- Identificación frente explotación
 - Apertura de caminos
 - Preparación de banco
- Limpieza desencape/ descarte
- Marcado Malla
- Perforación
- Cargado Banco
- Voladura

Previo a la internación de materias primas, ESMICAL S.A. realiza el acopio de materia prima y/o movimiento de materia prima a plataformas de internación.

El proceso de internación de materia prima es realizado con equipo pesado a cargo de SOBOCE S.A., En este proceso la materia prima acopiada en cantera, es cargada a las volquetas, quienes transportan el material a los depósitos de la fábrica de cemento El Puente o si se requiere directamente a las tolvas de alimentación de la chancadora.

1.2.1.1. Canteras

Para la producción de cemento, la cantera es el lugar donde se extrae la materia prima necesaria para la obtención de clinker y los demás aditivos.

En cantera se identifican los denominados bancos de materias primas que son plataformas que se realizan con el fin de que se pueda tener un material lo más puro posible y que no se mezcle con otro tipo de materia prima. Los bancos que se realizan en las canteras de cemento El puente son:

- Piedra caliza (Alta y baja ley)
- Arcilla
- Yeso
- Toba

En el Anexo 16, se muestran las concesiones y la conformación de materia prima en cantera.

1.2.1.2. Materias primas

Piedra caliza

Son rocas sedimentarias de origen químico y orgánico, formadas en ambientes marítimos y/o lacustres, constituidas esencialmente por carbonatos de calcio y otros elementos como Si, Al, P, Mg y K, los cuales se presentan en forma de óxidos. Su componente mayoritario es el carbonato de calcio (CaCO_3), entre 80 a 92 %, tienen como impurezas principales carbonato de magnesio y sílice.

Tabla I-1 Características químicas de piedra caliza La Tablada

PIEDRA CALIZA SM4				
FRENTE DE EXPLOTACION	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO
	%	%	%	%
SM4C	4,4	0,5	48	4
PIEDRA CALIZA SM1				
FRENTE DE EXPLOTACION	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO
	%	%	%	%
Guaranguay	10	1	46,3	2,8
Huayco	9,6	0,6	48	3
Salto	9,5	0,7	46,6	2,5
PIEDRA CALIZA SM2				
Guaranguay	21	4,9	36	1,8
Huayco	24	6	33	1,7
Salto	22	5,6	35	2

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de análisis químico XRF de la planta El Puente. 2023

Tabla I-2 Características químicas de piedra caliza La Constancia

PIEDRA CALIZA SM4				
FRENTE DE EXPLOTACION	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)
Huayco	4,5	0,4	49	2,5
Guaranguay	3,1	0,8	50	0,6

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de análisis químico XRF de la planta El Puente. 2023

Arcilla

Compuesto mineral cuya composición debe contener cantidades adecuadas de sílice, alúmina y óxido férrico.

Tabla I-4 Características químicas de arcilla El Salto

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Mn2O3	TiO2	P2O5	K2O	Na2O	SO3
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
56,49	19,55	7,25	1,35	1,41	0,07	0,81	0,11	3,65	0,95	0,27

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de análisis químico XRF de la planta El Puente. 2023

Marga calcárea

Mineral formado por mayor porcentaje de compuestos arcillosos y en menor proporción caliza.

Caliza Margosa

Mineral formado con mayor porcentaje de calizas y en menor proporción arcillas.

Óxido de hierro

Es un componente cuya función es formar, con la cal y la alúmina una serie de soluciones sólidas a las cuales pertenece la Brownmillerita (C_4AF) que es uno de los constituyentes mineralógicos del clinker. La dosificación de esta materia prima este sujeto a la composición de la arcilla, y se la usa cuando la arcilla tiene un contenido de sílice demasiado alto o un contenido de óxido de hierro demasiado bajo. El óxido de hierro tiene una pureza aproximadamente 50 - 85 % y una serie de impurezas como la sílice. Además, contribuye a la formación de costra para la protección del revestimiento refractario del interior del horno. Esta materia prima es internada desde el interior del país, puesto que en las canteras de SOBOCE S.A. no se cuenta con dicho material.

Yeso

Compuesto mineral cuya composición química es sulfato de calcio di hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) mayor a 35 % además contiene impurezas compuestas por sílice principalmente, se emplea como aditivo regulador de fraguado en la molienda final de cemento.

Tabla I-3 Características químicas de yeso y toba en LA SOLUCIÓN

MATERIAL	Ca ₂ SO ₄ *2H ₂ O (%)	Actividad (%)
Yeso	35-45	-
Toba	-	75-90

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de análisis químico XRF de la planta El Puente.

2023

Tobas Dacíticas

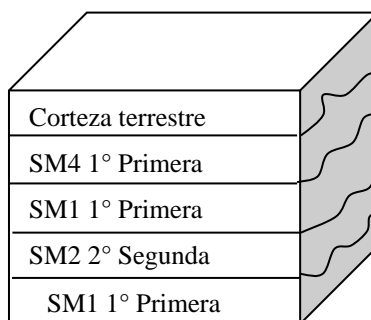
Tierra de origen volcánico con características de inestabilidad química que en lo general contienen sílice en estado amorfo o vítreo, que a temperaturas normales reaccionan con la Portlandita desprendida por el cemento al reaccionar con el agua y forman compuestos estables. Llegando a ser la puzolana natural utilizada para la fabricación de cemento en la planta de cemento El Puente.

1.2.1.3. Sondeo de materia prima

Es una técnica de reconocimiento geotécnico del lugar geométrico o banco de donde se quiere extraer la materia prima, y extraer las muestras a diferentes alturas para conocer las características del material mediante perforación mecánica o manual.

Altura de sondeo: Sector de la cantera de donde se extrae las muestras para su respectivo análisis, para luego explotar en ese sector.

Figura 1-2 Denominación de la cantera



Fuentes: Manual ESMICAL S.A. 2016

Tabla I-5 Clasificación de calizas (según prueba de carbonatos totales)

N°	CANTERA	%CO ₂ = TOTAL (MUESTREADO)
1	SUB MIEMBRO 4	92.74
2	HUAYCO SUB MIEMBRO 1	85.32
3	HUAYCO SUB MIEMBRO 2	60.37
4	SALTO SUB MIEMBRO 1	78.2

Fuente: Prueba hecha en laboratorio de análisis químico El Puente, 2023

Tabla I-6 Composición química de la materia prima en los bancos

	Huayco SM ₁	Huayco SM ₂	SM ₄	Yeso	Toba	Arcilla roja
CO ₃ ⁼ (%)	85.32	60.37	92.74			
MgO (%)	2.153	1.653	3.911	0.614	1.702	1.76
Al ₂ O ₃ (%)	1.173	3.945	0.784	1.307	9.471	17.97
SO ₃ (%)	0.244	0.234	0.199	36.339	0.528	0.65
SiO ₂ (%)	8.186	16.124	3.845	17.942	68.515	59.49
CaO (%)	46.024	40.821	48.763	25.393	6.772	1.84
Fe ₂ O ₃ (%)	0.487	1.299	0.334	0.546	2.744	5.69

Fuente: Prueba hecha en laboratorio de análisis químico El Puente. 2023

CALIZA PRIMERA: >85

CALIZA SEGUNDA: >50

1.2.1.4. Internación de materias primas

Una vez extraídas, las materias primas se transportan a la fábrica.

Este proceso de internación de materiales esta a cargo de la unidad de soporte de procesos en la fábrica El Puente y se realiza de la siguiente manera:

Número de volquetas: 3

Capacidad por volqueta: 18 toneladas

Viajes por volqueta en 8 horas: 10

Turnos en 24 horas: 3

Por lo tanto, con las operaciones de la fábrica de cemento El Puente funcionando continuamente durante 24 horas, las tres volquetas pueden transportar un total de 1620 toneladas de material en un día a los depósitos de planta o directamente al área de trituración de materiales.

1.2.2. Trituración de materias primas

La trituración es un proceso en el cual la energía mecánica - cinética (traslación) se transforma en energía de deformación y en calor (fricción interna) sobre el material que es impactado. Si el impacto es suficientemente fuerte, mediante un sólo contacto masivo o por varios impactos pequeños, la resistencia crítica del material (o su límite elástico) llega a excederse y el material se rompe.

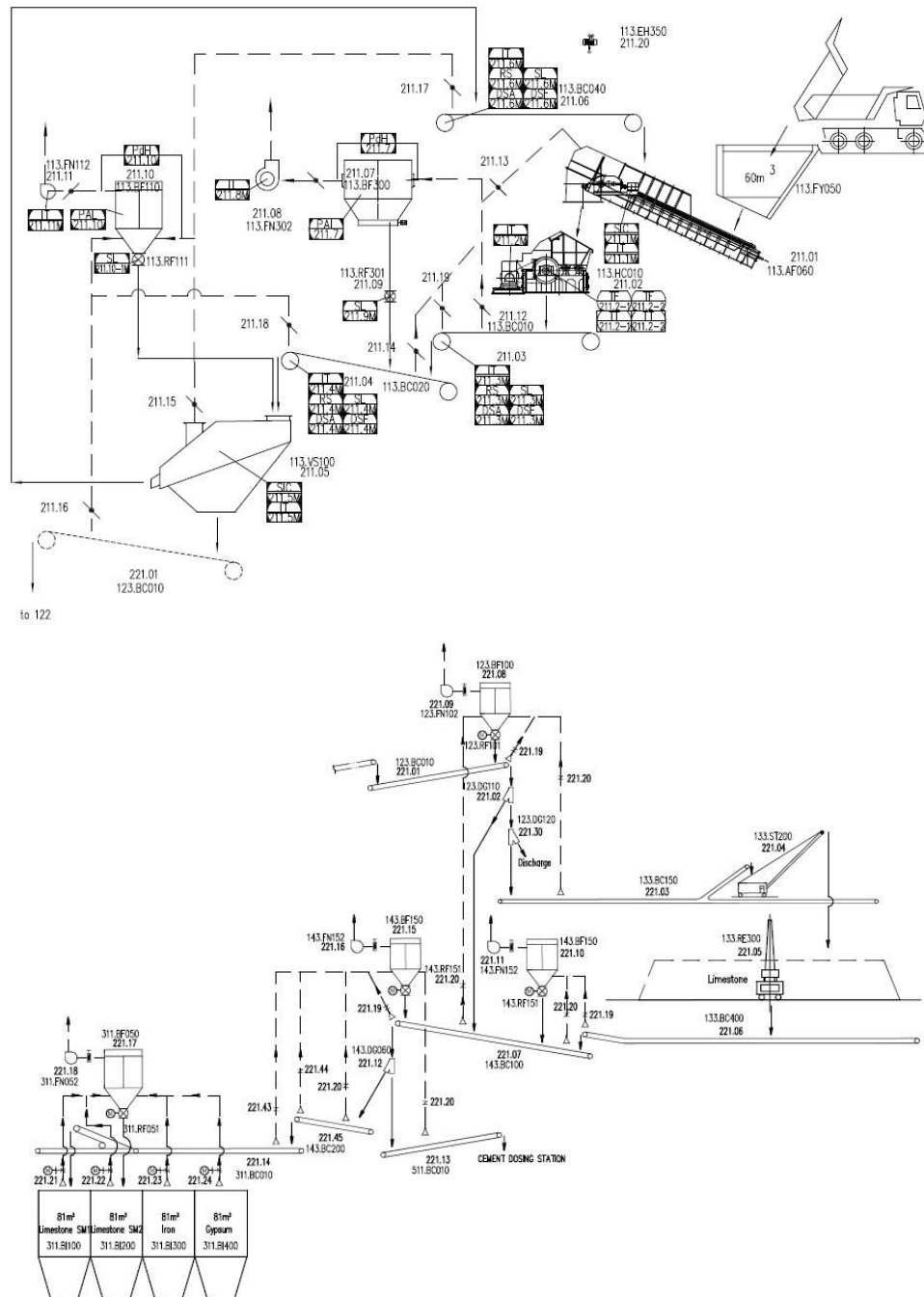
1.2.2.1. Chancadora de planta El Puente

El proceso de chancado en la fábrica El Puente, inicia la línea de producción de cemento. En esta sección son procesadas todas las materias primas: piedra caliza, yeso, óxido de hierro, arcilla y toba.

La sección de chancado utiliza materias primas explotadas en la cantera próximo a la planta,

excepto con el óxido de hierro que es transportado desde el departamento de Oruro.

Figura 1-3 Diagrama de flujo del proceso de chancado



Fuente: Manual de operaciones Planta El Puente. 2023

La trituradora de impacto, tiene un funcionamiento rápido y continuo, así como una elevada relación de reducción en comparación con las máquinas trituradoras a compresión.

Debido a su alta relación de reducción, este tipo de máquinas son las más utilizadas en la

industria del cemento, ya que en ellas pueden tratarse eficazmente materias primas blandas y semiduras. En razón de las rápidas velocidades de funcionamiento (velocidades circunferenciales para las trituradoras de impacto), los efectos de desgaste son comparativamente elevados, pero se justifica por las altas relaciones de reducción que permiten alcanzar las materias primas son obtenidas de la cantera próxima a la fábrica. Convirtiéndose la sección de chancado en un transportador de materias primas a los depósitos correspondientes, además, de reducir aún más el tamaño de las mismas.

Las piedras son depositadas en la tolva de alimentación hacia el alimentador de placas, quien transporta las mismas a la trituradora de impacto, posteriormente continua por la cinta transportadora túnel, que a su vez traslada el material hacia la cinta inclinada que sale del túnel hacia el tamizador que tiene una malla de 1/2" o 3/4" (dependiendo del requerimiento del proceso), donde se selecciona el material chancado. El producto mayor a la malla indicada se dirige a una cinta transportadora de retorno que descarga el material nuevamente a la trituradora, el producto que logra pasar la malla es depositado en una cinta inclinada que posee una derivación por medio de válvulas divisoras que según la posición de las mismas distribuyen el material hacia: el domo por medio del apilador, silos de almacenamiento de molinos de crudo, silos de almacenamiento de molienda de cemento y un chute de descarga de material hacia el exterior .

Posteriormente la piedra almacenada será alimentada según el requerimiento del proceso, el yeso, toba y óxido de hierro, se alimentan directamente hacia silos de almacenamiento de crudos, de igual modo los materiales requeridos para molienda de cemento.

1.2.3. Prehomogenización

La prehomogenización es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de arcilla, caliza o cualquier otro material que lo requiera.

En la fábrica de cemento El Puente se procede a la mezcla y homogeneización de las materias primas trituradas antes de proceder a la molienda de crudo. El material triturado se almacena en capas uniformes para ser posteriormente seleccionadas de forma controlada.

En la prehomogenización se realiza un apilado de piedra triturada destinado no tan solo a su almacenamiento; sino dispuesto para realizar las operaciones que puedan afectar a una homogeneización preliminar.

Este proceso permite preparar la dosificación adecuada de los distintos componentes

reduciendo su variabilidad.

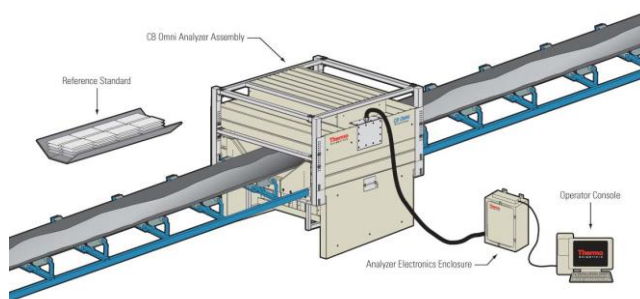
1.2.3.1. Apilador y recuperador

La apiladora y recuperadora es el sistema de prehomogeneización en la fábrica de cemento El Puente. Como parte necesaria de la línea de producción de cemento, puede completar simultáneamente o respectivamente el apilamiento y la recuperación. Desempeñan un papel vital en la prehomogeneización de la piedra caliza, estabiliza las condiciones del horno de cemento y garantiza la calidad del clinker.

Estos equipos que están dentro de área de chancado en la fábrica de cemento El Puente se desarrollaron en base a los requisitos de protección del medio ambiente, con filtros recuperadores de polvo en todo el sistema.

La prehomogeneización se realiza antes de la alimentación a la molienda de crudo, y su control químico es realizado mediante el analizador en línea CB OMNI – THERMOFISHER.

Figura 1-4 Control de formación de pilas con analizador en línea CB OMNI



Fuente: Manual CB OMNI Fusión Thermo fisher. 2018

1.2.4. Molienda de crudo

En la fabricación del cemento la molienda de crudo es de gran importancia, es en esta sección donde se lleva a cabo la molienda de las materias primas que previamente han sido prehomogeneizado con el proceso de explotación, trituración y formación de pilas.

La molienda es por vía seca y a circuito abierto. Los molinos están divididos por medio de tabiques en distintas cámaras de: secado del material, y de molienda propiamente dicho, en cuyo interior están los elementos molturantes en sus diámetros y pesos.

El principio de funcionamiento, es la conversión a polvo fino de la materia prima que ha sido triturada por la acción de los elementos molturantes contra las paredes, de las cámaras: el material en proceso de molienda es transportado en el molino neumáticamente por un ventilador de tiro inducido.

La alimentación al molino se la realiza por el mismo lado por donde ingresan los gases calientes provenientes del horno es un sistema de corrientes paralelas.

La función del molino, es la molienda y secado de los materiales.

El trabajo de molienda comienza eliminando la humedad que contiene la materia prima al ingresar al molino, este trabajo lo realizan los gases calientes que vienen de los hornos a una temperatura aproximada de 230°C, y que salen a una temperatura de unos 40 a 50 °C. entonces ingresan a la cámara 1 de molienda donde el trabajo es el molturado gracias a los impactos de las bolas que son de mayor diámetro contra el blindaje de la cámara, provocando el desmenuzamiento en primer grado para ingresar a la cámara de molienda 2, en la cual se realiza parte del trabajo de molienda esto debido a impacto y parte de fricción, es como la zona de transición en la conversión del estado físico de grava a polvo fino; posteriormente en la cámara 3, cuyo trabajo es del tipo fricción de las bolas de menor diámetro contra el blindaje del molino provocando el aumento de la superficie específica deseada en el material fino.

Dosificación de materiales en la molienda de crudo

Dosificar es mezclar las materias primas (piedra caliza, arcilla, y hierro), en proporciones determinadas de manera que los principales constituyentes químicos de estas materias primas, se puedan combinar entre si en una relación estequiométrica adecuada en el proceso de clinkerización.

La dosificación del molino de crudo 1 y crudo 2, se realiza por medio de dosificadoras de banda automáticas merrick de pesaje continuo que automáticamente van dotando de materia prima a las al molino por medio de las cintas transportadoras.

Los datos dados por el área de control de calidad son entregados a los operadores de molino de crudo para que los programen en las balanzas dosificadoras.

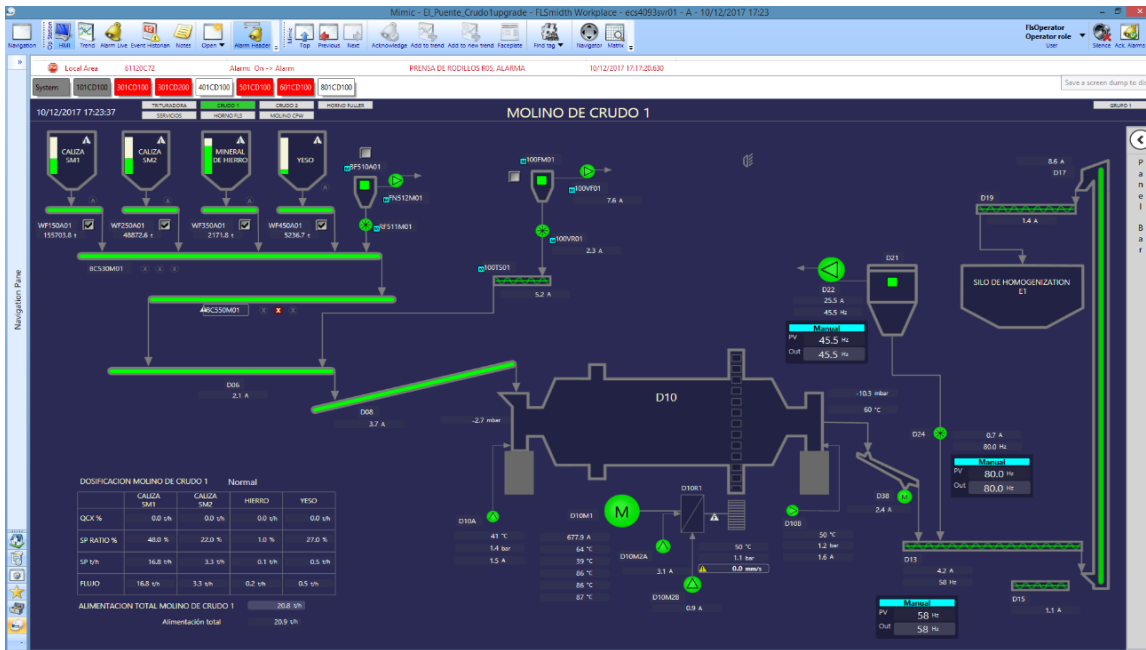
1.2.4.1. Molinos de crudo en la fábrica de cemento El Puente

El molino a bolas está sostenido por dos conjuntos de cojinetes y es accionado por un reductor y motor y está equipado con revestimientos, diafragmas y un trómel de salida.

Los dos molinos de crudo que hay en la planta el puente son cilindros de acero rotatorios, con capacidad aproximada de 22 t/h cada uno.

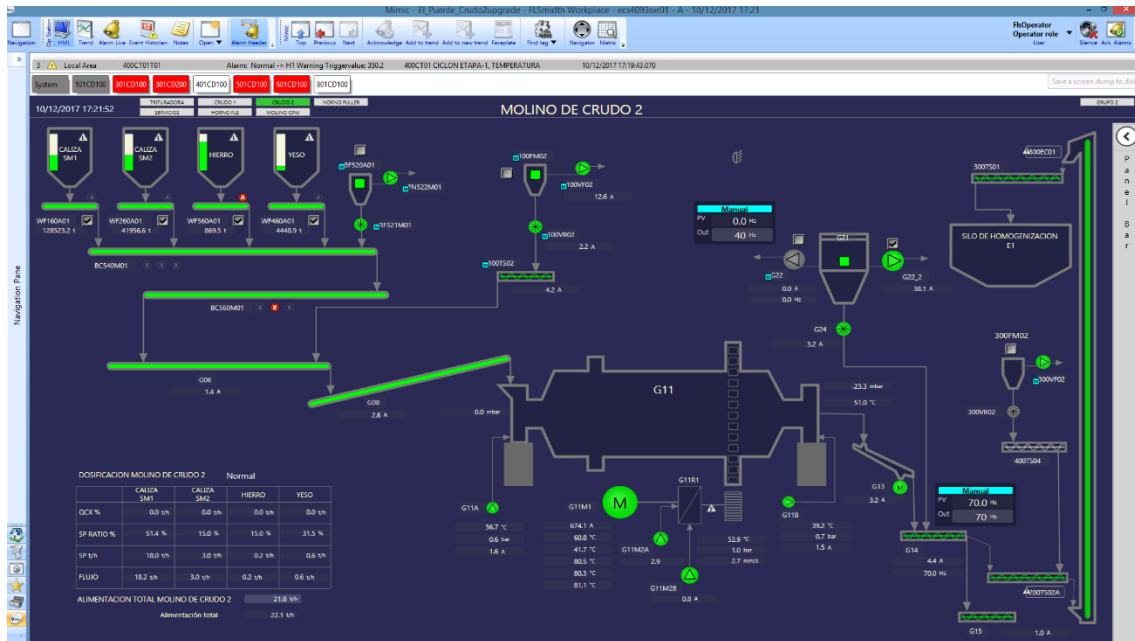
El molino al girar hace que las bolas en el interior vayan desmenuzando la materia prima hasta dejarlo en calidad de harina.

Figura 1-5 Diagrama de flujo de molienda de crudo I



Fuente: Panel de operación ECS/ ControlCenter OpStation Planta El Puente. 2023

Figura 1-6 Diagrama de flujo de molienda de crudo II



Fuente: Panel de operación ECS/ ControlCenter OpStation Planta El Puente. 2023

1.2.4.2. Parámetros físicos y químicos molienda de crudo

Para la Molienda de Polvo Crudo, se utilizan piedras calizas de alta y baja ley que conforman la pila de alimentación y correctoras, además de óxido férrico en forma de hematita y ocasionalmente a requerimiento del proceso se dosifica yeso y arcilla. Los parámetros de

control que deben cumplir los materiales de dosificación se encuentran detallados en el Anexo 3 Normas internas de materias primas y productos.

El prefijado del Polvo Crudo de alimentación al Horno, lo realiza la unidad de soporte de procesos que está a cargo del control de calidad en Planta El Puente.

Características física y química del crudo

Tabla I-7 Los análisis físicos y mecánicos que se realizan en laboratorio del polvo crudo

Característica	Prefijado	Procedimiento de inspección	Plan de acción
Modulo Khul (LSF) Modulo de Silicio (SIM) Modulo Fundente (ALM)	>=90 2,2-2,8 1,3-2,0	Análisis químico vía XRF	Laboratorio realiza los prefijados de las dosificadoras para corregir desviaciones en los módulos
Retenido en Malla 170 (%)	10 -20	Análisis físico en malla +170	OPERADOR DE MOLIENDA CRUDO Realiza ajuste en la frecuencia del Ventilador para corregir desviaciones.

Fuente: Manual de operaciones Planta El Puente, 2023

Los análisis Físicos y Químicos, del Polvo Crudo se realizan en laboratorio:

Análisis físicos.

Finura del polvo crudo según retenido en malla170.

Finura con la malla + 170 = 10 - 20%

Análisis químicos.

En las Tablas I-8 se muestra los parámetros del polvo crudo en lo que respecta a óxidos de control:

Tabla I-8 Composición química del polvo crudo óxidos

Componente	Cantidad (%)
CaO	41,0 - 42
SiO ₂	13,50 – 14,50
Al ₂ O ₃	2,80 – 3,30
Fe ₂ O ₃	1,60 – 1,90
MgO	<2,50
K ₂ O	<0,90
Cl-	<0,04
SO ₃	<0,50
Perdidas por calcinación	35,51

Fuente: Manual de operaciones Planta El Puente, 2023

Durante la operación es monitoreado por el sistema de control en el cual los valores de proceso y ajustes son tratados y registrados para que estén a disposición del operador.

1.2.5. Homogeneización y almacenamiento del crudo

En el sistema de homogeneizado, la mezcla cruda contenida en un silo de gran capacidad se fluidifica completamente por la admisión de aire comprimido que entra por aberturas dispuestas en el fondo cónico del silo. Sumergidas las partículas sólidas contenidas en el silo en la masa de aire entrado a baja presión, se reduce grandemente o se anula el rozamiento entre ellas.

Admitiendo el aire cíclicamente por zonas distintas del fondo del silo por las llamadas zonas de aireación, mientras que en las zonas restantes tan solo se admite la cantidad de aire suficiente para mantener la condición de fluidizadas.

La aireación de las zonas se realiza sistemáticamente a intervalos regulares mediante un sistema de válvulas que se mueven rotativamente en el fondo del silo; de sector a sector, en el sentido de las agujas del reloj. A los efectos de homogeneización deseada es muy particularmente esta continua progresión de las zonas activas lo que mantiene el contenido del silo en movimiento.

El silo de homogeneización de aproximadamente 350 t, está proyectado para contener la molienda de 7 a 9 horas de producción de la molienda, tiempo considerado como suficiente para neutralizar las variaciones que pudieran existir en el crudo.

El almacenado del crudo homogeneizado en el silo de almacenamiento de aproximadamente 800 t será de manera continua para fines de continuidad también del proceso de clinkerización; además de cumplir con las cantidades necesarias para tal fin.

Después del Proceso de Molienda, la mezcla en forma de polvo impalpable es fluidizado por medio de aire comprimido que ocasiona un efecto de mezcla.

Este efecto de mezcla es utilizado en forma ventajosa dentro del silo homogeneizador. Este silo es capaz de absorber y filtrar altas frecuencias de variaciones químicas en función del tiempo de retención del material dentro del silo; así mismo tiene la habilidad de suavizar estas variaciones de calidad de la mezcla cruda.

De vital importancia en el diseño de un sistema de preparación de materias primas es la optimización de su operación y el control del mismo.

Los requerimientos de energía eléctrica y de aire para la homogeneización del crudo dependen de las fluctuaciones de la composición del crudo a la entrada del sistema, así como el valor deseado como correcto. Esos factores prolongan o acortan el tiempo de mezcla y el caudal de aire necesario. Las desviaciones al valor correcto, fijado como contenido de carbonato de calcio en función del tiempo de mezcla.

1.2.6. Proceso de calcinación – descarbonatación

Las materias primas, secadas, molidas y homogeneizadas, son abastecidas a los precalentadores de los hornos FULLER y FLS como harina cruda.

En el conjunto precalentador horno, los gases calientes originados en el quemador del horno y en las reacciones químicas, son extraídos por un ventilador y circulan ascendentemente a gran velocidad por los ciclones.

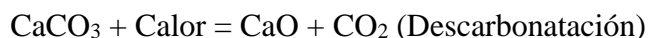
La alimentación de la harina cruda se efectúa desde la parte superior de la torre de ciclones, especialmente en el ducto de salida de los gases calientes del ciclón, pasando a través de estos, por contra corriente, al flujo de gases calientes del horno, produciendo la deshidratación y descarbonatación de la harina cruda.

La harina o polvo crudo al pasar por el precalentador sufre las siguientes reacciones:

- 20 a 100 °C evaporación del agua.
- 100 a 300 °C pérdida del agua absorbida físicamente.
- 400 a 900 °C Remoción del H₂O estructural (H₂O y grupo OH) de minerales arcillosos
- > 500 °C Cambios estructurales en los minerales silíceos
- 600 a 900 °C Disociación de carbonatos

Cuando el polvo de crudo ingresa está en el ciclón inferior se produce la:

- Descarbonatación de la piedra caliza, el carbonato de calcio de la caliza se convierte en óxido de calcio ó cal, eliminando dióxido de carbono, esta reacción se completa en la zona de calcinación del horno a aproximadamente entre 600 a 900 °C.



A causa de esta liberación de vapor de agua y de dióxido de carbono, se pierde por estequiométrica de la reacción química aproximadamente un 35 % del polvo crudo.

Desde el ciclón inferior de las torres de precalentamiento, la harina cruda se desliza al interior del horno como producto de la rotación e inclinación del horno.

La temperatura en la zona de cocción de la harina cruda, se regula, ajustando el volumen de combustible al horno y las revoluciones del ventilador de tiro inducido.

Ciclo de los álcalis

Cuando el material sometido a cocción alcanza los 800 °C a 1000 °C los álcalis (K₂O – Na₂O) y cloruros se separan por evaporación del material sometido a cocción pasando junto con los gases de combustión a la entrada del horno y volviendo a condensar en zonas más frías, esto es

la recámara y el precalentador, produciéndose un circuito interno que originan formaciones de costras indeseadas que producen taponamientos y perturbaciones en la marcha del horno.

1.2.7. Proceso de clinkerización

Cambiar la alimentación del horno a clinker requiere de una serie de procesos que ocurren a medida que el material pasa a través del sistema del horno. El objetivo principal es producir un flujo estable de clinker de calidad uniforme y predecible, utilizando simultáneamente una cantidad mínima de energía, evitando averías prolongada y costosas del enfriador y horno.

El proceso de clinkerización es la etapa más importante del proceso aquí es donde se desarrollan las mayores temperaturas y se producen las reacciones de los componentes mineralógicos del clinker. (Fuente: FLSmidth, (2002). Proceso y operación de los sistemas de hornos ASOCEM <https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/pyro/rotary-kilns-for-cement-plants.pdf>.)

