

1. ANTECEDENTES.-

1.1 El problema.-

En la actualidad el mercado del cemento en Bolivia está compuesto por cinco marcas, cuatro por SOBOCE (Warnes, Emisa, Viacha y El Puente) y por FANCESA, las cuales suplen la demanda en el país. Cada fábrica tiene su propia infraestructura, procesos industriales y materias primas, debido a esto se desea estudiar las diferencias de cada uno de los cementos mencionados líneas arriba y poder explicar cómo varían sus características físico-mecánicas. Además cada cemento tiene características propias que lo diferencia según las marcas, debido a que cada uno de estos cementos contiene un tipo y cantidad de adición que lo clasifica como cemento portland tipo IP-30, con un comportamiento variable. Pero estas particularidades de cada cemento no lo sabe cualquiera, por lo tanto es desaprovechada sus cualidades de cada cemento.

1.1.1 Planteamiento.-

El cemento Portland tipo IP-30 se utilizado en las obras de construcción en hormigón a nivel nacional, por lo tanto es de mucha demanda en el mercado. El cemento que se utiliza en la construcción, debe tener ciertas propiedades que deben cumplir con los requisitos mínimos especificados en las normas, para que el desempeño del cemento sea satisfactorio. El uso de un cemento de mala calidad en estructuras de construcción puede causar la pérdida de la funcionalidad de la estructura o incluso la pérdida de vidas humanas. Por lo tanto, la calidad del cemento Portland se ha convertido en un factor importante y crítico. Lo cual demanda una importante atención a su característica Físicos – Mecánicas para su mejor aprovechamiento.

1.1.2 Formulación.-

Con la apropiada orientación y el conocimiento de las características Físico –Mecánicas de los cementos nacionales que podemos adquirir en nuestro medio, podremos tener un mejor aprovechamiento de sus particularidades de cada cemento. Puesto que un cemento de diferente marca puede ser más apropiada en determinada actividad u obra que de otra marca, y así también viceversa.

1.1.3 Sistematización.-

De los datos obtenidos en laboratorios se podrá realizar planillas y gráficos las cuales muestren claramente las características de los cementos de distintas marcas, las cuales nos llevarán a tomar

decisiones con propiedad y seguridad al momento de elegir una marca de cemento, para su posterior utilización y aprovechamiento de acuerdo al lugar, actividad u obra en el cual se la requiera.

1.2 Objetivos.-

1.1.4 General.-

Determinar las características físicas y mecánicas (peso específico, finura, consistencia normal, tiempo de fraguado, expansión del cemento por autoclave y la resistencia a la tracción y compresión), mediante ensayos de laboratorio, de cinco cementos comerciales tipo IP-30 de diferentes marcas.

1.1.5 Específicos.-

- Comparar los resultados físicos y mecánicos obtenidos en el laboratorio con los parámetros mínimos de calidad especificados en la norma NB-011.
- Procesar estadísticamente los resultados de cada ensayo físico y mecánico, para saber la confiabilidad de los datos.
- Analizar los resultados de los ensayos físico-mecánicos, de los cinco cementos evaluados presentados en tablas y gráficas para sacar las conclusiones del trabajo

1.3 Justificación.-

El cemento es el material producto del constante desarrollo de la humanidad, que hoy en día es el más usado en la industria de la construcción, por lo tanto es necesario actualizar el conocimiento de los diferentes cementos que se usan en el mercado actual. Por lo tanto conocer sus características es importantes para el constructor, por las cuales presento las siguientes razones que fue motivo para elaborar la propuesta de proyecto:

1.1.6 Académica.-

Experimentar la teoría con la práctica, como también discernir, afinar los conocimientos adquiridos en la materia de Tecnología del Hormigón, realizando ensayos en laboratorio y su respectivo calculo. Para que a la hora de realizar un diseño, se tome en cuenta, aspectos que nos ayudan a tomar una mejor dirección.

1.1.7 Técnica.-

Evaluando los resultados de los ensayos y haciendo una comparación entre características de los cementos, extraer la esencia particular que lo diferencia un cemento de la otra, para que al momento de realizar un diseño podamos aplicar esta información e inclinarlo a favor del diseño, tomando en cuenta también la disponibilidad que hay en nuestro medio y el costo.

1.1.8 Social.-

Contribuir a la sociedad con una herramienta más, para tener una orientación de elegir algún cemento en función al tipo de obra y situación, además será una ayuda para poder evaluar y analizar la ficha técnica de los cementos disponibles en el mercado, y así poder elegir las según sus cualidades y costo.

1.4 Alcance del proyecto

Este proyecto tiene la finalidad de informar y orientar a todos aquellos que necesiten conocer más acerca de los cementos nacionales, para mejorar su aplicación y aprovechar a lo máximo las propiedades de los cementos. Para tal fin se pretende realizar ensayos al cemento para determinar sus propiedades y características de cada una de ellas, para tal efecto se propone realizar los siguientes ensayos: determinación de la finura de cemento mediante el tamiz N° 40 y N°200, determinación del peso específico mediante el frasco Le Chatelier, determinación de la consistencia normal y tiempo de fraguado mediante las agujas de Vicat, de terminación de la expansión de la pasta de cemento mediante el aparato de autoclave, y la determinación de la resistencia a la compresión de cubos de mortero.

Los datos obtenidos en laboratorio serán evaluados en gabinete mediante cálculos estadísticos para determinar su confiabilidad de los mismos. Por último se realizarán gráficas comparativas para una mejor apreciación de resultados, obteniendo así las conclusiones finales de cada ensayo. Apoyándose en la norma boliviana y normas extranjeras, como base de análisis.

2. MARCO TEÓRICO.-

2.1 Definición de cemento.-

Los cementos son materiales granulares muy finos y homogéneos, son conglomerantes hidráulicos, o sea materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que molidos y convenientemente amasados con agua, fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como sumergido en agua, a causa de las reacciones de hidrolisis e hidratación de sus constituyentes, la cual da lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables.

Dosificado y mezclado adecuadamente con agua y áridos es capaz de producir un mortero que conserve durante un tiempo suficientemente largo su trabajabilidad, para alcanzar, al cabo de periodos definidos, los niveles de resistencia fijados y una duradera estabilidad de volumen.

El factor fundamental en el endurecimiento es la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar otros compuestos químicos como los aluminatos.

Los cementos están formados por pequeños granos individuales de diferentes materiales pero, en composición, estadísticamente homogéneos. Obtiene un alto grado de regularidad en todas sus propiedades por medio de un proceso de producción continua en masa, especialmente por una molienda y homogeneización adecuados.

2.2 Definición de cemento Portland.-

Productos fabricados a base de Clinker, producto constituido en su mayor parte por silicatos de calcio, obtenido por la cocción hasta fusión parcial (clinkerización) de una mezcla convenientemente proporcionada y homogeneizada que contiene principalmente cal y sílice, con pequeñas proporciones de alúmina y óxido férrico.

El nombre de cemento Portland se patentó en 1824, por Joseph Aspdin, un constructor de Leeds en Inglaterra, daba el nombre de cemento portland y patentaba un material pulverulento que amasado con agua y con arena se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la

isla de Portland. Probablemente, el material patentado por Aspdin era una caliza hidráulica debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción.

2.3 Clasificación de los cementos según la ASTM.-

En el mundo existen una gran variedad de tipos de cementos, estos tipos se distinguen según los requisitos tanto químicos como físicos. La norma ASTM especifica:

- 8 tipos de cemento Portland, ASTM C150: I, IA, II, IIA, III, IIIA, IV, V.
- 6 tipos de cemento hidráulico mezclado, ASTM C595: IS, IP, P, I(PM), I(SM), S.

Tipo IS.- Cemento Portland con escoria de alto horno

Tipo IP.- Cemento Portland con adición Puzolánica.

Tipo P.- Cemento Portland con puzolana para usos cuando no se requiere alta resistencia inicial.

Tipo I (PM).- Cemento Portland con Puzolana modificado.

Tipo I (SM).- Cemento portland con escoria, modificado.

Tipo S.- Cemento con escoria para la combinación con cemento Portland en la fabricación de concreto y en combinación con cal hidratada en la fabricación del mortero de albañilería.

- 3 tipos de cemento para mampostería, ASTM C91: N, M, S.

En Bolivia sólo se fabrican los cementos del Tipo I, y IP por lo cual solo se desarrollaran estos con mayor detalle, del resto solo se presentaran sus características principales.

TIPO I, cemento común, para usos generales, es el que más se emplea para fines estructurales cuando no se requieren de las propiedades especiales especificadas para los otros cuatro tipos de cemento. En las tablas 2.1 se proporciona diferentes características para los cementos Tipo I.

TIPO II, cemento modificado para usos generales y se emplea cuando se prevé una exposición moderada al ataque por sulfatos o cuando se requiere un moderado calor de hidratación. Estas características se logran al imponer limitaciones en el contenido de C_3A y C_3S del cemento. El cemento tipo II adquiere resistencia con más lentitud que el tipo I; pero a final de cuentas, alcanza la misma resistencia. Este tipo de cemento se usa en el hormigón expuesto al agua de mar.

Tabla 2.1.-

Comparación de normas internacionales, para características del cemento portland Tipo

I 40

ESPECIFICACIONES	Norma Boliviana NB 011	Norma Española UNE 80-301
TIPO	I	I
Categoría resistente	40	45
Clinker %	95 a 100	95 a 99
Componentes adicionales %	0 a 5	1 a 5
Requerimientos Químicos		
Pérdidas por calcinación, % Max.	5.0	5.0
Residuo insoluble, % Max.	5.0	5.0
Trióxido de Azufre, % Max.	3.5	4.5
Oxido de Magnesio, % Max.	6.0	-
Requerimientos Físicos		
Resistencia a la Compresión, Mpa.		
Fraguado Vicat		
Mínimo inicial, Minutos	45	60
Máximo final, Horas	7	12
Superficie específica mínima, cm ² /g	2800	-
Expansión		
Autoclave, % máximo	1	-
Le Chatelier, mm Max.	8	10

Fuente: Instituto boliviano de normalización de calidad (IBNORCA) y la UNE 80-301

TIPO III, cemento de alta resistencia inicial, recomendable cuando se necesita una resistencia temprana en una situación particular de construcción. Este cemento se obtiene por un molido más fino y un porcentaje más elevado de C_3A y C_3S . El hormigón tiene una resistencia a la compresión a los 3 días aproximadamente igual a la resistencia a la compresión a los 7 días para los tipos I y II y una resistencia a la compresión a los 7 días casi igual a la resistencia a la compresión a los 28 días para los tipos I y II. Sin embargo, la resistencia última es más o menos la misma o menor que la de los tipos I y II.

Dado que el cemento tipo III tiene un gran desprendimiento de calor, no se debe usar en hormigones masivos. Con un 15% de C_3A presenta una mala resistencia a los sulfatos. El contenido de C_3A puede limitarse al 8% para obtener una resistencia moderada a los sulfatos o a 5% cuando se requiere alta resistencia.

TIPO IV. Cemento de bajo calor de hidratación. Los porcentajes de C_2S y C_4AF son relativamente altos; El bajo calor de hidratación en el cemento tipo IV se logra limitando los compuestos que más influyen en la formación de calor por hidratación, o sea, C_3A y C_3S . Dado que estos compuestos también aportan la resistencia inicial de la mezcla de cemento, al limitarlos se tiene una mezcla que gana resistencia con lentitud. Este cemento se usa para estructuras de hormigón masivo, con bajas relaciones superficie/volumen. Requiere mucho más tiempo de curado que los otros tipos.

TIPO V. Cemento resistente a los sulfatos. La resistencia al sulfato se logra minimizando el contenido de C_3A ($\leq 5\%$), pues este compuesto es el más susceptible al ataque por sulfatos.

Este tipo se usa en las estructuras expuestas a los sulfatos alcalinos del suelo o del agua, a los sulfatos de las aguas freáticas y para exposición al agua de mar.

Las resistencias relativas de los hormigones preparados con cada uno de los cinco tipos de cemento se comparan en la tabla 2.4, a cuatro edades diferentes; en cada edad, se han normalizado los valores de resistencia para comparación con el hormigón de cemento tipo I

Tabla 2.2

Características de los cementos portland

Tipo*	Descripción	Características Opcionales
I	Uso general	1,5
II	Uso general, calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos	1,4,5
II	Alta resistencia inicial	1,2,3,5
IV	Bajo calor de hidratación	5
V	Alta resistencia a los sulfatos	5,6
Características opcionales <ol style="list-style-type: none"> Aire incluido, IA, IIA y IIIA Resistencia moderada a los sulfatos: C₃A máximo, 8% Alta resistencia a los sulfatos: C₃A máximo, 5% Calor de hidratación moderado: Calor máximo de 290kJ/kg (70cal/g) a los 7 días, o la suma de C₃S y C₃A, máximo 58%. Álcalis bajo: Máximo de 0.60%, expresado como Na₂O equivalente. El límite de resistencia alternativa de sulfatos está basado en el ensayo de expansión de barras de mortero. 		

(*) Para cementos especificados en la ASTM C 150

Fuente: ASTM C150 Especificación Normalizada para cemento portland

Tabla 2.3.-

Composición típica de los compuestos de los cementos portland

Tipo de cemento	Desig. ASTM C150	Compuesto %						Perdida por cal %	CaO Libre %
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₃		
Ordinario	I	55	19	10	7	2.8	2.9	1	1

Moderado calor de hidratación, moderada resistencia al sulfato	II	51	24	6	11	2.9	2.5	0.8	1
Endurecimiento rápido	III	57	19	10	7	3	3.1	1	1.6
Bajo calor de hidratación	IV	28	49	4	12	1.8	1.9	0.9	0.8
Resistente al sulfato	V	38	43	4	9	1.9	1.8	0.9	0.8

Fuente: ASTM C150 Especificación Normalizada para cemento portland

Tabla 2.4.-

Resistencia de los cementos Tipo I, II, III, IV y V

Tipo de cemento Portland	Resistencia a la compresión (%)			
	3 días	7 días	28 días	3 meses
I. Usos generales	100	100	100	100
II. Modificado	85	89	96	100
III. Alta resistencia inicial	195	120	110	100
IV. Bajo Calor	-	36	62	100
V. Resistente a los sulfatos	67	79	85	100

Fuente: ASTM C150 Especificación Normalizada para cemento portland

Con inclusión de aire, ASTM C150: TIPO IA, IIA Y IIIA. Estos tipos tienen una composición semejante a las de los tipos I, II y III, excepto que durante la fabricación, se muele junto con estos últimos un agente inclusor de aire. Este constituye un mal método para obtener aire incluido, ya que no se puede hacer variar la dosis del agente para compensar otros factores que influyan en el contenido de aire en el hormigón.

Estos cementos se usan para la producción de hormigón expuesto a heladas severas.

Cementos mezclados ASTM C595: TIPO IS, IP, P, I(PM), I(SM), S. Estos cementos consisten en mezclas, que se muelen juntas, de Clinker y ceniza muy fina, puzolana natural o calcinada, o bien, escoria, dentro de los límites en porcentaje especificados de los componentes. También pueden consistir en mezclas de cal de escoria y cal de puzolana. En general, pero no necesariamente, estos cementos dan lugar a una resistencia mayor a la reacción álcali-agregado, al ataque por sulfato y al ataque del agua de mar, pero requieren un curado de mayor duración y tienden a ser menos resistentes

a los daños por la sal para deshelar y descongelar. Dan lugar a una menor liberación de calor y es posible que ganen resistencia con mayor lentitud, en especial a bajas temperaturas.

En Bolivia a estos cementos mezclados se los conoce como cementos con adicciones, y tienen como ventaja adicional y no menos importante, los concretos con cementos adicionados presentan algunas ventajas tecnológicas con respecto a los tradicionales, sobre todo en referencia a resistencias mayores a largo plazo y mayor durabilidad gracias a la impermeabilidad y a las adicciones en sí mismas.

Ante estas ventajas, el mundo usa actualmente los cementos adicionados de manera muy extendida (alrededor del 85 %).

Cementos Puzolánicos1.- Endurecen más lentamente, en especial en ambiente frío, y requieren en general más agua de amasado que el Pórtland normal; pero a largo plazo llegan a superar las resistencias de este, confiere al hormigón una elevada densidad, disminuyendo su porosidad y haciéndolo más compacto, lo que aumenta su resistencia química. Todo ello lo hace recomendable para gran número de obras (canales, pavimentos. obras en aguas muy puras o ambientes medianamente agresivos, hormigonados bajo agua, obras marítimas, etc.).

Cemento de Alto Horno.- Se obtiene por enfriamiento brusco en agua de la ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos. Dado su contenido en cal combinada, la escoria no es una simple puzolana, sino que tiene de por sí propiedades hidráulicas, es decir, que es un verdadero cemento, fragua y endurece muy lentamente, por lo que debe ser acelerada por la presencia de algo que libere cal, como el Clinker de Pórtland.

Estos cementos presentan poca retracción y un débil calor de hidratación, por lo que pueden ser utilizados sin riesgo en grandes macizos. A cambio y por la misma razón, son muy sensibles a las bajas temperaturas, que retardan apreciablemente su endurecimiento, por lo que no deben utilizarse por debajo de los + 5 °C.

Para mampostería, ASTM C91, TIPO N, S Y M. Son cementos de baja resistencia utilizados exclusivamente en albañilería. El tipo M tiene la resistencia más alta, alcanzando 20MPa. Una característica de este tipo de cemento es su mayor plasticidad. Este tipo se usa también para revoque; asimismo, suele contener una piedra caliza finamente molida junto con el clinker y un plastificante inclusor de aire.

Cemento blanco. Este tipo cumple con los requisitos del tipo I o del tipo III, o los de ambos. En él se utilizan materias primas de bajo hierro y bajo manganeso y un apagado especial para producir un color blanco puro.

API especial 10 para pozos petroleros. Este tipo consta de varias clases y está diseñado para satisfacer las condiciones de presión y temperatura elevadas que se encuentran en la inyección de grout en los pozos petroleros. Este tipo produce una pasta aguada de baja viscosidad y fraguado lento, tan líquida como es posible para facilitar el bombeo a presión en los pozos profundos. Es de bajo contenido de C_3A , de molido grueso y no puede contener alguna sustancia para ayudar a la pulverización.

Tipos expansivos. Estos tipos se usan para inhibir la contracción del hormigón y minimizar el agrietamiento. Tienen baja resistencia al sulfato.

Cementos de alta alúmina. Este tipo contiene aluminatos de calcio, en lugar de silicatos de calcio. Tiene una elevada resistencia temprana (a las 24 hrs) y propiedades refractarias. Puede experimentar un 40% de regresión en la resistencia después de secar durante un periodo de 6 meses, si el hormigón no se mantiene frío durante las primeras 24 h después de mezclar y vaciar.

Los cementos en Bolivia están regulados por el “Instituto Boliviano de Normalización y Calidad” (IBNORCA).

2.4 Clasificación de los cementos Bolivianos

En Bolivia los cementos Portland se han clasificado en varios tipos según la composición química que está muy ligada a las propiedades físico-mecánicas; además, con el uso de las adiciones de ceniza volante, puzolanas naturales o escoria de alto horno, se pueden obtener diferentes características cuando este se hidrata. La norma NB-011 ha clasificado los cementos Portland de la siguiente manera:

2.4.1 Cemento Portland tipo I.-

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker portland en proporción no menor de 95% en masa y de cualquiera de los componentes adicionales definidos por la norma (NB 011), o mezclas de ellos, en proporción no mayor de 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Es el que más se emplea para fines estructurales cuando no se requieren de las propiedades especiales especificadas para los otros cuatro tipos de cemento. Se utiliza principalmente en la construcción de casas, edificios, puentes, cimentaciones y trabajos de mampostería, construcciones de concreto presforzado, tanques y productos prefabricados.

2.4.2 Cemento Portland con puzolana, tipo IP.-

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker portland en proporción no menor del 60% ni mayor al 94% en masa, de puzolana en proporción no menor del 6% ni mayor del 40% en masa y de otro de los componentes adicionales definidos por la norma (NB 011), en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Es un cemento portland con Puzolana, Tipo IP, categoría resistente alta, con resistencia a la compresión desde 30 a 40 MPa a 28 días en mortero normalizado de cemento.

Se caracteriza por su moderado calor de hidratación, menor fisuración y retracción térmica, mejor trabajabilidad, mayor resistencia a ataques químicos, impermeabilidad, mayor durabilidad.



Figura 2.1 Vigas pretensadas



Figura 2.2 Cemento IP 30 ideal para estructuras de un desencofrado prematuro

Recomendado para hormigón armado estructural, hormigón pretensado, hormigones con altas resistencias iniciales, prefabricados, hormigón proyectado, hormigones para desencofrados rápidos, pavimentos, y en general en todo tipo de construcciones

2.4.3 Cemento Portland con Filler o caliza, tipo IF.

Son los conglomerantes hidráulicos a base de: Clinker portland en proporción no menor del 65% ni mayor del 94% en masa, filler o caliza en proporción no menor del 6% ni mayor de 20% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en la norma (NB 011), en proporción comprendida entre el 0 % - 5% en masa.

Este fenómeno es el más conocido y tiene que ver fundamentalmente por la capacidad de las partículas finas en “llenar” (to fill en inglés) u ocupar los espacios disponibles; es decir, las partículas de “filler” calcáreo son sumamente finas (en general, el filler representa la mayor parte de las partículas más finas del CPF), mejorando la distribución de partículas del cemento y, consecuentemente, mejoran la compactación de la pasta lográndose una mejor resistencia temprana del mortero u hormigón a partir de una mejor ocupación de espacios.

La utilización de cemento portland con filler implica la obtención de hormigones que en estado fresco presentan muy buena trabajabilidad, plasticidad, bombeabilidad y terminación superficial a partir de los finos aportados por el “filler” calcáreo. En estado endurecido, las mezclas presentan mayor resistencia inicial, mayor trabajabilidad, rápido fraguado, menor calor de hidratación, retención de agua, evitando fisuración y mayor impermeabilidad. Todos estos beneficios hacen del CPF un producto adecuado para ser utilizado en la fabricación de elementos prefabricados y hormigón elaborado, sin olvidar las ventajas que se obtienen a partir de su utilización en trabajos de albañilería. Es ideal para toda obra o elementos estructurales donde el hormigón no estará sometido a ambientes especialmente agresivos (agua de mar y/o sulfatos).



Figura 2.4 Hormigón elaborado



Figura 2.3 Ideal para pavimentos

2.4.4 Cemento Portland con adición de escoria, Tipo IS.-

Son los conglomerantes hidráulicos a base de: Clinker portland en proporción no menor del 65% ni mayor del 94% en masa, escoria en proporción no menor del 6% ni mayor de 35% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en la norma (NB 011), en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Las resistencias a compresión a edades tempranas disminuyen en función de la cantidad de escoria añadida, debido a que el proceso de hidratación de las escorias se desarrolla más lentamente que el del clinker de cemento portland. Por el contrario, a edades normales (28 días) las resistencias son similares o incluso más altas, conservando potencial de crecimiento a edades a largo plazo (60 días).



Figura 2.5 Presas con macizos de gran magnitud



Figura 2.6 Adriatic LNG Terminal (obra construida con cemento portland con

Sin embargo, el proceso de hidratación de las escorias es más lento que el del clinker. Para su hidratación necesita ser "activada". Este proceso de hidratación favorece una generación de calor más lenta y prolongada en el tiempo, lo que favorece su disipación.

La incorporación de la escoria de horno alto modifica la naturaleza y características de los hidratos que se forman, afectando a la red capilar del hormigón, reduciendo el tamaño y el número de poros, por lo tanto reduce la permeabilidad de agua. Este mismo efecto se produce también por el menor tamaño de las partículas de escoria, que favorecen el relleno de huecos en el hormigón.

Los cementos con escorias de horno alto proporcionan una mejor resistencia a los sulfatos que la que ofrecen los cementos tipo I, incluso siendo SR o MR. La razón de ello estriba en la menor permeabilidad del hormigón, en el menor contenido de portlandita (material muy susceptible de ser atacado químicamente) y, en algunos casos, un menor contenido en C3A.

Recomendado para hormigón armado estructural, hormigón pretensado, para dique, presas, puentes y obras marítimas.

2.4.5 Cemento Portland mixto, Tipo IM.-

Son los conglomerantes hidráulicos a base de: Clinker portland en proporción no menor del 65% ni mayor del 94% y la combinación entre escoria; filler o caliza y puzolana en proporciones entre el 6% al 35% en masa y de otros componentes adicionales definidos en la norma (NB 011), en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.



Figura 2.7 El cemento Tipo IM es ideal para prefabricado, resistente al agua de mar



Figura 2.8 Mortero de albañilería para pircado de muros de ladrillo

Entre sus ventajas de uso podemos mencionar: Altas resistencias finales, resistencia a los ataques químicos, sulfatos y agua de mar, mayor tiempo de operación, estabilidad en presencia de áridos reactivos, bajo calor de hidratación.

Es utilizado en construcciones de hormigón armado, prefabricados con grandes resistencias, ideal para revoque por su fraguado lento, construcciones en contacto con agentes químicos y para todo tipo

de construcciones. Mayor trabajabilidad, alta resistencia continuada en el tiempo a edades avanzadas y gran durabilidad,

2.4.6 Cemento Puzolánicos, tipo P.-

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker portland en proporción no menor al 45% ni mayor de 60% en masa, de puzolana, cenizas volcánicas u otros materiales puzolánicos en proporción total no menor del 40% ni mayor del 55% en masa y de otro de los constituyentes definidos en la norma (NB 011), en proporción total no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Figura 2.9 Morteros de albañilería para revoques



Figura 2.10 Estabilización con Cemento

Es un cemento puzolánico de categoría resistente media, con un calor de hidratación muy reducido, lo que ayuda a disminuir el riesgo de fisuración en las realizaciones de hormigón. Tiene mayor trabajabilidad, alta resistencia continua en el tiempo a edades avanzadas y gran durabilidad.

El desarrollo atenuado de calor de hidratación hace muy aconsejable su uso en pavimento de firmes de hormigón, estabilizados con cemento, firmes de suelocemento y gravacemento. Gracias a las características químicas de su composición, el uso de este cemento proporciona al hormigón resistencia a fenómenos de gradación como lixiviación por aguas puras y ataque ácido, estando especialmente indicado para hormigones adecuadamente dosificados para tales condiciones.

Tabla 2.5.-
Clasificación y composición de los cementos

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

1.- En estos valores se excluyen: El regulador de fraguado y los aditivos.

2.- Los componentes adicionales pueden ser puzolana, filler, caliza o escoria, a menos que sean componentes principales de cemento

3.- Para cementos tipo IF, se debe realizar el control de filler calizo mediante el método de azul de metileno.

4.- El índice de actividad de la puzolana se debe realizar mediante el método de ensayo de la norma ASTM C 311

Fuente: Instituto boliviano de normalización de calidad (IBNORCA) – Norma boliviana NB 011

2.5 Composición química de los tipos de cemento en Bolivia

Dada la complejidad de los compuestos en el Clinker del cemento Portland, generalmente se usa la abreviación de éstos para la descripción de los compuestos, (ver tabla 2.6).

Tabla 2.6.-

Nomenclatura de los compuestos del Clinker

COMPUESTO	NOMBRE	NOMBRE COMÚN	ABREVIACIÓN
Ca O	Oxido de Calcio	“Cal”	C
Si O ₂	Dióxido de Silicio	“Sílice”	S
Al ₂ O ₃	Oxido de Aluminio	“Alúmina”	A
Fe ₂ O ₃	Oxido Férrico	“Hierro”	F
H ₂ O	Agua		H
S O ₃	Sulfato		S

Existen varios tipos de cementos en el mundo, siendo el más comúnmente usado el denominado cemento Portland I, que actualmente se produce en nuestro país, cada tipo de cemento tiene una aplicación especial o específica.

Para preparar un cemento Portland y para que sea catalogado de esa forma, tiene que cumplir ciertos requisitos de tipo físico y químico.

Para cumplir con dichas especificaciones, el proceso de producción de cemento debe ser llenado a cabo de acuerdo a reglas operativas y control de materias primas, por ejemplo la preparación de un buen material para la cocción en el horno es un factor clave para este fin.

2.5.1 Componentes principales del cemento

Silicato Tricálcico (C₃ S).-

Conocido como ALITA es un compuesto hidráulicamente activo; es decir, que reacciona ante presencia de agua y aire, responsable de las resistencias mecánicas altas a los primeros días y cuyo fraguado está regulado por la adición de yeso, tiene mucha importancia en el calor de hidratación.

El porcentaje usual de este compuesto en el clinker debe estar comprendido entre el 45 y el 65%.

Del silicato tricálcico podemos enumerar las siguientes propiedades o características:

- 1.- Experimenta un principio y final de fraguado dentro de unas pocas horas después de su amasado

- 2.- Cuando se prepara convenientemente no presenta inestabilidad en volumen
- 3.- Mezclas de C_3S y agua son menos plásticas que las realizadas en las mismas condiciones con cemento. Se requiere más cantidad de agua para obtener una pasta trabajable o manejable. La adición de yeso a la masa la hace más trabajable.
- 4.- Alcanza o desarrolla la mayor parte de su resistencia en 7 días.

Silicato Dicálcico (C_2S).

Conocido como Belita, este compuesto es también hidráulicamente activo y favorece el endurecimiento, es responsable de las resistencias mecánicas finales. La adición de yeso, no produce cambios notables en este compuesto. El silicato dicálcico tiene incidencia menor en el calor de hidratación.

El valor de C_2S para condiciones normales debe estar entre el 10 y 30%.

Características del silicato dicálcico.

- 1.- No exhibe un tiempo de fraguado definido y la masa fragua lentamente en un periodo de tiempo de algunos días. La adición de yeso produce pequeños cambios.
- 2.- Este componente, que se metaestable, desarrolla o produce pequeña resistencia en edades tempranas, pero luego la va desarrollando de forma continua con el tiempo y se va aproximando a la del silicato. (Ver figura 2.22)

Aluminato Tricálcico (C_3A).

Este compuesto genera calor al hidratarse, siendo un punto negativo en la preparación de la mezcla de cemento, los cementos que contienen un elevado porcentaje de C_3A , generan gran cantidad de calor, produciendo esfuerzos que ocasionan posteriores fisuras internas en el hormigón.

El C_3A esta regulado por la adición de yeso, el cual retarda la hidratación del mismo; a mayores cantidades de C_3A se requieren mayores cantidades de yeso.

Los valores del C_3A usualmente deben estar entre 5 – 15 %.

Características del aluminato tricálcico.

El aluminato tricálcico reacciona muy rápidamente con el agua dando lugar a un fraguado casi instantáneo. Su alta reactividad se debe a los agujeros existentes en la estructura. La reacción está acompañada por una gran evolución de calor, produciéndose una violenta evaporación del agua. Un

mezclado posterior con agua produce una masa plástica y fácilmente trabajable, que fragua y endurece dando un material de resistencia mecánica mediana si se mantiene en un ambiente húmedo y que se desintegra y se desmenuza si se introduce en el agua. Para retrasar su actividad se emplea el yeso, que actúa como regulador de fraguado.

No posee ninguna propiedad hidráulica destacable, aunque contribuye al fraguado inicial y eleva ligeramente, quizás, la resistencia inicial del cemento. Desarrolla o produce algo de resistencia en un día, pero no aumenta con el tiempo, como muestra la figura 1.

Por tanto, el valor del C_3A en el cemento portland parece que se limita a su efecto de hacer posible la formación del clinker a las temperaturas que se alcanzan en los hornos comerciales. Sin embargo, parece ser que la presencia del C_3A aumenta la velocidad de hidratación y el desarrollo de resistencias del C_3S . Su forma de participar en el desarrollo de las resistencias y endurecimiento del cemento no están claras, creyéndose que actúa como catalizador de las reacciones de hidratación de los silicatos.

Lo que uno puede preguntarse es porque el cemento portland no presenta la expansión y la desintegración que exhibe el aluminato tricálcico cuando se sumerge en el agua o su fraguado casi instantáneo. La respuesta que se puede dar probablemente se basa en que su cantidad es pequeña (5-15 %), en la alta proporción del yeso añadido con respecto a él (3-5 % de yeso lo que corresponde a un 25-50 % del contenido de C_3A) y en cómo se encuentra distribuido en el Clinker. En este el aluminato tricálcico se encuentra intermezclado con otros constituyentes que lo rodean de forma parcial, con lo que su velocidad de reacción con el agua disminuye debido a una menor superficie de reacción.

Hay que tener presente que los clinker que poseen un contenido elevado en aluminato tricálcico dan lugar a pastas, morteros y hormigones muy sensibles al ataque por sulfatos y otros agentes agresivos.

Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF):-

Es un compuesto que no tiene mucha influencia en el desarrollo de la resistencia del cemento, su influencia se siente más en la coloración del mismo. Su participación varía entre el 12 al 18%.

Características de la fase ferrítica son:

1.-El ferroatuminato tetracálcico fragua en pocos minutos, pero no muestra el fraguado casi instantáneo del C_3A .

Durante dicho periodo de fraguado hay una marcada evolución de calor, pero también es mucho menos vigorosa que la del C_3A .

2.-A esta fase se le debe el color gris verdoso del cemento Portland, como resultado de la entrada en solución sólida en ella de los iones manganeso.

3.-Por otra parte su hidraulicidad es pequeña. La velocidad de hidratación de la fase ferrítica, así como la naturaleza de los productos hidratados depende de la relación A/F . Así el C_6A_2F ($x = 2/3$) y el C_6AF_2 ($x = 1/3$) hidratan rápidamente, mientras que el C_4AF no lo hace tan rápidamente y el C_2F lo hace más lentamente. La velocidad de hidratación se acelera con la presencia de manganeso y disminuye con la del hierro

4.-Apenas si tiene contribución en el desarrollo de la resistencia de los cementos, como pone de manifiesto la figura 2.3.

5.- Los cementos portland resistentes a los sulfatos tienen una relación Fe/Al relativamente alta y la fase ferrítica puede no tener la composición típica del clinker normal.

2.5.2 Componentes menores o secundarios del cemento

La proporción en que estén presentes en las materias primas influye en el modo en que van a estar presentes en el Clinker: en los compuestos mayoritarios como impurezas formando nuevos compuestos, que serán minoritarios se introducen en el crudo, debido a las impurezas que acompañan a los componentes principales (calcáreo y arcilloso). El contenido de dichos materiales está condicionado por ley o por valores obtenidos experimentalmente. Los más importantes son:

- (1).- óxido de calcio (cao).
- (2).-óxido de magnesio (mgo).
- (3).-álcalis (K_2O , Na_2O)
- (4).-azufre.
- (5).-cloruros
- (6).-fluoruros
- (7).-fosforo.