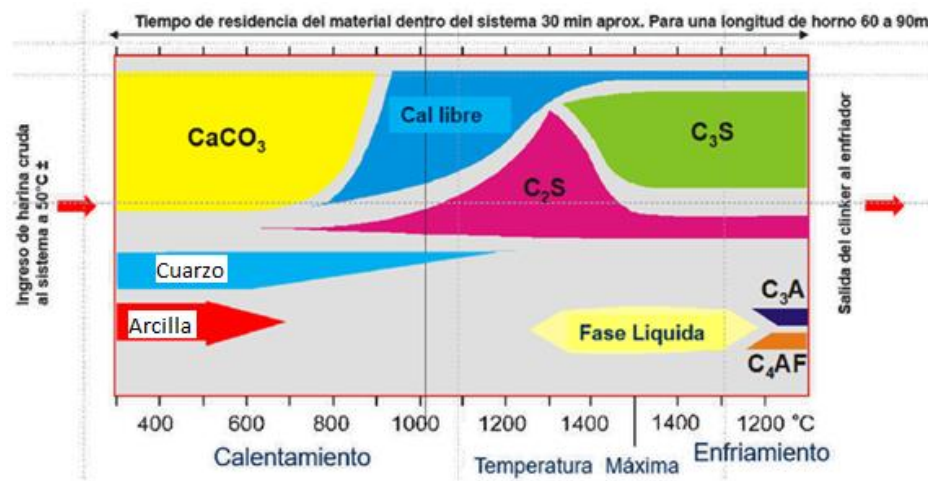
El polvo crudo homogeneizado deberá cubrir ahora la etapa principal del proceso productivo del Cemento Portland, su transformación química en clinker en el interior del horno rotatorio. Para fabricar clinker de cemento a partir del material crudo es preciso quemar este hasta una temperatura de 1450 °C, alcanzando así la clinkerización, un conjunto de complejas reacciones químicas que se llevan a cabo fundamentalmente en estado sólido, pero con una proporción considerable del material en estado líquido.

Los equipos destinados a la cocción del polvo crudo en una planta de cemento, son el precalentador y el horno rotatorio.

La cocción del clinker exige que la atmósfera sea oxidante dentro del horno, cuando no se tiene estas condiciones el clinker no resulta del color grisáceo verde, el cemento resultante presenta mala cocción y resistencia más bajas.

En la figura 1-7, se pueden apreciar gráficamente las temperaturas, reacciones y cantidades en la formación de fases mineralógicas del clinker.

Figura 1-7 Reacciones en el proceso de clinkerización



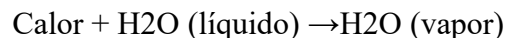
Fuente: FLSmidth, (2002). *Proceso y operación de los sistemas de hornos ASOCEM*
<https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/pyro/rotary-kilns-for-cement-plants.pdf>.

Durante el paso del material de harina cruda a través del tubo del horno va sufriendo una serie de transformaciones físicas y químicas, provocando la disociación de los carbonatos del crudo y a su vez, la combinación de los diversos óxidos presentes con la cal, originando los constituyentes mineralógicos del clinker en las diferentes zonas del horno.

A medida que va variando la temperatura en el horno el polvo calcinado sufre las siguientes reacciones.

SECADO

La evaporación del agua libre es un proceso endotérmico que se realiza a temperaturas de 100 °C o menos y que exige una aportación de calor suficiente para efectuar el proceso:

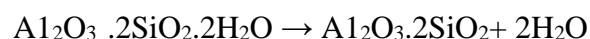


En el proceso por vía seca el secado se realiza, durante la operación de molienda de crudo utilizando la energía de los gases de salida del horno.

DESHIDRATACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

Al calentar la harina cruda a temperaturas superiores (temperaturas comprendidas entre 350 y 750 °C), se desprende el agua combinada de los componentes arcillosos.

Al calentar la harina cruda a temperaturas superiores (temperaturas comprendidas entre 350 y 750 °C), se desprende el agua combinada de los componentes arcillosos.



CALCINACIÓN

La calcinación fue descrita a detalle en el punto 1.2.6 del presente documento.

REACCIONES ENTRE FASES SÓLIDAS

A partir de temperaturas comprendidas entre 550 °C y 600 °C comienzan a producirse reacciones entre fases sólidas, por las cuales se combinan los productos de descomposición del CaCO_3 con los de la arcilla, formándose primero y preferentemente compuestos de menor contenido de cal, como por ejemplo aluminato monocálcico, CA, y silicato dicálcico, C_2S .

El mineral “gehlenita”, $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ se descompone a temperaturas más elevadas (alrededor de 1100 °C), y comienza la formación de $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, y $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

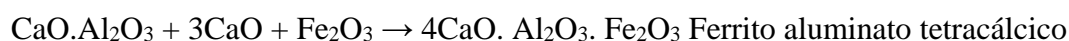
La formación del C4AF tiene lugar dentro de la gama de temperaturas de 1100 °C a 1250 °C.

El compuesto C_{12}A_7 se observa a temperaturas entre 900 °C y 1100 °C y se convierte en C3A a temperaturas de 1100 °C y mayores. Además, el CaCO_3 que queda se descompone y la CaO libre alcanza un valor máximo.

FORMACIÓN DE LA FASE FUNDIDA

La primera formación de fase líquida, tiene lugar a una temperatura comprendida entre 1250 y 1350 °C, y su proporción aumenta muy rápidamente en un pequeño intervalo de temperatura y después permanece prácticamente constante, alcanzando un valor máximo a, aproximadamente, 1450 °C, que oscila entre el 20 % - 30 %.

Esta etapa tiene como productos las fases mineralógicas de silicato dicálcico, aluminato tricálcico y el ferrito aluminato tetracálcico a partir de los óxidos puros, silicato de calcio y aluminato de calcio.



La cantidad de fase fundida que se forma depende de la composición química del crudo, así por ejemplo al aumentar el módulo de silicatos, manteniendo los demás parámetros constantes (Módulo de alúmina y factor de saturación en cal), disminuye la proporción de fase líquida.

El aluminato tricálcico en el cemento es responsable en alguna medida de las resistencias del cemento a corto plazo, se caracteriza por su alta solubilidad y elevados calores de hidratación.

El ferrito aluminato tetracálcico, forma parte de la fase líquida a 1338°C necesaria para alcanzar el rango de clinkerización para la conformación de las demás fases mineralógicas. Este último

constituyente es responsable también de la tonalidad del cemento.

FORMACIÓN FÍSICA DEL CLINKER NODULIZACIÓN.

En la primera etapa de la clinkerización la fase fundida formada hace que el crudo se nodulice. La nodulización de clinker se refiere a los procesos de aglomeración física en el horno rotatorio y es deseable que el material caliente que sale del horno tenga una granulometría en la gama de tamaños de 2 a 20 mm con gránulos de una porosidad apropiada. Esta granulometría, es decir, distribución de los granos de clinker por tamaño, es adecuada para el tratamiento (enfriamiento o transporte) en el enfriador y, normalmente, resulta en una molturabilidad satisfactoria en el molino de cemento.

FORMACIÓN DE LA ALITA

La reacción más importante que tiene lugar durante la cocción del crudo es la formación del silicato tricálcico a partir del silicato dicálcico y de la cal, en presencia de fase fundida.



La sinterización se da a temperatura mayores o iguales a 1450 °C.

En la zona de transición salida ya se encuentran formados los cuatro constituyentes mineralógicos del clinker.

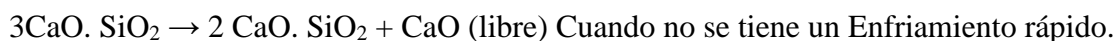
El silicato tricálcico y el silicato dicálcico son elementos mineralógicos fundamentales del clinker ya que son responsables del alcance de resistencias mecánicas a corto y largo plazo respectivamente.

ENFRIAMIENTO DEL CLINKER

Una vez formado el clinker es enfriado, para evitar degradación

- 1400 a 1240 °C cristalización de la fase líquida, especialmente el aluminato y ferrita

Se aconseja que el Clinker sea enfriado rápidamente para prevenir la descomposición del silicato tricálcico ó alita en silicato dicálcico ó belita y cal libre, como lo indica la siguiente reacción:



Las reacciones entre sólidos transcurren en general muy lentamente, pero se pueden acelerar en particular por lo que el operador debe de conocer las situaciones siguientes:

- Reducción del tamaño de las partículas.
- Aumento de la temperatura de cocción
- Distorsión de las redes cristalinas.

Además de prevenir la descomposición del C_3S , se debe evitar, siempre, que los gases de salida del horno no contengan gases inflamables, tales como:

- Monóxido de carbono
- Hidrógeno gaseoso
- Hidrocarburos.

Si los gases de salida contienen uno de los gases citados, significa que el proceso de quemado del combustible ha sido insuficiente.

Se debe tomar en cuenta que el clinker también tiene otros componentes procedentes de las materias primas y del combustible. A ellos se denominan componentes secundarios y son los siguientes:

- Magnesia (MgO).
- Sulfatos (SO_3).
- Cal libre (CaO sin combinarse).
- Alcalis (Na_2O y K_2O).
- Otros como el óxido de manganeso, óxido de vanadio, anhídrido fosfórico, entre los más importantes.

1.2.7.1. Variables químicas y físicas en el proceso de clinkerización

Tabla I-10 Relación del polvo crudo de alimentación al horno

Variable	Denominación	Fórmula	Mínimo	Máximo	Deseable
M.SIM	Módulo de Sílice	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,9	3,2	2,6 – 3.1
Si M.SIM es menor a 1,9			Si M. SIM es mayor a 3,2		
1. Cocción fácil, exceso de fase líquida. 2. Ataque a refractarios, costra fusible. 3. Formación de bolas. 4. Clinker duro. 5. Horno inestable. 6. Bajo consumo térmico. 7. Menor resistencia del cemento			1. Cocción fácil, poca fase líquida. 2. Cargas térmicas elevadas. 3. Poca Costra. 4. Clinker pulvulento, cal libre alta. 5. Horno inestable. 6. Cemento de alta resistencia inicial y fraguado lento.		
Variable	Denominación	Fórmula	Mínimo	Máximo	Deseable
Kulh (LSF)	Factor de saturación de la cal	$100 * (\text{CaO} + 0,75 \text{ Mg}) / 2,8\text{SiO}_2+1,18\text{Al}_2\text{O}_3+0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3$	90	98	92-97
Si Kulh es menor a 90			Si Kulh mayor a 98		
1. Crudo con bajo contenido de carbonato. 2. Inestabilidad en el horno. 3. Menor temperatura de fusión. 4. Menor consumo de combustible. 5. Puede ser causa de taponamientos. 6. Menor cal libre. 7. Formación de costras a temperaturas menores.			1. Crudo con mayor contenido de carbonato. 2. Inestabilidad en el horno. 3. Mayor temperatura de fusión. 4. Mayor consumo de combustible. 5. Mayor cal libre. 6. Formación de bolas.		
Variable	Denominación	Fórmula	Mínimo	Máximo	Deseable
M. ALM	Módulo de Alúmina o Fundente	$\text{Al}_2\text{O}_3/ \text{Fe}_2\text{O}_3$	1,4	2	1,6 - 1,9
Si M.ALM es menor a 1,2			Si M.ALM es mayor a 1,8		
1. Fase líquida fluida. 2. Mayor contenido de hierro. 3. Costra inestable. 4. Infiltración a refractarios. 5. Cemento de baja resistencia inicial y bajo calor de hidratación.			1. Fase líquida viscosa. 2. Exceso de aluminio. 3. Crudo de difícil cocción y baja formación de costra. 4. Cemento de alta resistencia inicial		

Fuente: RHI, Customer service. 2012

Análisis físicos de harina de alimentación al horno (HEH)

El análisis físico y mecánico que se realizan en laboratorio del polvo crudo de alimentación a los hornos son:

Fineza de polvo crudo según las diferentes mallas.

Fineza con la malla + 170 = 12 - 18 %

Fineza con la malla + 70 = 0.5 – 2.5 %

Características químicas de la harina de alimentación al horno (HEH)

La temperatura del polvo al ingresar al Precalentador es aproximadamente 20 °C cuando entra en contacto con los gases a 340 °C y alcanza los 800 °C al ingresar al horno.

Tabla I-9 Parámetros químicos HEH

	COMPUESTOS Y MÓDULOS	PARAMETROS
	CaO	41 – 42%
	SiO ₂	13.50 – 14.50%
	Al ₂ O ₃	2.8 – 3.20%
	Fe ₂ O ₃	2 – 2.3%
	MgO	1,0 – 2.60%
	K ₂ O	0.6 - 1 %
	SO ₃	0.1 - 0,80%
	Perdidas	34,50 – 35.90%
Carbonato	CaCO ₃	76,00 – 79.00%
Grado de saturación de la cal	KUHL (LSF)	> 90%
Cloruros	Cl-	0,025 %
Módulo de silicatos	SIM	2.6 – 3.20
Módulo fundente	ALM	1,6 – 1.9

Fuente: Manual de operaciones planta El Puente, 2023

Características químicas del producto “CLINKER”

Los siguientes parámetros corresponden al clinker estándar, producido en la fábrica de cemento El Puente:

Tabla I-11 Parámetros químicos del clinker

Compuestos, módulos y fases mineralógicas	%	
Oxido de Calcio	CaO	63,0 – 68,0
Dióxido de Silicio	SiO ₂	21,0 – 23,0
Alúmina	Al ₂ O ₃	4,10 – 4,90
Oxido Férrico	Fe ₂ O ₃	2,50 – 2,90
Oxido de Magnesio	MgO	2,50 – 4,70
Oxido de Potasio	K ₂ O	0,40 – 1,30
Oxido de Sodio	Na ₂ O	0,20 – 0,40
Trióxido de Azufre	SO ₃	0,15 – 0,80
Perdidas por Fuego	PPF	0,02 – 0,90
Cal libre	CaO(L)	1 – 2,5
Grado de Saturación de la cal	Kulh (LSF)	92 – 97
Modulo de silicatos	M. SIM	2,60 – 3,20
Modulo Fundente	M. ALM	1,50 – 1.90
Silicato tricálcico	C ₃ S	55 – 68
Silicato dicálcico	C ₂ S	8 – 18
Aluminato tricálcico	C ₃ A	6,8 – 9,7
Ferro Aluminato Tetracálcico	C ₄ AF	7– 10

Fuente: Manual de operaciones Planta El Puente. 2023

Función del clinker en el cemento

La materia más importante en la molienda de cemento es sin duda el clinker, que se obtiene del horno rotatorio, el cual es un compuesto mineralógico y de tamaño variable.

Los elementos mineralógicos fundamentales del clinker y del cemento, son responsables del alcance de resistencias mecánicas a corto y largo plazo respectivamente.

Tabla I-12 Comportamiento de los componentes mineralógicos en el cemento

Constituyente o fase	Fraguado	Endurecimiento	Contribución la resistencia	Calor de Hidratación	Estabilidad química
Silicato tri cálcico	Rápido	Rápido	Alta a edades cortas	Alto	Buena
Silicato di calcico	Lento	Lento	Alta a largo plazo	Regular	Muy buena
Aluminato tri cálcico	Muy rápido	Muy rápido	Poca	Muy alto	Mala
Ferrito aluminato tetra cálcico	Rápido	Rápido	Muy poca	Bajo	Muy buena

Fuente: Manual de operaciones de planta El Puente, 2023

1.2.7.2. Horno FULLER

El **Horno Fuller** es el equipo más antiguo de la fabricas de cemento El Puente, desde su puesta en marcha por el año 1988.

El horno Fuller es de funcionamiento simple e ideado para soportar diferencias significativas en el proceso de operación, con materiales de excelente resistencia. Actualmente cuenta con control automatizado de punta ECS/ ControlCenter OpStation, y tiene una capacidad de 160 t/día.

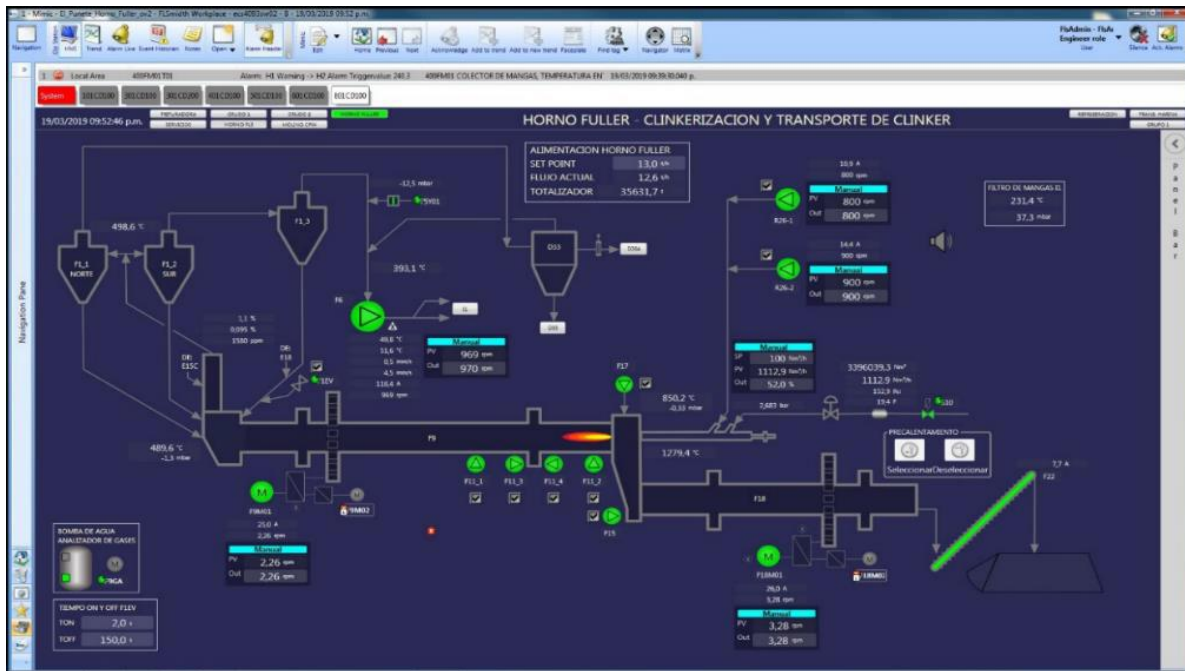
Las materias primas, chancadas, molidas y homogeneizadas, son abastecidas al horno como harina cruda.

La alimentación al horno del polvo crudo se efectúa a la cámara de humos, parte superior de la bóveda de entrada al horno, mediante un deflector se envía al flujo de gases de combustión que van a los ciclones, recuperándose de los gases calientes del horno y en este proceso se va produciéndose el secado y la deshidratación del polvo crudo.

Desde los ciclones de la torre, la harina cruda se introduce por la Bóveda de Entrada al horno sección más ancha, se desliza luego al interior del horno donde el material es suspendido en los levantadores recuperando calor y luego es enviado hasta la salida como producto de la rotación e inclinación del horno. (Manual de operaciones de planta El Puente, 2023).

En el diagrama de flujo se puede apreciar el sistema del horno Fuller:

Figura 1-8 Diagrama del horno Fuller



Fuente: Panel de operación ECS/ ControlCenter OpStation Planta El Puente. 2023

El Horno productor de clinker es de tipo largo para vía seca con una sola etapa precalentamiento y recuperación de polvo y calor.

El enfriamiento del clinker se produce en un enfriador rotatorio que está conectado al horno por una bóveda de salida.

Los gases residuales son filtrados en un filtro a mangas de cuatro cámaras con limpieza de mangas con retrolavado, luego estos gases depurados son enviados a la atmósfera por una chimenea.

1.2.7.3. Horno FLS

El horno rotatorio FLS, que se utiliza para la producción de clinker de cemento, es el equipo principal de la nueva línea de producción de cemento en planta El Puente.

Este equipo se compone principalmente de cilindro, dispositivo de soporte, dispositivo de soporte con rueda de captura, dispositivo de transmisión, el dispositivo de lubricación, móvil cabeza del horno y el dispositivo de sellado en el extremo del horno. (Manual de operaciones de planta El Puente, 2023)

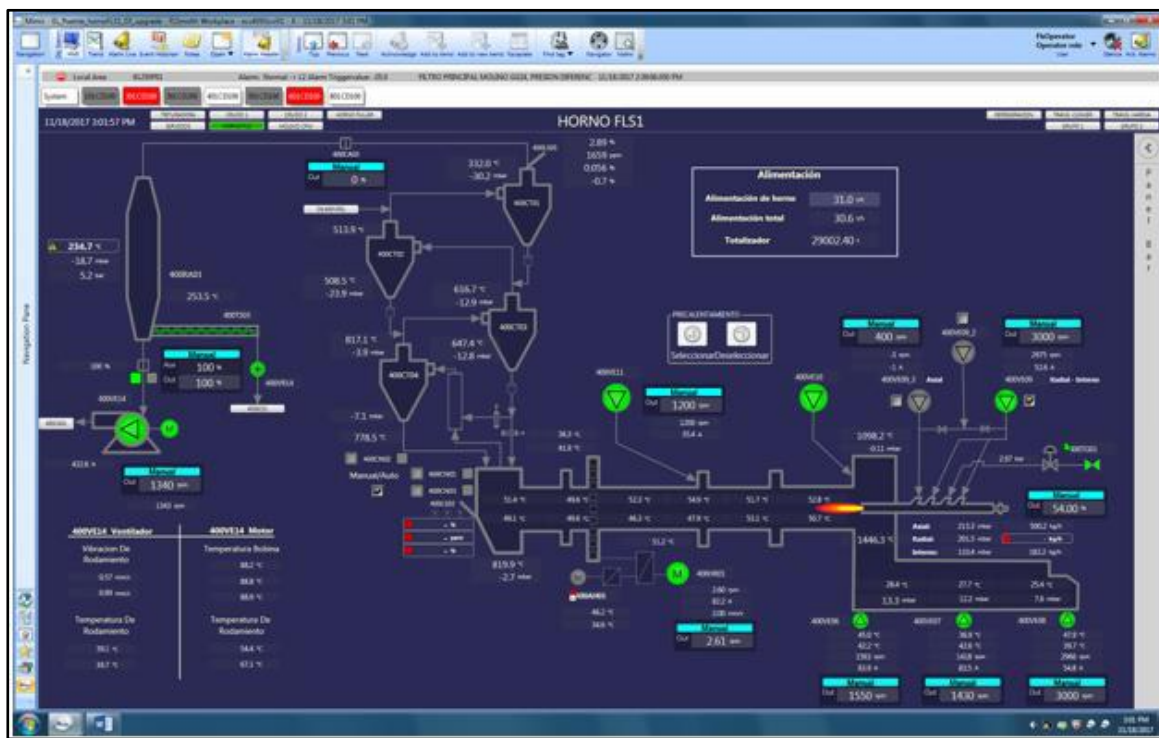
CONTROL DE VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO HORNO FLS

- Alimentación al horno 32 t/h.

- Velocidad del horno 2 rpm
- O₂ a la entrada del horno 1.5 – 2.5 %
- Damper del ventilador de tiro inducido 100 %
- Velocidad del ventilador de tiro inducido 1300 rpm
- Consumo específico 974,12 Kcal/Kg cl
- Presión de capilla de salida (hood) del horno -0.15 mbar.
- Velocidad sopladora de aire primario 2800 rpm.
- Velocidad ventilador cámara 1 a 1500 rpm.
- Velocidad ventilador cámara 2 a 1300 rpm
- Velocidad de mesa enfriador 850 rpm.
- Temperatura del clinker salida 40-80 °C.

En el diagrama de flujo se puede apreciar el sistema del horno FLS:

Figura 1-9 Diagrama de flujo del horno FLS



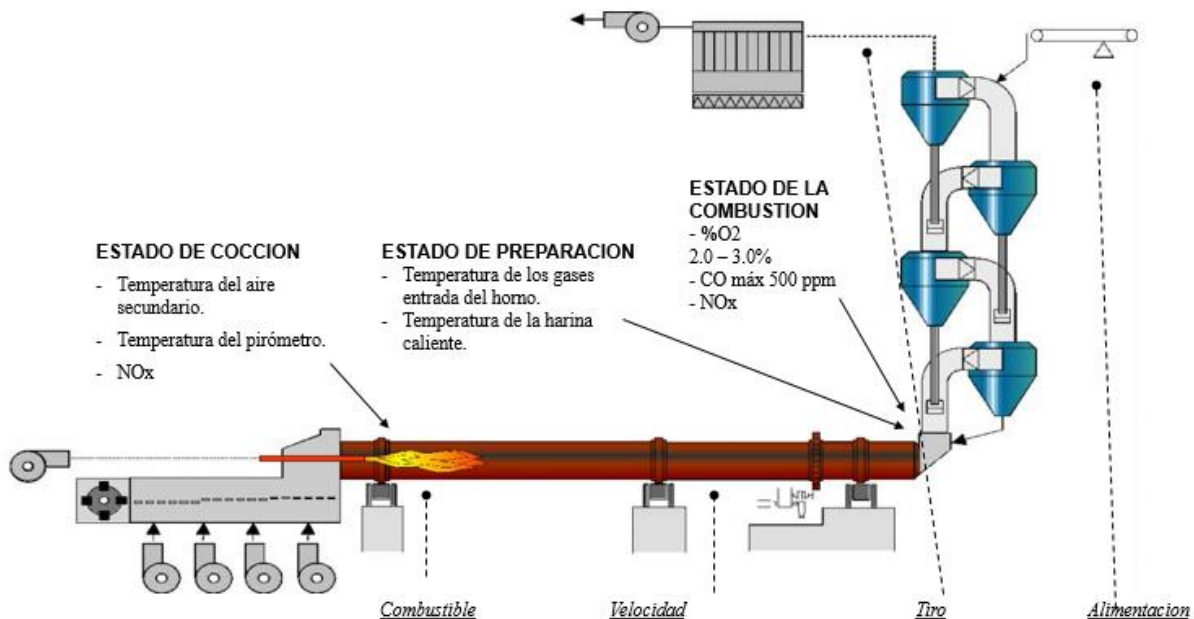
Fuente: Panel de operación ECS/ ControlCenter OpStation Planta El Puente. 2023

1.2.7.4. Operación de los hornos

Las condiciones de operación iniciales para el funcionamiento normal y a régimen del horno rotatorio, se deben reducir al mínimo posible, las variaciones de alimentación y de combustible.

Toda modificación o ajuste necesario debe efectuarse en incrementos discretos, para obtener un alto rendimiento y óptimo funcionamiento productivo de la línea del horno.

Figura 1-10 Variables básicas de operación del horno



Fuente: Ing. Rubén Ortiz, HOLCIM, *Elementos volátiles*. Ciudad de México (CDMX), Octubre 2017.

Las variables a manejar por el operadore del horno de clinker son el combustible, la velocidad del horno, las revoluciones del ventiladores de tiro inducido y la alimentación. Dichas variables permitirán controlar el estado de cocción del polvo crudo, el estado de preparación y el estado de la combustión en el horno.

Las condiciones de operación en un horno están indicadas por:

1. Temperatura en la zona de clinkerización: Cuando el material ingresa a esta es de vital importancia, según referencias de literatura está entre 1450 °C.
2. La temperatura a la entrada del horno: Para mantener el horno en condiciones estables de operación, en la bóveda de entrada deberá estar entre 480 y 550 °C.
3. El porcentaje de exceso de oxígeno que existe en los gases de Combustión: Para el control de la eficiencia en el proceso de combustión, este valor debe estar con aproximadamente 1.8%.

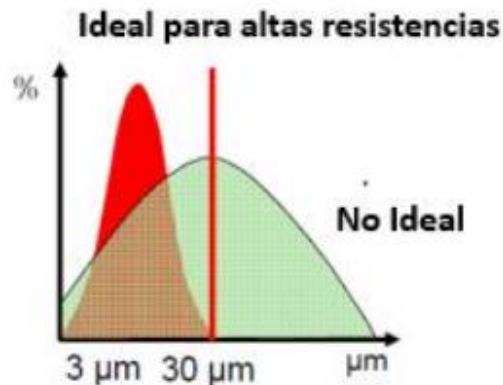
1.2.8. Molienda de cemento y dosificación

La molienda de clinker para cemento es uno de los procesos principales y, al mismo tiempo, el final de las operaciones tecnológicas en la fabricación del cemento. La forma de su realización

es decisiva para la calidad del cemento.

No se trata de conseguir que el proceso de molienda llegue hasta una superficie específica demasiado grande, sino que el producto molido cumpla determinadas leyes relativas a la granulometría del producto, para crear con ello las mejores condiciones para los procesos de endurecimiento.

Figura 1-11 Tamaño de partícula cemento



Fuente: Duda, Walter H. (1977). *Manual Tecnológico del cemento*, Editores Técnicos Asociados S.A, Barcelona- España.

Durante el proceso de producción de cemento, la molienda de clinker requiere el mayor consumo de energía eléctrica. Este consumo de energía depende directamente de la finura del producto terminado. Por lo tanto, los molinos de cemento deben ser operados de tal forma que se obtenga la producción requerida así como la calidad de producto deseada.

Resulta entonces, de extrema importancia, conocer las características de la materia prima en la molienda de cemento, las características del producto terminado, el equipo y maquinaria de la sección, la forma de operación, sus variables de operación y funcionamiento, etc.

Materia prima de alimentación a molienda

Las materias primas para la fabricación del cemento son el clinker, la toba y el yeso. De sus propiedades físicas, químicas y la óptima operación del molino, depende la calidad del cemento a obtenerse.

1.2.8.1. Dosificación de materiales sección cemento

El dosificador de banda se utiliza para trasvasar material desde una tolva de alimentación al resto de la instalación realizando el pesaje de forma continua y regular, siendo horizontales o ascendentes. Este alimentador está especialmente diseñado para productos de granulometría

continua y homogénea, tales como clinker y materiales triturados (Yeso, Toba, calizas y arcillas), por lo que son ampliamente usados en la molienda de cemento. Una máquina que, frente a otro tipo de alimentadores, presenta enormes ventajas de funcionamiento al tratar materiales húmedos y arcillosos extraídos bajo el nivel freático.

Figura 1-12 balanzas dosificadoras MERRICK



Fuente: INDUSTRIAS MECANICAS SEGUI. [sitio web]. España: Alimentador de banda. [13-08-2019]. Disponible en:

<http://www.industriasegui.com/wpcontent/uploads/2018/07/ALIMENTADOR-DE-BANDA.pdf>

Las balanzas dosificadoras MERRICK, son dosificadoras de banda de goma que se deslizan arrastradas mediante un tambor de cabeza motriz y retornan por medio de otro tambor de cola, en este caso trabajan en fondo de cada tolva, admite regulación de velocidad en carga utilizando un variador de frecuencia. Estas dosificadoras transportan el material almacenado en sus tolvas respectivas hacia las cintas de alimentación. La velocidad de la banda es ajustada para obtener un caudal de material correspondiente a un valor de consigna. En general, la banda asegura asimismo la extracción del material de tolva.

Las balanzas constan de una banda de goma, un puente pesador, donde se verifica el peso, de acuerdo al valor de consigna, un motor, un reductor, un tambor conducido, un tambor conductor y unos interruptores de desplazamiento.

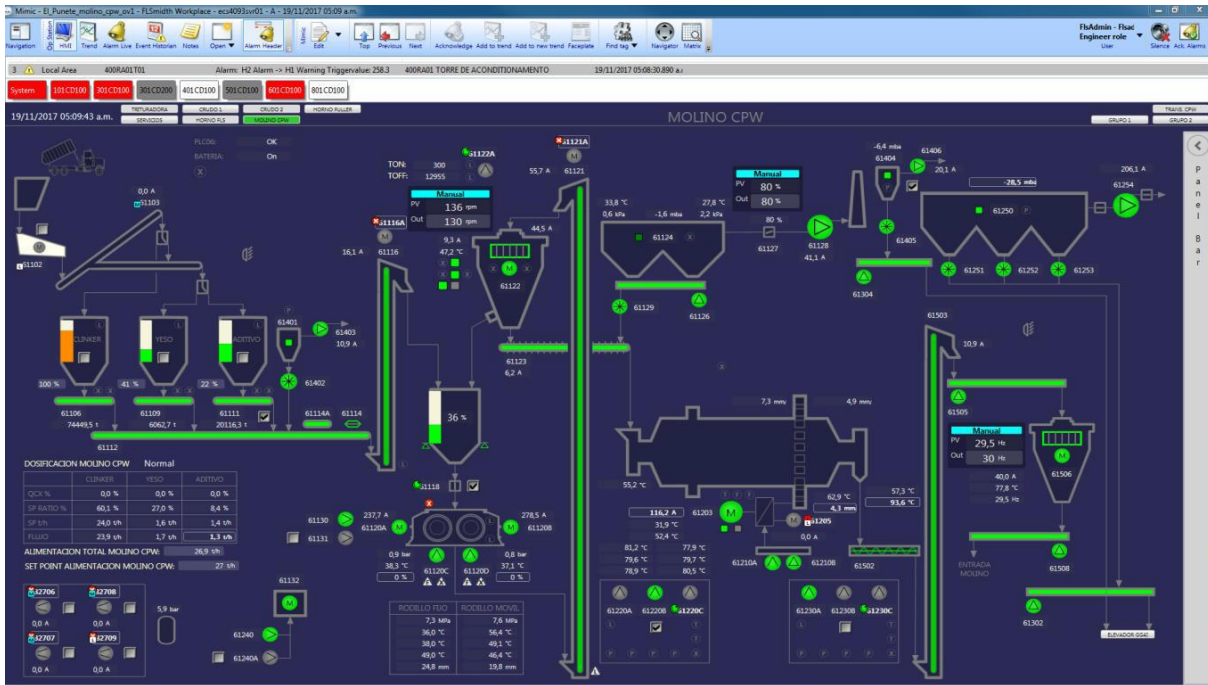
Las cintas de alimentación, son las encargadas de transportar el material hacia el chute del elevador R-03 que alimenta a la pre-molienda, las mismas están accionadas por un motor de

corriente alterna, un reductor de velocidad, dos tambores, uno conductor y el otro conducido, bastidor donde están montados los polines: cóncavos, horizontales y de retorno, por donde se traslada la cinta de goma.