- (8).-óxido de titanio.
- (9).-metales pesados.
- (10).-pérdida por fuego.

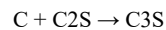
Cal Libre (CAO).-

En el proceso de clinkerización el óxido de calcio (Ca O) existente en la harina cruda, reaccionara con los óxidos de sílice, alúmina y hierro para formar los silicatos y aluminatos de calcio.

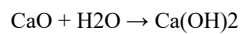
La cal libre, corresponde a la cantidad de óxido de calcio que no ha reaccionado químicamente y que se encuentra como tal. La presencia de cantidades elevadas (mayor al 1%) de cal libre, implica que la dosificación de las materias primas ha sido incorrecta o hubo deficiencias, en el proceso de quemado o clinkerización.

La cal libre es un compuesto indeseable porque es expansivo, es decir, aumenta su volumen cuando se mezcla con agua, provocando esfuerzos internos y agrietamiento en el concreto, participa entre un 55 y un 65%.

El óxido de calcio deriva de su no combinación total con el silicato dicálcico para formar el silicato tricálcico, según la reacción:



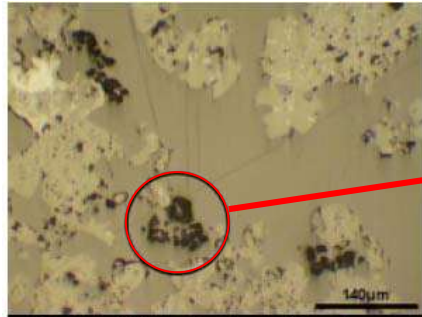
Esta cal libre reacciona con el agua formando el hidróxido:



Dicha reacción tiene una velocidad pequeña y tiene lugar cuando las reacciones de hidratación de los componentes mayoritarios del cemento prácticamente ya han finalizado (masa endurecida).

Como hay aumento de volumen pueden aparecer grietas junto a los granos de cal, que pueden disminuir considerablemente la resistencia mecánica del hormigón o el mortero, o incluso provocar su desintegración. Los cementos presentan inestabilidad en volumen.

Fotografía microscópica de la cal libre en el cemento



Fotomicrografia 1 - amostra C2 - a cal livre pode ser verificada em 3 zonas (preto).

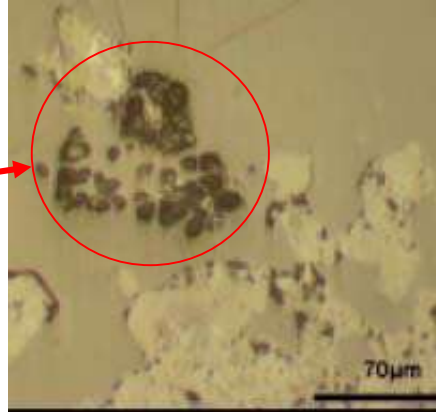
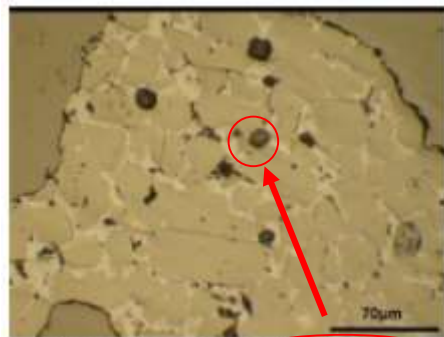


Figura 2.12.-

Fotografia microscópica cristales de cal libre



Fotomicrografia 3 - amostra A5 - cristais de cal livre dispersos (preto e arredondado).

Óxido De Magnesio (Mg O)

Es un compuesto sin propiedades hidráulicas, en contacto con el agua se hidrata aumentando su volumen. Porcentajes de Mg O mayores que el 5%, implican peligro de expansión. La expansión por magnesio es muy peligrosa, pues se manifiesta con gran lentitud a través de los años.

El óxido de magnesio suele acompañar a la caliza. Otros orígenes pueden ser ciertas rocas ígneas, ciertas arcillas y las escorias de alto horno.

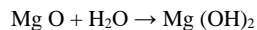
Si está en un contenido inferior al 2% entra en solución sólida en las fases principales del Clinker (Componentes mayoritarios) donde sustituye al Ca O ($Mg^{2+} \rightarrow Ca^{2+}$). Contenido típico son:

Alita	: 0.5-2%
Velita	: 0.5%
Fase aluminato	: 1.4%
Fase ferrítica	: 3.0%

La fase ferrítica en equilibrio con C_3S , C_2S , C_3A y fase líquida tiene una composición ligeramente más rica en hierro C_6AF_2 , que la corresponde al C_4AF si no existe Mg O y más próxima a la del C_6A_2F si el Mg O está presente.

El C_6AF_2 tiene una velocidad de hidratación mayor que el C_4AF

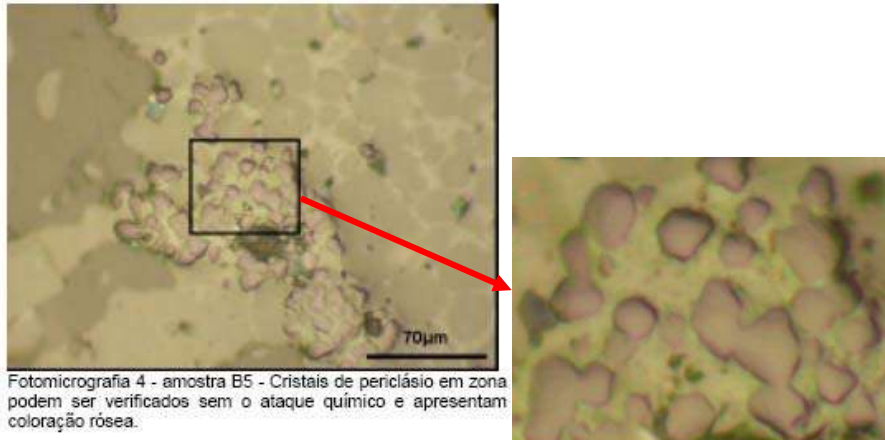
Por encima del contenido del 2%, aparte de entrar en solución sólida, aparece como Mg O (Periclasa), cuyo tamaño de cristal depende de la velocidad de enfriamiento del clinker y reacciona con el agua formando el hidróxido:



Dicha reacción tiene una velocidad pequeña y, por tanto, tiene lugar cuando las reacciones de hidratación de los componentes mayoritarios del cemento prácticamente ya han finalizado y la masa de cemento ya ha fraguado y endurecido. Como hay aumento de volumen pueden aparecer grietas junto a los granos de periclasa, que puede disminuir considerablemente la resistencia mecánica del hormigón o el mortero, o incluso provocar su desintegración.

Debido a que el óxido de magnesio es muy nocivo, las normas limitan su contenido en los cementos. (Ver tabla 2.9)

**Figura 2.13.-
Fotografía microscópica cristales periclasia**



Álcalis.-

Los álcalis ($K_2O + Na_2O$) están entre los elementos más ampliamente distribuidos en la naturaleza y se encuentran en pequeñas cantidades en todas las materias primas usadas en la fabricación del Clinker, pero principalmente en el componente arcilloso y distintas rocas ígneas (feldespatos, micas, etc) y en menor cuantía en las cenizas del carbón, si este se utiliza como combustible en el horno.

Los álcalis influyen negativamente en la durabilidad de los morteros y hormigones, que contengan áridos reactivos constituidos por sílice hidratada amorfa como son los ópalos, calcedonias, andesitas cristobalitas, etc.

Dando lugar a compuestos expansivos que perjudican la adherencia entre los áridos y la pasta y que incluso pueden destruir al propio hormigón o mortero.

Aparte de este pernicioso, los álcalis solubles pueden ser peligrosos por:

- 1.- Producir eflorescencias
- 2.- Aumenta la retracción hidráulica
- 3.- Acelera el fraguado del cemento
- 4.- poder corroer a determinados vidrios puestos en contacto con los morteros u hormigones

Figura 2.14.-

Efectos de un exceso de álcalis, producen eflorescencia



Azufre (SO₃).-

El azufre procede principalmente de la pirita o marcasita (FeS₂) y de los sulfatos que suelen estar presentes en las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento y en el combustible utilizado (azufre pírítico, sulfato y orgánico) el componente arcilloso usado en la fabricación del clinker contiene, usualmente, pequeñas proporciones de compuestos de azufre, como piritas, sulfatos y más raramente como compuestos orgánicos.

Sin embargo, altos contenidos en azufre (por encima de los contenidos que se pueden combinar con los álcalis) dan lugar a: al fenómeno del falso fraguado, disminuye la hidraulicidad y la resistencia mecánica, por lo que conviene ser estricto en la comprobación de que no se rebasa la limitación empuesta por el pliego correspondiente, ver tabla 2.9.

Metales pesados.-

Los metales pesados (aportados por minerales conteniendo Pb, Zn, Cu, Ba), aún en pequeñas cantidades (pocas décimas por ciento) inhiben el fraguado del cemento, por lo que deben de eliminarse en los yacimientos los minerales metálicos suelen estar en venas o “rakes” y las piedras conteniéndolas pueden eliminarse durante el arranque si su cantidad no es demasiado grande.

Residuo Insoluble (RI).-

El residuo insoluble, señala el grado de perfección en las reacciones que se efectúan en el horno, a menor valor de residuo insoluble, el desarrollo de los minerales del Clinker es más perfecto. De igual forma, cuando se aumenta agregado al cemento el valor del residuo insoluble tiende a subir, puede variar según los parámetros utilizados por cada tipo de cemento, para nuestro medio no debe exceder del 5% de acuerdo a la NB-011.

Pérdida al fuego.- La pérdida al fuego puede provenir del vapor de agua o del CO₂ presentes en conglomerantes, siendo entonces expresiva de una meteorización del cemento.

Otros componentes

Los cloruros, fluoruros, fósforos, óxido de titanio y aluminato tricálcico, aunque éstos aparecen en menor proporción, no dejan de influenciar en el comportamiento del cemento, por lo que si no se controla puede tener desventajas como ser: El cemento puede tener problemas de estabilidad en volumen, disminuye las resistencias iniciales, debido a una velocidad de endurecimiento más lenta.

El aluminato tricálcico, produce excesivo calor de hidratación y es muy vulnerable a aguas con sulfato

Tabla 2.7.-

Grado de influencia de los componentes específicos del Clinker en las propiedades del cemento

Componente del Clinker	fraguado	Resistencia	Calor de hidratación	Estabilidad volumen	Durabilidad
C ₃ S	**	***	***		*
C ₂ S		**	*		
C ₃ A	***	***	***	**	***
C ₄ AF		**	*		**
Ca O libre				***	
Mg O libre				***	

Álcalis	**	***	**	→	***I
---------	----	-----	----	---	------

Fuente: Pliego español RC -75

La norma española nos muestra limitaciones y especificaciones respecto a las características físicas y mecánicas del cemento.

Tabla 2.8.-
Parámetros químicos según el pliego español RC -75

Determinaciones químicas	Limitación del pliego Español RC - 75	Peligro de empleo si no cumple la limitación	Recomendaciones si no cumple la limitación
Óxido de Calcio CaO	NO EXISTE (Se recomienda < 2 por 100)	Expansiones peligrosas a mediano o largo plazo	Comprobar el ensayo de expansión. Si cumple, consultar a especialista. Si no cumple RECHAZAR
Óxido magnésico MgO	MÁXIMO 5 por 100	Expansiones muy peligrosas a largo plazo	RECHAZAR
Trióxido de azufre SO ₃	MÁXIMO 4 por 100 Para P-350; PA-350; PA-450 y PA-550 MÁXIMO 4.5 por 100 Para P-450 y P-550	-Alteraciones en el fraguado y endurecimiento -Perdidas de resistencia -Falso fraguado	RECHAZAR (Si cumple estrictamente realizar ensayo de falso fraguado y comprobar resistencias. Atención al contenido en sulfatos de agua y áridos)
Pérdida al fuego	MÁXIMO 4 por 100 Para P-350; PA-350; PA-450 y PA-550 MÁXIMO 3.5 por 100 Para P-450 y P-550	-Retracciones fuertes -Menor defensa química -Retraso en el fraguado y primer endurecimiento	-Comprobar ensayo de fraguado -Puede utilizarse el cemento, pero es preferible RECHAZAR
Residuo insoluble	MÁXIMO 3 por 100 para P-350 y 2.5 por	-Retracciones fuertes	Puede utilizarse el cemento, pero es preferible RECHAZAR

Con formato: Fuente: 11 pto

	100 para P-450 y P-550	-Menor defensa química	
<u>Aluminato tricalcico AO_3</u>	<u>NO EXISTE (Valor normal inferior al 18 por 100)</u>	<u>-Excesivo calor de hidratacion</u> <u>-Muy vulnerable a aguas con sulfato</u>	<u>-Comprobar la finura de molido. Si es muy elevado RECHAZAR.</u> <u>-Si se acepta, extremar el curado</u> <u>-Consultar a especialista</u>
<u>Álcalis $K_2O Na_2O$ (expresados en Na_2O)</u>	<u>NO EXISTE (Valor normal inferior al 0.8 por 100)</u>	<u>-Manchas en el hormigón</u> <u>-Aumento de retracción</u> <u>-Corrosión de vidrios</u>	<u>-Si los riesgos no importan ACEPTAR</u> <u>-En obras de responsabilidad, consultar a especialista</u>

Con formato: Párrafo de lista, Izquierda, Sangría: Izquierda: 0,06 cm, Sangría francesa: 0,23 cm, Interlineado: 1,5 líneas, Con viñetas + Nivel: 1 + Alineación: 0,63 cm + Sangría: 1,27 cm

Con formato: Subíndice

Con formato: Párrafo de lista, Izquierda, Sangría: Izquierda: 0,06 cm, Sangría francesa: 0,23 cm, Interlineado: 1,5 líneas, Con viñetas + Nivel: 1 + Alineación: 0,63 cm + Sangría: 1,27 cm

Con formato: Subíndice

Con formato: Fuente: 11 pto

Fuente: Pliego español RC -75

La norma boliviana nos limita convenientemente con parámetros de contenidos de componentes secundarios más sobresalientes en el cemento. (Ver figura 2.9)

Tabla 2.9.-

Parámetros químicos del cemento según NB 011

Características químicas (según norma NB 061)	Tipo de cemento (1)					
	I	IP	IF	IS	IM	P
Pérdida por calcinación, en % máximo	5	7	20	-	-	8
Residuo insoluble, en % máximo	5	-	5		-	-
Trióxido de azufre (SO ₃), en % máximo	3,5	4	4	4	4	4

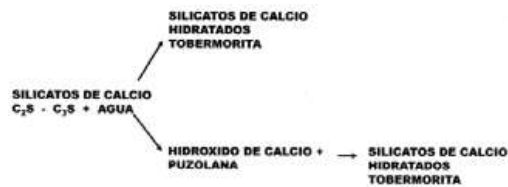
Oxido de magnesio (MgO), en % máximo	6	6	6	6	6	6
Puzolanidad para 8 días ó 15 días	-	-	-	-	-	positiva

Fuente: Instituto Bolivianos de Normalización y Calidad (IBNORCA)

2.5.3 Adiciones

Se describen en este acápite las adiciones más usadas a nivel general, pero no se debe olvidar que existen otras y que actualmente los investigadores siguen buscando y analizando nuevos subproductos para adiciones en el cemento.

En general las adiciones son materiales inorgánicos que se incorporan al clínker para una molienda conjunta o una vez pulverizados se adicionan al cemento; estos materiales que contienen sílice y alúmina reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento y forman nuevos compuestos resistentes (silicatos de calcio hidratados - tobermorita), gracias a lo cual las mezclas siguen adquiriendo resistencia e impermeabilidad.



De una forma algo equivocada o simplista, se han clasificado las adiciones en activas e inertes sin realizar un análisis profundo.

Generalmente, se consideran adiciones activas a las que reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (diagrama anterior) para formar más tobermorita sin considerar otras acciones físico-mecánicas que se producen con otras adiciones y en ocasiones actúan en forma química y epitáxica.

Entre las adiciones activas, sin duda, figuran las de escorias de alto horno, las que incluso tienen propiedades hidráulicas propias y las puzolanas naturales y artificiales.

Como adiciones inertes, actualmente de gran uso, están los fillers, sobre todo los calizos; se debe considerar que esos fillers son en razón de su constitución y composición afines al clínker y a la pasta

hidratada; resulta claro y entendible que se produzca un efecto epitáxico debido a la similitud de las estructuras.

Como ventaja adicional y no menos importante, los concretos con cementos adicionados presentan algunas ventajas tecnológicas con respecto a los tradicionales, sobre todo en referencia a resistencias mayores a largo plazo y mayor durabilidad gracias a la impermeabilidad y a las adiciones en sí mismas.

Ante estas ventajas, el mundo usa actualmente los cementos adicionados de manera muy extendida (alrededor del 85 %).

Las adiciones prescritas en la norma boliviana son: la escoria de alto horno, las puzolanas y los filler.

2.5.3.1 La escoria de alto horno

Las escorias de alto horno tienen un lugar preponderante en el contexto de las adiciones, ya que poseen hidraulicidad propia.