1.2.8.2. Premolienda de cemento

La fábrica de cemento El Puente cuenta con prensa de rodillos para el proceso de la premolienda de materiales en la fabricación de cemento.

Figura 1-13 Diagrama de flujo premolienda y molienda de cemento



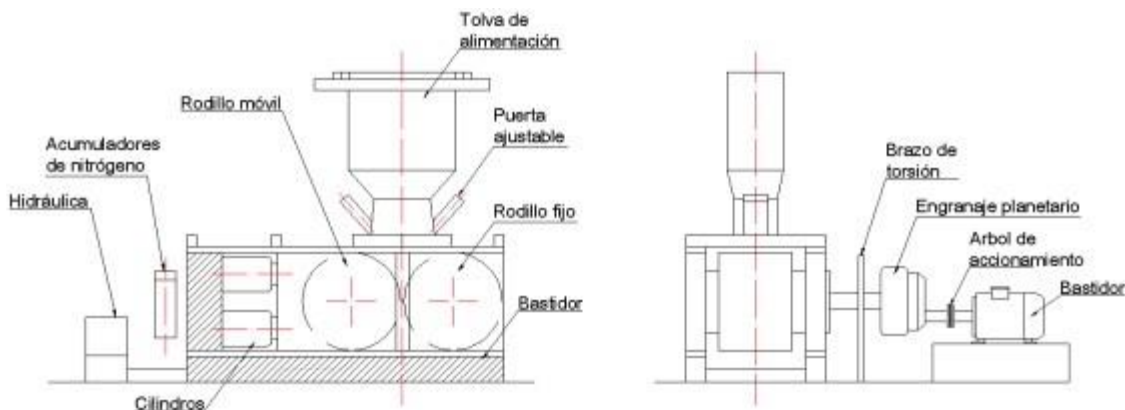
Fuente: Panel de operación ECS/ ControlCenter OpStation Planta El Puente. 2023

La premolienda, es un circuito cerrado que lo conforma la tolva de nivel constante, la prensa de rodillos, el elevador, el clasificador y la cadena de alimentación al molino.

El diseño de la prensa de rodillos básicamente cuenta con las siguientes partes:

- Bastidor de la prensa.
- Un par de rodillos (uno fijo y uno móvil).
- Accionamiento del rodillo (engranaje planetario con brazo de torsión, árbol de accionamiento, motor eléctrico).
- Sistema de amortiguamiento.
- Sistema hidráulico (cilindros, acumuladores de nitrógeno, hidráulica).
- Disposición de alimentación (tolva de alimentación, puerta ajustable de alimentación).

Figura 1-14 Prensa de rodillos



Fuente: *Manual de mantenimiento molinos*. SIME INGENIEROS, 2017

La prensa de rodillos R-05, recibe el material del sector de dosificación a través de la tolva de nivel constante. El material a granel es alimentado directamente en el espejo entre los rodillos. Una vez el material entra en contacto con los rodillos, se empieza a desarrollar el proceso de prensado, llegando a la disminución de tamaño. Dependiendo del tipo de material y sus correspondientes características, este puede salir de la prensa en forma granular o en forma de una torta delgada de espesor igual a la rendija. Como sale en forma de torta, esta es desaglomerada en la mesa quebradora a la entrada del clasificador R-07 para posteriormente ser clasificada dando un producto de mayor fineza que va a la cadena R-08 y es lo que se alimenta al molino CPW, el material más grueso retorna a la tolva de nivel constante para ingresar nuevamente a la prensa de rodillos.

El clasificador R-07, cuenta con un variador de frecuencia que nos permite dar mayor fineza a la alimentación del molino CPW, esto cuando se reduce los rpm del clasificador ya que el material recircula mayor número de veces en el circuito cerrado de pre-molienda.

1.2.8.3. Molino de cemento

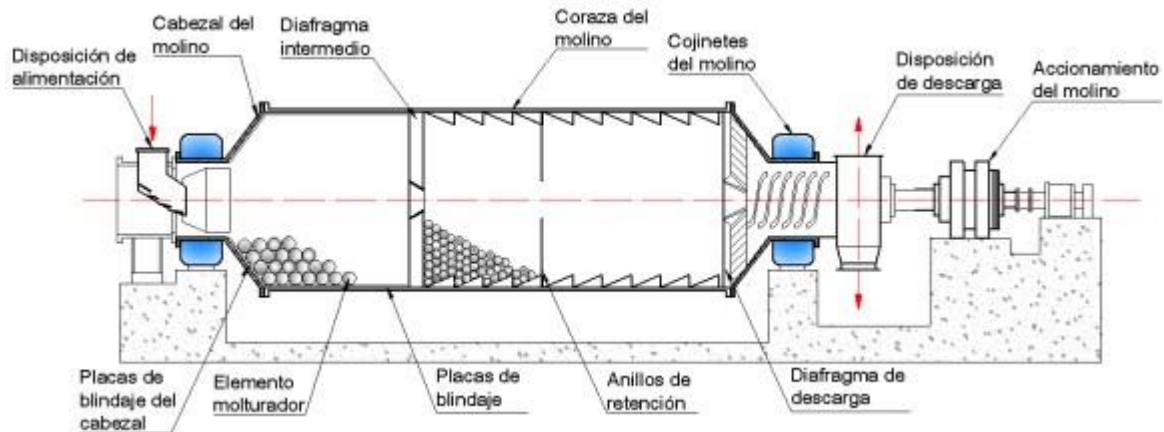
Casi el 85 % del total de la energía invertida en la producción de cemento, corresponde al desmenuzamiento y a la molienda de materias primas y del cemento; aproximadamente el 75 % sólo a la molienda.

El molino de cemento CHANDERPUR WORK (CPW) es un molino tubular de DOS cámaras, con una longitud total de 10 metros (exterior) y 3 metros (exterior) de diámetro.

Tiene dos cámaras en estas cámaras, en la primera se encuentran bolas con dimensiones que varían desde 50 mm hasta 15 mm y en la segunda cámara cuenta con cilpebs (cilindros

metálicos de acero. Interiormente el tubo este revestido con corazas de acero especial fundido.

Figura 1-15 Elementos mecánicos del molino de cemento



Fuente: *Manual de mantenimiento molinos*. SIME INGENIEROS, 2017

Los molinos de bolas son cilindros de acero rotatorio, en donde se realiza el desmenuzamiento del material por el movimiento de los cuerpos moledores. Por el giro del cilindro del molino, el montón formado por los elementos moledores y el material se eleva hasta un valor óptimo para su acción molturadora. La molienda se realiza por choque y rozamiento entre los cuerpos moledores y las paredes blindadas del molino.

A efectos de la eficiencia del molino son importantes las siguientes magnitudes:

- Velocidad de rotación óptima correspondiente al diámetro del molino
- Cantidad y tipo de cuerpos moledores
- Tamaño del recinto de molienda
- Molturabilidad del material

Tabla I-13 Información técnica del molino CPW

Longitud del molino	10,50 m
Diámetro del molino	2,80 m
Número de Cámaras	2
Potencia nominal	919,4 Kw
Potencia absorbida	793,6 Kw

Fuente: Manual de operaciones de planta El Puente, 2023.

Molturabilidad del material

El índice de trabajo de molienda según Bond da los Kw/h que hay que aplicar para desmenuzar una tonelada de material de tamaño de grano teóricamente ilimitado, hasta que el 80 % del

mismo pase por el tamiz de 0.10 mm.

Los índices de Molturabilidad, según Bond, Towarow, Hardgrove, etc., son el resultado de ensayos de molienda con molinos especiales. De estos ensayos, se determinó, por ejemplo, que índice de Molturabilidad para el clinker de cemento es de 13,49, para el crudo de cemento es 10,57, para el yeso natural es de 8,16; lo que confirma, que la molienda de cemento es el que consume mayor energía en la industria del cemento.

1.2.9. Parámetros de control de calidad en la molienda de cemento

La unidad de soporte de procesos que está a cargo del laboratorio de la fábrica El Puente, es la unidad encargada de realizar el control de calidad de materiales explotados, materiales en proceso y producto final.

Los parámetros especificados del cemento comercializado en Bolivia, se presentan en la Norma boliviana (NB-011) que se detalla en el Anexo 5 y en el Reglamento técnico del cemento (RM MDPyEP N°261.2018) que se detalla en el Anexo 6.

En el Anexo 7 se muestra el lay out laboratorio de la fábrica El Puente.

Los métodos ejecutados para los ensayos de control de calidad del cemento se describen en el Anexo 8.

CAPÍTULO II
CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL
PROBLEMA

2.1. POLVO DE PURGA EN PLANTA EL PUENTE

Toda industria de proceso siempre tiene, por lo menos en una parte de su línea, una generación de un sub-producto no deseado, y no es excepción que en la fabricación de cemento, en la parte de calcinación, se obtiene cierta cantidad de polvo del filtro con alto contenido de álcalis y cloro con destino a purga.

La sección del proceso que comprende la calcinación del crudo para la generación del Clinker, parte en la pre-homogenización que es de donde se obtiene por medio de mezclas de piedras calizas altas, medias y bajas, entregadas por el proceso de chancado con un tamaño no mayor de 3/4 pulgada, la caliza mencionada es molida en cualquiera de los dos molinos de bolas dispuestos para la producción de crudo.

Para obtener una mezcla con una composición química ideal para la producción de Clinker se homogeniza en un silo con aire presurizado, una vez conseguida la composición química deseada se almacena para su posterior transporte a la sección de precalentamiento de los hornos donde por gravedad atraviesa los ciclones y la capilla de entrada al horno, ya en el horno sufre el proceso clinkerización para la obtención del clinker. Acto seguido, cae al enfriador donde se realiza el enfriamiento por aire que a su vez sirve de aire secundario en la combustión.

En el pre-calentador a la altura del ciclón 4 se sitúa la mayor concentración de SO_3 y alcalinos, aquí es donde se tiene una temperatura aproximada de 770°C y se forma el ciclo de álcalis y sulfatos que es la causante de la formación de costras y obstrucciones en los ductos por caída de costra, que afectan el normal proceso de producción del horno. Los gases de salida del horno en su paso del horno hacia el pre-calentador y al medio ambiente arrastran partículas finas de alimentación, así como álcalis y sulfatos que luego son atrapados en el filtro para luego unirse nuevamente a la carga cruda de alimentación al horno lo que trae consigo la formación de un gran ciclo que causa una mayor tendencia a la formación de costras y obstrucciones en los ductos. Cuando se identifica el incremento significativo de los álcalis y SO_3 en el polvo caliente del ciclón 4, se inicia el proceso de purgado en el filtro del horno.

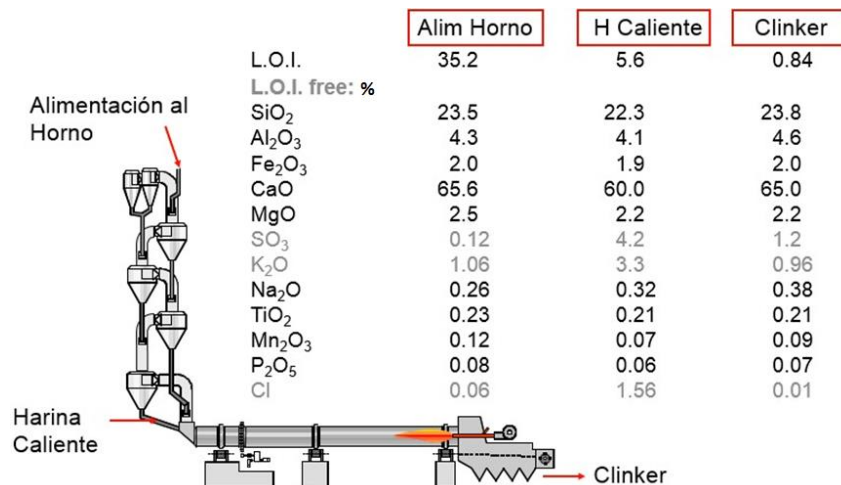
2.1.1. Elementos volátiles en el horno

Ciclo Interno: los elementos circulantes ingresan con la harina de crudo y/o el combustible y a altas temperaturas se vaporizan. Parte del vapor sale del sistema mientras que la otra parte se

condensa en ambientes más fríos. Algunos de los elementos condensados vuelven a ingresar a las zonas de altas temperaturas y se vaporizan nuevamente estableciendo un ciclo.

Ciclo Externo: una parte de los elementos circulantes abandonan el sistema condensado en el polvo de salida, dentro de la corriente de gas. El polvo es separado en una unidad de desempolvado (Filtro) y es introducido nuevamente dentro del sistema del horno a través del sistema de alimentación.

Figura 2-1 Ejemplo de enriquecimiento de elementos volátiles



Fuente: Ing. Rubén Ortiz, HOLCIM, Elementos volátiles. Ciudad de México (CDMX), Octubre 2017.

2.1.2. Los elementos alcalinos (Na₂O y K₂O)

El K₂O y el Na₂O proceden principalmente de los materiales margosos y arcillosos en donde están presentes en forma de inclusiones finamente dispersas en el seno de los feldespatos, de los restos de mica y del mineral ilita.

Son los encargados, junto con la portlandita [Ca(OH)₂], de darle naturaleza alcalina al cemento (PH>11), lo que protege las armaduras del hormigón,

Los álcalis ingresan al sistema del horno a través de la arcilla.

En la cocción del clinker en el horno rotatorio, se volatiliza una parte de los álcalis en la zona de sinterización y da lugar a un ciclo cerrado de álcalis. Al no ser volatilizados en su totalidad, al sobrepasar cierta dosis pueden reaccionar con algunos tipos de áridos originando compuestos expansivos.

Los álcalis, son los óxidos de sodio (Na₂O) y de potasio (K₂O) que plantean considerables

problemas operativos en el horno.

Debido a la baja volatilidad del sodio, este contribuye muy poco al ciclo interno dentro del sistema del horno.

Los álcalis se combinan con el cloro para formar cloruros alcalinos.

En la entrada del horno y en la zona de calcinación, se combinan con el dióxido de azufre (SO_2) para formar sulfatos alcalinos estables.

2.1.3. El elemento cloro

El cloro ingresa con las materias primas y los combustibles (incluyendo los combustibles alternos).

El cloro se combina con los álcalis para formar cloruros alcalinos.

Los cloruros volatilizan en las zonas de calcinación y transición

Las medidas en contra de los ciclos de cloro son limitadas debido a su alta volatilidad.

2.1.4. Ciclo de álcalis en la clinkerización.

Durante el quemado en el horno rotatorio de cemento, compuestos de potasio, sodio azufre y cloro, se volatilizan y forman parte de la carga gaseosa del horno. A medida que el gas se enfría después de su paso por la zona de quemado, dichos elementos circulantes pueden condensar con la formación de componentes nuevos o reaccionar con otros componentes de la carga con el polvo arrastrado por la corriente gaseosa.

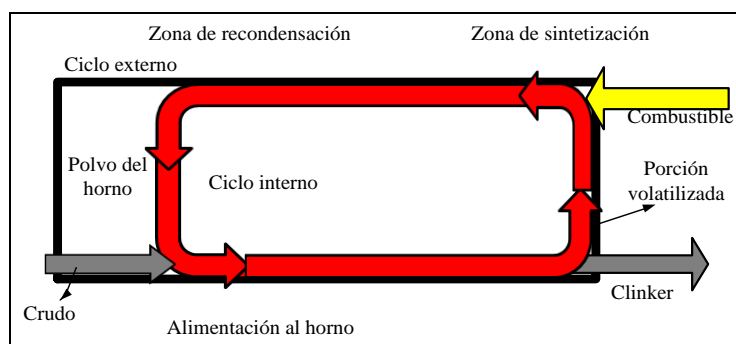
2.1.4.1. Consecuencias operativas

Las propiedades de flujo de material a quemar son alteradas debido a la formación de fundidos pegajosos de sales. Esto favorece a la formación de costras en el pre-calentador, que puede dar lugar a intermitencias en el proceso debido a obstrucciones.

Los elementos volátiles constituyen una fase líquida adicional durante el quemado e influyen en la formación y granulado de Clinker.

La energía y el consumo de materia prima son afectados por la repetida volatilización al consumir calor primario. El bypass de los gases cargados de polvo precipitado.

Figura 2-2 Circulación de elementos volátiles en el sistema de clinkerización



Fuente: Ing. R. Gilvonio Alegria, cementos Lima S.A. El ciclo de álcalis en la formación de Clinker. Lima, Noviembre 2000

La alimentación del horno frecuentemente incluye el ciclo externo por el cual la concentración de elementos circulantes es mayor que en el producto de la molienda de crudo.

Los álcalis (K, Na) aparecen generalmente como cationes inter reticulares en la arcilla. El azufre se introduce en diversas formas mineralógicas: como sulfuros, en la piridita y otros compuestos orgánicos, como sulfatos en el yeso y la anhidrita.

Los cloruros son introducidos principalmente como NaCl y KCl.

Tabla II-1 Efecto de concentración de elementos circulantes en la alimentación.

(Base libre de perdidas)		
Cl	< 0,02%	Caso normal no hay problema.
	> 0,05%	Severos problemas de obstrucción, dependiendo del ciclo de azufre.
SO ₃	< 0,5%	Caso normal, no hay problemas.
	> 1,25%	Severos problemas de obstrucción.
K ₂ O	< 1%	Caso normal, no hay problemas.
	> 1,5%	Problemas de incrustaciones, dependiendo de la concentración de alc - sulfato.
Na ₂ O		Poca volatilidad, no causa problemas.

Fuente: Ing. R. Gilvonio Alegría, cementos Lima S.A. El ciclo de álcalis en la formación de Clinker. Lima, Noviembre 2000.

2.3.1.2. Consecuencias operativas Pre calentador Horno FLS

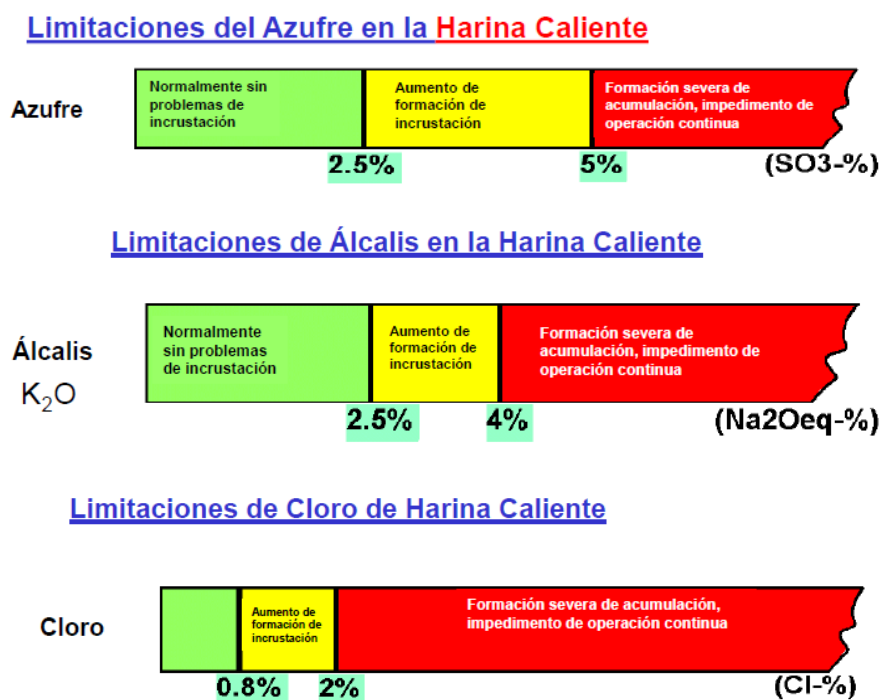
Para tener mayor comprensión acerca de las consecuencias operativas en el pre-calentador del horno FLS se presenta un análisis de un encostramiento y obstrucción que se presentó en el mes de enero de 2022.

El 17/01/2022 se presenta obstrucción en el pre-calentador del horno FLS, sin embargo desde diciembre 2021 se reportaban incremento de depresiones en los ciclones que eran combatidos mediante limpiezas frecuentes.

La obstrucción en el pre-calentador no solo afecta la productividad de Clinker, sino que también expone al personal a trabajos de alto riesgo por lo que es importante encontrar oportunidades de mejora para minimizar dichos eventos.

ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE LA HARINA CALIENTE Y COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES ESTABLECIDOS

Figura 2-3 Límites de elementos volátiles Holcim



Fuente: Ing. R. Ortiz, HOLCIM, Elementos volátiles. Ciudad de México (CDMX), Octubre 2017

Se evalúan los datos entre Noviembre 2021 hasta el 17/01/2022.

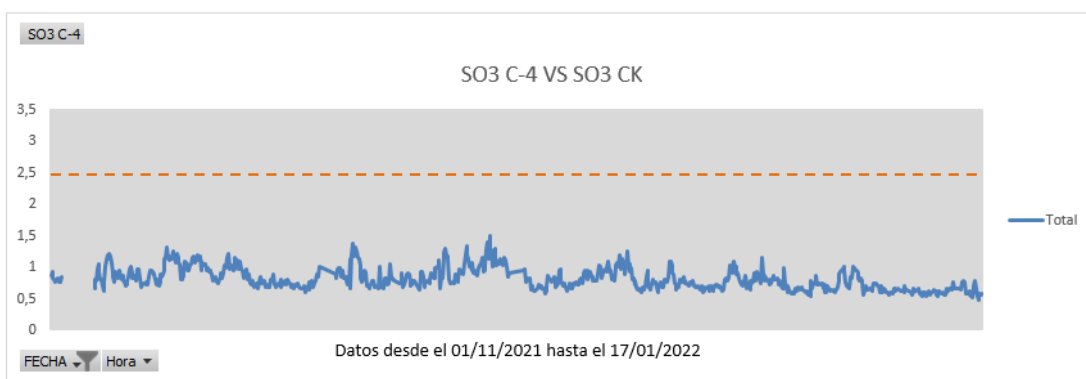
El encostramiento en el pre-calentador se debe principalmente al incremento en la concentración

de volátiles en la zona de pre-calcinación debido a la recirculación de álcalis, cloro y SO_3 en el sistema.

- La volatilidad es el grado o índice en el cual un elemento químico se vaporizará bajo ciertas condiciones de temperatura y presión.
- La volatilidad aumenta con elevadas temperaturas.

La insuficiencia de oxígeno aumenta la volatilidad

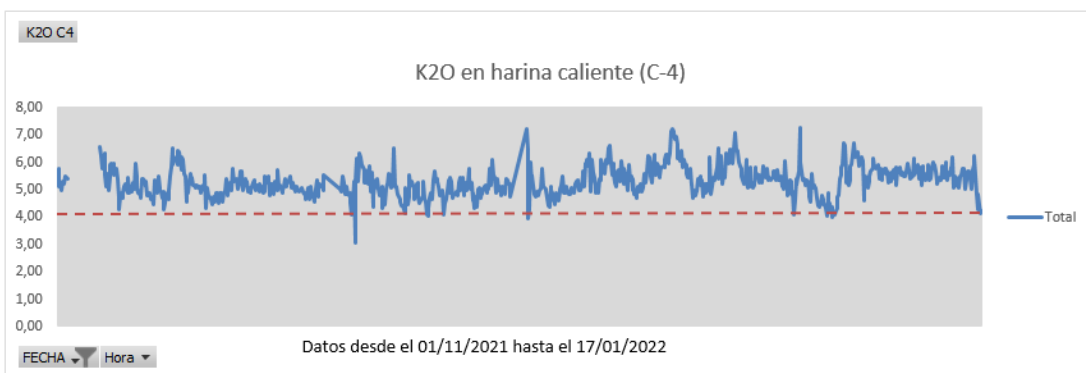
Figura 2-4 Gráficas de elementos volátiles SO_3 ciclón 4 vs clinker



Fuente: Registro ORJ-CCL.CC.089 *Control química hornos*, planta El Puente 2022

SO_3 en zona de trabajo sin problemas de incrustación.

Figura 2-5 Gráficas de elementos volátiles K_2O



Fuente: Registro ORJ-CCL.CC.089 *Control química hornos*, planta El Puente 2022

K_2O en zona de trabajo de formación severa de acumulaciones e impedimento de operación continua.

Figura 2-6 Gráficas de elementos volátiles cloro horno FLS



Fuente: Registro ORJ-CCL.CC.089 Control química hornos, planta El Puente 2022

Cloro en zona de trabajo de formación severa de acumulaciones e impedimento de operación continua.

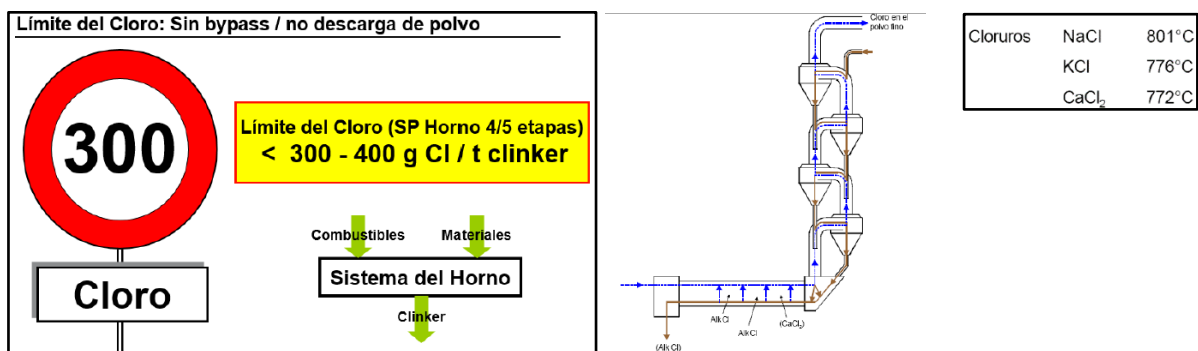
ACUMULACIÓN DE CLORO EN EL SISTEMA

- El cloro ingresa con las materias primas y los combustibles.
- El cloro se combina con los álcalis para formar cloruros alcalinos.
- Los cloruros volatilizan en las zonas de calcinación y transición
- Las medidas en contra de los ciclos de cloro son limitadas debido a su alta volatilidad.

La entrada de Cloro de 0.02 –0.03% sobre base clinker, no presenta problemas dentro del sistema del horno.

La entrada de Cloro de >0.05% presenta acumulación de material pesado dentro del sistema del horno.

Figura 2-7 Límites de cloro



Fuente: Ing. R. Ortiz, HOLCIM, Elementos volátiles. Ciudad de México (CDMX), Octubre 2017

El pre-calentador del horno FLS presenta alta acumulación del cloro que por su alta volatilidad terminan encostrando el sistema.

ACUMULACIÓN DE ALCALIS (K_2O) EN EL SISTEMA

Los álcalis, son los óxidos de sodio (Na_2O) y de potasio (K_2O) pueden afectar al cemento y plantean considerables problemas operativos.

Los álcalis ingresan al sistema del horno a través de las calizas de baja ley (Arcilla).

Debido a la baja volatilidad del sodio, este contribuye muy poco al ciclo interno dentro del sistema del horno.

Los álcalis se combinan con el cloro para formar cloruros alcalinos.

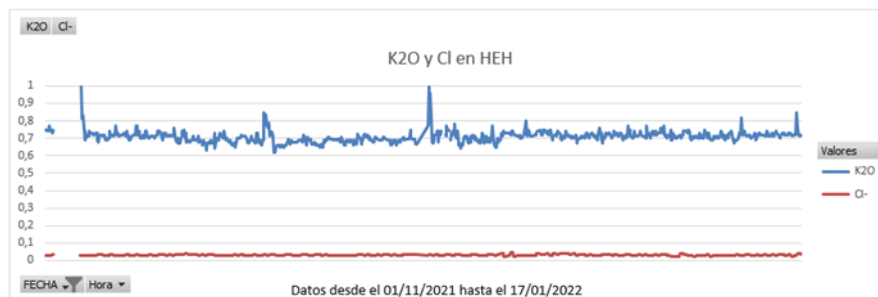
En la entrada del horno y en la zona de calcinación, se combinan con el dióxido de azufre (SO_2) para formar sulfatos alcalinos estables.

La entrada normal total de Álcalis (Óxido de Potasio, K_2O) $<1.0\%$ no presenta problemas en el sistema del horno. El cloro se combina con los álcalis para formar cloruros alcalinos.

La entrada total de Álcalis de $K_2O >1.5\%$ (también dependiendo de la relación Álcali/Azufre) presenta problemas con la acumulación de material dentro del sistema del horno.

En el polvo crudo y en HEH los datos de K_2O y Cl se encuentran dentro de los valores típicos de alimentación.

Figura 2-8 Gráficas de K_2O y Cl de la HEH FLS



Fuente: Registro ORJ-CCL.CC.089 Control química hornos, planta El Puente 2022

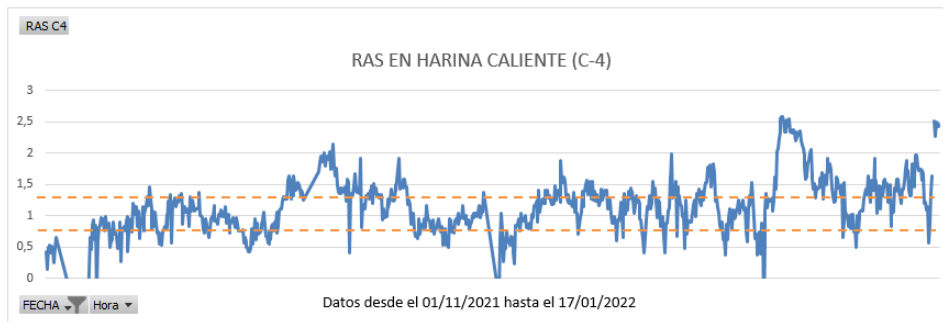
Sin embargo al no contar con By-pass para la descarga de elementos circulantes, en harina caliente llegan a valores que representan serio riesgo para la operación continua del sistema.

El cloro va incrementando en el sistema provocando la formación de costras que solo pueden ser

extraídas de manera mecánica (limpieza en parada de horno) o mediante la reducción de elementos circulantes realizando la purga del filtro del horno FLS.

En base a la elevada concentración de K_2O en ciclón 4, se concluye que en el sistema predominan los ciclos de álcalis.