Así, la escoria finamente molida puede reaccionar en cierto nivel al ser mezclada con agua y endurecer sin necesidad de presencia de cal, hidróxido de calcio o cemento.

Las escorias de alto horno provienen de la fabricación del acero en la industria siderúrgica como un subproducto y contiene compuestos adecuados para una adición como los sílicoaluminatos cálcicos. Para servir como adición, las escorias deben cumplir con un índice de hidraulicidad, de acuerdo a lo establecido en las normas ASTM y ser de constitución vítrea, para lo cual el enfriamiento de la escoria al salir del horno debe ser brusco y no permitir un enfriamiento lento que produzca cristalización.

2.5.3.2 Las puzolanas

Bajo esta denominación, hoy en día están comprendidos materiales inorgánicos de origen natural o artificial; dentro de estas segundas, muchas constituyen subproductos de uso nulo en otros rubros, pero adecuados como adición al cemento, ya que son capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio que se libera en la hidratación de los silicatos de calcio.

El material debe cumplir con el índice de actividad puzolánica de 75%, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C311.

Puzolanas naturales.- Representadas por rocas volcánicas de diversa naturaleza o rocas de origen orgánico (las harinas fósiles de naturaleza silícica) como las tierras de diatomeas. Se debe considerar que no todo material volcánico es puzolana y deben realizarse pruebas de actividad puzolánica para su verificación.

Puzolanas artificiales.- Dentro de este grupo, se consideran algunos subproductos; dos de ellos sobresalen por su performance (rendimiento en situaciones determinadas) y uso.

Las cenizas volantes (fly-ash), procedentes de los humos del carbón de las centrales termoeléctricas, ampliamente usados a nivel mundial, existen de varios tipos más o menos eficientes, pero no necesitan molienda, lo cual las hace muy apreciadas.

La microsílíce o microsílíce (sílica fume) muy activa y fina, cien veces más fina que el cemento, se obtiene de los gases en los filtros de la industria del ferrosilicio. Debido a su gran fineza y actividad, son usadas en la preparación de concretos de alta resistencia y alta performance.

2.5.3.3 Los fillers

Material orgánico, natural o artificial, especialmente seleccionado, que mejora las propiedades de cemento (como ser la trabajabilidad o retención de agua). Pueden ser inertes o poseer propiedades ligeramente hidráulicas o puzolánicas.

Son adiciones que, en proporciones relativamente bajas, se añaden al clínker para incrementar la producción de cemento, lo que contribuye con el ahorro energético y el cuidado del ambiente.

Contrariamente a algunas opiniones, no se considera a los fillers del todo inertes, pues producen un efecto dispersante del cemento que favorece su hidratación; en cuanto a otro tipo de acción como la epitáxica, se está investigando al encontrar resultados alentadores en algunos tipos de filler calizo.

2.6 Características físicas y mecánicas de los tipos de cemento en Bolivia

2.6.1 Peso específico

Generalmente el peso específico del cemento portland es de aproximadamente 3.15. El cemento de escoria de alto horno y los cementos portland-puzolánicos pueden tener valores de pesos específicos de aproximadamente 2.90. El peso específico de un cemento no es indicador de la calidad del cemento; su uso principal se tiene en los cálculos de proporcionamiento de mezclas en volumen.

El peso específico del cemento se define como el peso de cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas. Se expresa en gramos por centímetro cúbico o en Kg/m^3 (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, 2004).

No se debe confundir los parámetros de peso específico y peso volumétrico, debido a que el peso específico hace referencia a la masa por unidad de volumen de la partícula aislada, mientras que el peso volumétrico hace referencia a la masa por unidad de volumen del conjunto de partículas y espacios vacíos entre partículas, la cual está en función de la forma de la partícula, el peso específico de esta y el acomodamiento de las partículas.

Este valor varía entre $3,10 \text{ g/cm}^3$ y $3,15 \text{ g/cm}^3$, para los cementos sin adiciones como es el caso de los cementos tipo II, III, IV y V este valor es inferior a $3,10 \text{ g/cm}^3$ para el cemento adicionado tipo I dependiendo del tipo de adición y el porcentaje de sustitución del Clinker. Cuando contiene otras adiciones para obtener los cementos adicionados, que son de menor peso específico a la del clinker puro, este valor desciende notablemente e igualmente ocurre para los cementos meteorizados. El peso específico del cemento no determina su calidad, pero analizado junto con la finura se puede deducir si contiene o no adiciones.

Para el proporcionamiento de la mezcla, puede ser más útil expresar el peso específico como densidad relativa, también llamada gravedad específica. La densidad relativa es un número adimensional determinado por la división de la densidad del cemento por la densidad del agua a 4°C , la cual es 1.0 g/cm^3 , 1000 Kg/m^3 o 62.4 lb/pies^3 (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, 2004). El peso específico del cemento es indispensable para el diseño de mezclas de concreto, además, es un indicador de que tan adicionado es el cemento.

La determinación del peso específico del cemento, se realiza por medio del frasco de Le Chatelier.

2.6.2 Finura del cemento y su influencia en la resistencia

Este parámetro está unido a la resistencia y al proceso de hidratación del cemento, ya que tiene gran incidencia en la velocidad de las reacciones químicas durante el fraguado y posterior endurecimiento del cemento (Sanchez de Guzman, 2001).

La hidratación del cemento es muy lenta, por lo tanto si el grano de cemento es muy grueso, su hidratación total puede llegar a tardar muchos años, e incluso puede que nunca se hidrate completamente, (Sanchez de Guzman, 2001), por tanto su rendimiento no será el máximo, debido a que el núcleo del grano permanecerá inerte.

Figura 2.15.-

Hidratación de los granos de cemento en función a la finura



Cuando el cemento es muy fino la velocidad de hidratación es muy rápida, siendo mayor su contribución a las resistencias iniciales, además, una mayor área de hidratación puede retener mejor el agua produciendo una menor exudación que un cemento grueso. El cemento compuesto por granos finos, presentan una alta retracción y calor de hidratación, los cuales son perjudiciales para la durabilidad debido a la fisuración que se puede presentar por estos dos efectos (González de la Cotera S, Adiciones Minerales del Cemento Portland, 1992).

Además un cemento más fino es susceptible al deterioro ante las condiciones ambientales durante periodos de almacenamiento largos (Sanchez de Guzman, 2001). Por lo tanto, una mayor molienda de las partículas de clinker representará un mayor costo.

La finura del cemento proporciona información acerca de la cantidad de adiciones de que posee el cemento, ya que las adiciones más comúnmente utilizadas como la escoria de alto horno o la ceniza volante son más finas que el clinker, por lo tanto, un cemento adicionado posee una mayor finura que un cemento compuesto únicamente por clinker y yeso.

También, un aumento en la finura eleva la cantidad de yeso requerida para obtener un efecto retardante adecuado, puesto que en cementos más finos existe más C_3A libre para una hidratación temprana. El contenido de agua de una pasta de consistencia normal es mayor en un cemento fino, pero un incremento en la finura del cemento mejora levemente la trabajabilidad de una mezcla de concreto (Neville, 1988).

La finura del cemento nos dice que tanta impureza posee, ya que a medida que el cemento tiene más impureza menor será la resistencia del concreto realizado con dicho cemento, el porcentaje máximo de impurezas admitido en el cemento es de 0,5. La finura del cemento influye en el calor liberado y en la velocidad de hidratación, a mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia. Los efectos que una mayor finura provoca sobre la resistencia se manifiestan principalmente durante los primeros siete días (Lopez, 2003).

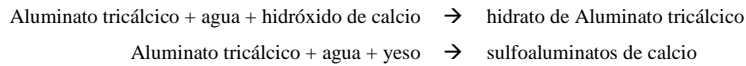
La finura se mide por medio del ensayo del turbidímetro de Wagner (ASTM C 115), el ensayo Blaine de permeabilidad al aire (ASTM C 204), o con la malla No.325 (45 micras) (ASTM C 430). Aproximadamente del 85% al 95% de las partículas de cemento son menores de 45 micras. En el pliego español RC-75, la finura también se la mide por el residuo en tamiz 4900 mallas por cm^2 (Tamiz 200), este residuo debe ser menor al 15 por 100.

En el presente trabajo se determinará la finura de cemento, mediante el tamizado de la malla 40 y 200

2.6.3 Hidratación del cemento y su influencia en la resistencia

Cuando se agrega agua al cemento Pórtland, los compuestos básicos presentes se transforman en nuevos compuestos por reacciones químicas. Como por ejemplo:

COMBINACIÓN	REACCIONES
Silicato tricálcico + agua	→ gel de tobermorita + hidróxido de calcio
Silicato dicálcico + agua	→ gel de tobermorita + hidróxido de calcio
Ferroaluminato tetracálcico+ agua + hidróxido de calcio	→ hidrato de calcio



Las dos primeras reacciones, donde intervienen los silicatos de calcio, que constituyen alrededor del 75% por peso del cemento Pórtland, reaccionan con el agua para producir dos nuevos compuestos: gel de tobermorita el cual es no-cristalino e hidróxido de calcio que es cristalino. En la pasta de cemento completamente hidratada, el hidróxido de calcio constituye el 25% del peso y el gel de tobermorita, alrededor del 50%.

La tercera y cuarta reacciones muestran cómo se combinan los otros dos compuestos principales del cemento Pórtland con el agua para formar productos de reacción.

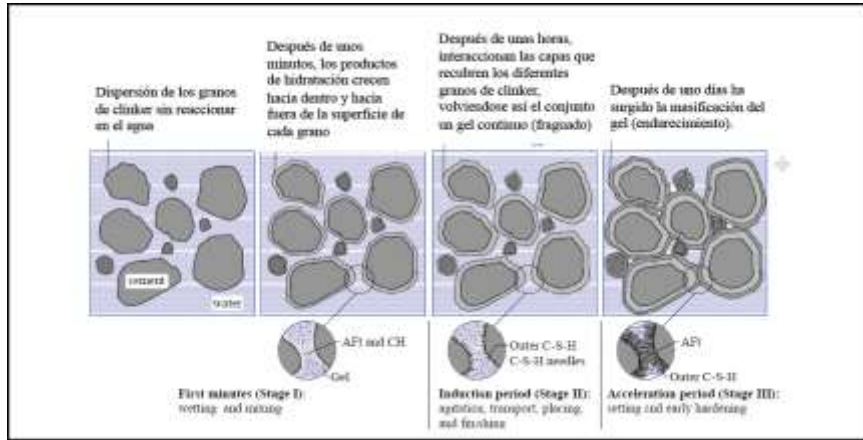
En la última reacción aparece el yeso, compuesto agregado al cemento Pórtland durante la trituración del clinker para controlar el fraguado.

Cada producto de la reacción de hidratación desempeña una función en el comportamiento mecánico de la pasta endurecida. El más importante de ellos es el compuesto llamado gel de tobermorita, el cual es el principal compuesto aglomerante de la pasta de cemento, porque liga o aglutina entre sí a todos los componentes. Este gel es una sustancia dividida, muy fina, con estructura coherente, con una composición y estructura semejantes a la de un mineral natural, llamado tobermorita.

La rapidez de hidratación es afectada, además de la composición, por la finura del molido, la cantidad de agua agregada y las temperaturas de los componentes al momento de mezclarlos. Para lograr una hidratación más rápida, los cementos se trituran hasta dejarlos muy finos. El diámetro promedio de un grano de cemento Pórtland proveniente de la trituración del clinker es de alrededor de 10 μm . Las partículas del producto de hidratación, como el gel de tobermorita, son del orden de una milésima de ese tamaño, por lo que su enorme superficie específica, de alrededor de 3 millones de cm^2 por gramo, produce fuerzas de atracción entre las partículas. Estas fuerzas ocasionan que las partículas de gel de tobermorita se adhieran entre sí y con otras partículas introducidas en la pasta de cemento.

Figura 2.16.-

Proceso de hidratación del cemento (Las cuatro fases en el fraguado y endurecimiento del cemento Portland)



El primer compuesto en reaccionar con el agua es el aluminato tricálcico (C_3A), que en presencia de yeso, forma pequeñas agujas de etringita (sulfoaluminato de calcio) alrededor del grano de cemento. Posteriormente a este proceso se inicia el fraguado de la pasta de cemento (Suarez Sidalgo, 2010).

Los siguientes compuestos en reaccionar son la alita (C_3S) y la belita (C_2S), cuyas reacciones se presentan al finalizar el fraguado de la pasta, estas reacciones son importantes, para el desarrollo resistente y durable de un hormigón o mortero. La hidratación de la alita y la belita producen silicatos cálcicos hidratados, representado por la abreviatura C-S-H, denominada como geles de silicoaluminatos o gel de tobermorita gel. La tobermorita es la responsable del endurecimiento y resistencia mecánica en la pasta de cemento, constituyendo entre el 50% al 60% del volumen de los sólidos en la pasta de cemento completamente hidratada (Suarez Sidalgo, 2010).

La hidratación de los silicatos también produce hidróxido cálcico o pòrtlandita (CH), este producto no contribuye al desarrollo de resistencias mecánicas en la pasta de cemento, pero le confiere a la pasta de cemento la alcalinidad necesaria para proteger el acero de refuerzo embebido en el concreto, la pòrtlandita ocupa entre un 20% a 25% del volumen total de los sólidos en la pasta de cemento hidratado (Suarez Sidalgo, 2010).

Por tanto, se puede decir que hasta los 3 días de edad, el desarrollo de resistencias se debe a la hidratación del C_3S y C_3A ; hasta los 7 días, prácticamente por el aumento de la hidratación del C_3S ; hasta los 28 días, el incremento se debe principalmente al C_3S , con pequeña contribución del C_2S y, después de los 28 días el incremento se debe a la hidratación del C_2S (Sanchez de Guzman, 2001).

2.6.3.1 Hidratación del cemento con adición puzolánica

Las propiedades de las puzolanas (incluso las naturales) varían considerablemente, dependiendo de su origen. En la zona cordillerana de nuestro país existen yacimientos de puzolana natural proveniente de erupciones volcánicas que poseen una adecuada actividad puzolánica.

Las puzolanas, incorporadas dentro del CPP (cemento p rtland puzolánico) tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria donde se combinan con el $(OH)_2Ca$ formado durante la hidratación de los compuestos s lico-calcáreos (C_3S y C_2S) denominada primaria (1), resultando compuestos SCH (s lico-calcáreos-hidratados):

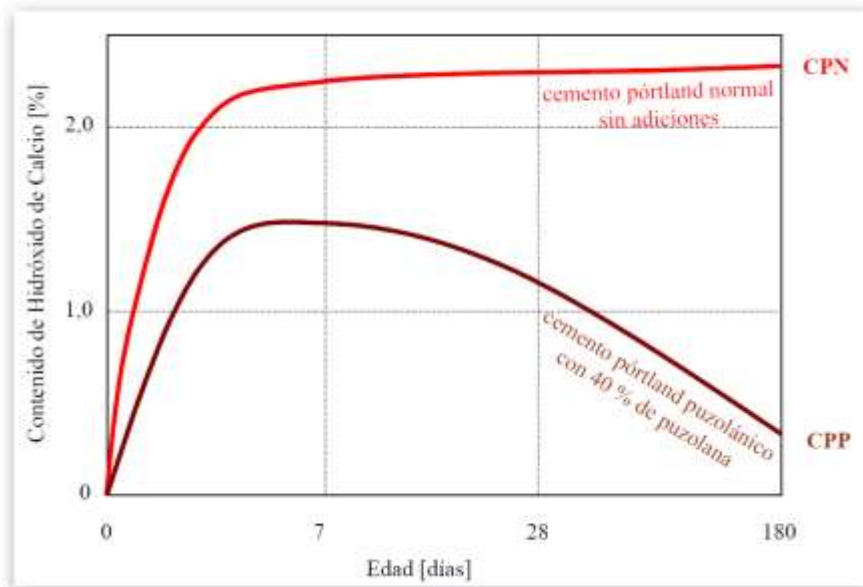
Hidratación primaria: $C_nS + H_2O \rightarrow \text{gel SCH} + (OH)_2Ca$ (1)

Hidratación secundaria: $SiO_2 + (OH)_2Ca + H_2O \rightarrow \text{gel SCH}$ (2)

El SiO_2 es aportado por la puzolana y el $(OH)_2Ca$ –hidróxido de calcio- es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de $(OH)_2Ca$. En el mismo sentido, la figura N  2.18 muestra que a medida que avanza el proceso de hidratación, la cal libre disminuye, lo que indica la formación de productos de hidratación (en su mayor parte SCH y aluminosilicatos de calcio en menor medida) a partir de la puzolana. Es evidente que el uso de una puzolana de buena calidad asegura, no solamente una menor cantidad de cal libre en la pasta de cemento sino que además se obtiene un mayor volumen de productos SCH por lo cual se obtiene –a igual relación a/c- una menor porosidad de la pasta debido a un refinamiento de poros y, consecuentemente, menor permeabilidad respecto del CPN (cemento p rtland normal) producido a partir del mismo clinker p rtland. Esto significa la obtención de una pasta de cemento más compacta, resistente y durable.

Figura 2.18.-

Cambios en el contenido de $(OH)_2Ca$ durante la hidratación del CPP - cemento p rtland puzolánico
(Lea 1971).



Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

2.6.3.2 Calor de hidratación y su influencia en la resistencia

La reacción del cemento con el agua es exotérmica; es decir, se genera calor en la reacción, durante la hidratación del cemento.

La relación agua/cemento, finura del cemento y temperatura de curado también son factores que intervienen. Un aumento de la finura, del contenido de cemento y de la temperatura de curado aumenta el calor de hidratación. El cemento portland puede liberar calor por muchos años, siendo la tasa de generación de calor mayor en las edades tempranas. Se genera una gran cantidad de calor en los tres primeros días, con la mayor tasa de liberación de calor normalmente ocurriendo a lo largo de las primeras 24 horas (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, 2004).

Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable de la temperatura del concreto. Este aumento de temperatura puede ser indeseable, pues después del endurecimiento, el enfriamiento no uniforme de la masa de concreto hasta la temperatura ambiente puede crear tensiones

de tracción (esfuerzos de tensión) indeseables. Por otro lado, el aumento de la temperatura en el concreto causado por el calor de hidratación es frecuentemente beneficioso en clima frío, pues ayuda a mantener las temperaturas favorables para el curado (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, 2004).

Se puede sacar ventaja de esta propiedad, durante el tiempo frío, para mantener temperaturas adecuadas de curado mediante el aislamiento que brinda el encofrado. No obstante, para las cortinas de presas y otras estructuras de hormigón masivo, deben tomarse medidas para reducir o eliminar el calor mediante el diseño y métodos de construcción adecuados, esto puede comprender la circulación de agua fría u otros medios de enfriamiento. Otro método para controlar el desprendimiento de calor es reducir el porcentaje de compuestos que generan elevado calor de hidratación, como el C₃A y el C₃S, y usar un cemento con menos finura.

El uso de agregado grande ($\leq 15\text{cm}$) también ayuda a reducir el requisito del cemento y el calor consecuente, al reducir la cantidad de agua, y por tanto menos cemento, con la misma relación agua/cemento.

A continuación se dan los valores para la cantidad total de calor desprendido durante la hidratación completa del cemento:

Silicato tricálcico	120 cal/gr	Ferroaluminato tetracálcico	100 cal/gr
Silicato dicálcico	62 cal/gr	Cal Libre	279 cal/gr
Aluminato tricálcico	207 cal/gr		

Si se considera que la cantidad de calor generada durante los primeros 7 días de hidratación para el cemento del Tipo I es el 100%, entonces:

Tipo II, moderadamente resistente al sulfato	85-94%
Tipo II, Calor moderado de hidratación	75-85%
Tipo III, alta resistencia temprana	150%
Tipo IV, bajo calor de hidratación	40-60%
Tipo V, resistente al sulfato	60-90%

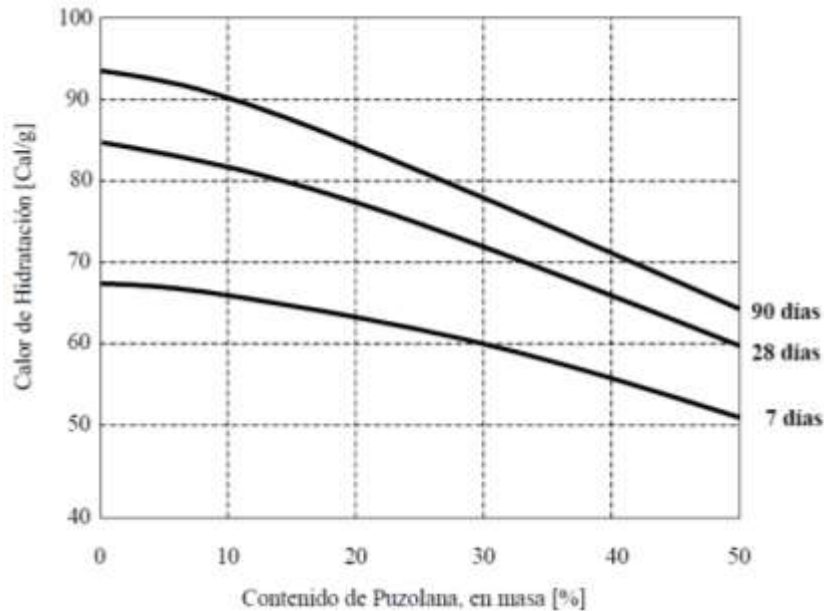
Los porcentajes son un poco mayores después de, más o menos, un año.

2.6.3.3 Calor de hidratación del cemento con adición puzolánica

Cuando se construyen estructuras de hormigón masivo (bases, grandes plateas de fundación, diques, presas, etc.) resulta fundamental limitar la temperatura que adquirirá ese hormigón durante las primeras edades, de manera de limitar las deformaciones y tensiones que se producirán en la estructura por efectos térmicos y su consecuente riesgo de fisuración. Adicionalmente a las prácticas constructivas que pueden ayudar a disipar el calor (metodología de hormigonado, incorporación de cañerías de enfriamiento dentro de la masa del hormigón, etc.) o que permitan soportar las deformaciones / tensiones (armadura adicional) o limitar la temperatura de colocación del hormigón entre otras, resulta necesario trabajar sobre el diseño de la mezcla de hormigón de manera de minimizar el desarrollo de calor. En este aspecto, se puede trabajar limitando el CUC (contenido unitario de cemento) y el calor de hidratación del cemento pórtland. Sin duda las estructuras masivas más exigidas son las presas/diques de hormigón simple donde se utilizan cementos BCH (de bajo calor de hidratación) y/o se utilizan importantes contenidos de adiciones minerales (en general algún tipo de puzolana o escoria granulada de alto horno).

Figura 2.19

Efecto de la sustitución con puzolana natural de origen italiano en el calor de hidratación del cemento pórtland (Massazza & Acosta 1979).



Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

La figura N° 2.19 muestra la influencia del reemplazo de puzolana natural en el calor de hidratación del cemento pòrtland. La obtención de un CPN (BCH) –cemento pòrtland normal, de bajo calor de hidratación- implica necesariamente la fabricación de un clinker pòrtland “especial” (alto contenido de C_2S y bajo C_3S) bastante diferente del clinker que se produce habitualmente para hacer otros tipos de cemento, lo que incrementa su costo considerablemente. El uso de CPP (BCH) –cemento pòrtland puzolánico de bajo calor de hidratación- mejora sensiblemente los costos a similares valores de calor de hidratación lo que sin duda resulta una clara ventaja y explica la altísima participación del CPP en obras de hormigón masivo.

2.6.4 Tiempo de fraguado y su influencia en la resistencia

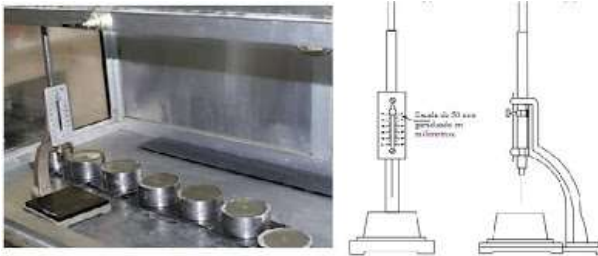
El fraguado es la pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento. La velocidad de fraguado viene limitado por las normas estableciendo un periodo de tiempo, a partir del amasado, dentro del cual debe producirse el principio y fin del fraguado. Este proceso es controlado por medio del ensayo de la aguja de Vicat (NB 063; ASTM C191), (Figura. 2.20 y 2.21), que mide el inicio y fin del fraguado en mediciones de penetraciones cada 15min, de la siguiente manera:

Inicio del Fraguado.- Cuando la aguja no penetra más de 25 mm en la pasta. Se recomienda que una vez iniciado el fraguado el cemento ya debe estar totalmente colocado y no debe moverse de su lugar, ya que se originarán fisuras.

Fin del Fraguado.- Cuando la aguja no deja marcas e la superficie de la pasta.

Figura 2.20.-

Ensayo para la determinación del tiempo de fraguado mediante el aparato de Vicat



Como resultado del ensayo puede dibujarse un diagrama mostrando las mediciones en la escala graduada del aparato de Vicat, como se muestra en la figura 2.21:

Figura 2.21.-

Curva de fraguado del cemento



Fuente: P. Jiménez Montoya, “Hormigón armado” 13ª Edición

Otro ensayo que establece el tiempo de fraguado del cemento es el de las agujas de Gillmore (ASTMC266).

Los parámetros dados por la NB 011 para el inicio y fin del fraguado se muestran en la tabla 2.10

Tabla 2.10.-

Parámetro de finura e inicio y fin de fraguado del cemento dado por la NB 011

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

Fuente: Instituto Bolivianos de Normalización y Calidad (IBNORCA)

Factores que influyen en el tiempo fraguado:

1. finura del cemento.- cuanto mayor sea la finura, menor será el tiempo de fraguado.
2. temperatura.- a mayor temperatura, menor tiempo de fraguado
3. meteorización.- causado por el almacenamiento prolongado, aumenta la duración del tiempo de fraguado
4. materia orgánica.- que puede provenir del agua o de la arena, retrasa el fraguado y puede llegar a inhibirlo.
5. agua de amasado.- a menor cantidad corresponde un fraguado más corto.
6. humedad ambiente.- a menor humedad menor tiempo de fraguado.

En casos donde el Hormigón debe ser trasladado una distancia considerable, se debe tomar en cuenta el tiempo de inicio del fraguado, debiéndose considerar el empleo de retardadores de fraguado.

Falso Fraguado o endurecimiento prematuro.- Se manifiesta por un endurecimiento rápido del hormigón poco después del mezclado. Si este es resultado de la deshidratación del yeso durante el proceso de molido, por lo general desaparecerá con un mezclado adicional. Si es resultado de la interacción cemento-aditivo, es posible que se requieran agua y mezclado adicionales para mitigar el problema.

Fraguado por compactación.- En ocasiones, en el manejo del cemento a granel, se encuentra que el cemento presenta cierta dificultad para fluir o que fluye mal. Este “fraguado por compactación”, no tiene efecto sobre las propiedades del cemento para producir el hormigón. El problema suele ser la humedad, instalaciones de manejo inadecuadamente diseñadas o haber dejado que el cemento se asentara, por demasiado tiempo sin moverlo.

El fraguado por compactación puede presentarse en donde, durante el tránsito, la vibración ha eliminado la mayor parte del aire que rodea las partículas de cemento, como en los vagones de ferrocarril. Se puede tener una situación semejante en los silos de almacenamiento. Por lo general, la aplicación de chorros de aire esponjará bastante el cemento como para permitir que fluya.

El uso de sustancias para ayudar a la pulverización del cemento ha reducido de manera significativa los problemas de flujo. Los sistemas modernos de aireación, los vibradores adecuados para los depósitos y los depósitos y silos correctamente diseñados experimentan pocos problemas, en caso de haberlos.

2.6.5 Estabilidad de volumen del cemento y su influencia en la resistencia

La estabilidad de volumen de cemento se refiere a la capacidad de una pasta endurecida para conservar su volumen después del fraguado. La expansión destructiva retardada o falta de sanidad es provocada por un exceso en las cantidades de cal libre o de magnesia. Casi todas las especificaciones para el cemento portland limitan los contenidos de magnesia (Ver tabla 2.9), así como la expansión registrada en la prueba de autoclave (Ver tabla 2.11). Desde que en 1943 se adoptó la prueba de expansión en autoclave (ASTM C 151), prácticamente no han ocurrido casos de expansión anormal que puedan atribuirse a falta de sanidad.

Tabla 2.11.-
Parámetros físicos del cemento según NB 011

Tipos	Expansión	
	Autoclave, en % máximo (según norma NB 471)	Le Chatelier, en mm máximo (según norma NB 643)
I	1	8

IP,IF,P	1	8
---------	---	---

Fuente: Instituto Bolivianos de Normalización y Calidad (IBNORCA)

Pese a que todos los cementos presentan deformaciones durante el equilibrio termo- higrométrico, estas son mínimas y sin efectos perjudiciales, sin embargo el exceso de algunos compuestos como la cal libre, el óxido de magnesio, el yeso o sulfato de calcio, pueden producir deformaciones considerables luego del fraguado del cemento, los cuales pueden conllevar a la desintegración de los morteros y concretos (González de la Cotera S, Adiciones Minerales del Cemento Portland, 1992).

El óxido de magnesio conocido como periclusa, se forma en la masa de cemento, cuando el proceso del enfriamiento del clinker se realiza lentamente, mientras que la cal libre, se presenta en un proceso industrial técnicamente desajustado (Sanchez de Guzman, 2001).

La determinación de la expansión se realiza con el ensayo del autoclave (NB 471), que consiste en medir la deformación en probetas prismáticas de pasta de 2,5 x 2,5 x 25,4 cm, sometida a una aceleración en el proceso de hidratación mediante temperaturas y presiones altas, y los valores obtenidos del cambio de longitud en porcentaje se denomina expansión en autoclave.

Debido a los inconvenientes que presenta el ensayo en autoclave se ha utilizado ampliamente el ensayo de las agujas de Le Chatelier (NB 643), la cual mide el cambio de volumen en probetas cilíndricas de 3,0 cm de diámetro y 0,5 cm de alto, curado en agua a temperatura ambiente y en ebullición. Cuando el ensayo se realiza a temperatura ambiente la expansión se debe a excesos de cal y cuando se realiza a temperatura de ebullición la expansión se debe a la presencia de cal libre y periclusa.

De las materias primas que se añaden al horno la caliza es la que contiene mayor cantidad de cal de la que puede combinarse con los óxidos ácidos, por lo tanto, el exceso permanecerá en estado libre. Esta cal calcinada se hidrata en forma lenta y, como la cal apagada ocupa mayor volumen que el óxido de calcio original, da lugar a una expansión. A los cementos que experimentan esta expansión se les conoce como cementos con variación de volumen (Neville, 1988).

De acuerdo (Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, 2004) a estos autores a la expansión del volumen la llaman “sanidad” que se refiere a la habilidad de la pasta de cemento en mantener su volumen. La falta de sanidad o la expansión destructiva retardada es

causada por la cantidad excesiva de cal libre o magnesia súper calcinadas. La mayoría de las especificaciones para cemento portland limitan el contenido de magnesia (periclasa) y a la expansión máxima que se mide por el ensayo de expansión en autoclave.

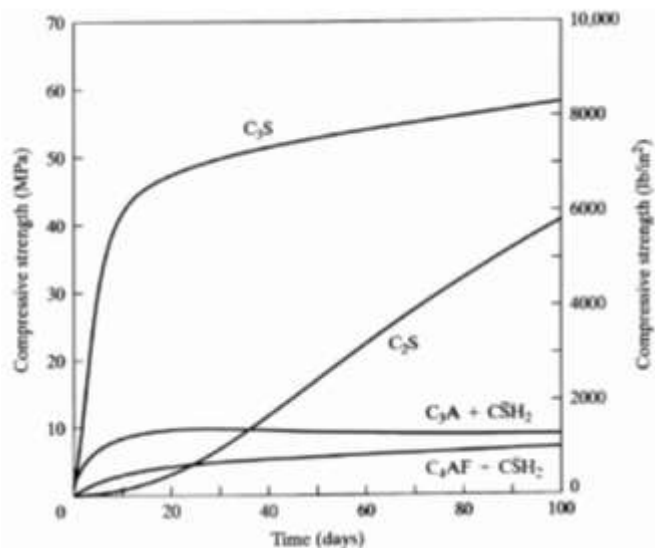
2.6.6 Resistencia mecánica del cemento

La aplicación fundamental del cemento es la fabricación de morteros y hormigones destinados a la construcción de elementos en los que, generalmente, la propiedad más interesante es su resistencia mecánica.

Por consiguiente, los cementos, junto con los áridos, tienen que conferírseles y esto lo logran porque al amasarlos con agua dan lugar a pastas que endurecen y tienen una gran cohesión y, cuya porosidad va disminuyendo a la vez que las resistencias mecánicas van creciendo con el paso del tiempo, presentando, además, las mismas una gran adherencia con los áridos que componen el mortero y el hormigón.

Todas las fases del cemento que hidratan pueden, potencialmente, contribuir al desarrollo de resistencias. El desarrollo de resistencias iniciales (es decir, hasta 28 días a 20 °C) está dominado por la hidratación del C_3S soportado por el C_3A , mientras las fases de C_2S y C_4AF , que hidratan más lentamente, contribuyen al desarrollo de resistencias finales (Ver figura 2.22).

Figura 2.22.- Resistencia a la compresión de componentes de cemento puro En función del tiempo de curado (endurecimiento).



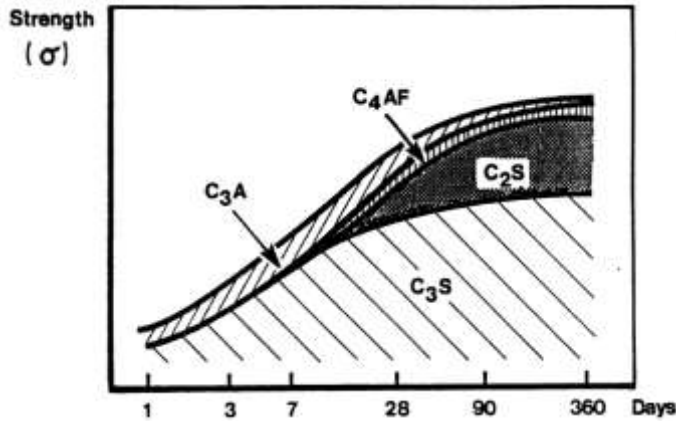
Fuente: Chemical Commission Technical Studies Committee of the Cement Industry (CETIC, 1978)

La figura 2.23 muestra el desarrollo de resistencia de los cuatro componentes mayoritarios del cemento, así como la contribución de los diferentes minerales a la resistencia en función del tiempo. Los álcalis y, sobre todo, los álcalis solubles, combinados como sulfatos, tienen una influencia pronunciada en el desarrollo de resistencias. Un aumento del contenido incrementará las resistencias iniciales (típicamente hasta 3 días de endurecimiento), pero reducirá las resistencias finales. El efecto beneficioso en las resistencias iniciales es un resultado del efecto acelerante de los procesos de hidratación iniciales, mientras los efectos negativos en las resistencias finales son, por lo menos, en parte causados por un efecto retardador en los procesos de hidratación finales.