Figura 2-9 RAS en Harina caliente FLS

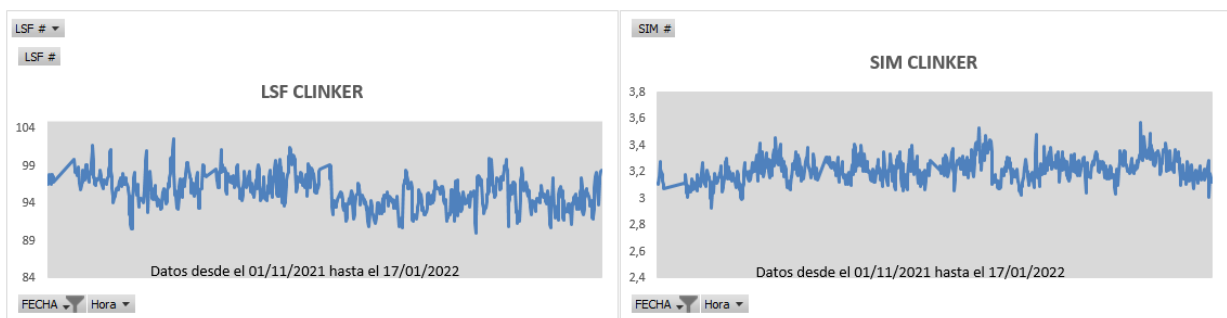


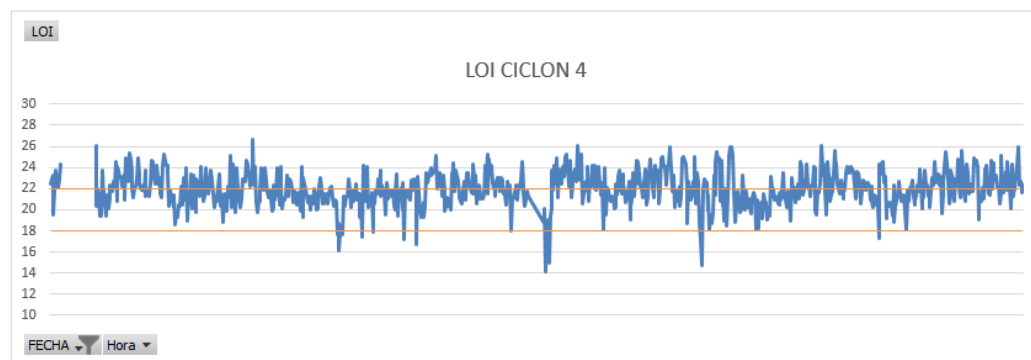
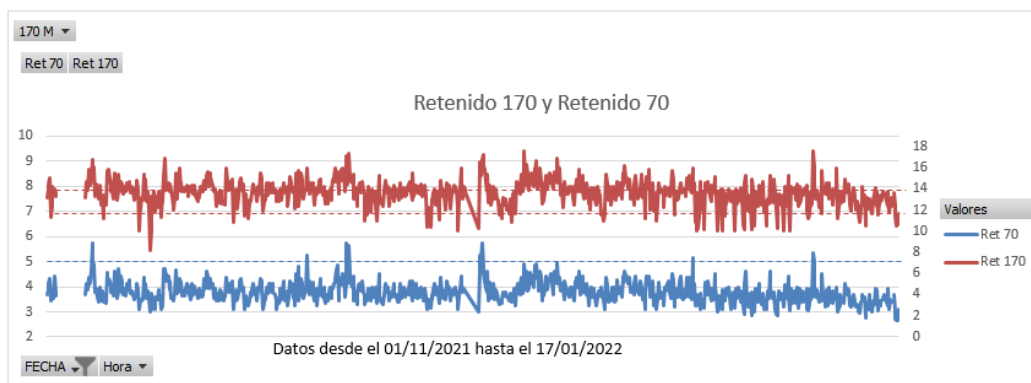
Fuente: Registro ORJ-CCL.CC.089 Control química hornos, planta El Puente 2022

Revisando el RAS en harina caliente se identifica elevada variabilidad en el SO_3 y K_2O del sistema que da lugar a la predisposición de ambos ciclos durante largos periodos.

La entrada de K_2O y SO_3 al sistema actualmente está predispuesta al contenido de materias primas, puesto que no se alimenta actualmente yeso en crudo.

Figura 2-10 Módulos de control y finura horno FLS





Fuente: Registro ORJ-CCL.CC.089 Control química hornos, planta El Puento 2022

La recirculación de volátiles en el sistema, es provocada principalmente por las siguientes causas:

Variabilidad térmica en la zona de pre-calcinación (LOI con variabilidad, pero con picos por encima de parámetro).

Variabilidad química (Alta desviación estándar en módulos en los cambios de pila.)

Variabilidad operativa (Problemas de alimentación, combustión inadecuada, sobre-calentamiento del sistema, a ser evaluada por el área operativa.)

Paros súbitos y cortes de alimentación al sistema (salidas de servicio, paros frecuentes a ser evaluada por el área operativa)

Entradas de aire falso al precalentador (Verificación pendiente por realizar).

Variabilidad granulométrica del polvo crudo (Se identifica variabilidad con incumplimiento por encima de rango)

Incremento de volátiles en las materias primas y combustibles. (Se verifica que las materias primas mantienen sus porcentajes habituales de volátiles y al ser gas natural el combustible, se descarta el

ingreso de volátiles por dicha entrada)

Reducción de elementos volátiles en entradas: Materias primas y combustibles (Es el último recurso al tratarse de la medida más difícil.)

Mantener operación de horno estable: Entradas regulares, automatización del control del proceso.

Limpieza inteligente: Medición en lugares críticos, inclusión de cañones de aire o bombas de alta presión, limpieza según el perfil de presión, incremento de limpieza a medida que incrementa la concentración de volátiles.

Medidas constructivas: Protección del ducto ascendente, cortina de harina a la entrada del horno, compuertas pendulares, inclinación de ductos de harina mayor a 55°, salidas de ciclones suficientemente grandes, evitar rincones muertos, refractario antipegaduras y evitar aire falso.

Evitar Atmosfera reductora: Suficiente aire de exceso (O_2) evitar incremento de CO, Dispersión óptima de combustibles, revisar y evitar fluctuaciones en flujos de combustibles, quemador paralelo al eje del horno.

Evitar Zona de sinterización larga y demasiado caliente: Trabajar con llamas cortas, evitar sobrecocción del polvo crudo incrementar levemente la Cal libre.

Cambio de dosificación del polvo crudo: Ajustar el RAS, disminución del LSF, disminución del SIM y mejorar la finura del polvo crudo, minimizar fluctuaciones químicas y cuantitativas.

Realizar purgas del polvo del filtro: Las purgas del filtro permiten disminuir la carga de elementos volátiles en el sistema del horno FLS sin embargo, por motivos de espacio en los depósitos de planta se fue disminuyendo dicha práctica, que se va tener que retomar, siendo una alternativa económica y eficaz para evitar los problemas que se presentaron.

2.1.5. Purga de polvo del filtro FLS en planta El Puente

El laboratorio de la fábrica de cemento “El Puente” realiza muestreos de la harina de entrada al horno, cada hora, donde se determina su composición. Los Alkalís son el indicador principal con el cual se determina si se debe realizar la purga de harina de entrada al horno en el filtro o no. Cuando la composición de óxido de potasio en el ciclón 4 del horno es mayor o igual a 3.5 % por más de tres horas, comienza el proceso de purga que dura aproximadamente 3 horas, con una cantidad promedio de 2.2 t/h.

Por ejemplo, la siguiente situación de purga dada en el filtro del horno FLS, responde a las composiciones de Alkalís en el ciclón 4 del precalentador.

Tabla II-2 Obstrucción en el precalentador del horno FLS, composiciones en el ciclón

		FLS										CICLON 4					% Volátiles					OBSERVACIONES
Parametro	14,30	3,40	2,00	42,00	2,50	0,80	1,00	0,68	Max	97,00	3,10	1,90	820	22	3,60	5,00	0,65	0,70				
Parametro	13,80	3,10	1,75	41,00	1,50		0,68	Min	92,0	2,60	1,60	760	18	1,00	3,00							
		%CRUDO DE ALIMENTACION AL HORNO										CICLON 4					% Volátiles					
FECHA	Hora	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl	LSF	SIM	ALM	Temp	LOI	Cl	K2O2	Na2O3	SO3			
30/05/21	11:00	14,08	3,03	1,76	41,27	2,30	0,65	0,79	0,29	0,039	93,49	2,94	1,72	818	21,67	4,01	5,41	0,58	1,64			
30/05/21	13:00	14,07	2,97	1,77	41,21	2,31	0,63	0,79	0,29	0,039	93,55	2,97	1,68	822	16,91	5,02	6,30	0,67	2,01			
30/05/21	15:00	13,94	3,01	1,74	41,38	2,40	0,60	0,76	0,29	0,039	94,66	2,93	1,73	819	21,06	4,50	5,78	0,62	1,68			
30/05/21	17:00	14,36	3,13	1,84	41,08	2,27	0,65	0,78	0,30	0,032	91,09	2,89	1,70	813	21,59	3,82	5,17	0,58	1,58			
30/05/21	19:00	14,35	3,10	1,83	41,10	2,27	0,64	0,78	0,30	0,032	91,28	2,91	1,69	818	16,23	4,51	5,86	0,66	1,82			
30/05/21	21:00	14,74	3,05	1,77	41,05	2,32	0,56	0,74	0,30	0,032	89,20	3,06	1,72	818	17,47	4,52	5,87	0,67	1,80			
30/05/21	23:00	14,29	3,01	1,77	41,27	2,29	0,60	0,75	0,29	0,032	92,30	2,99	1,70	829	19,08	4,45	5,48	0,60	1,52			
31/05/21	1:00	13,92	3,03	1,78	41,36	2,26	0,61	0,76	0,29	0,035	94,63	2,89	1,70	820	19,40	4,37	5,31	0,59	1,41			
31/05/21	3:00	13,92	3,12	1,80	41,28	2,24	0,66	0,78	0,29	0,035	94,19	2,83	1,73	829	22,88	4,11	5,19	0,58	1,44			
31/05/21	5:00	14,01	3,09	1,86	41,37	2,21	0,60	0,75	0,30	0,035	93,85	2,83	1,66	823	21,86	4,12	5,23	0,59	1,46			
31/05/21	7:00	13,92	3,07	1,85	41,45	2,21	0,60	0,74	0,30	0,035	94,63	2,83	1,66	847	20,82	4,54	5,44	0,60	1,42			
31/05/21	9:00	13,93	3,07	1,85	41,41	2,22	0,63	0,76	0,30	0,038	94,48	2,83	1,66	-	22,33	4,07	5,01	0,62	1,27			
31/05/21	11:00	14,08	3,08	1,81	41,44	2,22	0,61	0,74	0,30	0,038	93,68	2,88	1,70	-	19,53	4,77	5,83	0,73	1,69			
31/05/21	13:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	#####	#####	#####	-	-	-	-	-	-			
31/05/21	15:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	#####	#####	#####	-	-	-	-	-	-			

Fuente: Unidad de soporte; ORJ-CCL.CC.089 CONTROL QUÍMICA DEL HORNO FLS; Planta El Punte, 2021.

Los efectos de la recirculación de elementos volátiles causan serios problemas de obstrucción en el precalentador del horno FLS, siendo la limpieza de ciclones una tarea de alto peligro para el personal involucrado, por las altas temperaturas a la que se encuentra el crudo de alimentación y las condiciones del lugar. En el anexo 10, se muestra fotografías de la obstrucción de ductos y ciclones del precalentador del horno FLS, cuando no existe una adecuada purga de elementos volátiles.

Tabla II-3 Purga en el filtro del horno FLS, composiciones en el ciclón 4.

		FLS										CICLON 4					% Volátiles					OBSERVACIONES
Parametro	14,30	3,40	2,00	42,00	2,50	0,80	1,00	0,68	Max	97,00	3,10	1,90	820	22	3,00	5,00	0,65	0,70				
Parametro	13,80	3,10	1,75	41,00	1,50		0,68	Min	92,0	2,60	1,60	760	18	1,00	3,00							
		%CRUDO DE ALIMENTACION AL HORNO										CICLON 4					% Volátiles					
FECHA	Hora	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl	LSF	SIM	ALM	Temp	LOI	Cl	K2O2	Na2O3	SO3			
12/03/23	21:00	14,37	3,23	1,76	41,47	2,12	0,15	0,74	0,29	0,042	91,77	2,88	1,84	811	17,01	2,72	4,43	0,48	0,64			
12/03/23	23:00	14,55	3,29	1,79	41,37	2,10	0,13	0,75	0,29	0,042	90,36	2,86	1,84	809	16,75	2,64	4,47	0,48	0,65			
13/03/23	1:00	14,60	3,34	1,78	41,43	2,12	0,13	0,75	0,29	0,039	90,11	2,85	1,88	807	17,22	2,81	4,64	0,47	0,65			
13/03/23	3:00	14,72	3,41	1,83	41,31	2,12	0,13	0,76	0,29	0,039	88,97	2,81	1,86	817	15,56	2,75	4,64	0,48	0,66			
13/03/23	5:00	13,77	3,04	1,71	41,86	2,20	0,12	0,70	0,27	0,039	96,78	2,90	1,78	811	19,43	3,28	5,15	0,44	0,69			
13/03/23	7:00	14,09	3,14	1,77	41,62	2,21	0,12	0,72	0,27	0,039	93,93	2,87	1,77	807	20,21	3,28	5,63	0,44	0,74			
13/03/23	9:00	13,80	3,07	1,74	41,82	2,22	0,11	0,71	0,27	0,036	96,37	2,87	1,76	808	19,72	3,00	5,30	0,40	0,67			
13/03/23	11:00	13,80	3,06	1,73	41,83	2,24	0,12	0,71	0,27	0,036	96,44	2,88	1,77	812	19,78	2,98	5,19	0,42	0,61			
13/03/23	13:00	13,76	3,08	1,74	41,88	2,23	0,12	0,72	0,27	0,036	96,74	2,85	1,77	808	17,86	3,18	5,36	0,43	0,63			
13/03/23	15:00	14,01	3,23	1,78	41,57	2,21	0,11	0,74	0,28	0,036	94,06	2,80	1,81	804	18,22	2,86	4,87	0,40	0,57			
13/03/23	17:00	14,17	3,26	1,78	41,51	2,21	0,11	0,74	0,28	0,037	92,91	2,81	1,83	808	20,4	2,80	4,75	0,42	0,59			
13/03/23	19:00	14,21	3,29	1,79	41,50	2,21	0,11	0,75	0,28	0,037	92,56	2,80	1,84	808	17,86	2,69	4,62	0,44	0,59			
13/03/23	21:00	14,46	3,28	1,80	41,34	2,23	0,12	0,75	0,28	0,037	90,80	2,85	1,82	811	19,13	2,75	4,65	0,44	0,61			
13/03/23	23:00	14,14	3,25	1,79	41,52	2,21	0,13	0,74	0,28	0,037	93,11	2,81	1,82	810	19,13	2,39	4,27	0,43	0,61			
14/03/23	1:00	14,10	3,24	1,77	41,58	2,19	0,21	0,74	0,32	0,045	93,54	2,81	1,83	806	17,74	2,22	4,00	0,41	0,66			

Fuente: Unidad de soporte; ORJ-CCL.CC.089 CONTROL QUÍMICA DEL HORNO FLS; Planta El Punte, 2023.

La tabla anterior muestra que una purga de 4 horas de producción, se obtiene aproximadamente, 12 T de harina purgada y llevada al depósitos de residuo, véase Anexo 4 Informe fotográfico extracción polvo del filtro en la fábrica de cemento El Punte.

Este polvo es purgado del filtro de mangas y se almacena en los depósitos de materia prima dentro de la fábrica.

Este material es muy fino y presenta características de filler calizo que es usado normalmente en el cemento como aditivo ya que, mediante una adecuada dosificación en función de su granulometría, mejoran las propiedades físicas del cemento y de las mezclas bituminosas retardando su envejecimiento.

2.1.6. Características del polvo purgado del filtro

De acuerdo al centro de información de planta El Puente (CIF) actualmente se tiene una reserva de polvo purgado del filtro de aproximadamente 10000 t; la apariencia física es polvo muy fino (Ret 325 =0%) de color blanquecino; los depósitos de polvo del filtro en planta son de acceso libre, sin proceso previo si se requiere alimentación a la molienda de cemento.

El polvo del filtro presenta las características mostradas en la siguiente:

Tabla II-4 Características físicas del polvo purgado

Características físicas	Dato
Temperatura del material en depósito	14 °C
Humedad	0,22%
Retenido malla 325	0 %
Temperatura del material a la salida del filtro	80 °C
Peso específico del material suelto	0,8482 kg/l
Peso específico del material semi-compactado	1,0942 kg/l
Peso específico del material compactado	1,3098 l

Fuente: Elaboración propia, 2023

Tabla II-5 Características químicas del polvo purgado

QUÍMICA DEL POLVO DE FILTRO									
ÓXIDO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	PPF
% promedio	16,56	4,72	2,99	38,84	2,48	1,19	0,87	0,36	32

Fuente: ORJ-CCL.CC.078 Registro único de ensayos químicos; Planta El Puente, 2023

Las características físicas del polvo del filtro son las de un microfiller calizo:

- Su peso unitario está entre 800 a 1 000 kg/m³.
- Su gravedad especifica se encuentra entre 2,60 a 2,75.
- Su color característico es gris claro o blanquesino.

- Su tamaño promedio de partículas es menor a 4 micras.
- Su tamaño es de 1/3 a 1/4 del tamaño promedio de las partículas del cemento.
- El valor de su finura Blaine es aproximadamente 10.000 m²/kg.

2.1.7. Características del cemento El Puente IP-30

El Cemento Portland Tipo IP-30 El Puente, es un cemento elaborado bajo estrictos estándares de calidad estipuladas en las especificaciones de la Norma Boliviana NB 011 y Reglamento Técnico del Cemento.

Tabla II-6 Dosificación IP-30 y química de materiales

CEMENTO IP-30	CLINKER	YESO	TOBA
%	73,5	6,5	20,0
SiO ₂	22,50	35,40	46,67
Al ₂ O ₃	4,54	10,35	11,19
Fe ₂ O ₃	2,80	2,75	4,05
CaO	66,25	15,50	15,21
MgO	3,05	1,24	2,22
SO ₃	0,75	18,01	0,24
PPF	0,10	15,30	12,10

Fuente: ORJ-CCL.CC.038 *Dosificación al molino de cemento*; Planta El Puente, 2023

El producto obtenido de la molienda conjunta de clinker, puzolana natural (Toba) y yeso, desprende menor calor de hidratación, lo que reduce la retracción térmica debido a la inclusión de puzolana y ofrece mayor trabajabilidad en morteros y revestimientos. La fabricación es controlada bajo un Sistema de Gestión Integrado certificado en ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001. El cemento puede ser utilizado en cualquier tipo de obras de infraestructura y construcción en general. Especialmente en obras de alta exigencia de durabilidad

Características Técnicas:

Tabla II-7 Parámetros del cemento IP-30 El Puente

REQUISITOS QUÍMICOS	CEMENTO PORTLAND TIPO IP-30 EL PUENTE	REQUISITOS NORMA NB 011
Perdida por calcinación [%]	3,5 – 4,5	Máximo 7
SO ₃ [%]	1,6 – 2,2	Máximo 4
MgO [%]	3 – 3,5	Máximo 6

REQUISITOS FÍSICOS	CEMENTO PORTLAND TIPO IP-30 EL PUENTE	REQUISITOS NORMA NB 011
Superficie Específica Blaine [cm ² /g]	4500 - 5000	> 2600
Tiempo de Fraguado Inicial [min]	200 - 250	> 45
Tiempo de Fraguado Inicial [min]	180- 230	< 420
Expansion autoclave [%]	0,02 -0,05	Máximo 0.8%

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	CEMENTO PORTLAND TIPO IP-30 EL PUENTE	REQUISITOS NORMA NB 011
1 día [MPa]	8 - 11	---
3 días [MPa]	18 - 21	> 10
7 días [MPa]	25 - 29	> 17
28 días [Mpa]	31 - 34	> 30

Fuente: Elaboración propia, 2023

Propiedades del cemento El Puente IP-30

- **Resistencia a la compresión:**

Debido a las características de los componentes químicos y mineralógicos del Clinker que le otorgan alta reactividad y la molienda conjunta con toba que tiene una mejor distribución de granulometría comparado con otros tipos de cemento, hacen que el cemento El Puente IP-30 resistencias iniciales y finales superiores a los especificados por la normativa.

- **Resistencia al ataque de sulfatos:**

Debido a la capacidad de la toba para fijar el hidróxido de calcio liberado y a su mayor impermeabilidad, el cemento El Puente IP-30 es más resistente a los sulfatos y al ataque químico de otros iones agresivos.

- **Impermeabilidad:**

El cemento portland El Puente IP-30, produce mayor cantidad de silicatos cálcicos debido a la reacción de los aluminosilicatos de la toba con los hidróxidos de calcio producidos durante la hidratación del cemento, disminuyendo la porosidad capilar, así el concreto se hace menos permeable y protege a la estructura metálica de la corrosión.

- **Menor calor de hidratación:**

La reacción entre la puzolana natural (Toba) y el hidróxido de calcio, liberado en la hidratación del cemento, con el aluminato tricálcico (C_3A) presente en el cemento, genera gran calor de hidratación. La toba al reaccionar con el hidróxido de calcio, inhibe ésta reacción generando menor calor de hidratación, evitando contracciones y fisuraciones que afectan la calidad del concreto, principalmente en obras de gran volumen.

- **Almacenamiento**

El correcto almacenamiento debe realizarse de acuerdo a la NB-096:2013 Cemento – Requisitos de comercialización.

- **Presentaciones disponibles**

Bolsas de 50 kg, Big bag de 1,5 t y a Granel

- **Duración**

Almacenar y consumir de acuerdo a la fecha de producción utilizando el más antiguo. Se recomienda que el cemento sea utilizado antes de 60 días de la fecha de envasado indicada en la bolsa, posterior a esa fecha verifique la calidad del mismo.

2.1.8. Concepción y definición de la problemática del polvo del filtro en planta El Puente

En la fábrica de cemento "El Puente", se genera una cantidad significativa de polvo residual durante el proceso de producción de clinker. Este polvo, que contiene altos porcentajes de álcalis y cloro en comparación con la materia prima cruda, se retira regularmente de los filtros del proceso para evitar problemas en el horno y garantizar la calidad del clinker producido. Sin embargo, el manejo y la disposición de este polvo residual generan costos significativos y plantean desafíos ambientales.

El problema fundamental que aborda este proyecto es la gestión eficiente y sostenible del polvo residual recuperado de los filtros en la fábrica de cemento "El Puente". Este polvo, que actualmente se considera un residuo, representa una oportunidad no aprovechada para mejorar la sostenibilidad de la producción de cemento IP-30 en la planta.

Los principales aspectos problemáticos son los siguientes:

Costos de eliminación: El transporte y la disposición del polvo del filtro como residuo generan gastos considerables que afectan la rentabilidad de la planta.

Impacto ambiental: La eliminación de este polvo como residuo plantea problemas

medioambientales y aumenta la huella ecológica de la fábrica debido a la necesidad de espacio de almacenamiento adicional y a la reducción de la vida útil de las canteras utilizadas para la obtención de materias primas.

Desperdicio de recursos: El polvo del filtro consiste en material valioso que ha sido extraído, molido y procesado, y cuya eliminación representa una inversión perdida.

Oportunidad de mejora: Existe el potencial de mejorar las propiedades del cemento IP-30 al incorporar el polvo del filtro como una adición. Esto podría resultar en un producto final de mayor calidad y rendimiento.

Normativas y estándares: El uso del polvo del filtro como adición al cemento IP-30 debe cumplir con las normativas y estándares de calidad del cemento, lo que requiere un análisis técnico detallado.

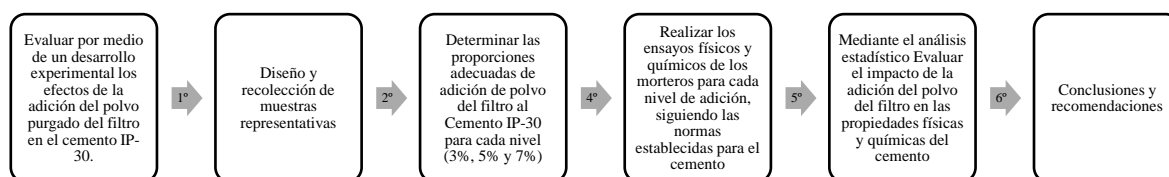
CAPÍTULO III
DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1.PLANIFICACIÓN PARTE EXPERIMENTAL

Para llevar adelante este trabajo de investigación se utilizó Cemento El Puente tipo IP-30 (patrón) “El Puente” para evitar la variación de fabricación de este componente se realizó el muestreo, la cantidad necesaria para el desarrollo de toda la tesis, los ensayos de esta partida en su totalidad se desarrollaron en el laboratorio de pruebas físicas y químicas de la Fábrica de Cemento “El Puente”. Para la determinación de las propiedades químicas y físicas de los cementos con y sin adición del polvo del filtro; se siguió con las instrucciones de trabajo de la Fábrica de Cemento “El Puente” y de las normas bolivianas del cemento vigentes.

Se pretende seguir el plan experimental para obtener resultados precisos y confiables que permitan tomar decisiones fundamentadas en cuanto a la adición del polvo del filtro al Cemento Pórtland IP-30 en la fábrica de cemento "El Puente", el cual se muestra en la figura 3-1.

Figura 3-1 Diagrama de Flujo de las etapas del desarrollo experimental



Fuente: Elaboración propia, 2023

En este punto se desglosa la metodología utilizada para la obtención de datos, el acopio de materiales y metodologías para que este trabajo desarrollado, y siguiendo una secuencia de pasos preestablecidos para cumplir con los objetivos del proyecto.

La investigación que se realiza es de tipo experimental debido a que se pretende realizar un control de la manipulación intencional de las variables independientes, para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre las variables dependientes.

Se quiere determinar cuál es el porcentaje de adición del polvo del filtro que no afecte negativamente a las características químicas y físicas del cemento IP-30.

3.1.1. Objeto de la parte experimental

El objeto o propósito de la parte experimental del proyecto de adición de polvo del filtro al cemento IP-30 en la fábrica de cemento "El Puente" es llevar a cabo pruebas y ensayos controlados para evaluar el impacto de la adición del polvo del filtro en las propiedades físicas

y químicas del Cemento Pórtland IP-30. La parte experimental tiene como objetivo obtener datos empíricos y cuantitativos que permitan analizar y comparar las características del cemento con diferentes niveles de adición y el cemento puro (patrón).

Los principales objetos de la parte experimental son:

Determinar la dosificación óptima: La parte experimental busca establecer las proporciones adecuadas de adición del polvo del filtro al cemento pórtland IP-30 para cada nivel (3%, 5% y 7%) con el fin de obtener un producto final que cumpla con los requisitos de la norma NB-011, reglamento técnico del cemento y que mantenga o mejore sus propiedades y rendimiento.

Evaluar las propiedades físicas y químicas: Se llevan a cabo ensayos físicos y químicos de los morteros preparados con diferentes niveles de adición y el cemento IP-30 puro (patrón). Estos ensayos permiten evaluar características como resistencia a la compresión, fraguado, expansión, estabilidad volumétrica, finura y otros atributos relevantes.

Comparación de resultados: Se realizará un análisis estadístico para comparar los resultados de los ensayos entre los diferentes niveles de adición y el Cemento El Puente IP-30 puro (patrón). Esto permitirá identificar diferencias significativas en las propiedades del cemento debido a la adición del polvo del filtro.

Con los resultados de la parte experimental, se toman decisiones fundamentadas sobre la viabilidad de implementar la adición del polvo del filtro al cemento IP-30 en la fábrica de cemento "El Puente", y si esta adición puede mejorar o mantener las características del producto final.

3.1.2. Variables

En el diseño experimental del proyecto de adición de polvo residual del filtro al cemento IP-30 en la fábrica de cemento "El Puente", las variables dependientes e independientes se definen de la siguiente manera:

Variables Independientes:

Nivel de adición del polvo del filtro al Cemento Pórtland: 3%, 5% y 7%.

Variables Dependientes:

- Propiedades físicas del cemento

Resistencia a la compresión: Se medirá la resistencia a la compresión a diferentes edades (3, 7 y 28 días) para cada nivel de adición.

Expansión de Le-Chatelier: Se determinará la expansión del cemento mediante el ensayo de Le-Chatelier para cada nivel de adición.

Tiempo de fraguado: Se medirá el tiempo de fraguado inicial (Fi) y fraguado final (Ff) del cemento para cada nivel de adición.

Superficie específica (Blaine): Se determinará la superficie específica del cemento utilizando el método Blaine para cada nivel de adición.

- Propiedades químicas del cemento:

Óxido de magnesio (MgO): Se determinará el contenido de MgO en el cemento para cada nivel de adición

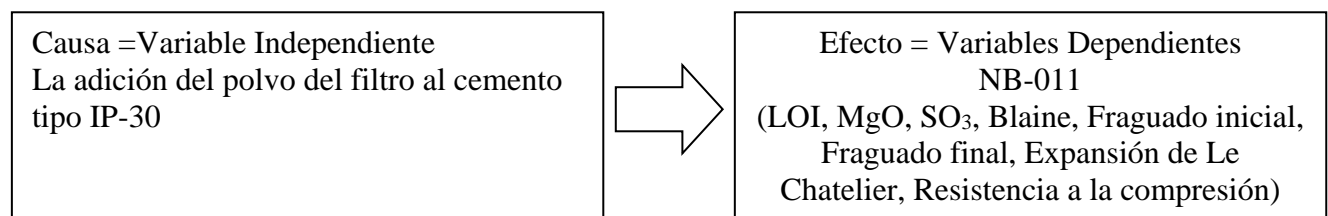
Trióxido de azufre (SO₃): Se analizará el contenido de SO₃ en el cemento para cada nivel de adición

Pérdidas por calcinación (LOI): Se medirán las pérdidas por calcinación del cemento para cada nivel de adición

Residuo insoluble (RI): Se determinará el contenido de residuo insoluble en el cemento utilizando la norma NB 061 para cada nivel de adición.

Las variables objeto de este estudio son la adición del polvo del filtro al cemento variando en porcentajes del 3, 5 y 7% en reemplazo parcial de cemento.

Figura 3-2 Variables parte experimental



Fuente: Elaboración propia

Dadas las características del polvo del filtro se puede predecir que no se tendrán efectos adversos en lo referido a finura (Blaine) y en dosificaciones menores en lo referido a características químicas y de fraguado, por lo que la observación se centra en el desempeño de las resistencias que vaya a presentar el mortero.

3.1.3. Hipótesis

La hipótesis que se plantea en este trabajo de investigación es que, con la adición del polvo del filtro en reemplazo parcial al cemento se mantendrá las propiedades físico químicas del

cemento IP-30.

La hipótesis se respalda debido a la alta finura del polvo del filtro y las características físico-químicas similares a las de un microfiller calizo, que típicamente se utiliza como aditivo en la preparación de cementos, tiende a mantener o mejorar las características del cemento.

La hipótesis para la parte experimental del proyecto de adición de polvo residual del filtro de los hornos al cemento IP-30 en la fábrica de cemento El Puente se plantea de la siguiente manera:

Hipótesis nula (H0): La adición de diferentes niveles de polvo purgado del filtro de los hornos (3%, 5% y 7%) al Cemento Pórtland IP-30 en la fábrica de cemento El Puente no produce ninguna diferencia significativa en las propiedades físicas y químicas en comparación con el cemento estándar IP-30 sin adición.

Hipótesis alternativa (H1): La adición de diferentes niveles de polvo residual del filtro de los hornos (3%, 5% y 7%) al Cemento Pórtland IP-30 en la fábrica de cemento El Puente produce una diferencia significativa en las propiedades físicas y químicas en comparación con el cemento estándar IP-30 sin adición.

Durante la parte experimental del proyecto, se recolectarán y analizarán los datos de las propiedades físicas y químicas del cemento con diferentes niveles de adición del polvo del filtro para determinar si hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y respaldar la hipótesis alternativa. Los resultados obtenidos serán fundamentales para tomar decisiones informadas sobre la viabilidad de implementar la adición del polvo residual del filtro en el Cemento Pórtland IP-30 en la fábrica de cemento El Puente.

3.2. PROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE MUESTRAS

3.2.1. Diseño de la muestra

El muestreo seleccionado es aleatorio estratificado (tipo de muestreo probabilístico), debido a que se desea estudiar distintos grupos homogéneos. Para tal caso, se empleó la siguiente ecuación, perteneciente a poblaciones finitas (Fuente: Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. 2013. *Using Multivariate Statistics*. Pearson.):

Ec. 3.1

$$n_0 = \left(\frac{z}{\varepsilon} \right)^2 * p * q$$

Donde:

n_0 = Cantidad teórica de elementos de la muestra.

z = Valor estandarizado en función del grado de confiabilidad de la muestra calculada.

ε = Error asumido en el cálculo.

p = Probabilidad que tiene la muestra en poseer las mismas cualidades de la población.

q = Probabilidad de que la muestra no presente las mismas características de la población.

A continuación, se presentan algunos valores estandarizados de (z) en función del grado de confiabilidad asumido.

Tabla III-1 Valores estandarizados en función del grado de confiabilidad

GRADOS DE CONFIABILIDAD (%)	VALOR ESTANDARIZADO (z)
99	2,58 (empleado con frecuencia)
95	1,96 (el más empleado)
90	1,64

Fuente: Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). Using Multivariate Statistics. Pearson.

En este caso se optó por tomar el más empleado es decir $z=1,96$.

Como se trata de un número de estratos igual a 3, se asume un error del 10% donde $\varepsilon = 0.10$

Para la selección de (q) tenemos los siguientes valores:

Tabla III-2 Valores de la probabilidad de la población que no presenta las características

NÚMERO DE ESTRATOS (N)	(q)
$3 \leq N \leq 19$	se asume 0,01
$20 \leq N \leq 29$	se asume 0,01 hasta 0,02
$30 \leq N \leq 79$	se asume 0,02 hasta 0,05
$80 \leq N \leq 159$	se asume 0,05 hasta 0,10
$N \geq 160$	se asume 0,05 hasta 0,20

Fuente: Elaboración propia, 2023

Como se tratan de tres estratos se obtiene $q= 0,01$.