Figura 2.23.-

Contribución (semi-cuantitativa) de los cuatro minerales de Clinker a la resistencia.

(Composición del Clinker: 60 % C₃S, 20 % C₂S, 10 % C₃A y 10 % C₄AF)



Fuente: Chemical Commission Technical Studies Committee of the Cement Industry (CETIC, 1978)

Una lista de los factores más importantes para el desarrollo potencial de resistencias debe incluir:

- 1.- Los contenidos relativos de los cuatro minerales de clinker dominantes, C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF . Los contenidos dependen de la composición de la harina cruda y la eficacia de la cocción.
 - 2.- La reactividad de los minerales principales del Clinker, que depende de la entrada en solución sólida de iones ajenos en los minerales y la historia térmica de la cocción.
 - 3.- El contenido y la distribución de los álcalis, que dependen del contenido de SO_3 y de álcalis.
- Contribución de los cuatro minerales del Clinker para el desarrollo de la resistencia

C_3S : Es el mayor contribuyente al desarrollo de la resistencia durante las primeras 4 semanas. 80% reaccionan en los primeros 10 días (ver figura 2.22).

C_2S : Influye sobre el aumento en resistencia de la cuarta semana en adelante. 80% reacciona en 100 días (ver figura 2.22).

Alrededor de un año de edad dos componentes contribuyen aproximadamente en la misma medida en la resistencia final.

C_3A : Contribuye a la resistencia de la pasta del cemento del primer al tercer día. 80% reacciona en 6 días (ver figura 2.22).

C_4AF : No tiene contribución apreciable en la resistencia. 80% reacciona en 50 días (ver figura 2.22).

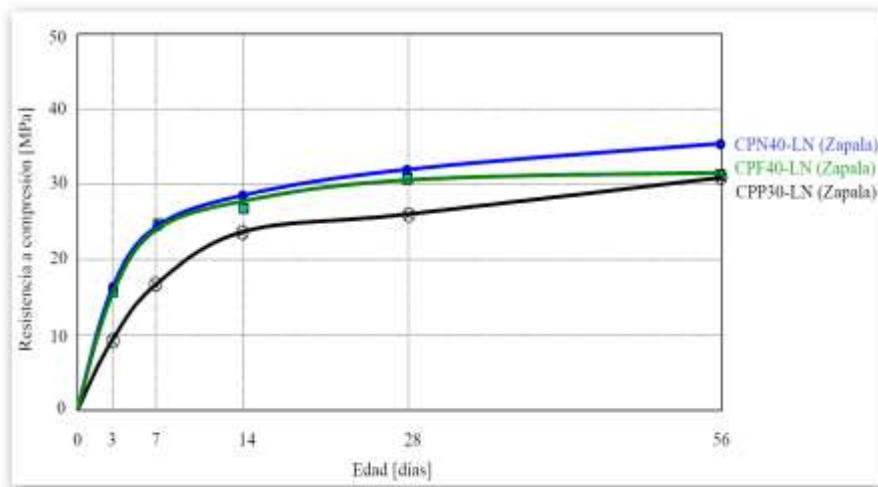
Conociendo las distribuciones a la resistencia de los componentes presentes individualmente se puede predecir la resistencia del cemento en base a su composición. Esto es posible usando la fórmula del tipo:

$$\text{Resistencia} = a (\text{C3S}) + b (\text{C2S}) + c (\text{C3A}) + d (\text{C4AF})$$

Donde los símbolos entre paréntesis representan los porcentajes en peso de la composición, u a, b, etc. Son constantes representando la contribución en porcentaje de los respectivos componentes a la resistencia de la pasta de cemento.

Figura 2.24.-

Desarrollo de resistencia en el tiempo de hormigones con similar CUC (contenido unitario de cemento) y asentamiento sin aditivos. La demanda de agua se ajustó a fin de lograr un asentamiento constante.



Fuente: Centro Técnico LOMA NEGRA, 2000 - 2001

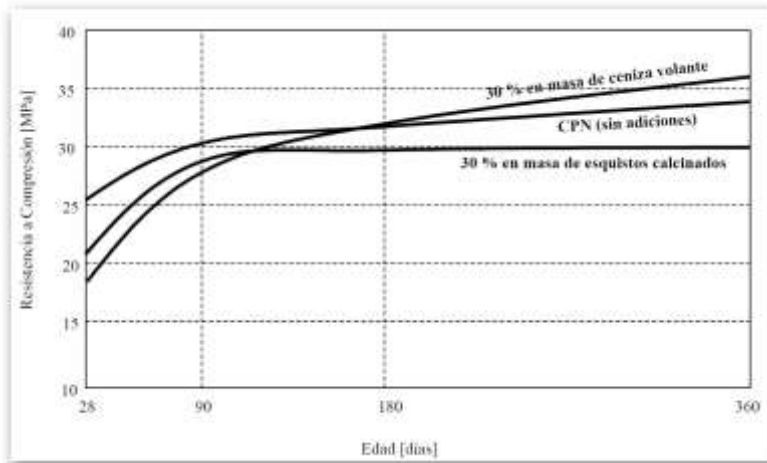
Ya se explicó anteriormente el mecanismo de hidratación del CPP, por lo cual resulta evidente que el desarrollo de resistencia depende –entre otros aspectos- de la velocidad de hidratación de las partículas de clinker pórtland -donde intervienen fundamentalmente su composición química y

tamaño- y del tipo, contenido y finura de la puzolana. Generalmente, el uso de CPP supone un desarrollo de resistencia más “lento” que el CPN debido a que la puzolana se hidrata en forma retardada respecto del clinker. En la figura N° 2.24 puede observarse el desarrollo de resistencia de tres (3) hormigones de similares características elaborados a partir de CPN40 (cemento p rtland normal, categoría 40), CPF40 (cemento p rtland con “filler” calcáreo, categoría 40) y CPP30 (cemento p rtland puzolánico, categoría 30). El hormigón elaborado a partir de CPP presenta un desarrollo de resistencia más “lento” que las otras opciones, no obstante luego de 56 días de edad, iguala la resistencia del CPF y la superar  a partir de esa edad. El mismo fenómeno se dará respecto del CPN a edades más avanzadas como muestra la figura N° 2.25.

Otro aspecto que se desprende de las figuras N° 2.24 y 2.25, es el real aprovechamiento de la importante resistencia final que adquieren los hormigones elaborados con CPP a través de una adecuada especificación de la edad de diseño del hormigón. Convencionalmente, los ingenieros estructuralistas están acostumbrados a especificar valores de resistencia a 28 días. En el caso del uso de CPP se recomienda especificar edades de diseño mayores (por ejemplo: 56   90 días). Esta recomendación, utilizada internacionalmente para el diseño de todo tipo de hormigones

Figura 2.25.-

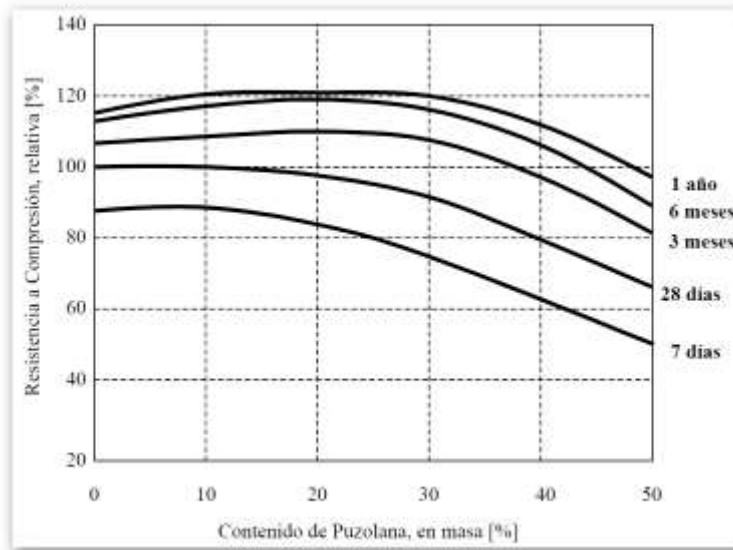
Efecto de la puzolana natural en la resistencia a compresión del hormigón (Elfert 1974).



Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

Figura 2.26:

Efecto de la sustitución de cemento pórtland con puzolana natural de origen italiano en la resistencia a compresión del mortero ISO (Massazza & Acosta 1979).



Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

La figura N° 2.26 muestra claramente que al aumentar la adición de puzolana, el desarrollo de resistencia se hace más “lento” lográndose los mejores desempeños –desde este punto de vista- con reemplazos entre 10 y 30 %.

2.7 Durabilidad

La durabilidad es la propiedad más importante del hormigón. El ACI 201.2R-92 la define como “la habilidad de resistir la acción del medioambiente, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro”. Para completar esta definición debe incluirse el concepto de mantener las condiciones de servicio por el ciclo de vida para el cual fue proyectado. De acuerdo a lo mencionado, el concepto de durabilidad es muy amplio y bastante difícil de medir. No obstante, de acuerdo al medio al cual estará sometido, existen diferentes métodos de medición que resultan útiles para evaluar el desempeño del hormigón y de qué manera contribuirá a la durabilidad de la estructura. Entre las propiedades del hormigón que contribuyen con la durabilidad se destacan la permeabilidad, resistencia a los sulfatos, reacción álcali-agregado y susceptibilidad a la fisuración.

2.7.1 Permeabilidad

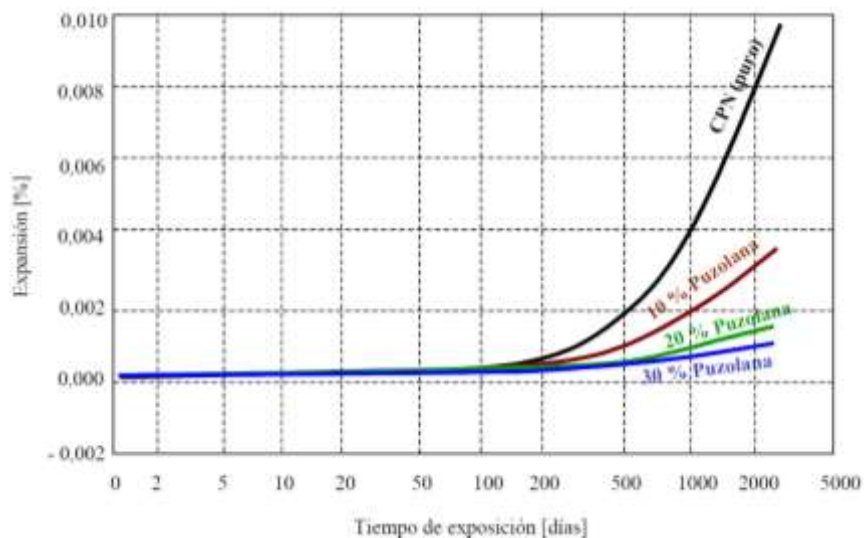
Evidentemente la permeabilidad del hormigón depende –además de los agregados- de la calidad de la pasta de cemento, destacándose la influencia de la relación *a/c* (agua / cemento). En un segundo orden de magnitud, existe cierta influencia del tipo de cemento p rtland utilizado. Resulta evidente que, en general, a igual relación *a/c*, los hormigones elaborados con CPP presentan un mayor volumen de gel SCH produciéndose un refinamiento de poros que se traduce en una menor permeabilidad, destacándose el excelente comportamiento que presentan los hormigones elaborados con este cemento ante el ataque del agua de mar debido a su menor permeabilidad al agua y a los cloruros.

2.7.2 Resistencia a los Sulfatos

Es conocido que los cementos con adiciones minerales (puzolanas naturales o artificiales y escoria granulada de alto horno) son preferidos ante el ataque fuerte por sulfatos debido a su menor permeabilidad y capacidad de reducción de expansión por sulfatos incluso al utilizar clinker p rtland de contenido relativamente alto de AC_3 . La figura N  2.27 muestra el efecto de la puzolana natural en la reducción de la expansión por sulfatos en prismas de mortero sometidos por más de 5 años a una solución de $MgSO_4$ al 1%.

Figura 2.27:

Efecto de la sustitución de cemento p rtland por puzolana natural de Italia en la expansión de morteros 1:3 (Massazza & Costa 1979).



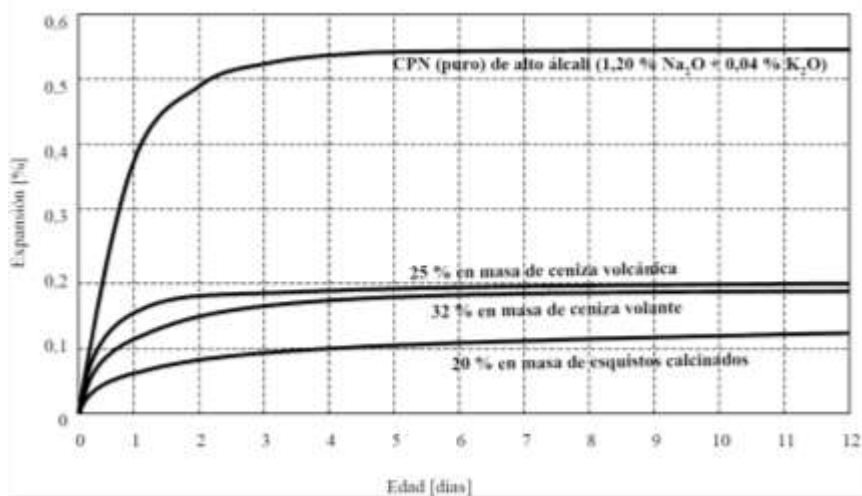
Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

2.7.3 Reacción álcali-agregado

La norma IRAM 1668 (Instituto Argentino de Normalización) fija como requerimiento cierta capacidad de reducción de la reacción álcali-agregado por parte de la puzolana, por lo cual, independientemente de las propiedades especiales que pueda tener un CPP, al menos su utilización supone un mejor desempeño que un CPN fabricado a partir del mismo clinker p rtland. Esta idea se refuerza en la figura N  2.28 donde se observa una importante reducción de la expansión cuando se reemplaza un CPN de alto contenido de álcalis ($Na_{equivalente} = 1,23 \%$) combinado con arena de trituración vidrio Pyrex altamente reactiva. Cuando se necesita utilizar en la elaboración de hormigón agregados calificados como potencialmente reactivos en estructuras que estarán sometidos a humedad en forma constante, deben tomarse ciertas precauciones entre las que se encuentran la utilización de un cemento p rtland de bajo álcali ($Na_{equivalente} < 0,60 \%$) cuya efectividad debe ser probada y solamente resulta válida cuando no existe la posibilidad de incorporación de álcalis a través del medio o la utilización de un cemento p rtland RRAA con adiciones: CPP (RRAA) –cemento p rtland puzolánico, resistente a la reacción álcali-agregado- o CPE (RRAA) o CAH (RRAA) cuando existe la posibilidad de incorporación de álcalis a través del agua o suelo de contacto.

Figura 2.28:

Efecto de la puzolana natural en la expansión relativa de barras de mortero elaboradas con cemento p rtland de alto álcali y arena de vidrio Pyrex triturado (Elfert 1974).

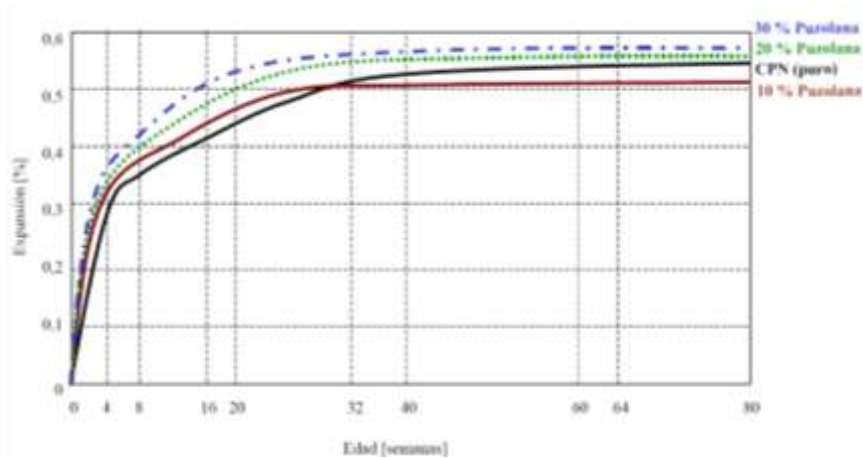


Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

2.7.4 Tendencia a la Fisuración

Figura 2.29:

Contracción por secado en prismas de hormigón elaborados con cemento p \acute{o} rtland con distintos contenidos de puzolana natural de Santorin, Italia (Mehta 1981).