Como $p + q= 1$ resulta que $p = 1 - q$ por lo tanto $p = 0,99$ lo que indica que hay la probabilidad del 99% de que la muestra represente a la población

Aplicando la Ec. 3.1. Resulta:

$$n_0 = \left(\frac{1.96}{0.10}\right)^2 * 0.99 * 0.01 = 3.8$$

Donde:

n_0 = Cantidad teórica de elementos de la muestra.

Z = es el valor estandarizado en función del grado de confiabilidad de la muestra calculada (1.96 para un nivel de confianza del 95%).

ε = es el error asumido en el cálculo ($\varepsilon = 0.1$ o 10%).

P = es la probabilidad que tiene la muestra en poseer las mismas cualidades de la población ($p=0.99$).

q = es la probabilidad de que la muestra no presente las mismas características de la población ($q=0.01$).

En base a la cantidad teórica de los elementos de muestra, se determina que la cantidad representativa de muestras a ensayar en el presente proyecto son 4 para cada estrato identificado.

3.2.2. Características del muestreo

Las selecciones de los materiales a ser utilizados en este proyecto se obtienen a partir de muestreo representativo.

Objetivos del muestreo: Evaluar las propiedades del Cemento Pórtland IP-30 con diferentes niveles de adición del polvo del filtro.

Equipamiento de muestreo: En planta El Puente se tiene la disponibilidad de tornillos sinfín de muestreo continuo y material adecuado para la toma de muestras, incluyendo recipientes limpios y herméticos, herramientas para mezclar las muestras y etiquetas para identificarlas correctamente.

Puntos de muestreo: Se tiene identificados los puntos de muestreo representativos en la línea de producción del cemento para la obtención de muestras representativas de cemento IP-30 y en los depósitos de polvo de polvo purgado del filtro de planta El Puente.

Muestreo del cemento IP-30 sin adición: Se asegura la obtención muestras representativas del cemento IP-30 sin adición para utilizar como referencia en la comparación.

Etiquetado y registro de muestras: Etiqueta cada muestra de manera clara y registra la información relevante, como la fecha, el punto de muestreo, el nivel de adición y cualquier otra información importante.

Transporte y almacenamiento de muestras: Se asegura que las muestras se transporten y almacenen adecuadamente para mantener su integridad y evitar contaminaciones. Para lo cual se utiliza la sala de almacenamiento de muestras de laboratorio donde se cuenta con termohigrómetros calibrados para la verificación de temperatura y humedad.

Análisis de muestras: Las muestras de cemento adicionado con polvo del filtro serán analizadas en el laboratorio de control de calidad de la fábrica de cemento El Puente, los ensayos a ejecutar son los que tienen especificación en el reglamento técnico del cemento y la Norma Boliviana NB-011.

Se hace notar que el laboratorio de la fábrica de cemento El Puente cuenta con los materiales, equipamiento y las respectivas certificaciones y en el año 2023 obtuvo la acreditación en la norma NB/IEC 17025:2018 de los métodos del cemento.

3.2.3. Obtención de muestras del polvo de purga

La toma de muestras del polvo residual del filtro de los hornos se realiza en diferentes momentos y ubicaciones de los dos depósitos de materia prima en la fábrica de cemento El Puente donde el polvo del filtro se vino acumulando durante los últimos años. (Ver anexo 4)

Se realizó el muestreo de los depósitos 1 y 2 de polvo purgado del filtro existente en planta, se optó por un método de toma de muestras aleatoriamente, como se muestra en el Anexo 4 Informe fotográfico polvo purgado del filtro del horno.

Se separó la capa superficial que debido al tiempo de acumulación en el depósito mayor de polvo de filtro esta endurecida.

Posteriormente a la obtención de muestras de polvo del filtro de los depósitos, para eliminar impurezas se hizo pasar a través del tamiz N°100. Se caracterizó químicamente el polvo purgado del filtro.

3.2.4. Obtención de muestras de cemento estándar IP-30

Las muestras de cemento estándar IP-30, se obtuvieron del punto de muestreo de envase en la línea de producción de cemento en planta El Puente.

También se obtuvo muestras de las materias primas dosificadas en la fecha de muestreo, como se muestra en el Anexo 11 Fotografías del muestreo en la línea de cemento y materiales en dosificación.

Se caracterizó químicamente el cemento El Puente IP-30 de la línea de producción en planta, como se muestra en la tabla III-3.

Tabla III-3 Análisis clinker dosificación

ANALISIS CLINKER CINTA DOSIFICADORA				
ENSAYOS EN LABORATORIO PLANTA EL PUENTE				
Análisis Químicos	SiO ₂ (Dióxido de silicio)	%	XRF	22,38
	Al ₂ O ₃ (Óxido de aluminio)	%	XRF	4,26
	Fe ₂ O ₃ (Óxido férrico)	%	XRF	2,63
	CaO (Óxido de calcio)	%	XRF	65,37
	MgO (Óxido de magnesio)	%	XRF	3,39
	K ₂ O (Óxido de potasio)	%	XRF	1,07
	Na ₂ O (Óxido de sodio)	%	XRF	0,36
	SO ₃ (Trióxido de azufre)	%	XRF	0,61
	LOI (Pérdidas por calcinación)	%	NB 061	0,12
Fases del Clinker XRD	C ₃ S; Silicato tricálcico	%	-	58,22
	C ₂ S; Silicato dicálcico	%	-	16,62
	C ₃ A; Aluminato tricálcico	%	-	3,87
	C ₄ AF; Ferrito aluminato tetracálcico	%	-	6,24
Fases del Clinker Bogue	C ₃ S; Silicato tricálcico	%	-	60,11
	C ₂ S; Silicato dicálcico	%	-	18,84
	C ₃ A; Aluminato tricálcico	%	-	6,84
	C ₄ AF; Ferrito aluminato tetracálcico	%	-	8,00

Fuente: Elaboración propia, 2023

Tabla III-4 Análisis toba dosificación

ANALISIS TOBA CINTA DOSIFICADORA				
ENSAYOS EN LABORATORIO PLANTA EL PUENTE				
Análisis Químicos	SiO ₂ (Dióxido de silicio)	%	XRF	45,35
	Al ₂ O ₃ (Óxido de aluminio)	%	XRF	14,29
	Fe ₂ O ₃ (Óxido férrico)	%	XRF	5,22
	CaO (Óxido de calcio)	%	XRF	12,6
	MgO (Óxido de magnesio)	%	XRF	2,77
	K ₂ O (Óxido de potasio)	%	XRF	4,49
	Na ₂ O (Óxido de sodio)	%	XRF	0,4
	SO ₃ (Trióxido de azufre)	%	XRF	0,3
	LOI (Pérdidas por calcinación)	%	NB 061	15,77
Act. Puzolánica Toba	Act. 3 días	-	ASTM C311	80,77
	Act. 7 días	-	ASTM C311	79,39
	Act. 28 días	-	ASTM C311	80,17

Fuente: Elaboración propia, 2023

Tabla III-5 Análisis yeso dosificación

ANÁLISIS YESO CINTA DOSIFICADORA				
ENSAYOS EN LABORATORIO PLANTA EL PUENTE				
Análisis Químicos	SiO ₂ (Dióxido de silicio)	%	XRF	40,52
	Al ₂ O ₃ (Óxido de aluminio)	%	XRF	11,01
	Fe ₂ O ₃ (Óxido férrico)	%	XRF	3,01
	CaO (Óxido de calcio)	%	XRF	15,68
	MgO (Óxido de magnesio)	%	XRF	1,44
	K ₂ O (Óxido de potasio)	%	XRF	1,49
	Na ₂ O (Óxido de sodio)	%	XRF	0,82
	SO ₃ (Trióxido de azufre)	%	XRF	17,34
	LOI (Pérdidas por calcinación)	%	NB 061	12,89
CaSO ₄ .2H ₂ O	C ₃ S; Silicato tricálcico	%	-	37,28

Fuente: Elaboración propia, 2023

3.2.5. Granulometrías materias primas obtenidas

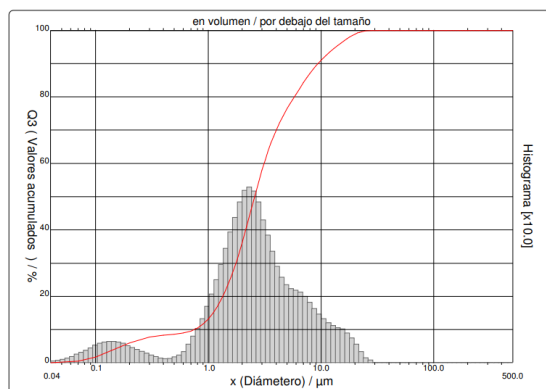
Para un análisis más preciso de las muestras obtenidas se decidió ejecutar el análisis de granulometría laser, realizado en el equipo SILAS de planta Warnes que también es parte del grupo SOBOCE S.A, cuyos resultados se muestran en las siguientes a continuación:

Granulometría polvo purgado del filtro planta El Puente

Figura 3-3 Granulometría Laser polvo purgado del filtro horno FLS 08/2023

x	0.10	0.50	0.90	2.00	3.00	10.00	16.00	20.00	25.00	30.00
Q3	1.72	8.63	11.72	36.09	58.05	91.02	96.84	98.85	99.84	100.00
x	32.00	45.00	50.00							
Q3	100.00	100.00	100.00							

x : Diámetro / μ m Q3 : Valor acumulado / % q3 : density distribution



Ultrasonidos	: 60	s
Obscuration	: 20	%
Diámetro a 10%	: 0.75	μ m
Diámetro a 50%	: 2.58	μ m
Diámetro a 90%	: 9.39	μ m
Fraunhofer		
Densidad/Factor	-----	
Superficie específica	-----	
Dilución automática	: No / No	
Medidas/lavado	: 60s/60s/3	
SOP name	: CEMENTO46H	

Fuente: Laboratorio Warnes, Cilas, muestra EL Puente FILTRO FLS 14-08-23

Los resultados de la granulometría laser del polvo purgado del filtro indican que el 50% de las partículas tienen un diámetro menor a 2.58 micras y el 90 % de partículas con diámetro menor a 9.39 micras, presenta una distribución granulométrica uniforme, con dichas características se

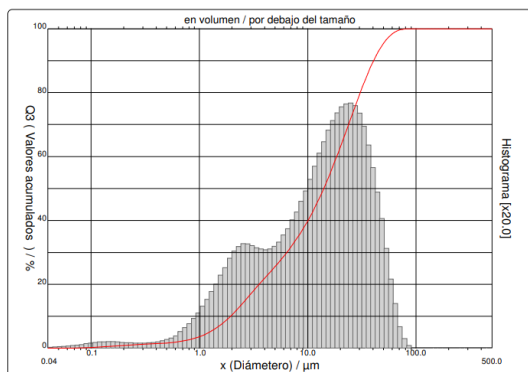
confirma que este material está dentro del rango de microfiller calizo.

Granulometría cemento EL Puente tipo IP-30

Figura 3-4 Granulometría Laser cemento EL Puente IP-30, 08/2023

x	0.10	0.50	0.90	2.00	3.00	10.00	16.00	20.00	25.00	30.00
Q3	0.25	1.67	3.11	10.41	17.14	39.85	54.49	62.94	71.91	79.25
x	32.00	45.00	50.00							
Q3	81.76	92.92	95.41							

x : Diámetro / μm Q3 : Valor acumulado / % q3 : density distribution



Ultrasonidos	: 60	s
Obscuration	: 16 %	
Diámetro a 10%	: 1.94	μm
Diámetro a 50%	: 14.06	μm
Diámetro a 90%	: 40.59	μm
Fraunhofer		
Densidad/Factor	-----	
Superficie específica	-----	
Dilución automática	: No / No	
Medidas/lavado	: 60s/60s/3	
SOP name	: CEMENTO46H	

Fuente: Laboratorio Warnes, Cilas, muestra cemento EL Puente IP-30, 18-08-23

Los resultados de la granulometría laser del cemento IP-30 indican que el 50% de las partículas tienen un diámetro menor a 14.06 micras y el 90 % de partículas con diámetro menor a 40.59 micras, presenta una distribución granulométrica uniforme. EL 79 % de las partículas presentan un diámetro menor a 30 micras estando dentro de los parámetros granulométricos habituales del producto estándar.

3.2.6. Homogenización y dosificación de muestras

Homogenización de muestras:

Se aseguró la obtención de muestras de cemento El Puente IP-30 y del polvo purgado del filtro (PVF) de manera representativa, tomando muestras de diferentes depósitos y línea de producción dentro de la fábrica para garantizar la variabilidad natural del material. Las fotografías del cemento y polvo del filtro obtenidas se muestran en el Anexo 11 fotografías del muestreo en la línea de cemento y materiales en dosificación.

Mezcla de las muestras: Para homogenizar cada muestra, se utiliza una mezcladora introduciendo lotes de 1.5 Kg por el lapso de 10 minutos, para combinar bien los materiales y asegurar que la muestra sea lo más uniforme posible.

Una vez homogeneizadas las muestras, se dividen cada muestra en dos partes para tener una muestra de referencia (sin adición) y una muestra para agregar el polvo del filtro con los niveles

de adición deseados (3%, 5% y 7%).

Dosificación de muestras:

Establecimiento de las proporciones: Con base en el tamaño de muestra calculado previamente y el porcentaje de adición requerido (3%, 5% y 7%), se calcula la cantidad adecuada de polvo del filtro que se agregará a cada muestra de cemento IP-30 puro.

En primera instancia, se eligió una base de materia prima, cuya cantidad es 8000 g tomando en cuenta los diferentes ensayos a realizar y las probables repeticiones, para cada una de las mezclas como se observa en la siguiente tabla:

Tabla III-6 Dosificación de polvo del filtro al cemento IP-30

Materia prima	Cantidad (g)	Masa (g)	Porcentaje de adición (%)
Cemento IP-30	7760	8000	3
Polvo del filtro	240		
Cemento IP-30	7600	8000	5
Polvo del filtro	400		
Cemento IP-30	7600	8000	7
Polvo del filtro	560		

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Mezcla de los componentes: Se agrega el polvo del filtro cuidadosamente a la muestra de cemento IP-30 puro y mezcla bien para asegurar una distribución uniforme del aditivo. Las fotografías de las mezclas de componentes se muestran en el ANEXO 11 FOTOGRAFÍAS DEL MUESTREO EN LA LINEA DE CEMENTO Y MATERIALES EN DOSIFICACIÓN.

Etiquetado y almacenamiento: Se etiqueta claramente cada muestra para identificar el nivel de adición y demás detalles y se almacena las muestras de manera adecuada para evitar contaminaciones y cambios no deseados antes de realizar los ensayos.

Consideraciones importantes:

Control de humedad: Se va mantiene un control adecuado de la humedad de las muestras, debido a que se trabaja con polvo fino, ya que la humedad puede afectar los resultados de los ensayos.

Registro de datos: Se lleva un registro detallado de todos los pasos realizados durante la

homogenización y dosificación de las muestras, así como de las cantidades exactas de adición utilizadas.

Uso de equipos adecuados: con la disponibilidad del laboratorio de planta El Puente se asegura de utilizar equipos y herramientas adecuadas para realizar la homogenización y dosificación de las muestras de manera precisa y segura.

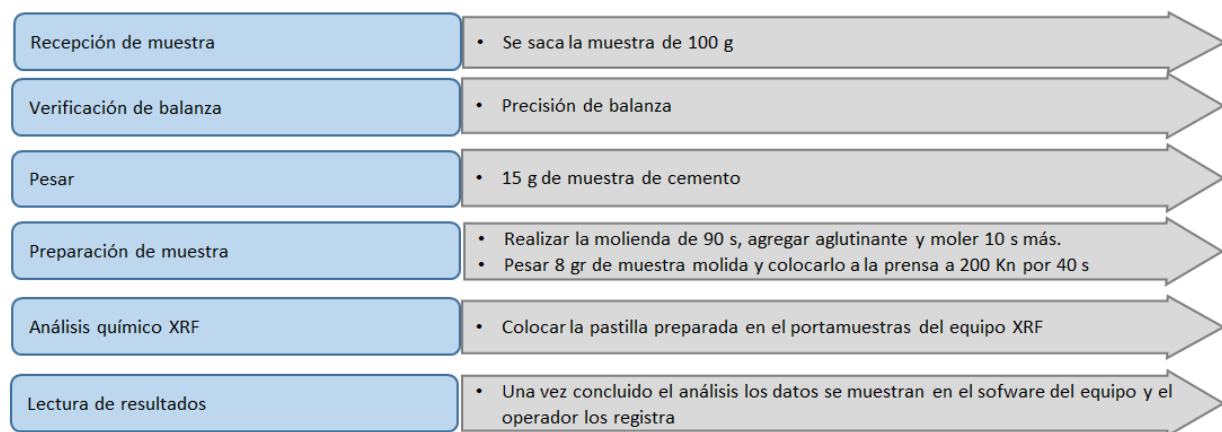
3.3. ENSAYOS FÍSICOS Y QUÍMICOS

Se realizan los ensayos físicos y químicos de los morteros para cada nivel de adición, siguiendo los métodos normalizados para el cemento: NB 063, NB 470, NB 471, NB 472, NB 643 y NTP-ISO 29581-2 para evaluar la calidad y las propiedades de los morteros.

3.3.1. Análisis químicos

Cemento. Método de ensayo. Parte 2: Análisis químico por fluorescencia de Rayos X - ISO 29581-2 (MgO, SO₃)

Figura 3-5 Resumen método ISO 29581-2 (MgO, SO₃)

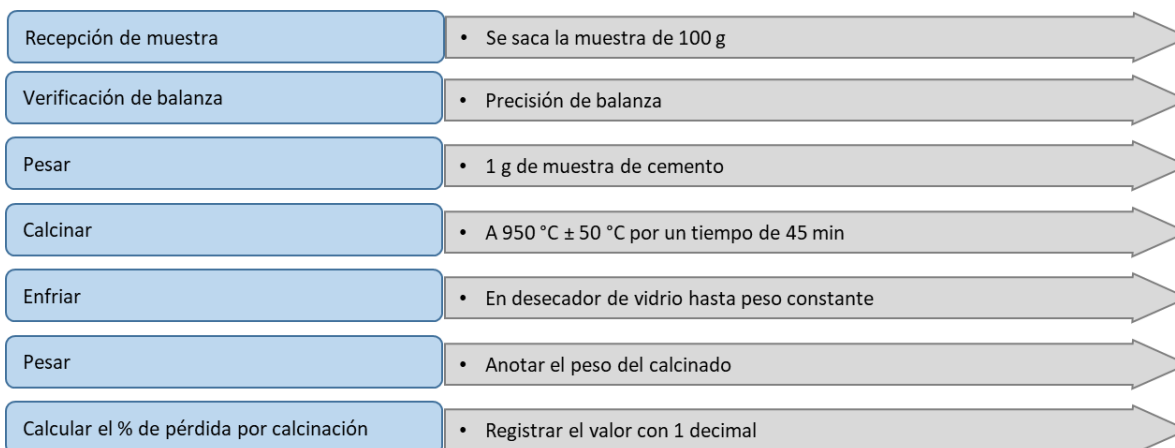


Fuente: Elaboración propia, 2023

Norma Boliviana: NB 061. Determinación de las pérdidas por calcinación. Tercera revisión: 2013-12-31

ASTM : Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement ASTM C114 -

Figura 3-6 Resumen método NB 061 Determinación de las pérdidas por calcinación

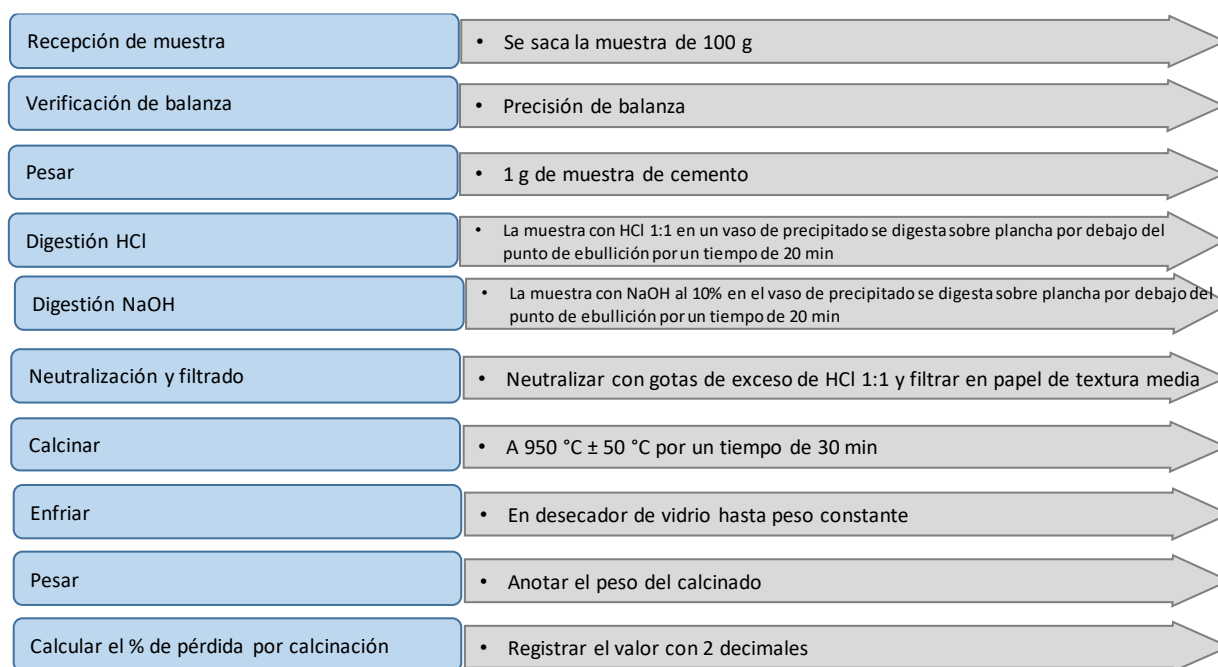


Fuente: Elaboración propia, 2023

Norma Boliviana: NB 061. Determinación de residuos insolubles. Tercera revisión: 2013-12-31

ASTM : Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement ASTM C114 - 18

Figura 3-7 Resumen método NB 061 Determinación de residuos insolubles



Fuente: Elaboración propia, 2023

3.3.1.1. Análisis químico muestras de polvo del filtro

El procedimiento para el desarrollo de este análisis químico está detallado en las siguientes

Normas:

- NB-061 Cemento - Análisis químico y NB-060 Cemento - Disposiciones generales para análisis químico
- NTP ISO 29581-2 Análisis químico por fluorescencia de rayos-X
- Instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.029 “ANÁLISIS QUÍMICO”)

Tabla III-7 Composición Química del polvo purgado del filtro

N°	Componente	PVF		Media
		Contenido Porcentual		
		Deposito 1	Deposito 2	%
1	SiO ₂	16,75	16,19	16,47
2	Al ₂ O ₃	4,55	4,39	4,47
3	Fe ₂ O ₃	2,98	2,44	2,71
4	CaO	38,36	39,49	38,925
5	MgO	2,27	2,32	2,295
6	SO ₃	0,34	0,47	0,405
7	K ₂ O	1,39	1,26	1,325
8	PPF	31,71	31,5	31,605
TOTAL=				98,205

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Este análisis químico es el respaldo para la utilización del polvo del filtro purgado del horno en la adición al cemento IP-30, que presenta características de filler calizo.

3.3.1.2. Análisis químico del cemento IP30 El Puente y cementos con adición de polvo purgado del filtro

En este apartado se detalla el análisis químico del cemento IP-30 y del cemento IP-30 con 3%, 5% y 7% de adición de polvo purgado del filtro del horno (PVF):

Tabla III-8 Análisis Químico cemento IP-30

N°	Componente	CEMENTO ESTANDAR IP-30				Media
		Contenido Porcentual				
		M1	M2	M3	M4	%
1	SiO ₂	28,48	28,56	28,57	28,19	28,45
2	Al ₂ O ₃	6,4	6,01	6,38	6,22	6,25
3	Fe ₂ O ₃	3,34	3,02	3,26	3,18	3,20
4	CaO	51,96	52,59	52,08	52,37	52,25
5	MgO	3	3,06	3,13	3,11	3,08
6	SO ₃	1,85	1,81	1,73	1,76	1,79
7	K ₂ O	1,67	1,51	1,66	1,65	1,62
8	PPF	3,65	3,58	3,63	3,6	3,62
9	RI	15,83	15,87	15,88	15,67	15,81
10	Cal libre	1,06	1,21	0,9	1,21	1,10
TOTAL=						100,3

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-9 Análisis Químico del cemento IP-30 con 3 % de adición

N°	Componente	CEMENTO IP-30 + 3%PVF				Media
		Contenido Porcentual				
		M1	M2	M3	M4	%
1	SiO ₂	28,12	28,14	28,18	28,06	28,13
2	Al ₂ O ₃	6,34	6,04	6,06	6,18	6,16
3	Fe ₂ O ₃	3,32	3,07	3,09	3,05	3,13
4	CaO	52,02	52,51	52,47	52,57	52,39
5	MgO	3,14	3,11	3,05	3,16	3,11
6	SO ₃	1,81	1,78	1,77	1,75	1,78
8	PPF	4,34	4,40	4,37	4,31	4,36
9	RI	15,73	15,74	15,76	15,54	15,69
TOTAL=						99,1

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-10 Análisis Químico del cemento IP-30 con 5 % de adición

N°	Componente	CEMENTO IP-30 + 5%PVF				Media
		Contenido Porcentual				
		M1	M2	M3	M4	%
1	SiO ₂	27,70	27,86	27,75	27,80	27,78
2	Al ₂ O ₃	6,19	6,08	6,16	6,12	6,14
3	Fe ₂ O ₃	3,30	3,20	3,26	3,26	3,25
4	CaO	52,43	52,83	52,58	52,73	52,64
5	MgO	3,18	3,24	3,31	3,22	3,24
6	SO ₃	1,77	1,73	1,84	1,80	1,79
8	PPF	4,91	4,99	4,93	4,89	4,93
9	RI	15,65	15,64	15,60	15,60	15,62
TOTAL=						99,8

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-11 Análisis Químico del cemento IP-30 con 7 % de adición

N°	Componente	CEMENTO IP-30 + 7%PVF				Media
		Contenido Porcentual				
		M1	M2	M3	M4	%
1	SiO ₂	27,20	27,38	27,13	27,32	27,26
2	Al ₂ O ₃	6,05	6,18	5,98	6,15	6,09
3	Fe ₂ O ₃	3,24	3,21	3,22	3,19	3,22
4	CaO	52,86	52,91	52,52	53,06	52,84
5	MgO	3,37	3,44	3,40	3,49	3,42
6	SO ₃	1,77	1,69	1,65	1,73	1,71
8	PPF	5,45	5,58	5,59	5,58	5,55
9	RI	15,53	15,60	15,60	15,64	15,59
TOTAL=						100,1

Fuente: Elaboración Propia, 2023.

3.3.2. Análisis físicos del cemento IP-30 con adición de PVF

Tabla III-12 Métodos normalizados ensayos físicos

	ENSAYO	DESCRIPCIÓN	EL PUENTE
Laboratorio Físico	BLAINE	SUPERFICIE ESPECÍFICA	NB 472 (ASTM C204)
	FRAG. INICIAL	TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL VICAT	NB063 (ASTM C191)
	FRAG. FINAL	TIEMPO DE FRAGUADO FINAL VICAT	NB063 (ASTM C191)
	EXP. LE CHAT.	EXPANSIÓN DE LE CHATELIER	NB643
	EXP. AUTOCLAVE	EXPANSIÓN AUTOCLAVE	NB 471 (ASTM C151)
	RES. 3 DIAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 3 DIAS	NB470 (ASTM C109)
	RES. 7 DIAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DIAS	NB470 (ASTM C109)
	RES. 28 DIAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DIAS	NB470 (ASTM C109)

Fuente: Elaboración Propia, 2023

3.3.2.1. Determinación del Peso Específico

Previo al ensayo de finura por Blaine es necesario ejecutar el ensayo de peso específico de los cementos adicionados para los cálculos en el permeabilímetro de acuerdo a la normativa.

El peso específico del cemento con y sin adición se realizó en base a la norma boliviana NB 064 en un matraz de Le Chatelier con diesel, llevando el líquido a un baño de temperatura constante de 20°C, leyendo a esta temperatura el volumen inicial entre las marcas 0 a 1 ml. luego adicionando el material; posteriormente leyendo el volumen final en el baño de temperatura constante, y finalmente se obtiene el peso específico, dividiendo el peso del cemento por el volumen desplazado.

Tabla III-13 Pesos específicos

Cemento	% Adición	Peso específico (g/ml)
Patrón	0	3,03
Patrón	3	3,03
Patrón	5	3.05
Patrón	7	3.08

Fuente: Elaboración Propia, 2023

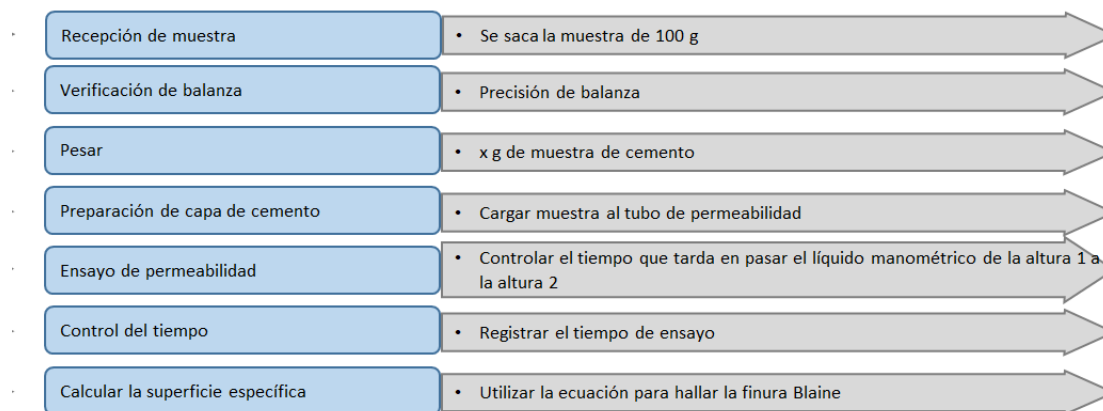
3.3.2.2. Determinación de la Superficie Específica Blaine NB 472 (ASTM C204)

Las partículas de cemento y polvo purgado del filtro debido a su pequeño tamaño, necesitan métodos especiales para medir el tamaño de partícula. Por lo que se utiliza el método detallado a continuación:

NB 472. Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro (Blaine). Tercera revisión: 2013-10-11

ASTM C 204. 2018. Standard Test Method for Fineness of Hidraulic Cement by Air Permeability Apparatus.

Figura 3-8 Resumen método NB 472 (Blaine)



Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Tabla III-14 Resultados de superficie específica por el permeabilímetro (Blaine)

Nº	% Adición	Peso Especifico	Blaine
		(g/ml)	(cm ² /g)
1	0	3,03	4700
2	0	3,03	4737
3	0	3,03	4780
4	0	3,03	4701
1	3	3,03	4878
2	3	3,03	4856
3	3	3,03	4874
4	3	3,03	4928
1	5	3,05	5001
2	5	3,05	5028
3	5	3,05	4992
4	5	3,05	5034
1	7	3,08	5073
2	7	3,08	5134
3	7	3,08	5098
4	7	3,08	5166

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Este método depende del flujo de aire a través de un lecho de cemento preparado en la celda del aparato mostrado en el ANEXO 13 INFORME FOTOGRAFICO ENSAYOS FISICOS.

El flujo de aire es función del tamaño y número de poros, lo cual es función del tamaño de

partícula. Para determinar la superficie específica, se considera a las partículas como esferas. El área superficial se expresa en m^2/kg o cm^2/gr de cemento.

3.3.2.3. Determinación Consistencia Normal

El objetivo de este ensayo es el de determinar la cantidad de agua necesaria para que en la pasta se evalúen los tiempos de fraguado y la expansión de los cementos con y sin adición, respectivamente.

La consistencia normal de una pasta de cemento se la determina de acuerdo al método NB 062_2013 Cemento - Determinación de la consistencia normal, preparando varias pastas hasta obtener la pasta que obtenga una penetración del vástago del aparato de Vicat de 10 ± 1 mm. en 30 segundos, la medición de la penetración se la realiza 30 segundos después de que la pasta fue preparada.