Fuente: ACI 232.1R-94: Use of Natural Pozzolans in Concrete

La tendencia a fisuración de un hormigón depende fundamentalmente de la dosificación utilizada, las dimensiones del elemento estructural y las condiciones de protección y curado. Evidentemente las losas (de edificios, pisos o pavimentos) son los elementos más sensibles a la fisuración por retracción

plástica, alabeo térmico y contracción por secado, mientras que los elementos masivos están expuestos a la fisuración térmica como se explicó anteriormente.

La retracción plástica depende, en gran medida, de la relación entre la velocidad de exudación con la velocidad de evaporación superficial del hormigón es evidente que la velocidad de exudación depende de las características de la mezcla, destacándose el contenido y distribución de finos. El uso de CPP hace que los hormigones tiendan a una baja velocidad de exudación, aumentándose relativamente la tendencia a la fisuración por retracción plástica. No obstante, la ejecución de una adecuada protección y curado (de acuerdo con las reglas del arte) minimizan o eliminan la posibilidad de este tipo de fisuras.

La contracción por secado del hormigón depende de los productos de hidratación del cemento pórtland, el contenido de pasta y, fundamentalmente, del contenido de agua de la mezcla. La figura N° 2.29 muestra que el uso de CPP no implica una diferencia significativa de comportamiento respecto del CPN, sin embargo, aquellos hormigones que demanden mayor cantidad de agua tienden a sufrir una mayor contracción por lo cual se recomienda, particularmente en el caso del CPP, el uso de aditivos plastificantes para aquellos elementos estructurales susceptibles a este tipo de fisuras.

2.8 Especificaciones del cemento según la NB-011

Esta norma se aplica a los cementos normales utilizados para morteros y hormigones en construcción.

**Tabla 2.12.-
Categorías resistentes de los cementos (resultados según la norma NB 470)**

Categorías resistentes		Resistencia a la compresión, en Mpa		
		Mínima a 3 días	Mínima a 7 días	Mínima a 28 días
alta	40	17	25	40
media	30	10	17	30
baja	25	-	15	25

Fuente: Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA)

Especificación física

Principio y fin de fraguado véase la tabla 2.10

Superficie específica Blaine véase la tabla 2.10

Expansión véase la tabla 2.11

Especificaciones químicas para el cemento véase la tabla 2.9

3. MARCO PRÁCTICO.-

En este capítulo se presentan los ensayos físicos-mecánicos que se hicieron, en el laboratorio de cementos y agregados de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Por otro lado también se busca lograr una repetibilidad para dar un nivel de confianza y que la incertidumbre sea lo más baja

posible. Para poder lograr esto, se tuvieron en cuenta factores claves como el error del operador, la temperatura, la exactitud y la calibración de las máquinas.

Los resultados de los ensayos de caracterización para las cuatro marcas de cementos nacionales se verifica que cumplan con lo especificado en la NB 011, y para evaluar la repetibilidad se hicieron varios ensayos para poder calcular el promedio, valor máximo, valor mínimo, desviación estándar y el coeficiente de variación.

3.1 Determinación de la finura de cemento tipo IP-30,

Este ensayo se determinó mediante los tamices N°40 y N° 200.

Procedimiento utilizado

Se pesó 50 gramos de cemento para su respectivo tamizado, luego se agitó la muestra, utilizando tamices de malla N°40 y N°200 con base y tapa en el vibrador eléctrico.

Se agitó la muestra por un tiempo mayor o igual a 15 minutos.

Una vez agitada la muestra en el tiempo mencionado se quitó la tapa y se separó de la malla N°200 vaciando la fracción de cemento que podría ser retenida en ella, sobre un papel limpio. A las partículas que se han quedado atrancadas entre los hilos de malla se invirtió el tamiz y con ayuda de un cepillo o brocha de alambre se fue desprendiendo todas las partículas retenidas entre la malla y luego se depositó en un papel para su respectivo pesado.

Se pesó cuidadosamente la fracción obtenida en el tamiz N°40. Se puso en un recipiente. Se guarda esta fracción de muestra hasta el final de la prueba para poder repetir las pesadas en el caso de error. Se hizo el pesado de las fracciones retenidas en cada malla y en el recipiente del fondo, procediendo en la forma indicada. Todos los pesos retenidos se anotaron en una hoja de registros para el cálculo.

Tabla 3.1 Finura del cemento de las cinco marcas de cemento

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	CEMENTO EL PUENTE	CEMENTO EMISA	CEMENTO VIACHA	CEMENTO WARNES	CEMENTO FANCESA
Valor promedio, %	0,95	1,666	2,697	2,534	2,100

Valor máximo, %	0,96	1,720	2,900	2,600	2,220
Valor mínimo, %	0,93	1,600	2,500	2,440	1,960
Desviación estándar%	0,01	0,043	0,130	0,060	0,103
Coefficiente de variación%	1,32	2,567	4,833	2,355	4,918

Fuente: Elaboración propia

3.2 Determinación del peso específico de cemento tipo IP-30

Este ensayo tiene por objeto determinar el peso específico del cemento hidráulico. Su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de hormigón.

Teniendo todos los materiales y herramientas para el ensayo, se llenó el frasco con 300 ml de nafta, hasta la altura conveniente del cuello del frasco, para su mejor apreciación de la medición. Se secó el interior del frasco por encima del líquido para que no se adhiriera residuos de cemento en el cuello del frasco. Se anotó la primera lectura después de sumergir al frasco en el baño de agua como se indicó en la norma ASTM C188. Luego se agregó cemento Pórtland, aproximadamente 64 g, en pequeñas cantidades, a la misma temperatura que el líquido, procurando evitar salpicaduras y observando que el cemento no se adhiriera a las paredes del frasco por encima del líquido. Después de agregar todo el cemento, se hace girar en posición inclinada o en círculo horizontal poco a poco, hasta que no asciendan burbujas a la superficie del líquido, para sacarle el aire. Una vez sacado todo el aire atrapado, se hizo la lectura final una vez que el frasco se haya sumergido en el baño de agua.

Debe sumergirse el frasco en un baño de agua a temperatura ambiente durante un tiempo suficiente, antes de hacer cualquiera de las lecturas, para evitar variaciones mayores de 0,2°C en la temperatura del líquido dentro del frasco. Todas las lecturas se comprobaron hasta obtener un valor constante para asegurarse de que los contenidos del frasco han alcanzado la temperatura del baño de agua.

La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen líquido desplazado por el peso de cemento usado en el ensayo. El peso específico debe calcularse como sigue:

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Peso del cemento, en gr}}{\text{Volumen desplazado, en ml}}$$

Tabla 3.2 Peso específico de los cementos de las cinco marcas nacionales

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	CEMENTO EL PUENTE	CEMENTO EMISA	CEMENTO VIACHA	CEMENTO WARNES	CEMENTO FANCESA
Valor promedio, gr/cc	3,069	2,894	2,877	3,000	2,921
Valor máximo, gr/cc	3,077	2,909	2,896	3,048	2,949
Valor mínimo, gr/cc	3,062	2,870	2,857	2,963	2,896
Desviación estándar, gr/cc	0,008	0,016	0,015	0,029	0,018
Coefficiente de variación	0,256	0,549	0,510	0,966	0,615

Fuente: Elaboración propia

3.3 Determinación de la consistencia normal y tiempo de fraguado de los cementos tipo IP-30

Este método tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat o determinar la cantidad de agua requerida para preparar pastas de cemento hidráulico, de consistencia normal, para su posterior ensayo.

Condiciones ambientales.-

La temperatura ambiente en la sala de trabajo, así como la de las herramientas y materiales, excepto el agua, tuvo una variación de 20 y 27.5°C. La temperatura del agua de mezcla de 19°C.

Preparación de la pasta de cemento.-

En una bandeja de aluminio se colocó una muestra de 500 g en forma de cono y se le hizo un hoyo en el centro. Se vierte en el hoyo una cantidad medida de agua destilada y luego, con ayuda del palustre, se pasa al hoyo el cemento seco que lo rodea exteriormente, empleando en esta operación 30 segundos. Durante los siguientes 30 segundos, mientras se permite la absorción del agua, el cemento que aún permanecía seco en el exterior del cono se mezcló suavemente mediante el palustre con la pasta húmeda para reducir las pérdidas por evaporación y facilitar la completa absorción. Luego se terminó la operación mezclando y amasando con las manos, continuo y vigorosamente durante 90 segundos. En este último paso y en el siguiente, se usó guantes de caucho bien ajustados.

Llenado de moldes para consistencia normal.-

Se moldeó la pasta de cemento con las manos dándole forma esférica y se lanzó 6 veces de una mano a otra a través de una distancia de unos 150 mm (6"). Con la muestra que permanece en una mano se llenó completamente por la base mayor el molde, sostenido en la otra, quitando el exceso

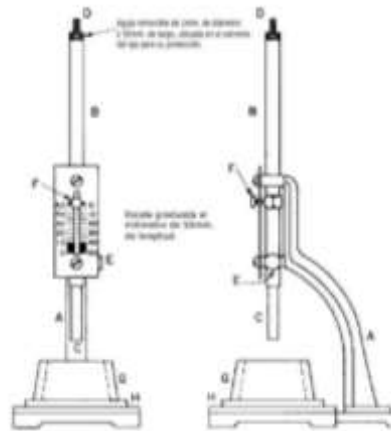
en esta base con un solo movimiento de la palma de la mano. Se colocó la placa de vidrio (H) sobre la base mayor, se giró el conjunto y con ayuda de un palustre se quitó el exceso en la base menor. Finalmente, el conjunto se sacudió suavemente. Se tuvo mucho cuidado de no comprimir la muestra.

Determinación de la consistencia normal.-

El conjunto constituido por la placa, la pasta y el molde se colocó al aparato y se centró debajo del vástago (B), se hizo descender el mismo hasta que el extremo del émbolo (C) quedo en contacto con la superficie de la pasta y se aseguró en esta posición por medio del tornillo (E). Se tomó lectura la posición inicial del índice (F); 30 segundos después de terminada la mezcla, se soltó el vástago cuidando que el aparato no esté sometido a ninguna vibración durante el ensayo.

Se considera que la pasta tiene consistencia normal cuando el émbolo penetra 10 ± 1 mm, 30 segundos después de haber sido soltado. Si no se obtiene la consistencia normal en el primer ensayo, debe repetirse toda la operación, variando la cantidad de agua, hasta obtenerla; cada vez hay que emplear cemento nuevo.

Figura 3.1.-
Aparato Vicat



Fuente: ASTM C191,
del cemento hidráulico

Tiempo de fraguado

La cantidad de agua requerida para obtener una pasta de consistencia normal debe calcularse como un porcentaje en peso del cemento seco, con aproximación del 0.1% y reportarse con aproximación del 0.5%.

Tabla 3.3 Consistencia normal de las pastas de cemento de Tipo IP

Parámetro estadísticos	MARCAS DE CEMENTO				
	CEMENTO EL PUENTE	CEMENTO EMISA	CEMENTO VIACHA	CEMENTO WARNES	CEMENTO FANCESA
peso de la muestra, gr	500	500	500	500	500
peso del agua, gr	145	137	125	127	132
penetración, mm	10	10	10	10	10
consistencia, %	29	27,4	25	25,4	26,4

Fuente: Elaboración propia

Moldeo de la muestra de ensayo para la determinación de tiempo de fraguado.-

A la pasta preparada con la cantidad de agua necesaria para obtener una pasta de consistencia normal, rápidamente se le dio forma esférica con las manos enguantadas, y se lanzó de una mano a la otra por seis veces estando éstas a una distancia de 15 cm aproximadamente. Se agarró el molde en una mano y con la otra se presionó la pasta de forma esférica hasta llenar el molde completamente por la base mayor. El exceso en esta base se la quitó con un solo movimiento de la palma de la mano. Se colocó el molde con su base mayor sobre la placa de vidrio y el exceso de pasta que desbordaba en la base menor se la quitó pasando un palustre oblicuamente de modo que forme un ángulo pequeño con el borde superior del molde. Se aliso la parte superior de la muestra, con dos pasadas del borde del palustre. Durante esta última operación se tuvo mucho cuidado de no presionar la pasta de cemento para no alterar el ensayo. La muestra se la dejó en el molde, soportada por la placa de vidrio, durante todo el período de ensayo.

Determinación del tiempo de fraguado.-

La muestra usada para determinar el tiempo de fraguado, se la mantuvo en un cuarto húmedo durante 30 minutos después del moldeo sin que sufra ninguna alteración. Se determinó la penetración de la aguja de 1 mm en ese instante y luego se retiró cada 15 minutos, hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menos. Para el ensayo de penetración se descendió la aguja D del vástago B, hasta que el extremo hizo contacto con la superficie de la pasta de cemento. Se apretó el tornillo de sujeción E hasta ajustar el índice F, en el extremo superior de la escala. Posteriormente se soltó el vástago

rápidamente aflojando el tornillo de sujeción E y dejando que la aguja penetre durante 30 segundos, momento en el cual se anotó la lectura para determinar la penetración.

Las penetraciones fueron separadas por lo menos 6 mm (¼") entre sí y 10 mm (¼") del borde interior del molde. Se anotó los resultados de todas las penetraciones y por interpolación se determinó el tiempo, obtenido para una penetración de 25 mm, el cual indica el Tiempo de Fraguado.

Precauciones tomadas durante el ensayo.-

El aparato no debe estar sometido a vibraciones durante la penetración. La aguja, de 1 mm de diámetro, debe ser recta y estar limpia, pues la acumulación de pasta en su periferia puede retardar la penetración, así como la pasta en la punta puede aumentar la misma. Esta determinación es sólo aproximada, puesto que no sólo la temperatura y la cantidad de agua de amasado influyen en el resultado, sino también la temperatura y humedad del aire.

Tabla 3.4

Tiempo de fraguado de las pastas de cemento, de la marca El Puente, Emisa y Viacha

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	CEMENTO EL PUENTE		CEMENTO EMISA		CEMENTO VIACHA	
	T.F Inicial	T.F Final	T.F Inicial	T.F Final	T.F Inicial	T.F Final
Valor promedio, min	162,18	291,14	143,21	372,14	173,04	303,93
Valor máximo, min	165,00	315,00	150,00	375,00	180,00	315,00
Valor mínimo, min	157,50	280,00	135,00	360,00	157,50	300,00
Desviación estándar, min	2,54	12,21	5,35	5,67	7,77	5,75
Coefficiente de variación, %	1,57	4,19	3,73	1,52	4,49	1,89

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5

Tiempo de fraguado de las pastas de cemento, de las marcas Warnes y Fancesa

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	CEMENTO WARNES		CEMENTO FANCESA	
	T.F Inicial	T.F Final	T.F Inicial	T.F Final
Valor promedio, min	210,36	384,64	148,14	261,43
Valor máximo, min	217,50	390,00	152,50	270,00
Valor mínimo, min	202,50	375,00	142,50	255,00
Desviación estándar, min	5,67	5,67	3,47	4,53
Coefficiente de variación, %	2,70	1,47	2,34	1,73

Fuente: Elaboración propia

3.4 Determinación de la expansión de autoclave del cemento tipo IP-30

Este método tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar la estabilidad del volumen de muestras de pastas de cemento puro, al ser sometidas a tratamientos en autoclave.

El ensayo de expansión en el autoclave proporciona un índice de la expansión potencial demorada causada por la hidratación del CaO, o del MgO, o de ambos.

Una vez reunidas todas las materiales, herramientas y el ambiente indicado como esta prescrita en la norma ASTM 151, se procede con el primer paso:

Preparación de los moldes

Se limpió los moldes y engrasados con aceite mineral. Colocando a continuación los pines de referencia verificando que exista un claro de 250 ± 2.5 mm entre sus extremos (ver Figura 3.2). Además debe tenerse el cuidado de que se mantengan limpios y libres de aceite, grasa o alguna otra materia extraña.

Figura 3.2.-

Moldes de acero inoxidable 2.5x2.5x25.4mm



Mezclado de la pasta de cemento

Se elaboró una pasta de cemento con 500 g de cemento; según el procedimiento de mezclado de pastas realizado en la práctica de determinación de consistencia normal del cemento y con la cantidad de agua que se determinó en esa práctica (para reproducir esa condición de consistencia normal).

Moldeado de los especímenes (tiempo máximo de moldeo de 2 a 3 minutos)

Inmediatamente luego después de la finalización del mezclado, se moldeó el espécimen de prueba en dos capas aproximadamente iguales compactando fuertemente con los dedos y presionando la pasta en las esquinas, alrededor de los pines de referencia y a lo largo de la superficie del molde hasta que se obtenga un espécimen homogéneo.

Después que la capa superior ha sido compactada, se enrasó con una espátula de borde delgado y suavizando la superficie con unos leves golpes de la espátula plana a fin de evitar colmenas. Utilizando en esta operación guantes de goma.

Almacenamiento de los especímenes de prueba

Después de terminar de moldear, se colocó los especímenes en el gabinete de curado. Los especímenes permanecieron en los moldes durante 24 horas.

Desmoldado y medición de los especímenes de prueba

A las 24 horas \pm 30 minutos después de haber moldeado las muestras, se sacó los 3 especímenes del gabinete de curado y desmoldados con cuidado. Aplicando unos golpes al molde para que las muestras deslicen con mayor facilidad.

Figura 3.3.-

Especímenes desmoldados y curados



Se tuvo que identificar a cada espécimen, ubicándola en uno de sus extremos.