Tabla III-15 Determinación de la Consistencia Normal

Nº	% Adicción	Cemento	Agua	Consistencia (%)
		(gr.)	(gr.)	
1	0	500	139	27,8
2	0	500	139	27,8
3	0	500	139	27,8
4	0	500	139	27,8
1	3	500	139	27,8
2	3	500	139	27,8
3	3	500	139	27,8
4	3	500	139	27,8
1	5	500	138	27,6
2	5	500	138	27,6
3	5	500	138	27,6
4	5	500	138	27,6
1	7	500	136	27,2
2	7	500	136	27,2
3	7	500	136	27,2
4	7	500	136	27,2

Fuente: Elaboración Propia, 2023

3.3.2.4. Determinación del Tiempo de Fraguado NB063 (ASTM C191)

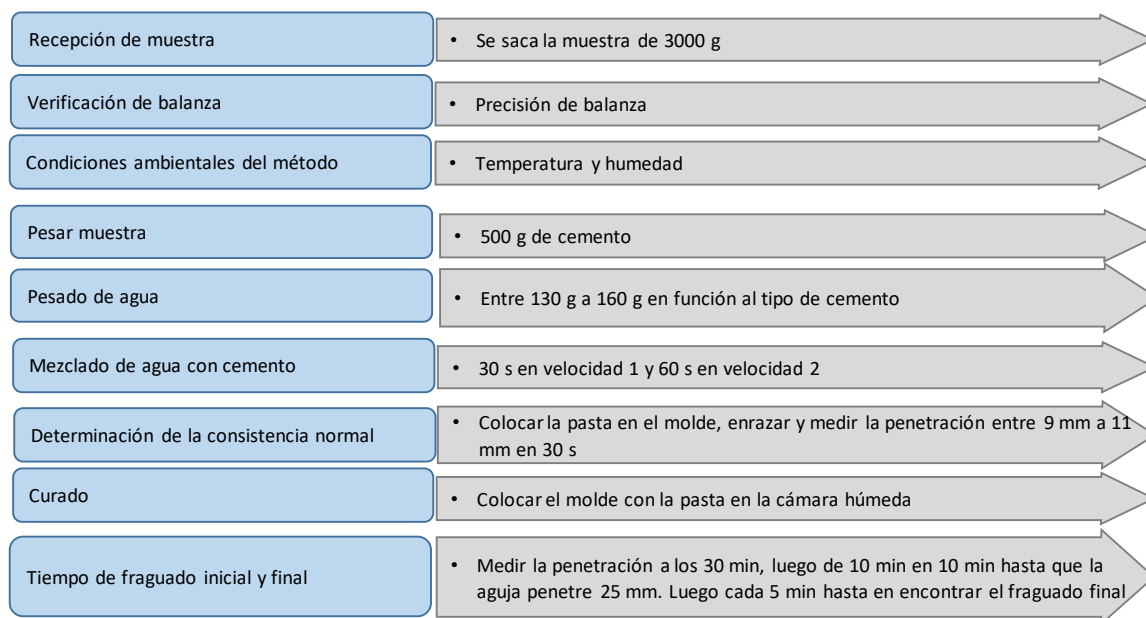
La finalidad de este estudio es la de determinar el tiempo de fraguado inicial y final de acuerdo a los métodos normalizados:

Norma Boliviana: NB 063. Determinación del tiempo de fraguado. Tercera revisión: 2013-12-

06.

ASTM C 191 - 21. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle

Figura 3-9 Determinación del tiempo de fraguado



Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-16 Resultados determinación del Tiempo de Fraguado Inicial y Final

Nº	% Adicción	TIEMPOS DE FRAGUADO	
		Inicial (min)	Final (min)
1	0	151	265
2	0	155	280
3	0	157	280
4	0	150	290
1	3	157	285
2	3	153	275
3	3	160	295
4	3	161	290
1	5	169	290
2	5	165	280
3	5	170	285
4	5	155	295
1	7	174	280
2	7	168	280
3	7	171	295

4	7	160	285
---	---	-----	-----

Fuente: Elaboración Propia, 2023

La normativa indica que el tiempo de fraguado inicial no debe ser menor a 45 minutos para evitar que en la puesta en obra este material fragué. Además de que pueden presentarse anomalías en el proceso de endurecimiento.

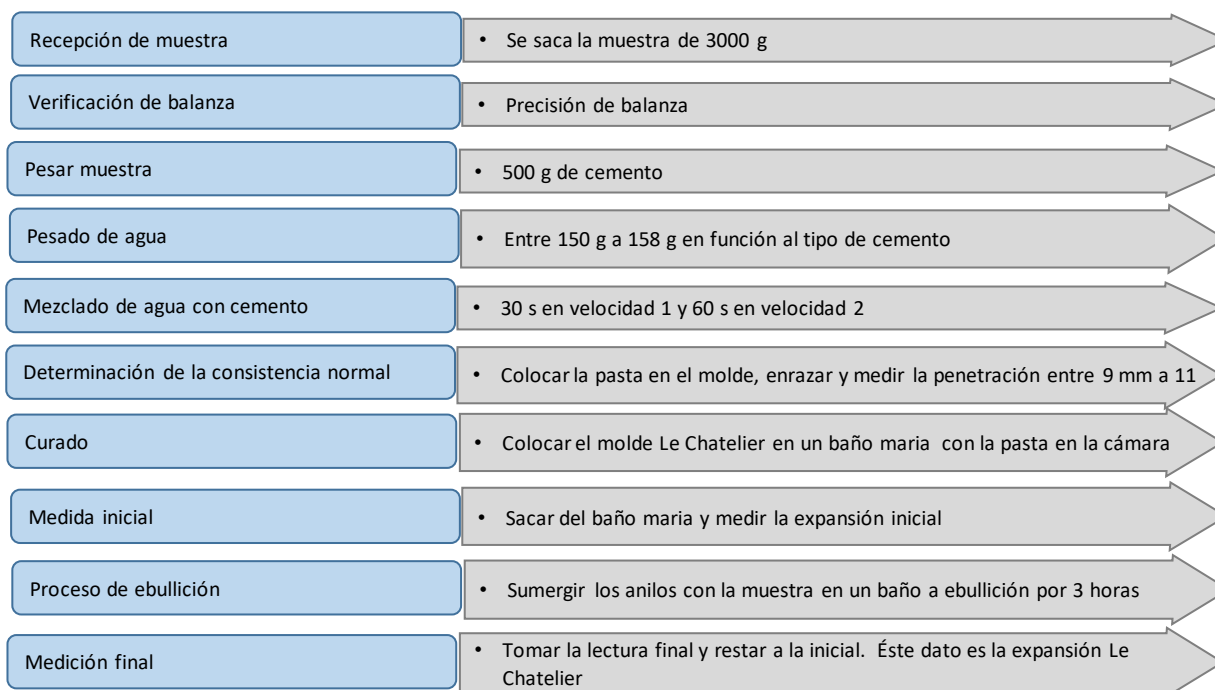
En el tiempo de fraguado final, se indica que no debe ser mayor a 420 minutos, ya que si no se cumple con este parámetro se obtienen resistencias bajas (especialmente a cortas edades).

3.3.2.5. Determinación de la Estabilidad del Volumen Le Chatelier NB643

Este ensayo es realizado para determinar la estabilidad del volumen, además de medir la expansión de la muestra mediante las Agujas de Le Chatelier mostrado en el ANEXO 13 INFORME FOTOGRAFICO ENSAYOS FISICOS, nos referimos a la estabilidad ya que el fenómeno de expansión no es sólo debido al cal libre, sino también a la presencia de MgO y SO₃.

Norma Boliviana: NB 643. Ensayo para determinar la estabilidad de volumen por el método de Le Chatelier. Octubre 2005

Figura 3-10 NB 643 estabilidad de volumen Le Chatelier



Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-17 Resultados determinación estabilidad de volumen Le Chatelier

N°	% Adición	Edad	Longitud	Longitud	Expansión
		(días)	Inicial (mm)	Final (mm)	(mm)
1	0	1	18	18,7	0,7
2	0	1	7	7,5	0,5
3	0	1	15	15,7	0,7
4	0	1	4	4,6	0,6
1	3	1	8	8,4	0,4
2	3	1	6	6,5	0,5
3	3	1	4	4,5	0,5
4	3	1	10	10,3	0,3
1	5	1	18	18,6	0,6
2	5	1	7	7,2	0,2
3	5	1	4	4,5	0,5
4	5	1	10	10,3	0,3
1	7	1	4	4	0
2	7	1	8	8,2	0,2
3	7	1	15	15,1	0,1
4	7	1	3	3	0

Fuente: Elaboración Propia, 2023

3.3.2.6. Determinación de la Resistencia a la compresión

Previo al ensayo de resistencias a la compresión, es necesario determinar la fluidez de los cementos estudiados.

Determinación de la fluidez y relación agua cemento

El ensayo para determinar la fluidez NB 473, se realiza en una mesa de sacudidas la que se coloca la muestra en dos capas que son compactadas con una varilla normada en un molde normado. Se deja la muestra en el molde por 1min y luego se retira el molde quedando la muestra sobre el plato de la mesa de sacudidas. Se inicia una secuencia de 25 golpes y se realizan 5 medidas del diámetro de la muestra expandida por los golpes. El cálculo de las medidas debe dar 110 ± 5 .

El % de fluidez se determina promediando los diámetros y reemplazando en la siguiente fórmula:

$$\% \text{Fluidez} = \left(\frac{\text{DIÁMETRO...PROMEDIO} - \text{DIÁMETRO...ORIGINAL}}{\text{DIÁMETRO...ORIGINAL}} \right) * 100 \quad \text{Ec. 3.3}$$

La determinación de la fluidez se realiza con el mortero previo, a ser moldeadas.

Los equipos usados en la medición de fluidez para la determinación de la relación agua cemento se muestran en el ANEXO 13 INFORME FOTOGRAFICO ENSAYOS FISICOS.

Tabla III-18 Resultados Fluidez y relación agua cemento

Nº	% Adición	Cemento	Agua	Relación a/c (%)	Fluidez (%)
		(g)	(g)		
1	0	740	380	51,4	108,6
2	0	740	380	51,4	110,1
3	0	740	380	51,4	108,5
4	0	740	380	51,4	107,5
1	3	740	382	51,6	106,9
2	3	740	382	51,6	106,3
3	3	740	383	51,8	107,2
4	3	740	383	51,8	108,1
1	5	740	385	52,0	111,3
2	5	740	385	52,0	112
3	5	740	385	52,0	113,2
4	5	740	384	51,9	110,8
1	7	740	387	52,3	109,8
2	7	740	388	52,4	111,3
3	7	740	387	52,3	110,5
4	7	740	387	52,3	111,8

Fuente: Elaboración Propia, 2023

RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Norma Boliviana: NB 470. Determinación de la resistencia la compresión

ASTM C109/C109 - 21. Standard Test Method for Compressive Strength of Hidraulic Cement Mortars (Using 2-in. Or [50 mm] Cube Specimens)

Figura 3-11 NB 470. Resumen método determinación de la resistencia la compresión

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-19 Resultados determinación de la resistencia la compresión 3 días

Nº	% Adición	Resistencia 3 días (MPa)					
		Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	Prom.	Dif. entre máx. Y mín.	% De dif. con prom. de 3 max 8,7
1	0	20,80	21,30	21,10	21,1	0,5	2,37
2	0	21,50	21,90	21,00	21,5	0,9	4,19
3	0	21,10	20,10	20,80	20,7	1,0	4,84
4	0	21,46	21,10	21,20	21,3	0,4	1,69
1	3	22,20	22,10	22,20	22,2	0,1	0,45
2	3	21,40	21,10	20,70	21,1	0,7	3,32
3	3	21,60	21,80	21,50	21,6	0,3	1,39
4	3	21,40	21,90	21,60	21,6	0,5	2,31
1	5	21,40	21,90	21,60	21,6	0,5	2,31
2	5	20,70	20,50	21,10	20,8	0,6	2,89
3	5	20,30	21,40	20,20	20,6	1,2	5,82
4	5	20,50	20,50	19,90	20,3	0,6	2,96
1	7	18,60	18,80	19,60	19,0	1,0	5,26
2	7	18,70	18,50	18,10	18,4	0,6	3,25
3	7	19,30	19,40	19,20	19,3	0,2	1,04
4	7	18,50	18,50	19,90	19,0	1,4	7,38

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-20 Resultados determinación de la resistencia la compresión 3 días

N°	% Adición	Resistencia 7 días (MPa)					
		Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	Prom.	Dif. entre máx. Y mín.	% De dif. con prom. de 3 max 8,7
1	0	27,60	27,40	28,20	27,7	0,8	2,88
2	0	27,50	27,30	27,60	27,5	0,3	1,09
3	0	26,80	27,50	26,80	27,0	0,7	2,59
4	0	27,90	26,80	27,80	27,5	1,1	4,00
1	3	28,50	28,40	28,90	28,6	0,5	1,75
2	3	28,30	28,80	29,30	28,8	1,0	3,47
3	3	28,60	28,80	28,60	28,7	0,2	0,70
4	3	28,30	28,40	28,20	28,3	0,2	0,71
1	5	27,80	27,10	28,00	27,6	0,9	3,26
2	5	26,70	27,50	27,10	27,1	0,8	2,95
3	5	28,30	28,40	28,20	28,3	0,2	0,71
4	5	28,10	28,40	29,00	28,5	0,9	3,16
1	7	23,70	23,20	24,00	23,6	0,8	3,39
2	7	25,30	24,50	24,10	24,6	1,2	4,87
3	7	25,00	25,50	24,70	25,1	0,8	3,19
4	7	25,80	25,60	25,50	25,6	0,3	1,17

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Tabla III-21 Resultados determinación de la resistencia la compresión 28 días

N°	% Adición	Resistencia 28 días (MPa)					
		Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	Prom.	Dif. entre máx. Y mín.	% De dif. con prom. de 3 max 8,7
1	0	33,50	32,20	33,70	33,1	1,5	4,53
2	0	33,50	33,10	33,60	33,4	0,5	1,50
3	0	33,90	31,80	33,90	33,2	2,1	6,33
4	0	33,64	31,80	31,70	32,4	1,9	5,99
1	3	33,20	31,80	32,30	32,4	1,4	4,32
2	3	31,87	32,00	32,60	32,2	0,7	2,27
3	3	32,64	34,30	33,00	33,3	1,7	4,98
4	3	32,70	32,60	33,80	33,0	1,2	3,63
1	5	30,43	32,20	31,30	31,3	1,8	5,65
2	5	32,00	31,00	31,90	31,6	1,0	3,16
3	5	31,60	31,80	31,50	31,6	0,3	0,95
4	5	30,60	30,00	30,60	30,4	0,6	1,97
1	7	28,60	29,00	28,60	28,7	0,4	1,39
2	7	26,62	26,20	27,30	26,7	1,1	4,12
3	7	29,20	28,80	29,60	29,2	0,8	2,74
4	7	29,80	28,90	29,50	29,4	0,9	3,06

Fuente: Elaboración Propia, 2023

3.4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la parte experimental del proyecto se va emplear los siguientes análisis estadísticos apoyados en el software validado para análisis estadístico minitab:

Hipotesis nula es que no existen diferencias significativas de las medias de los grupos entre el cemento sin adición de PVF respecto a los cementos adicionados.

La hipótesis alterna nos indica que si existen diferencias significativas entre las medias de los grupos, entre el cemento sin adición de PVF respecto a los cementos adicionados.

Cabe resalta que el hecho que existan diferencias significativas puede significar que las propiedades hayan mejorado o empeorado y se debe tomar en cuenta las especificaciones normadas de las variables para evaluar los distintos porcentajes de adición (3, 5 y 7%).

El procedimiento para realizar el ANOVA a ejecutarse con el software minitab el cual calcula la regla de decisión (P-value) que se usa para evaluar la variabilidad entre los grupos y dentro de los grupos, en el que si el P-value > 0.05 no rechazamos la hipótesis nula (No hay diferencias significativas), sin embargo si el P-value < 0.05 se acepta la hipótesis alterna (hay diferencias significativas) por lo que tendrá que evaluarse si esa variable mejoro o empeoro respecto a la especificación de la normativa nacional del cemento.

Es importante mencionar que el ANOVA debe cumplir con ciertos supuestos, como la normalidad y la homogeneidad de varianzas en los grupos, para obtener resultados válidos. Si los supuestos no se cumplen, se pueden utilizar pruebas no paramétricas como alternativa.

Gráficos de Control: para detectar desviaciones significativas en el comportamiento de las variables.

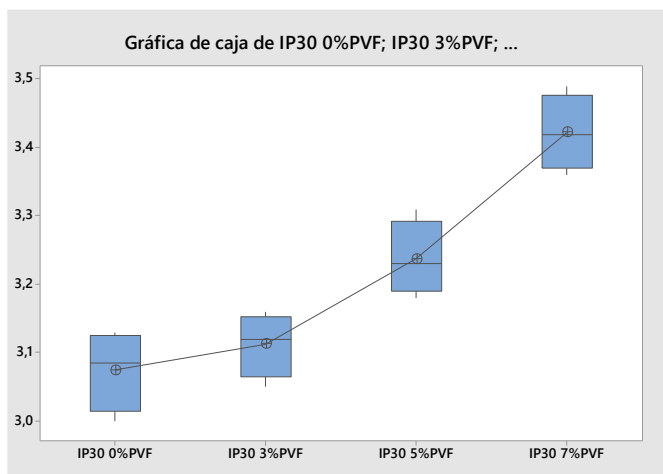
3.4.1. Análisis estadístico de resultados de ensayos químicos

Los requisitos químicos referidos al contenido de oxido férrico, óxido de magnesio, residuos insolubles y pérdidas por calcinación están dados por la norma NB-011 y el reglamento técnico del cemento, han sido verificados en este proyecto para el cemento patrón IP-30 estándar sin adición, como así también para los cementos adicionados.

Se realiza la evaluación de resultados usando la gráfica de cajas proporcionada por el software minitab. Los análisis estadísticos de los resultados de ensayos químicos se detallan en ANEXO 14 ANÁLISIS ESTADISTICO DE RESULTADOS SOFTWARE MINITAB

3.4.1.1. Cemento. Método de ensayo. Parte 2: Análisis químico por fluorescencia de Rayos X - ISO 29581-2 (MgO)

Figura 3-12 Grafica Análisis químico ISO 29581-2 (MgO)%



Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-22 Análisis de Varianza (MgO)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0,29452	0,098173	33,93	0,000
Error	12	0,03473	0,002894		
Total	15	0,32924			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-23 Estadísticos descriptivos (MgO)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	3,0750	0,0290	0,0580	0,0034	1,89	3,0000	3,0850	3,1300
IP30 3%PVF	4	3,1125	0,0232	0,0465	0,0022	1,49	3,0500	3,1200	3,1600
IP30 5%PVF	4	3,2375	0,0272	0,0544	0,0030	1,68	3,1800	3,2300	3,3100
IP30 7%PVF	4	3,4225	0,0278	0,0556	0,0031	1,62	3,3600	3,4200	3,4900

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación de la NB-011, que indica que el MgO debe ser menor a 6% se puede afirmar que en el método estudiado todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas

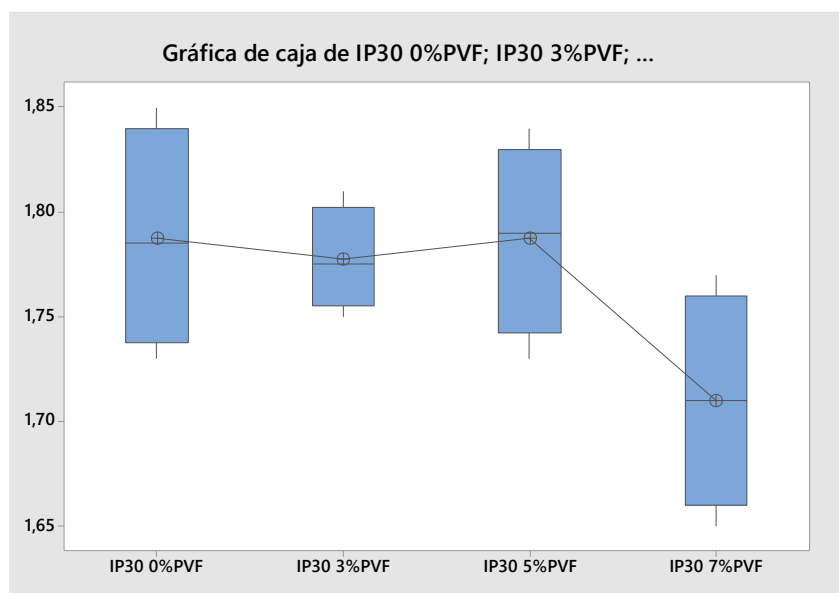
en las medias de los grupos.

3.4.1.2. Cemento. Método de ensayo. Parte 2: Análisis químico por fluorescencia de Rayos X - ISO 29581-2 (SO₃)

Este componente se agrega al clinker durante la molienda para regular su fraguado, y también puede provenir del clinker y combustible empleado en el horno. Un exceso de SO₃ puede conducir al fenómeno de falso fraguado, por lo que se limita a no más del 4%.

El SO₃ al hidratarse produce ácido sulfúrico y este componente reacciona con la portlandita dando sulfato cálcico y este último componente puede reaccionar con el aluminato tricálcico que todavía no reacciona, dando lugar a un componente llamado ettringita que es expansiva, motivo por el cual debe limitarse el porcentaje del SO₃ en el cemento.

Figura 3-13 Gráfica Análisis químico ISO 29581-2 (SO₃) %



Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-24 Análisis de Varianza (SO₃)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0,01677	0,005590	2,72	0,091
Error	12	0,02463	0,002052		
Total	15	0,04139			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-25 Estadísticos descriptivos (SO₃)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	1,7875	0,0266	0,0532	0,0028	2,97	1,7300	1,7850	1,8500
IP30 3%PVF	4	1,7775	0,0125	0,0250	0,0006	1,41	1,7500	1,7750	1,8100
IP30 5%PVF	4	1,7875	0,0229	0,0457	0,0021	2,56	1,7300	1,7900	1,8400
IP30 7%PVF	4	1,7100	0,0258	0,0516	0,0027	3,02	1,6500	1,7100	1,7700

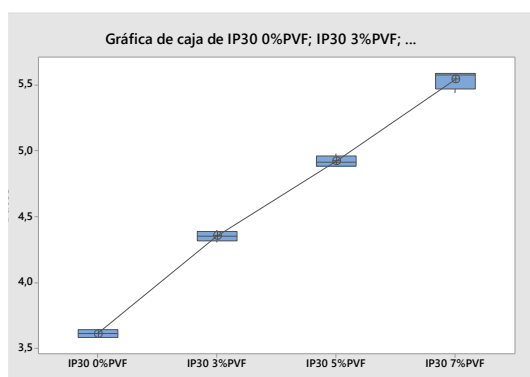
Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} > 0.05$ se acepta la hipótesis nula, que indica que no hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación de la NB-011, que indica que el SO₃ debe ser menor a 4% se puede afirmar que todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento y no existen diferencias significativas en las medias de los grupos que incluyen al patrón (cemento IP-30) sin adición de polvo del filtro.

3.4.1.3. Norma Boliviana: NB 061. Determinación de las pérdidas por calcinación. Tercera revisión: 2013-12-31

La pérdida por calcinación (también conocida como pérdida por ignición) es una medida de la cantidad de materia orgánica y agua presente en el cemento IP-30. Se determina calentando una muestra de cemento con masa conocida a una temperatura de 950°C hasta que se obtenga la constancia de masa. Luego, se determina la pérdida de masa de la muestra.

Pese a que la norma boliviana (NB-011) en su última versión, tiene como máximo en 7% de pérdidas por calcinación para el cemento IP-30, el reglamento técnico RM MDPyEP N°261.2018 limito el parámetro hasta el 5% máximo (ver ANEXO 6 REGLAMENTO TECNICO DEL CEMENTO – ESPECIFICACIONES FISICAS Y QUIMICAS).

Figura 3-14 Determinación de las pérdidas por calcinación (LOI) %

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-26 Análisis de Varianza (LOI)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	8,10772	2,70257	1176,10	0,000
Error	12	0,02758	0,00230		
Total	15	8,13529			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-27 Estadísticos descriptivos (LOI)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	3,6150	0,0155	0,0311	0,0010	0,86	3,5800	3,6150	3,6500
IP30 3%PVF	4	4,3555	0,0198	0,0395	0,0016	0,91	4,3100	4,3550	4,4021
IP30 5%PVF	4	4,9272	0,0218	0,0437	0,0019	0,89	4,8858	4,9177	4,9874
IP30 7%PVF	4	5,5478	0,0340	0,0681	0,0046	1,23	5,4461	5,5771	5,5909

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que las pérdidas por calcinación (LOI) debe ser menor a 5% se puede afirmar que en el método estudiado el cemento IP-30 con adición de 7% de PVF no cumple la especificación del reglamento técnico del cemento, sin embargo las adiciones de 3, 5 % cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos.

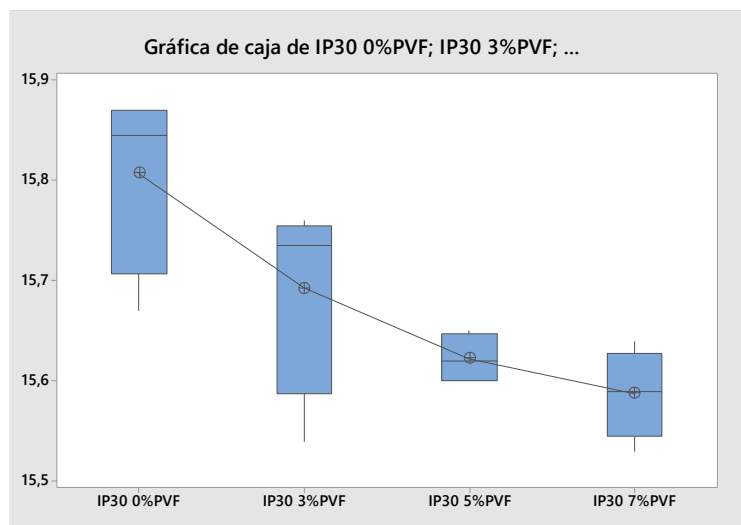
Un alto valor de pérdida por calcinación indica que el cemento contiene una cantidad significativa de materia orgánica y agua, lo que puede afectar negativamente la resistencia y la capacidad del cemento IP-30 de resistir a la corrosión, sin embargo, con la adición de polvo purgado del filtro, podemos afirmar que el incremento del LOI corresponde a la disociación del CaCO_3 del filler calcáreo en $\text{CO}_2 + \text{CaO}$ en el cemento estándar IP-30 y no se observaron efectos físicos negativos en los cementos con adiciones de hasta el 7%.

3.4.1.4. Norma Boliviana: NB 061. Determinación de residuos insolubles. Tercera revisión: 2013-12-31

El residuo insoluble en el cemento es la parte del cemento que no se disuelve en ácido clorhídrico. Está formado principalmente por partículas de cuarzo, feldespatos y otros silicatos

insolubles. Un alto contenido de residuo insoluble en el cemento, puede afectar a las resistencias a la compresión debido a que las partículas de residuo insoluble dificultan la formación de una matriz de cemento sólida y compacta, además estas partículas pueden ser más susceptibles a la acción de los agentes ambientales, como el agua y el hielo lo que puede afectar a la durabilidad

Figura 3-15 Determinación de residuos insolubles (RI) %



Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-28 Análisis de Varianza (RI)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0,11300	0,037667	6,80	0,006
Error	12	0,06650	0,005542		
Total	15	0,17950			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-29 Estadísticos descriptivos (RI)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	15,807	0,0473	0,0946	0,0090	0,60	15,670	15,845	15,870
IP30 3%PVF	4	15,692	0,0512	0,102	0,0105	0,65	15,540	15,735	15,760
IP30 5%PVF	4	15,623	0,0131	0,0263	0,0007	0,17	15,600	15,620	15,650
IP30 7%PVF	4	15,587	0,0225	0,0450	0,0020	0,29	15,530	15,590	15,640

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos

estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que el residuo insoluble (RI) debe ser menor a 35% para el cemento IP-30, se puede afirmar que en el método estudiado todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos.

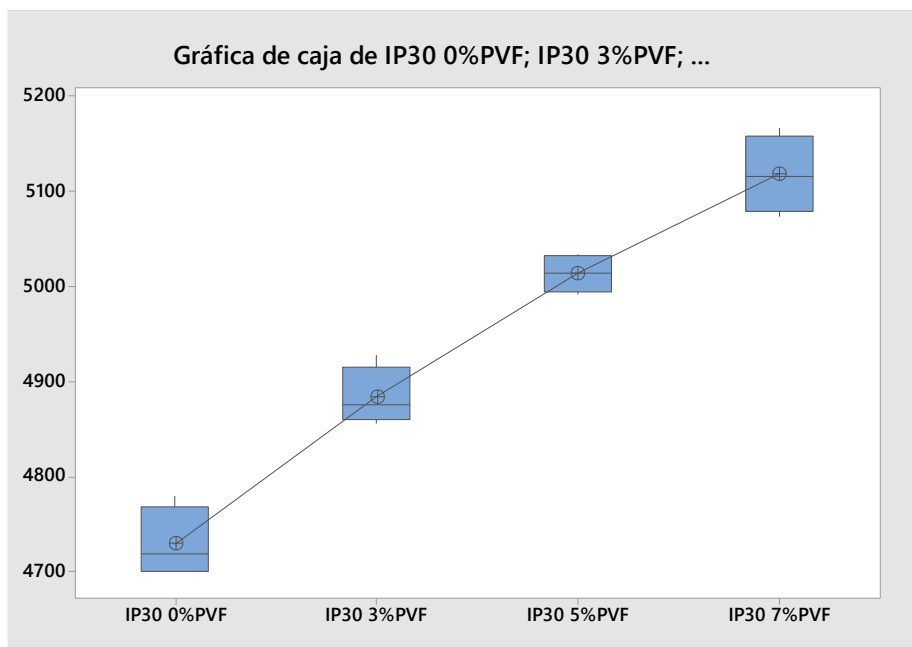
3.4.2. Análisis estadístico resultados de ensayos físicos

Los análisis estadísticos de los resultados de ensayos físicos se detallan en ANEXO 14 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS SOFTWARE MINITAB.

3.4.2.1. Determinación de la Superficie Específica Blaine NB 472 (ASTM C204)

El Blaine es una medida de la finura del cemento. Se refiere a la superficie de las partículas de cemento por gramo y se mide en cm^2/g . La finura del cemento es importante porque afecta la velocidad de hidratación (fraguado) y los requerimientos de cantidad de agua, retardador y dispersante.

Figura 3-16 Determinación de la Superficie Específica Blaine (cm^2/g)



Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-30 Análisis de Varianza (Blaine)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	337697	112566	100,97	0,000
Error	12	13379	1115		
Total	15	351075			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-31 Estadísticos descriptivos (Blaine)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	4729,5	18,9	37,8	1429,7	0,80	4700,0	4719,0	4780,0
IP30 3%PVF	4	4884,0	15,4	30,9	952,0	0,63	4856,0	4876,0	4928,0
IP30 5%PVF	4	5013,8	10,2	20,4	416,3	0,41	4992,0	5014,5	5034,0
IP30 7%PVF	4	5117,8	20,4	40,8	1661,6	0,80	5073,0	5116,0	5166,0

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que el Blaine debe ser mayor a 2600 (cm^2/gr) se puede afirmar que en el método estudiado todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos. Al adicionar el polvo del filtro (microfiller calizo) se incrementó la finura puesto que el microfiller presenta una finura mayor que el cemento.

La finura es una propiedad importante en el cemento IP-30, puesto que la hidratación comienza sobre la superficie de las partículas, el área superficial total del cemento constituye el material de hidratación durante las primeras edades.

El grado de hidratación, incrementa con el aumento de la finura del cemento portland debido a la mayor área superficial de partículas que se ponen en contacto con el agua. Además, la bibliografía ha demostrado que un grano de cemento sólo puede hidratarse completamente cuando su tamaño es menor a 50 μm , pues la difusión del agua a través de la capa de C-S-H, sólo se produce hasta que el espesor es menor a 25 μm .

El incremento de la finura del cemento, también aumenta la resistencia en las primeras edades, pero para las edades más avanzadas su efecto es casi nulo.

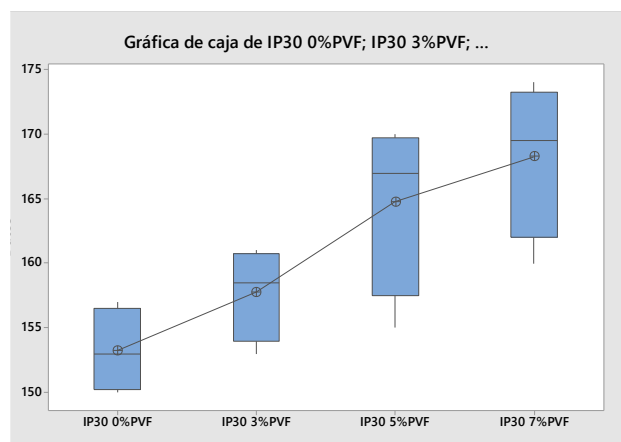
Los cementos con granos finos se hidratan más rápido que los cementos de granos gruesos y como resultado se obtienen pastas con baja porosidad y alta resistencia a flexión y a compresión, cuando se comparan a igual relación agua - cemento. Sin embargo, si la comparación se realiza a igual fluidez, los cementos más finos tienen un mayor consumo de agua que los cementos más gruesos. En consecuencia, el tamaño óptimo de grano será el que

determine las mejores propiedades físicas y el menor consumo de agua.

3.4.2.2. Determinación del Tiempo de Fraguado NB063 (ASTM C191)

El tiempo de fraguado es el período de tiempo que transcurre desde que el cemento o el mortero se mezcla con agua hasta que se endurece y se vuelve sólido. Durante este tiempo, se producen una serie de reacciones químicas y físicas que permiten que estas mezclas se solidifiquen y adquieran resistencia. Es importante tener en cuenta este factor, ya que, si se espera demasiado tiempo después de la mezcla, el material puede comenzar a endurecerse antes de que se haya colocado adecuadamente. Por otro lado, si se trabaja demasiado pronto, puede no tener la resistencia necesaria para soportar cargas o tensiones.

Figura 3-17 Determinación del Tiempo de Fraguado inicial (min)



Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-32 Análisis de Varianza Tiempo de Fraguado inicial

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	549,0	183,00	6,84	0,006
Error	12	321,0	26,75		
Total	15	870,0			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

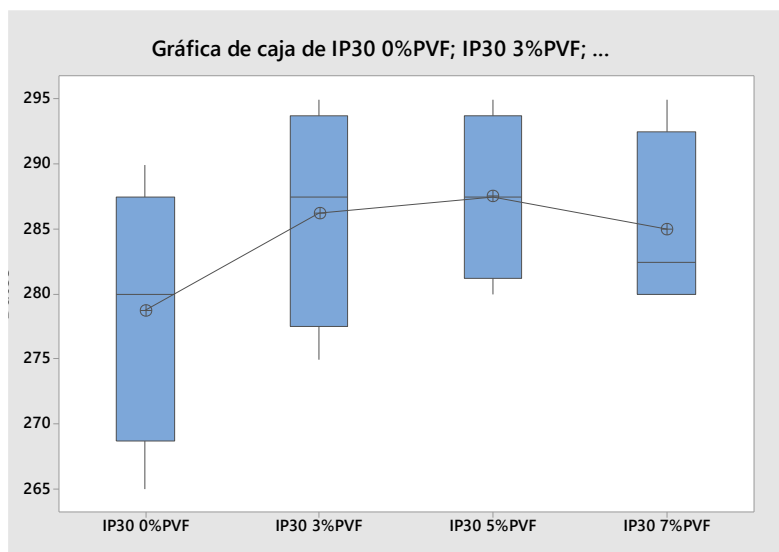
Tabla III-33 Estadísticos descriptivos (Fraguado inicial)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	153,25	1,65	3,30	10,92	2,16	150,00	153,00	157,00
IP30 3%PVF	4	157,75	1,80	3,59	12,92	2,28	153,00	158,50	161,00
IP30 5%PVF	4	164,75	3,42	6,85	46,92	4,16	155,00	167,00	170,00
IP30 7%PVF	4	168,25	3,01	6,02	36,25	3,58	160,00	169,50	174,00

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que el fraguado inicial debe ser mayor a 45 min se puede afirmar que en el método estudiado todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos.

Figura 3-18 Determinación del Tiempo de Fraguado final (min)



Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-34 Análisis de Varianza Tiempo de Fraguado final

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	181,3	60,42	0,89	0,473
Error	12	812,5	67,71		
Total	15	993,7			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-35 Estadísticos descriptivos (Fraguado final)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	278,75	5,15	10,31	106,25	3,70	265,00	280,00	290,00
IP30 3%PVF	4	286,25	4,27	8,54	72,92	2,98	275,00	287,50	295,00
IP30 5%PVF	4	287,50	3,23	6,45	41,67	2,25	280,00	287,50	295,00
IP30 7%PVF	4	285,00	3,54	7,07	50,00	2,48	280,00	282,50	295,00

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

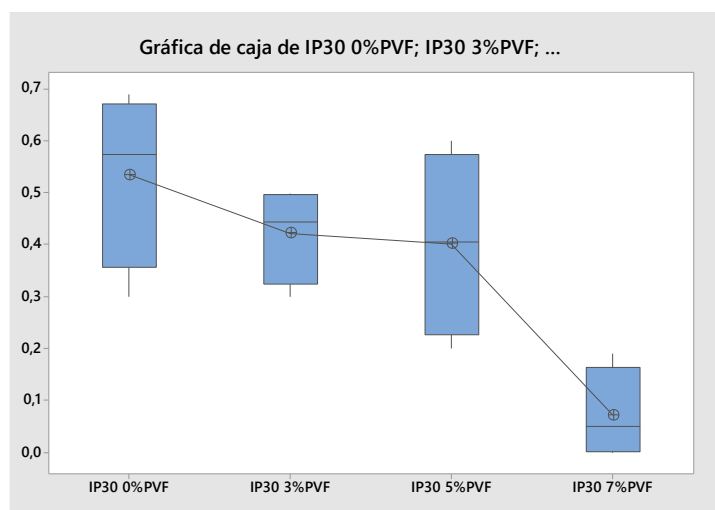
De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} > 0.05$ se acepta la hipótesis nula en el fraguado final, que indica que no hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación de la NB-011, que indica que el fraguado final debe ser menor a 420 min, se puede afirmar que todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento y no existen diferencias significativas en las medias de los grupos que incluyen al patrón (cemento IP-30) sin adición de polvo del filtro.

En la práctica, el concreto debe permanecer en estado plástico un tiempo suficiente como para que pueda ser transportado, colocado, compactado y terminado de manera conveniente. El fraguado implica una pérdida de plasticidad y de la facilidad de manipulación, por lo tanto, es necesario que el cemento no comience a fraguar hasta que se hayan completado todas las operaciones. Además de estas razones de índole práctica, limitar el tiempo de fraguado inicial, es otra manera de controlar las cantidades relativas de yeso y C_3A que se encuentran presentes en el clinker. El tiempo inicial de fraguado se encuentra limitado en la norma en 45 minutos, en tanto que el final es limitado a 420 minutos. Todos los cementos mezclas estudiados cumplen con este requisito (Tabla III-34).

3.4.2.3. Determinación de la Estabilidad del Volumen Le Chatelier NB643

La expansión de Le Chatelier es un ensayo que se realiza en el cemento para medir la variación de volumen que experimenta el cemento hidráulico después de haber sido sometido a un tratamiento térmico. Este ensayo se lleva a cabo utilizando un dispositivo llamado agujas de Le-chatelier, que consiste en un cilindro con agujas en los extremos que son medidos inicialmente con un vernier que da la lectura inicial. Las agujas se colocan en un baño de agua caliente durante un período de tiempo específico, después del cual se mide la variación de volumen del cemento hidráulico, cuyo resultado es la expansión de Le-Chatelier.

Un cemento puede tener variaciones de volumen debidas a la presencia excesiva de óxido de calcio (CaO) libre, óxido de magnesio (MgO) y sulfato de calcio ($CaSO_4$). Los resultados de la prueba de expansión de Le-Chatelier se ven afectados no solamente por los compuestos que causan expansión, sino también por el contenido de C_3A y por las adiciones que pueda tener incorporado el cemento.

Figura 3-19 Determinación estabilidad del volumen Le Chatelier NB643 (mm)

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-36 Análisis de Varianza Le Chatelier NB643

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0,4759	0,15864	8,14	0,003
Error	12	0,2339	0,01949		
Total	15	0,7098			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-37 Estadísticos descriptivos (Le Chatelier NB643)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	0,5350	0,0849	0,1698	0,0288	31,74	0,3000	0,5750	0,6900
IP30 3%PVF	4	0,4225	0,0466	0,0932	0,0087	22,07	0,3000	0,4450	0,5000
IP30 5%PVF	4	0,4025	0,0904	0,1808	0,0327	44,92	0,2000	0,4050	0,6000
IP30 7%PVF	4	0,0725	0,0440	0,0881	0,0078	121,49	0,0000	0,0500	0,1900

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que estabilidad del Volumen Le Chatelier debe ser menor a 8 mm se puede afirmar que en el método estudiado todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos. Sin embargo este comportamiento hasta el 7% de adición de polvo del filtro al cemento es claramente

positivo ya que indica una mejor estabilidad de volumen del cemento.

3.4.2.4. Método determinación de la resistencia la compresión a 3 días (NB 470)

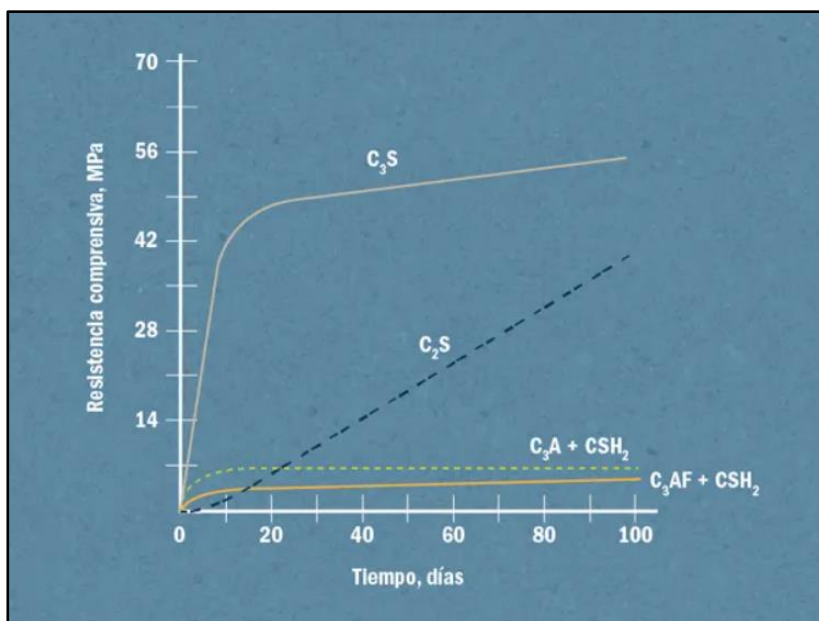
La resistencia a la compresión del cemento es una propiedad importante que se utiliza para determinar la calidad del cemento y su capacidad para soportar cargas. A mayor resistencia a la compresión, mayor es la capacidad del cemento para soportar cargas.

La resistencia a la compresión del cemento es una propiedad importante que debe tenerse en cuenta al diseñar estructuras de hormigón. Las estructuras de hormigón con una mayor resistencia a la compresión pueden soportar cargas más pesadas y son más resistentes a las grietas y el agrietamiento.

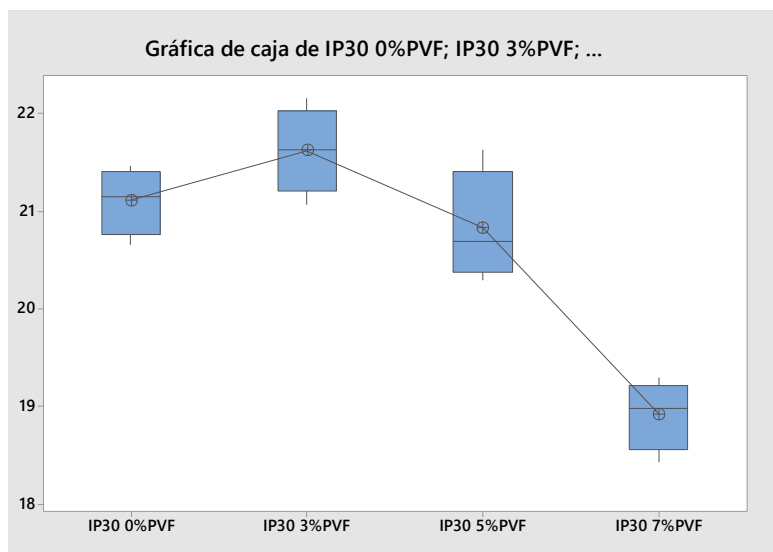
Para determinar la resistencia mecánica se realizaron morteros de cemento con reemplazo parcial por filler de acuerdo a NB-470 con relación agua - cemento determinada de acuerdo a norma NB-473.

El aporte en resistencias de las fases mineralógicas del clinker pueden observarse en la siguiente gráfica:

Figura 3-20 Desarrollo de las resistencias de las fases mineralógicas



Fuente: Taylor, H. F. W. (1997). FLSmidth Cement Chemistry. Thomas Telford Publishing

Figura 3-21 Resistencia la compresión a 3 días NB 470 (Mpa)

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-38 Análisis de Varianza resistencia la compresión a 3 días NB 470

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	16,687	5,5625	28,90	0,000
Error	12	2,310	0,1925		
Total	15	18,998			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-39 Estadísticos descriptivos (resistencia la compresión a 3 días NB 470)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	21,113	0,170	0,340	0,115	1,61	20,667	21,160	21,467
IP30 3%PVF	4	21,625	0,225	0,449	0,202	2,08	21,067	21,633	22,167
IP30 5%PVF	4	20,833	0,284	0,568	0,323	2,73	20,300	20,700	21,633
IP30 7%PVF	4	18,925	0,180	0,360	0,130	1,90	18,433	18,983	19,300

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que la resistencia del cemento IP-30 a la edad de 3 días debe ser mayor a 10 Mpa se puede afirmar que en el método estudiado todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos. Sin embargo, el comportamiento hasta el 3% de adición de polvo del filtro al cemento es

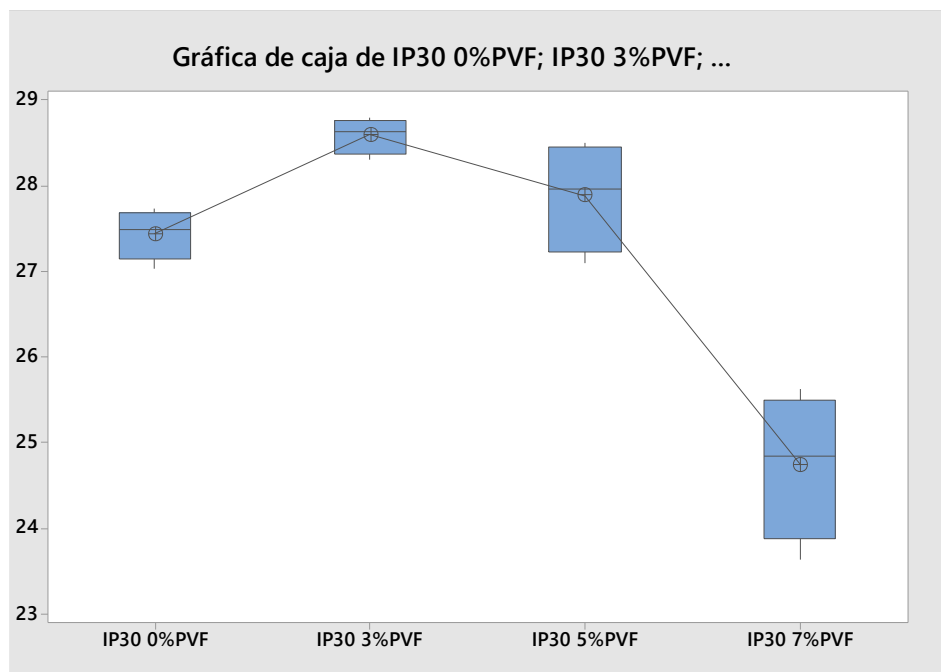
claramente positivo ya que indica un incremento en las resistencias iniciales del cemento (3 días).

Se debe considerar que a medida que aumenta el contenido de filler calcáreo en las muestras, la resistencia a compresión disminuye. Esto puede deberse a que el tamaño de los granos del clinker permanecen constante por tratarse de cemento mezcla, en consecuencia, la incorporación de polvo purgado del filtro, sin excluir el efecto físico de la misma, puede estar actuando principalmente como un diluyente.

En la bibliografía encontrada indica que para mejorar las resistencias para adiciones menores, el cemento con filler debe tener una finura mayor que el cemento sin adición, este aumento debe ser fundamentalmente de los granos del clinker y no a expensa de la caliza.

Método determinación de la resistencia la compresión a 7 días (NB 470)

Figura 3-22 Resistencia la compresión a 7 días NB 470 (Mpa)



Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-40 Análisis de Varianza resistencia la compresión a 7 días NB 470

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	33,984	11,3279	36,15	0,000
Error	12	3,761	0,3134		
Total	15	37,744			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab)

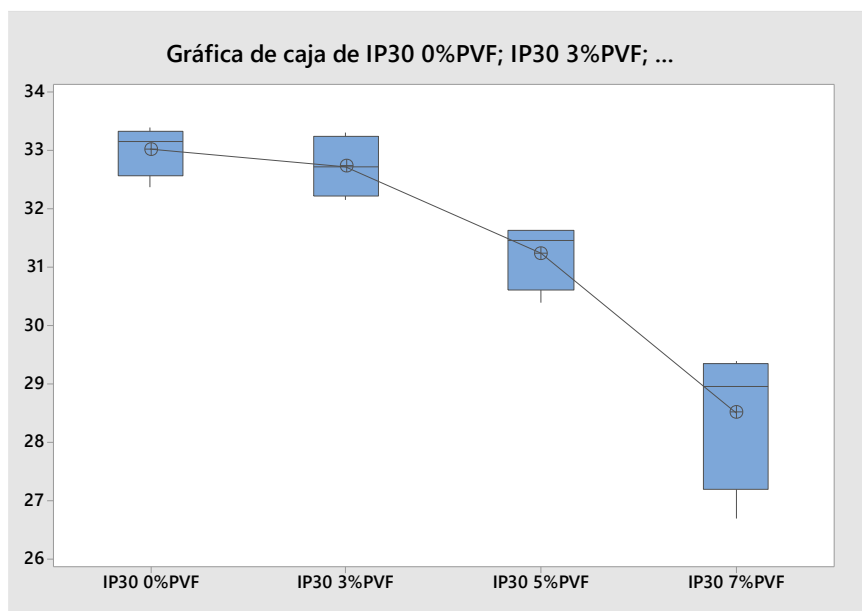
Tabla III-41 Estadísticos descriptivos (resistencia la compresión a 7 días NB 470)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	27,433	0,146	0,292	0,085	1,06	27,033	27,483	27,733
IP30 3%PVF	4	28,592	0,106	0,211	0,045	0,74	28,300	28,633	28,800
IP30 5%PVF	4	27,883	0,320	0,640	0,410	2,30	27,100	27,967	28,500
IP30 7%PVF	4	24,742	0,422	0,845	0,714	3,41	23,633	24,850	25,633

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab)

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que la resistencia del cemento IP-30 a la edad de 7 días debe ser mayor a 17 Mpa se puede afirmar que en el método estudiado todos los grupos cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos. Sin embargo, el comportamiento hasta el 3% de adición de polvo del filtro al cemento es claramente positivo ya que indica un incremento en las resistencias iniciales del cemento (3 días) y se observa que hasta el 5% de adición de polvo del filtro mantienen tendencias similares al cemento sin adición.

Método determinación de la resistencia la compresión a 28 días (NB 470)

Figura 3-23 Resistencia a la compresión a 28 días NB 470 (Mpa)

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-42 Análisis de Varianza resistencia la compresión a 28 días NB 470

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	51,224	17,0748	29,11	0,000
Error	12	7,038	0,5865		
Total	15	58,262			

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

Tabla III-43 Estadísticos descriptivos (resistencia la compresión a 28 días NB 470)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
IP30 0%PVF	4	33,028	0,223	0,447	0,200	1,35	32,380	33,167	33,400
IP30 3%PVF	4	32,734	0,266	0,532	0,283	1,63	32,157	32,733	33,313
IP30 5%PVF	4	31,244	0,292	0,583	0,340	1,87	30,400	31,472	31,633
IP30 7%PVF	4	28,510	0,617	1,234	1,523	4,33	26,707	28,967	29,400

Fuente: Elaboración Propia (software validado minitab), 2023

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determina que $P\text{-value} < 0.05$ se acepta la hipótesis alterna, que indica que hay diferencias significativas en las medias de los grupos estudiados y al evaluarlo respecto a la especificación del RM MDPyEP N°261.2018, que indica que la resistencia del cemento IP-30 a la edad de 28 días debe ser mayor a 30 Mpa se puede afirmar que en el método estudiado los grupos con 3%, 5% de adición de PVF cumplen la especificación de las normas vigentes del cemento, pese a que existen diferencias significativas en las medias de los grupos. Pero los resultados de la adición del 7% no cumplen la especificación de la normativa vigente.

El comportamiento hasta el 3% de adición de polvo del filtro al cemento IP-30 de acuerdo a las comparaciones en parejas utilizando el método de Tukey y una confianza de 95% (Ver ANEXO 14 ANALISIS ESTADISTICO DE RESULTADOS SOFTWARE MINITAB) no presenta diferencias significativas con el cemento IP-30 sin adición lo cual cemento es claramente positivo y se observa que hasta el 5% de adición de polvo del filtro pese a que presenta disminución a edades finales los resultados están por encima de los 30 MPa exigidos por la NB-011.

3.5. CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO IP-30 CON ADICIÓN DE PVF

Como se planteó con anterioridad, el objetivo de esta tesis es realizar el estudio para utilizar el polvo residual recuperado de los filtros del proceso de producción de Clinker, como adición en el cemento IP-30 en la fábrica “El Puente”, por lo que es necesario contribuir a la comprensión y el análisis de los efectos físico y químico que produce el polvo del filtro (micro filler) sobre las propiedades del cemento IP-30 El Puente. Con este fin, a continuación, se exponen y analizan los resultados obtenidos en la parte experimental sobre las pastas con cemento mezcla.

3.5.1. Consumo de agua del cemento con PVF

El contenido de agua que se necesita para producir una pasta de consistencia normal, se expresa como porcentaje en peso de cemento seco, y el valor normal varía entre 27.8% (cemento estándar IP-30) y 27.2 % (cemento IP-30 con 7% de adición de PVF).

Cuando se reemplaza cemento IP-30 por PVF, el consumo de agua de la pasta depende fundamentalmente de la finura y de la composición mineralógica del cemento IP-30 y del PVF. Una parte de la demanda de agua del cemento mezcla está determinada por el clinker. El agua químicamente combinada en los productos de hidratación durante el período inicial y el período durmiente, y el agua necesaria para lubricar estos hidratos y sus partículas. El resto de la demanda de agua queda determinada por el PVF. Si bien la bibliografía indica que el C_3A se combina con el $CaCO_3$ del material calcáreo, debido a que el contenido de C_3A del cemento es moderado (6.84 %) gran parte del filler permanecerá sin reaccionar principalmente durante las primeras horas. Por lo tanto, este tipo de adición podría considerarse como “no activa” desde el punto de vista del consumo de agua. La demanda de agua de éste sólo se remitirá a la necesaria para lubricar sus granos y será función de su finura.

Los resultados obtenidos en el consumo de agua para producir una pasta de consistencia normal, corroboran lo expuesto. Las muestras con adición de 3% PVF tuvieron igual demanda de agua que el cemento IP-30 estándar (27.8%) y la demanda de agua para consistencia normal fue disminuyendo levemente a medida que se adiciono mayores porcentajes de PVF lo que fue acompañado por un incremento en la finura Blaine del cemento mezcla que va desde 4700 cm^2/g para el cemento sin adición hasta 5100 cm^2/g para el cemento con adición del 7% de PVF.

La finura Blaine de un material sólo puede considerarse como un valor relativo, pues pueden existir infinitas distribuciones granulométricas con igual finura Blaine.

La bibliografía indica que el tamaño de partícula que produce un pequeño cambio en el consumo de agua es del orden de $25.70 \mu\text{m}$, pues para tamaños comprendidos entre 25.70 y $23.20 \mu\text{m}$, el requerimiento de agua se incrementa levemente.

El requerimiento de agua del cemento mezcla parece estar más influenciado por el tamaño de las partículas que por la menor o mayor amplitud de la curva de distribución de las mismas.

3.5.2. Tiempo de fraguado del cemento IP-30 con PVF

Tomando en cuenta que el polvo del filtro básicamente es microfiller calizo, para comprender las reacciones es importante estudiar las reacciones del filler en el cemento portland.

La influencia de incorporación del Filler sobre el tiempo de fraguado, como reemplazo de yeso ó de cemento, ha sido estudiada por varios autores. Debido a la gran cantidad de variables que se involucran en este proceso (contenido de C_3A ; contenido y calidad del yeso y de la caliza), estas investigaciones no han podido encontrar una relación entre el tiempo de fraguado y el efecto de la adición. Los resultados muestran que la adición de hasta 20 % de caliza no modifica substancialmente el tiempo de fraguado.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, el fraguado inicial de las muestras con adición de PVF varía levemente respecto al cemento patrón sin adición, presentando un incremento máximo de 20 minutos con adiciones de hasta el 7% de PVF. En el caso del fraguado final se produce prácticamente al mismo tiempo o un tiempo muy levemente mayor (5 minutos) al que registra el cemento IP-30 sin adición. Por lo comentado y en concordancia con la bibliografía, tampoco se ha podido determinar una correlación exacta entre este parámetro y la influencia del porcentaje de reemplazo de cemento por PVF (microfiller).

Endurecimiento del cemento adicionado

Las propiedades de la pasta de cemento en estado endurecido, están estrechamente ligadas a la formación de productos de hidratación. La velocidad y el grado de hidratación y los distintos tipos de hidratos formados son los que determinarán las características resistentes, la porosidad y consecuentemente las propiedades durables de un cemento.

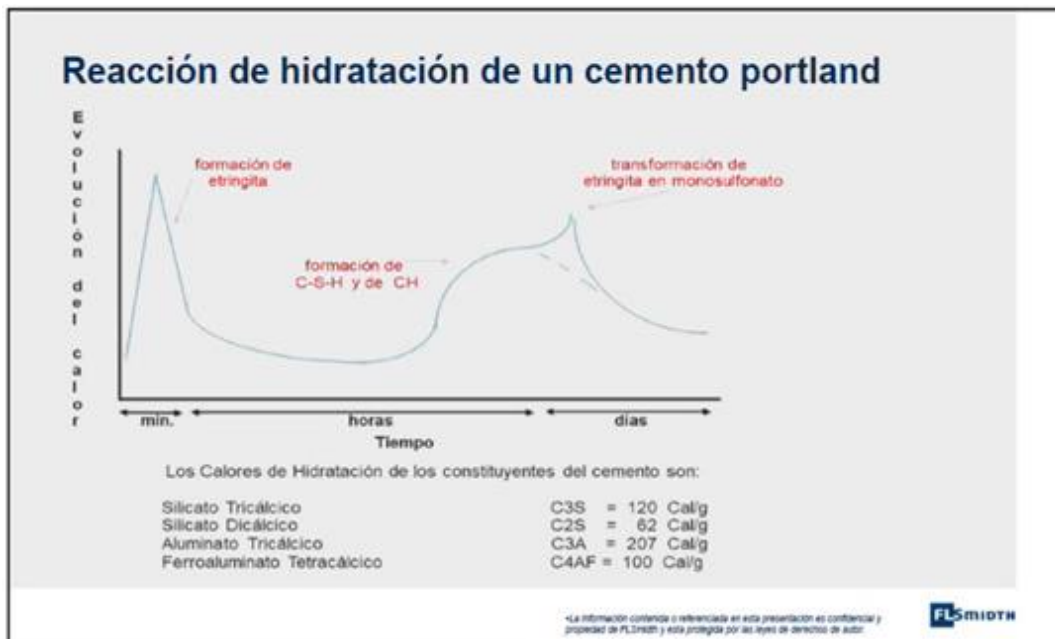
En la hidratación del cemento existen procesos de diversa naturaleza, los cuales son:

- Reacciones de hidratación e hidrólisis
- Procesos de disolución y cristalización
- Procesos de ligazón debido a fuerzas de adherencia entre partículas.

Las reacciones de hidratación que provocan el endurecimiento de la pasta se pueden

observar en la siguiente gráfica:

Figura 3-24 Reacciones de hidratación del cemento



Fuente: Taylor, H. F. W. (1997). *FLSmidth Cement Chemistry*. Thomas Telford Publishing

Las reacciones de hidratación inician con una fuerte reacción exotérmica provocada por el C₃A que tiene la mayor solubilidad, donde se da lugar a la formación de etringita, posteriormente se forma la torbemorita (CHS) y portlandita (CH), luego se presenta un pico máximo que corresponde a la formación de AFm (forma baja de sulfoaluminato) y AFt (forma alta de sulfoaluminato de calcio hidratado) y por último la hidratación de la fase férrica dada por el C₄AF. Tomar en cuenta que las fases el mayor calor de hidratación la desprende el C₃A, seguido por el C₃S que es la fase mineralógica más importante debido a que aporta las resistencias del cemento hasta los 28 días, a continuación el C₄AF que principalmente da la tonalidad al cemento y por último el C₂S que presenta el más bajo calor de hidratación y aporta en las resistencias finales. Todas estas reacciones intervienen en los fraguados del cemento y el posterior endurecimiento hasta la adquisición de resistencias finales.

Tabla III-44 Reacciones de hidratación del cemento

Denominación	Formula química	Expresión abreviada	Productos que forma al hidratarse	Propiedades que aporta
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	Tobermorita Portlandita	Resistencia a edades iniciales
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	Tobermorita Portlandita	Resistencia a largo plazo
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Ettringita	Reacciona con el regulador de fraguado
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF		Da color al cemento

Fuente: Prof. Agustín Rodríguez. Publicación. Introducción al estudio de cementos. Granada 2015

3.5.3. Efecto químico del CaCO_3 del PVF

Las reacciones químicas que se producen durante la hidratación del C_3A en presencia de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ fueron ampliamente estudiadas por la bibliografía existente, en un comienzo se produce la cristalización de la ettringita y más tarde su conversión a monosulfoaluminato de calcio, dependiendo de la cantidad de C_3A y de iones SO_4^{2-} en la pasta. La incorporación del microfiller al cemento modifica estas reacciones, pues durante la reacción del C_3A , el ión SO_4^{2-} puede ser intercambiado por el CO_3^{2-} dando lugar a nuevos productos de hidratación.

La cristalización de los hidratos alrededor de los granos de C_3A , depende del tipo y cantidad de material que componen la pasta y de la solubilidad de los productos formados. Como consecuencia de estos factores, los hidratos que se originen en una pasta pueden ser diferentes. La bibliografía muestra que las reacciones del microfiller con el cemento dan cuenta que en el inicio de la hidratación y como resultado de la reacción del C_3A , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y CaCO_3 , se produce ettringita y monocarboaluminato de calcio. Con el avance de la hidratación la ettringita se transforma a monosulfoaluminato por la deficiencia de yeso. Posteriormente parece existir una retransformación de este compuesto a ettringita. Este comportamiento puede justificarse a partir de las solubilidades de los componentes. Pues, el CaCO_3 remanente puede disolverse y reaccionar con parte del monosulfoaluminato de calcio para formar más carboaluminato de calcio, debido a que este compuesto es más estable por ser menos soluble que el monosulfoaluminato de calcio. Los iones sulfatos liberados en esta reacción se combinan con el resto del monosulfoaluminato para formar nuevamente ettringita. Por último y a pesar de la formación de monocarboaluminato de calcio, una buena parte del CaCO_3 aportado por el

microfiller calcáreo permanece sin reaccionar hasta los 90 días de hidratación.

El grado de conversión de ettringita a monosulfoaluminato depende fundamentalmente de la existencia de C3A o de aluminatos hidratados. Consecuentemente la deficiencia de iones SO_2 - en el cemento puede producir la falta de estabilidad de la ettringita en el tiempo y ocasionar su transformación a monosulfoaluminato, a pesar de ser este compuesto más insoluble que el monosulfoaluminato de calcio.

3.5.4. Efecto físico del PVF (microfiller)

El efecto filler del polvo del filtro es preponderante en las primeras edades de la hidratación, la reacción puzolánica que se manifiesta diferida en el tiempo y el efecto de dilución del cemento IP-30 presente durante toda la de hidratación del cemento.

El efecto negativo de dilución del cemento sobre las propiedades mecánicas de la pasta tiende a ser compensado en principio por el efecto filler y posteriormente por el efecto puzolánico de la Toba. El grado de compensación depende fundamentalmente de la reactividad, la cantidad y la finura de la adición.

El efecto filler, causa una aceleración de la hidratación del cemento portland y generalmente se asume que es debido al “empaquetamiento” y la mayor dispersión del mismo dentro de la pasta. Además, también actúan como núcleos de cristalización alrededor de los cuales se deposita el hidróxido de calcio. Sin embargo estas reacciones compiten con el efecto puzolánico de la toba al conjugarse con la portlandita, por lo que un buen porcentaje de micro filler queda sin reaccionar, limitando a ciertos porcentajes el efecto filler del PVF.

Los factores que más influyen al grado de hidratación son: por una parte, el efecto negativo de la dilución que tiene el filler sobre el cemento, provocando una menor cantidad de clinker para hidratar y por otra parte, el beneficio otorgado por el efecto acelerador del filler del PVF y el efecto puzolánico otorgado por la toba en la hidratación del cemento.

En función de los resultados obtenidos se puede concluir que con el incremento de hasta 3 % de microfiller en la pasta, aumenta el efecto de aceleración de la hidratación del cemento IP-30, que se muestra en el incremento de las resistencias a edades iniciales.

La relación agua cemento efectiva de los resultados experimentales de la adición del PVF al cemento IP-30, indican un incremento de agua a medida que se va incrementando la adición del PVF, teniendo valores de relación a/c para el cemento IP-30 sin adición de 51.4 y para el

cemento IP-30 con 7% de adición de 52.4%.

El desarrollo de resistencias del cemento con adición de PVF muestra un importante aumento del grado de hidratación cuando se incorpora el microfiller a edades iniciales y que este efecto disminuye a la edad de 28 días. Es importante resaltar el incremento de resistencias a edades iniciales debido a que las pastas con PVF poseen una menor cantidad de clinker portland para hidratar.

3.5.5. Resistencias a la compresión de los cementos con adición de PVF

Para analizar los efectos del PVF en el cemento es importante repasar el aporte en el comportamiento de las resistencias de los componentes del cemento, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III-45 Aporte de los componentes del cemento en el endurecimiento

	Resist. inicial	Resist. final	Fraguado (tiempos)	Demanda de agua	Estabilidad volumen
C ₃ S	↗	↗	-	-	-
C ₂ S	↘	↗	-	-	-
C ₃ A	↗	↘	↘	↗	-
C ₄ AF	↘	↗	-	↘	-
Cal libre	-	-	↘	-	↘
Periclasa	-	-	-	-	↘
Sulfatos alcalinos	↗	↘	↗	↗	-
↗ aumento ↘ reducción - sin efecto					

Fuente: Prof. Agustín Rodríguez. Publicación. *Introducción al estudio de cementos*. Granada 2015

Influencia del contenido del PVF en el cemento IP-30: En el ANEXO 14 análisis estadístico de resultados software minitab se muestra la resistencia a compresión en función de la edad 3 días, 7 días y 28 días, con las tres superficies específicas del filler incorporado.

Los resultados experimentales indican que a la edad de tres días, la resistencia de las muestras con 3% de PVF se encuentra comprendida entre el 99 y 105 % del patrón IP-30 sin adición, con 5% de PVF se encuentra comprendida entre el 96 y 102 % del patrón IP-30 sin adición, con 7% de PVF se encuentra comprendida entre el 87 y 91.2 % del patrón IP-30 sin adición.

Los resultados experimentales indican que a la edad de siete días, la resistencia de las muestras con 3% de PVF se encuentra comprendida entre el 99 y 100.5 % del patrón IP-30 sin adición,

con 5% de PVF se encuentra comprendida entre el 92 y 95 % del patrón IP-30 sin adición, con 7% de PVF se encuentra comprendida entre el 81 y 89 % del patrón IP-30 sin adición.

Los resultados experimentales indican que a la edad de veintiocho días, la resistencia de las muestras con 3% de PVF se encuentra comprendida entre el 97 y 100.5 % del patrón IP-30 sin adición, con 5% de PVF se encuentra comprendida entre el 92 y 95 % del patrón IP-30 sin adición, con 7% de PVF se encuentra comprendida entre el 80 y 89 % del patrón IP-30 sin adición.

En función de los resultados obtenidos se puede considerar que: la influencia del aumento en el contenido de PVF al cemento IP-30 tiene un efecto acelerador del filler menor a medida que se va incrementando el porcentaje del PVF, el aumento de la relación agua - cemento efectiva y el efecto de dilución, y este último afecta los volúmenes de productos de hidratación, que solo son compensados por el efecto puzolánico de la toba.

Influencia de la finura filler: A medida que se incrementó el porcentaje de adición de PVF al cemento hubo incremento considerable de la finura de las mezclas.

El aumento en el grado de hidratación no se traduce en un aumento proporcional de la resistencia, pues en la mayoría de los casos el volumen de productos de hidratación de las muestras con PVF resulta menor que el de las muestras de control.

El efecto microfiller del PVF y el efecto puzolánico de la toba, compensan al efecto de dilución y al aumento de la porosidad capilar debido al incremento de la relación agua - cemento efectiva de las muestras con PVF, lo que puede observarse claramente en las muestras con hasta el 3% de PVF adicionado al cemento IP-30.

Resistencia a compresión a las edades de 3, 7 y 28 días. muestran que las pastas con PVF presentan una ganancia de resistencia hasta los 3 días de hidratación. A partir de esta edad la resistencia relativa de estas disminuye y hacia los 28 días se encuentra comprendida entre el 80 y el 105 % de las pastas de control.

En las dosificaciones de hasta el 5% de adición de PVF se registra un importante incremento de la resistencia hasta la edad de 3 días, y a partir de esta edad la velocidad de ganancia de resistencia disminuye. Este comportamiento demuestra que, a pesar de la mayor cantidad de agua que tienen las muestras de control en todas las edades y el aumento del grado de hidratación del cemento de las muestras con PVF, posteriormente este actúa como un diluyente del cemento IP-30.

En la mayoría de los casos, la resistencia a compresión de las pastas con adición de polvo del filtro al cemento IP-30 aumentan entre los 0 y 3 días debido a que el efecto acelerador del filler es mayor que el efecto de dilución por el reemplazo parcial del cemento IP-30 con polvo del filtro que es básicamente microfiller calizo. A los 28 días, este parámetro es afectado en forma considerable por el incremento del porcentaje de la adición; pero debe considerarse que los incrementos de resistencias más importantes lo registran las muestras con 3 % PVF.

3.5.6. Estabilidad de volumen del cemento con adición de PVF

Las pastas del cemento con adición del polvo del filtro presentan mejor estabilidad de volumen respecto al cemento IP-30 sin adición. Estos volúmenes se verificaron mediante el ensayo de expansión de Le-Chatelier donde se realizó la comparación de la variación de volumen alcanzado en las pastas con y sin PVF e igual consistencia normal, sometidas a las mismas condiciones durante un periodo determinado de tiempo. Los resultados indican que para las adiciones de las pastas con adición de PVF, la expansión es menor que en las pastas sin adición.

Esto se debe a que factores importantes gobiernan este comportamiento del cemento IP-30 con adición de PVF son: el efecto de dilución y el efecto microfiller. El primer efecto se pone de manifiesto en una menor cantidad de clinker para hidratar, en tanto que el segundo efecto produce un aumento del grado de hidratación de las pastas con microfiller.

La adición de PVF al cemento IP-30 permite un menor calor de hidratación a comparación a un cemento sin adición, volviéndose ideal para obras que requieran moderado calor de hidratación, evitando fisuras de origen térmico con el tiempo.

Los Cementos IP-30 con adición de PVF presentan una mayor finura que el cemento sin adición. Se espera que esta característica favorezca la retención de agua en la mezcla debido a una menor velocidad de exudación y como resultado se tienda a mejorar la resistencia superficial del concreto.

3.5.7. Porcentaje de cloruros en el PVF

Las elevadas concentraciones de cloruros pueden tener efectos negativos en el hormigón. Los cloruros pueden causar corrosión en las armaduras de acero, lo que puede reducir la resistencia estructural del hormigón. Además, las altas concentraciones de cloruros pueden provocar la formación de compuestos poco solubles en agua, lo que reduce su concentración efectiva en el medio.

Por lo tanto, la norma europea UNE-EN 197-1 establece que el contenido máximo de cloruros en el cemento Portland ordinario no debe superar el 0,10% en masa.

Los porcentajes de cloruros en clinker, yeso, toba y PVF, son proporcionados por el área de la unidad de soporte de procesos de la planta de cemento El Puente.

Al conocer que hasta el 5% de adición del PVF al cemento no afecta las especificaciones de la normativa boliviana del cemento, se decide ejecutar un balance de contenido de cloruros en el cemento IP-30 adicionado:

Tabla III-46 Balance de contenido de cloruros en el cemento IP-30 adicionado

Prod. IP-30 CPW:		45	t/h			
Dosif.	%	t/h	%Cl	t Cl	%Cl(pond)	EN 197-1
Ck	69,6%	31,32	0,005%	0,002		
Yeso	6,1%	2,763	0,00%	0,000		
Toba	19,3%	8,667	0,001%	0,000		
PVF	5,0%	2,25	0,80%	0,018		
	100%	45		0,02	0,04%	< = 0.10%

Fuente: Elaboración propia, 2023

Contenido máximo de cloruros en polvo purgado del filtro = 0.8 %

La cantidad máxima de cloruros en la dosificación del polvo del filtro al cemento IP-30 va rondar el 0.04%, cumpliendo la especificación de la norma UNE-EN 197-1($\leq 0,10\%$), no habiendo riesgo de corrosión en las armaduras del hormigón al utilizar el cemento IP-30 adicionado con PVF.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE COSTOS

4.1. IDENTIFICACIÓN DE COSTOS

El proceso de clinkerización genera en el interior del horno, un polvo alcalino que se arrastra a través de las columnas de precalentado de crudos, luego de lo cual es filtrado, separado y desechado, con el consiguiente costo no recuperado que afecta la productividad del proceso.

Se ha establecido que este polvo puede ser reincorporado al producto final, luego de la etapa de molienda de cemento, en proporciones controladas (3%, 5%), sin afectar la calidad del producto final.

Para eliminar este derroche y aprovechar este conocimiento, se decide analizar la factibilidad de poner en funcionamiento un sistema de acopio, transporte y alimentación dosificada de este material, a la cola de molienda de cemento.

4.1.1. Situación actual del polvo purgado del filtro

Actualmente cada que se requiere, el polvo separado es acumulado en un ambiente contiguo a la base de la columna de precalentamiento y luego es desechado en los dos depósitos de polvo de purga con el que se cuenta en planta.

La línea de alimentación de clinker al molino de línea, está situada a una distancia y elevación que pueden ser alcanzados mediante un sistema de elevación y transporte que puede ser de elementos mecánicos o de arrastre neumático de polvo.

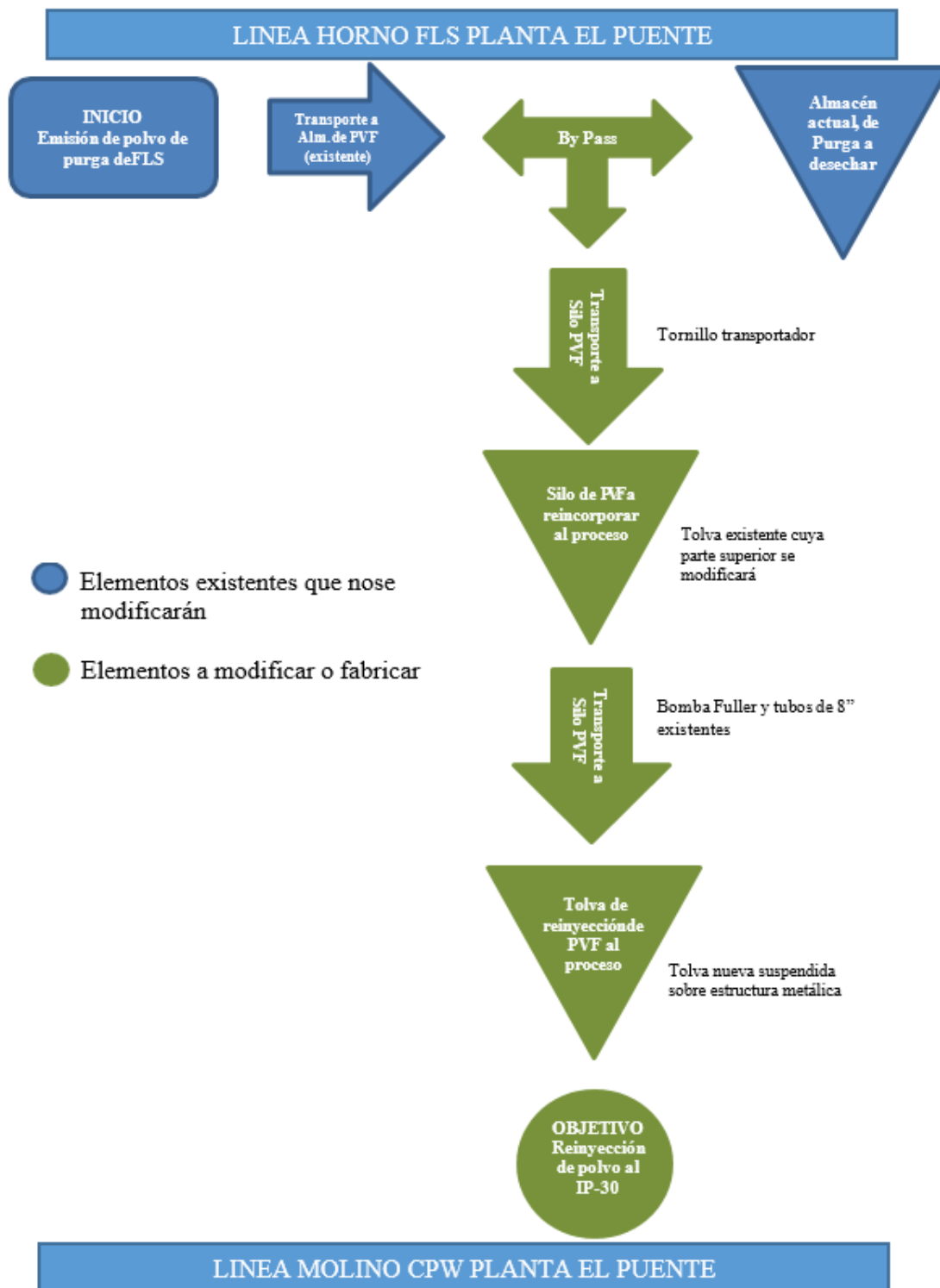
Existe en un tramo intermedio, un elemento en forma de pequeño reservorio, con presión nivelada al ambiente, que permite su apertura e incorporación de un caudal del polvo llevado hasta ese punto por uno de los sistemas típicos de transporte de polvo.

4.1.2. Sistema planteado para la adición del PVF a cemento

Para hacer posible la adición de polvo del filtro purgado a la línea de cemento, se va requerir un sistema de transporte (tornillos, transportadores neumáticos) y silos pequeños, además aprovechar elementos existentes que pueden ser modificados para servir al proyecto.

El sistema planteado para la adición de polvo del filtro FLS a la línea del cemento CPW es la siguiente:

Figura 4-1 Sistema planteado para la adición del PVF a cemento



Fuente: Elaboración propia, 2023

4.1.2.1. Estimación del costo del sistema para la adición del PVF al cemento IP-30

En base a experiencias de instalaciones mecánicas similares en el grupo SOBOCE S.A. se elaborado el presupuesto estimado para la adición de PVF al cemento:

Tabla IV-1 Presupuesto para la adición PVF al cemento

NOMBRE PROYECTO		ADICIÓN DEL POLVO PURGADO DEL FILTRO AL CEMENTO IP-30	
RESPONSABLE	JESUS GARNICA QUICANIA	PRESUPUESTO TOTAL	479000
NECESIDADES IDENT.	COTIZACIONES		USD
ACTIVIDAD 1	INGENIERIA A DETALLE		40200
	Op. Interna	Designación de un supervisor interno	200
	Op. Externa		0
	Op. Costos	Gastos, transporte y almuerzos especialista	5000
	Op. Servicio	Estudio de ingeniería, topografía, Ing. Civil, Planos de ingeniería	35000
ACTIVIDAD 2	ESTRUCTURA CIVIL		41000
	Op. Interna	Designación de un supervisor interno	6000
	Op. Externa		0
	Op. Costos		0
	Op. Servicio	Servicio de construcción de obra civil, replanteo para obra civil	35000
ACTIVIDAD 3	FABRICACIÓN Y MONTAJE MECANICO DE SISTEMA DE TRANSPORTE Y TOLVAS		261600
	Op. Interna	Designación de un supervisor interno	6000
	Op. Externa	Compra de materiales, planchas, electrodo, Disco de corte	85000
	Op. Costos	Gastos, transporte y almuerzos especialista supervisión	600
	Op. Servicio	Solicitud Fabricación y montaje mecanico	170000
ACTIVIDAD 4	COMPRA Y MONTAJE DE PESOMETRO Y BYPAS		70200
	Op. Interna	Designación de un supervisor interno	200
	Op. Externa	Compra de pesometro, by pass, valvulas	70000
	Op. Costos		0
	Op. Servicio	Instalacion	0
ACTIVIDAD 5	INSTALACIÓN ELECTRICA INSTRUMENTAL		70000
	Op. Interna	Designación de un supervisor interno, capacitación operación	0
	Op. Externa	Compra de general instrumentación eléctrica, cableado y centrales	40000
	Op. Costos	Gastos, transporte y almuerzos especialista supervisión	5000
	Op. Servicio	Servicio de instalacion electrica electronica	25000
ACTIVIDAD 5	COMISIONAMIENTO		37000

Fuente: Elaboración propia, 2023

Se estima que el costo del sistema para la adición del polvo del filtro al cemento tendrá un costo aproximado de 479000 dólares

4.2. BENEFICIO FINANCIERO

Tabla IV-2 Dosificación media del cemento IP-30

PRODUCCIÓN AÑO		% Adición
CEMENTO IP-30 (t)	214605,9	
Clinker (t)	157224,2	73,3%
Yeso (t)	13876,4	6,5%
Toba (t)	43505,4	20,3%
		100,0%

Fuente: Elaboración propia, 2023

CUANTIFICACIÓN DEL BENEFICIO DEL FLUJO FINANCIERO 3% PVF

Tabla IV-3 Dosificación media del cemento IP-30 con 3% PVF

PRODUCCIÓN AÑO		% Adición
CEMENTO IP-30 (t)	214605,9	
Clinker (t)	152584,8	71,1%
Yeso (t)	13520,2	6,3%
Toba (t)	42277,4	19,7%
DOSIFICACIÓN PVF (t)	6438,2	3,0%

Fuente: Elaboración propia, 2023

Tabla IV-4 Cuantificación del beneficio del flujo financiero 3% PVF

Concepto	Unidad	Cantidad
Producción de clinker FLS	t/día	500
Porcentaje de dosificación PVF a IP-30	%	3
Total PVF purgado recuperado	t/h	0,735
Total diario recuperado	t/día	17,64
Total mensual recuperado	t/mes	529,2
En bolsas de 50 kg	Unid/mes	10584
Valor comercial de mercado	Bs/Unid	45
Total monto recuperado en mercado (estimado)	Bs/mes	476280
Total recuperado anual (estimado)	t	6350,4
Valor estimado de recuperación en precio de mercado	Bs/año	5715360
	USD/año	821172

Fuente: Elaboración propia, 2023

En base a la producción y ventas anuales se estima que el beneficio la adición del 3% del polvo purgado del filtro al cemento tendrá un beneficio aproximado de 821172 USD al año.

CUANTIFICACIÓN DEL BENEFICIO DEL FLUJO FINANCIERO 5% PVF

Tabla IV-5 Dosificación media del cemento IP-30 con 5% PVF

PRODUCCIÓN AÑO		% Adición
CEMENTO IP-30 (t)	214605,9	
Clinker (t)	149365,7	69,6%
Yeso (t)	13176,8	6,1%
Toba (t)	41333,1	19,3%
DOSIFICACIÓN PVF (t)	10730,3	5,0%

Fuente: Elaboración propia, 2023

Tabla IV-6 Cuantificación del beneficio del flujo financiero 5% PVF

Concepto	Unidad	Cantidad
Producción de clinker FLS	t/día	500
Porcentaje de dosificación PVF a IP-30	%	5
Total PVF purgado recuperado	t/h	1,225
Total diario recuperado	t/día	29,4
Total mensual recuperado	t/mes	882
En bolsas de 50 kg	Unid/mes	17640
Valor comercial de mercado	Bs/Unid	45
Total monto recuperado en mercado (estimado)	Bs/mes	793800
Total recuperado anual (estimado)	t	10584
Valor estimado de recuperación en precio de mercado	Bs/año	9525600
	USD/año	1368621

Fuente: Elaboración propia, 2023

En base a la producción y ventas anuales se estima que el beneficio la adición del 5% del polvo purgado del filtro al cemento tendrá un beneficio aproximado de 1368621 USD al año.

Costos de depreciación

El costo de depreciación de un activo es la amortización de su costo a lo largo de su vida útil. Para calcular la depreciación, se pueden utilizar diferentes métodos, como el método de línea recta, el método de saldo decreciente o el método de unidades de producción:

$$\text{Depreciación anual} = (\text{Costo inicial del activo} - \text{Valor residual}) / \text{Vida útil del activo}$$

En este caso, el costo del sistema para la adición del polvo purgado del filtro al cemento IP-30 es de \$479,000 USD. La vida útil del sistema depende de los equipos utilizados para el transporte. Por ejemplo, la vida útil media de un aerodeslizador es de 15 años, la vida útil de un

tornillo es de 25 años de una banda de transporte, la vida útil es de 40 años.

En base a sistemas similares instalados en SOBOCE S.A. se le asigna vida útil de 30 años al sistema de transporte total para la adición del polvo del filtro al cemento IP-30.

Se debe tomar en cuenta que el valor residual para los equipos de transporte industriales en la manufactura del cemento en Bolivia es aproximadamente 15% del valor inicial.

El costo de depreciación anual del aerodeslizador es de:

$$\$479000 - 71850 \$ / 30 \text{ años} = 13571,6 \text{ USD/año}$$

Beneficios anuales

Los beneficios anuales de la adición del polvo purgado del filtro al cemento IP-30 dependen del porcentaje de polvo que se agregue al cemento. Si se agrega el 3% del polvo, los beneficios anuales son de 82.1172 USD. Si se agrega el 5% del polvo, los beneficios anuales son de \$1.368.621 USD.

Costos típicos de operación

Costos de energía

- Los costos de energía son el costo más importante de operación de un sistema de transporte de materiales. Estos costos se calculan multiplicando el consumo de energía por el costo de la energía.

Costos de mantenimiento

- Los costos de mantenimiento son el segundo costo más importante de operación de un sistema de transporte de materiales. Estos costos se calculan sumando el costo de las piezas y mano de obra necesarias para mantener el sistema en funcionamiento.

En base a los factores mencionados anteriormente y tomando en cuenta áreas de operación de similares características en SOBOCE S.A., los costos típicos de operación del sistema de transporte que se pretende instalar para la adición de polvo del filtro al cemento IP-30 se puede estimar de la siguiente manera:

Aerodeslizador: \$10,000 - \$20,000 USD/año

Tornillo: \$5,000 - \$10,000 USD/año

Bomba fuller y tubería: \$2,000 - \$5,000 USD/año

Tomando en cuenta que el costo total del sistema (Operación, energía, mantenimiento) es 30000 USD al año, recalculamos el VAN para el 3% y 5% de adición:

Utilizar datos actualizados para calcular el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto. Dado que

se estima que el costo total del sistema es de \$479,000 USD y los beneficios anuales son de \$821,172 USD para el 3% y \$1,368,621 USD para el 5%, podemos calcular el VAN para ambos casos.

4.3. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO

Costo del Sistema para la adición del polvo purgado del filtro al cemento IP-30:

- Costo Estimado: \$479,000 USD

Beneficios Anuales:

a. Adición del 3% del Polvo al Cemento:

- Beneficio Estimado: \$821.172 USD al año

b. Adición del 5% del Polvo al Cemento:

- Beneficio Estimado: \$1.368.621 USD al año

Análisis de Costo-Beneficio para el primer año

Valor Actual Neto (VAN):

$$\text{VAN} = \text{Beneficios Netos} - \text{Costos Iniciales} - \text{Costos de operación y Mtto}$$

$$\text{Para el 3\%: VAN} = \$821.172 - \$479.000 - \$30.000 = \$312.172 \text{ USD}$$

$$\text{Para el 5\%: VAN} = \$1.368.621 - \$479.000 - \$30.000 = \$859.621 \text{ USD}$$

Estos valores sugieren que, en ambos casos, los beneficios netos del primer año superan los costos iniciales, indicando la viabilidad financiera del proyecto.

Rentabilidad

La rentabilidad de la inversión es mayor cuanto mayor sea el porcentaje de polvo que se agregue al cemento. Además, la rentabilidad es mayor cuanto menor sea el costo de depreciación del sistema.

$$\text{Rentabilidad} = \frac{\text{Ganancia} \times 100\%}{\text{Inversión}}$$

La rentabilidad del primer año con los distintos porcentajes de adición respecto a la inversión, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Rentabilidad 3\% PVF} = (312.172 \text{ USD} / 479.000 \text{ USD}) \times 100 = 65 \%$$

$$\text{Rentabilidad 5\% PVF} = (859.621 \text{ USD} / 479.000 \text{ USD}) \times 100 = 179 \%$$

La adición de polvo del filtro al sistema demuestra que es rentable desde el primer año de su puesta en marcha, ya que el aprovechamiento del PVF residual como adición al cemento estándar IP-30 representa beneficios netos significativos.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El presente proyecto, que busca la incorporación de polvo residual del filtro en el cemento IP-30, ha arrojado resultados significativos tras la realización de ensayos normalizados en la fábrica de cemento "El Puente". Estas conclusiones se basan en la evaluación de las propiedades del cemento modificado con 3%, 5% y 7% de adición de polvo del filtro, en comparación con el IP-30 estándar establecido por la Norma Boliviana (NB-011) y el reglamento técnico del cemento.

- Se ha logrado una caracterización detallada del polvo residual, identificando sus componentes principales, lo que ha permitido comprender su potencial como aditivo en la producción de cemento.
- La investigación determinó que una adición entre el 3 y 5% de polvo residual es la proporción óptima, equilibrando las mejoras en las propiedades del cemento con la viabilidad económica y técnica.
 - Cumplimiento de Especificaciones para 3% y 5% de Adición: Los resultados obtenidos para las proporciones del 3% y 5% de adición de polvo del filtro al cemento IP-30 cumplen satisfactoriamente con todas las especificaciones establecidas por la Norma Boliviana (NB-011) y el reglamento técnico del cemento.
 - Influencia Negativa a 7% de Adición: La evaluación de la proporción del 7% de adición reveló que ciertas propiedades, específicamente las pérdidas por calcinación (NB-061) y las resistencias a 28 días (NB-470), salieron de especificación. Este resultado indica que, si bien la adición de polvo del filtro puede ser beneficioso hasta ciertos niveles, superar el umbral del 5% podría tener efectos adversos en las propiedades del cemento.
- Las pruebas realizadas al cemento IP-30 modificado con el polvo residual han mostrado comportamientos interesantes en las propiedades del cemento:
 - Desarrollo de resistencias del cemento con adición: En la mayoría de los casos, se registra un aumento en la resistencia a compresión de las pastas

con adición de polvo del filtro al cemento IP-30 entre 0 y 3 días. Este fenómeno se atribuye al efecto acelerador del filler, que supera el efecto de dilución por el reemplazo parcial del cemento IP-30. Las muestras con 3% de PVF registran los mayores incrementos de resistencia. Este hallazgo sugiere que, dentro de los niveles evaluados, el 3% de adición puede ofrecer un equilibrio óptimo entre beneficios y cumplimiento de especificaciones.

El efecto microfiller del PVF y el efecto puzolánico de la toba, compensan al efecto de dilución y al aumento de la porosidad capilar debido al incremento de la relación agua - cemento efectiva de las muestras con PVF, lo que puede observarse claramente en las muestras con hasta el 3% de PVF adicionado al cemento IP-30.

La disminución de la ganancia de resistencia a edades avanzadas de las pastas con PVF pone en evidencia que el efecto microfiller pierde importancia a medida que transcurre el tiempo de hidratación y que el efecto de dilución se hace cada vez más preponderante pero es compensado con el efecto puzolánico de la toba al conjugarse con la portlandita.

- Estabilidad de volumen: Se evidenció mediante el ensayo de expansión de Le-Chatelier que la expansión es menor en las pastas con adición de PVF, lo que sugiere que este componente puede contribuir a la reducción de la variación volumétrica del material durante el proceso de hidratación.
- Contenido de cloruros: La cantidad máxima de cloruros en la dosificación del polvo del filtro al cemento IP-30 va rondar el 0.04%, cumpliendo la especificación de la norma UNE-EN 197-1($\leq 0,10\%$), no habiendo riesgo de corrosión en las armaduras del hormigón al utilizar el cemento IP-30 adicionado.
- El análisis económico reveló que la adición del polvo residual permite una reducción en los costos de producción, derivada tanto del aprovechamiento de un subproducto como de la mejora en la eficiencia del proceso.
 - Costos: De acuerdo a la evaluación económica efectuada se determina que

en la adición de 3 y 5% de polvo purgado del filtro al cemento IP-30, los beneficios netos superan los costos iniciales, indicando la viabilidad financiera del proyecto.

- Los resultados obtenidos han sido sistematizados y presentados claramente en forma de gráficas y tablas, demostrando que la adición de polvo de purga al cemento IP-30 no solo es técnicamente factible sino también económicamente beneficiosa.
- Los beneficios ambientales de la adición de polvo del filtro son notables. La reducción de residuos y eliminación de estos, así como la disminución de la extracción de materias primas, consumo de clinker y liberación de espacio en los depósitos de planta respaldan el enfoque sostenible del proyecto.

En conclusión, el proyecto demuestra que la adición de polvo del filtro al cemento IP-30 en la fábrica de cemento "El Puente" es una estrategia viable para la optimización de recursos, manteniendo la calidad del producto estándar en base al cumplimiento de las especificaciones vigentes y una solución sostenible al problema de espacio en los depósitos de planta.

Tomar en cuenta la correcta dosificación de los porcentajes de adición satisfactorios para cumplir con las especificaciones establecidas. La optimización continua y un enfoque equilibrado entre los beneficios económicos y ambientales son esenciales para el éxito a largo plazo de este proyecto.

5.2.RECOMENDACIONES

Basándonos en los resultados experimentales y análisis detallado de las propiedades del cemento IP-30 con diferentes porcentajes de adición de polvo del filtro, se derivan las siguientes recomendaciones:

- **Optimización del Porcentaje de Adición:**

Se sugiere una consideración cuidadosa del porcentaje de adición de polvo del filtro. Los resultados indican que hasta el 5%, las propiedades del cemento cumplen con las especificaciones. Sin embargo, con el 7%, algunas propiedades, como las pérdidas por calcinación y las resistencias a 28 días, salen de especificación. Una optimización alrededor del 4% podría ser más apropiada para equilibrar beneficios y cumplimiento de estándares.

- **Monitoreo Continuo de Propiedades Mecánicas:**

Se recomienda un monitoreo constante de las propiedades mecánicas del cemento a medida que

se implementa a escala comercial. Esto garantizará que cualquier desviación de las especificaciones sea identificada y abordada de manera oportuna.

- **Control Riguroso de Calidad:**

Dada la sensibilidad de las propiedades del cemento a diferentes porcentajes de adición de polvo del filtro, se insta a implementar un sistema de control de calidad robusto. Esto debe incluir pruebas regulares en lotes de producción para garantizar la consistencia y calidad del producto final.

- **Investigación Adicional:**

Se sugiere la realización de investigaciones adicionales para comprender más profundamente el impacto a largo plazo de la adición de polvo del filtro en propiedades específicas, especialmente aquellas que se desvían de las especificaciones a tasas de adición más altas.

- **Análisis de Costo-Beneficio Continuo:**

Se recomienda realizar análisis de costo-beneficio continuos a medida que se expande la implementación del proyecto. Esto permitirá ajustar estrategias operativas según sea necesario para maximizar los beneficios económicos.

- **Educación y Comunicación:**

Se sugiere llevar a cabo programas educativos y de comunicación tanto internos como externos para explicar los beneficios ambientales y económicos de la adición de polvo del filtro. Esto ayudará a obtener apoyo interno y externo y a abordar posibles preocupaciones.