Inmediatamente se procedió a determinar lecturas con el auxilio del comparador de longitud para obtener una lectura inicial de cada espécimen. El objetivo de este comparador es medir los cambios de longitud y está diseñado para acomodarse al tamaño de la probeta empleada en este ensayo.

La determinación de lecturas en el comparador se realizó de la siguiente manera:

a) Se colocó en el comparador la varilla de tarado y anotando el número de divisiones que marca con relación al cero del dial comparador (Liv). La varilla siempre deberá colocarse en el comparador en la misma posición.

b) Se quitó la varilla de tarado y se colocó la probeta, ésta se hizo girar suavemente y se registró el número de divisiones con relación al cero del comparador; si la rotación causa un cambio en la lectura en el dial (Lip). Los especímenes deben colocarse en el comparador con el mismo extremo hacia arriba cada vez que se tome una lectura.

Preparación del autoclave

Primeramente se revisó que se encuentren todos los elementos que componen el equipo: tornillos, termómetro, empaque de hule, etc.

Se procedió a limpiar el interior del autoclave.

Se llenó una cantidad de agua destilada entre el 7 y el 10% del volumen del autoclave. La temperatura del agua se verificó que oscilara entre 20 y 28°C.

Posteriormente se introdujo los especímenes debidamente identificados en el sostenedor de muestras del autoclave, éstos se colocaron en la misma posición en la que fueron puestos para tomar las mediciones en el comparador de longitudes.

Antes de cerrar se engrasa las juntas del autoclave.

Se cerró el autoclave con la tapa, asegurando su cierre con el apriete secuencial de los tornillos (con el auxilio de la llave cangreja). Colocando el termómetro en el espacio correspondiente en la autoclave y tomando en cuenta que el mando de ventilación indique “CERRADO”.

Ensayo de los especímenes

Se encendió todas las resistencias y anotando la hora de inicio de la prueba.

Permitiendo escapar aire a partir de la autoclave durante la porción temprana del periodo de calentamiento, se dejó la válvula de ventilación abierta, hasta que el vapor empezó a escapar.

Cerrando la válvula y elevando a temperatura de la autoclave a una tasa tal que elevar la presión de vapor a 295 psi en 45 a 75 minutos a partir del momento en que el calor es encendido. La secuencia se controlará así:

- Se registró la hora en que se alcanzó los 200°F y la presión correspondiente (debe ser 50 psi aproximadamente).
- Se anotó la hora en que se alcanzó los 300°F y proceder a purgar el autoclave; es decir que se abre la válvula de purga y se deja salir todo el vapor hasta que la presión disminuye significativamente. Seguidamente se cerró la válvula de purga y anotando el tiempo en que la válvula de purga estuvo abierta.
- Se quitó el termómetro y reapretó la tapa (con el uso de los guantes de asbesto y la llave cangreja) y colocando el termómetro nuevamente.
- Cuando la temperatura llegó a 350°F, se registró la hora y la presión (la presión en este instante debe ser aproximadamente 150 psi).
- Se registró la hora en que la temperatura alcanza 370°F (la presión deberá ser 195 psi).
- Cuando el termómetro marque 420°F, la presión no debe sobrepasar de 305 psi. Registrando la hora cuando alcanza dicha temperatura.

- Al llegar a este punto el aparato de autoclave se desconecta automáticamente para mantener una presión de 295 ± 10 psi.
- Se mantuvo estas condiciones presión durante 3 horas verificando que el aparato autoclave automáticamente se conecte y desconecte.

Periodo de enfriamiento del autoclave

Al término de las 3 horas del ensayo, se desconectó el interruptor principal.

Procediendo a abrir la válvula de ventilación.

Dejando enfriar el autoclave a una tasa tal que la presión sea menos que 10 psi al término de 1 ½ hora.

En este intervalo se utilizó el baño de María y añadiendo suficiente agua (para cubrir los especímenes) de manera que el agua se mantenga a una temperatura de superior a los 90°C (194°F).

Al final del periodo de 1 ½ hora, se abrió la válvula de purga para que lentamente se retire la presión remanente hasta que se alcance la presión atmosférica.

Luego abrir el autoclave.

Protegiendo las manos con los guantes de asbesto para evitar quemaduras ya que el autoclave

Enfriamiento final de las probetas

Se procedió a sacar los especímenes y sumergirlos inmediatamente en el baño de María con el agua a una temperatura por encima de 90°C (194°F).

Enfriando el agua alrededor de los especímenes con el hielo de tal forma de bajar la temperatura del agua hasta 23°C (74°F) en 15 minutos.

Manteniendo los especímenes en agua a 23°C (74°F) por otros 15 minutos.

Luego se procedió a determinar las lecturas finales de la siguiente forma:

- a) Se colocó en el comparador de la varilla de tarado y anotando el número de divisiones que marca con relación al cero del dial comparador (Lfv). La varilla siempre deberá colocarse en el comparador en la misma posición que con la que se determinó la lectura inicial (Liv).
- b) Posteriormente se quitó la varilla de tarado y colocando la probeta, ésta se hizo girar suavemente y se registró el número de divisiones con relación al cero del comparador; si la rotación causa un cambio en la lectura en el dial (Lfp) deberá de tomarse esta lectura.

Cálculos

Calculando el cambio en longitud del espécimen por restar la lectura de longitud del comparador antes de colocarlo en el autoclave a partir de aquella que se obtiene luego de que se ha sometido en el autoclave y reportarla como un porcentaje de la longitud efectiva de calibración (G) de los moldes al 0.001% más próximo para cada espécimen y reportar el promedio al 0.01% más próximo. Reportar el porcentaje de incremento en longitud como la expansión autoclave. Indicar un decrecimiento en longitud añadiendo un signo menos al valor obtenido.

Las fórmulas a utilizar son las siguientes:

$$Li = (Lip - Liv) \text{ Ec. 3-1}$$

$$Lx = (Lfp - Lfv) \text{ Ec. 3-2}$$

$$L = 100(Lx - Li)/G \text{ Ec. 3-3}$$

Donde:

Lip : Divisiones del comparador de longitud con respecto al “cero” en el espécimen (Antes del ensayo).

Liv : Divisiones del comparador de longitud con respecto al “cero” en la varilla de comparación (antes del ensayo).

Li : Diferencia de lecturas iniciales.

Lfp : Divisiones del comparador de longitud con respecto al “cero” en el espécimen (después del ensayo).

Lfv : Divisiones del comparador de longitud con respecto al “cero” en la varilla de comparación (después del ensayo).

Lx : Diferencias de lecturas finales.

G : Longitud nominal de calibración: 10 para moldes en unidades inglesas o 250 para moldes en unidades SI.

L : Cambio en longitud, en %

La precisión encontrada para un solo operador es de una desviación estándar de 0.024% para expansiones que están en el rango de 0.11% a 0.94%.

Tabla 3.6.-

Expansión de la pasta de cemento tipo IP-30, por autoclave

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	MARCAS DE CEMENTO				
	EL PUENTE	EMISA	VIACHA	WARNES	FANCESA
Valor promedio, (%)	0,0106	0,0951	0,0606	0,0260	0,1115
Valor máximo, (%)	0,0134	0,0990	0,0685	0,0291	0,1181
Valor mínimo, (%)	0,0079	0,0912	0,0527	0,0236	0,1063
Desviación estándar	0,0028	0,0039	0,0079	0,0028	0,0060
Coefi. de variación, (%)	25,92	4,14	12,99	10,93	5,39

Fuente: Elaboración propia

3.5 Determinación de la resistencia de los morteros a la compresión con cemento tipo IP-30

Este ensayo cubre la determinación del esfuerzo de compresión de morteros de cemento hidráulico, usando cubos de 50,8 mm (2") de lado.

La compresión se midió sobre dos (2) cubos de 50,8 mm (2") compactados en dos (2) capas.

Los cubos fueron curados un día en los moldes y se desmoldaron y sumergieron en agua-cal hasta su ensayo.

Características de la arena utilizada.-

La arena usada para hacer las muestras (cubos), en este ensayo, fue natural de sílice; normalizada para ensayo y gradada de acuerdo con los siguientes tamices:

Tamices		% que pasa
	Alternativa	
1,18 mm	(No.16)	100
600 µm	(No.30)	96 - 100
300 µm	(No.50)	23 - 33
150 µm	(No.100)	0 - 4

Fuente: ASTM C 109- Resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico

Para comprobar la gradación normalizada, se tomó el contenido de un saco lleno de arena, de aproximadamente 45 kg, se extendió en una superficie plana y por cuarteo se tomó unos 700 g; de esta muestra, se tomó unos 100 g y se hace el tamizado, tomando las mallas en forma independiente; en 60 segundos de continuo tamizado teniendo cuidado de no pasar más de 0,5 g. El material retenido en cada malla quedo de acuerdo con la gradación presentada antes.

Condiciones de ensayo.-

Condiciones Ambientales.- La temperatura del aire en las vecindades de la mezcladora, moldes, materiales, prensa, etc., presentaba un diferencia de 20 a 27,5°C (68 a 81.5°F).

Y agua de mezclado una temperatura de $23 \pm 1,7^\circ\text{C}$.

Preparación de los moldes.-

Para que la mezcla no se adhiera a las superficies interiores se lo pasó una capa de aceite ligero.

Las superficies de contacto de los elementos separables se revistieron de una capa de aceite mineral pesado, luego se unen estos elementos y se elimina el exceso de aceite en cada uno de los compartimentos. Luego se colocó el molde sobre una placa plana, no absorbente, cubierta con una delgada capa de aceite. En la parte exterior de las juntas de las partes que componen el molde, o de éstos con la placa.

Composición del mortero.-

Las proporciones en peso de materiales para el mortero normal se las proporciono de una (1) parte de cemento y 2,75 partes de arena gradada, usando una relación agua - cemento de 0,485 para los cementos Portland; sin embargo, será tal que produzca un flujo de 110 ± 5 , expresada en porcentaje del cemento.

Las cantidades mezcladas para formar la bachada para seis (6) cubos de ensayo, estaban constituidos de 500 g de cemento y 1375 g de arena y 242 ml de agua, aproximadamente.

Moldeo de Especímenes.-

Como no se cuenta con una mezcladora, la preparación del mortero se la debe hacer manualmente, en una fuente no absorbente, se las pone las dos proporciones, cemento y arena sin agregarle agua todavía, mezclar hasta que tengan una distribución homogénea, luego se le hace un hoyo en forma de cráter para verterlo agua de la proporción mencionada y mezclar hasta que no quede partículas secas.

Dentro de un tiempo transcurrido no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar la mezcla original de la bachada, se inicia el llenado de los compartimentos, colocando una capa de más o menos 25 mm (1") de espesor (aproximadamente la mitad del molde), en cada uno de los compartimentos, y se apisonan con 32 golpes que se aplicarán sobre la superficie, en 4 etapas de 8 golpes adyacentes cada una.

Los golpes de cada etapa se darán siguiendo una dirección perpendicular a los de la anterior; la presión del compactador será tal, que asegure el llenado de los compartimentos. Se deben completar las cuatro (4) etapas de compactación, en cada compartimiento, antes de seguir con el siguiente. Una vez terminada la etapa de la primera capa en todos los compartimentos, se llenan con una segunda capa y se procede como en la primera.

Durante la compactación de la segunda capa, al completar cada etapa y antes de iniciar la siguiente, se introduce en el compartimiento el mortero que se ha depositado en los bordes del molde. A lo largo de estas operaciones, se usó guantes de cucho. Al finalizar la compactación, las caras superiores de los cubos, deben quedar un poco más altas que el borde superior de los moldes. La superficie de los cubos se aliso con la parte plana del palustre, retirando el mortero sobrante, con un movimiento de vaivén.

Almacenamiento de los especímenes.-

Terminada la operación de llenado, el conjunto de molde y placa se mantuvo en un ambiente fresco durante 20 o 24 horas, con la cara superior expuesta al aire húmedo, pero protegidos contra la caída de gotas. Si los cubos se retiran del molde antes de las 24 horas, se dejarán en la cámara húmeda hasta completar este tiempo. Los cubos que no se van a ensayar a las 24 horas, se sumergen en agua saturada dentro del tanque de almacenamiento, construido con material no corrosivo.

Ensayo.-

Los cubos que van fueron ensayados a las 24 horas, se sacan de la cámara húmeda cubriéndolos con un paño húmedo, mientras se van pasando a la máquina. Para los otros cubos, deben sacarse del tanque de almacenamiento uno a uno y probarse inmediatamente. Todos los cubos se ensayaron dentro de las siguientes tolerancias de tiempo: a los 3 días \pm 1 hora; a los 7 días \pm 3 horas; y a los 28 días \pm 12 horas.

A los cubos de ensayo se las limpio, con el fin de eliminar toda arena suelta, o incrustaciones, en las caras que van a estar en contacto con los bloques de la máquina de ensayo. Posteriormente se comprobó por medio de una regla, que las caras están perfectamente planas.

Colocado cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo, debajo del centro de la parte superior de la máquina, comprobándose antes de ensayar cada cubo, que la rótula gira libremente en cualquier dirección.

Los cubos que fueron ensayados se centraron en los soportes. Se empieza luego a aplicar la carga a una rata conveniente hasta alcanzar el 50% la rata de aplicación de la carga no debe ser menor de 1000 lb por pulgadas cuadradas ni mayor de 6000 lb por pulgadas cuadradas, se aplique sin interrupción en un tiempo comprendido entre 20 y 80 segundos, desde el inicio de la carga. No se hará ningún ajuste a la máquina mientras se esté efectuando el ensayo.

Cálculos realizados.-

Se apuntó la carga máxima indicada por la máquina de ensayo en el momento de la rotura y se calcula la resistencia a la compresión, siendo el área nominal de la sección del cubo de 2581 mm², la cual no debe variar de la real en \pm 38 mm²; si hay variación mayor, el cálculo se hará con base en el área real.

Los cubos defectuosos o los que den resistencias que variaron en más del 10% del promedio de todas las muestras hechas de la misma mezcla y ensayadas al mismo tiempo, no se tomaron en cuenta al determinar la resistencia.

Tabla 3.7.-

Resistencia de los morteros de cemento tipo IP 30, a edad de 3 días

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	MARCAS DE CEMENTO				
	CEMENTO EL PUENTE	CEMENTO EMISA	CEMENTO VIACHA	CEMENTO WARNES	CEMENTO FANCESA
Valor promedio, MPa	22,15	23,58	19,60	20,37	21,58
Valor máximo, MPa	23,05	24,10	20,27	20,96	22,20
Valor mínimo, MPa	21,24	23,17	19,11	19,41	20,42
Desviación estándar, MPa	0,65	0,37	0,46	0,59	0,70
Coefficiente de variación, %	2,95	1,58	2,35	2,89	3,24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8.-

Resistencia de los morteros de cemento tipo IP 30, a edad de 7 días

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	MARCAS DE CEMENTO				
	CEMENTO EL PUENTE	CEMENTO EMISA	CEMENTO VIACHA	CEMENTO WARNES	CEMENTO FANCESA
Valor promedio, MPa	26,87	29,12	24,73	25,76	28,05
Valor máximo, MPa	27,50	29,57	25,34	26,27	28,52
Valor mínimo, MPa	26,43	28,79	24,22	24,99	27,32
Desviación estándar, MPa	0,45	0,29	0,43	0,52	0,47
Coefficiente de variación, %	1,66	0,98	1,72	2,03	1,68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9.-

Resistencia de los morteros de cemento tipo IP 30, a edad de 28 días

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	MARCAS DE CEMENTO				
	CEMENTO EL PUENTE	CEMENTO EMISA	CEMENTO VIACHA	CEMENTO WARNES	CEMENTO FANCESA
Valor promedio, MPa	31,41	36,62	34,09	31,55	35,97
Valor máximo, MPa	32,06	37,01	34,76	32,05	36,35

Valor mínimo, MPa	30,69	36,23	33,09	30,88	35,34
Desviación estándar, MPa	0,53	0,36	0,67	0,50	0,38
Coefficiente de variación, %	1,69	0,99	1,96	1,57	1,05

Fuente: Elaboración propia

3.6 Determinación de tablas comparativas de las características físicas – mecánicas de los cementos tipo IP-30

Los promedios obtenidos de los ensayos de la caracterización de los cinco cementos en estudio se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10.-
Promedios característicos de los ensayos de cinco cemento tipo IP-30

DESCRIPCIÓN		UNI	EL PUENTE	EMISA	VIACHA	WARNES	FANCESA	IP-30 NB 011
RESIDUOS EN MALLAS	200M	%	0,95	1,67	2,70	2,53	2,10	
PESO ESPECÍFICO		gr/cc	3,069	2,89	2,88	3,00	2,92	
TIEMPO DE FRAGUADO	INICIAL	min	162,18	143,21	173,04	210,36	148,14	>45
	FINAL	hrs	4,85	6,20	5,07	6,41	4,36	<7
EXPANSIÓN AUTOCLAVE		%	0,01	0,10	0,061	0,026	0,11	<1
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	3 DIAS	MPa	22,15	23,58	19,60	20,37	21,58	>10
	7DIAS	MPa	26,87	29,12	24,73	25,76	28,05	>17
	28DIAS	MPa	31,41	36,62	34,09	31,55	35,97	>30

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.10 vemos que todos los cementos estudiados, cumplen con los requisitos prescritos en la norma boliviana NB 011.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.-

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de los ensayos de laboratorio realizados a las cinco marcas de cemento estudiadas en el presente trabajo.

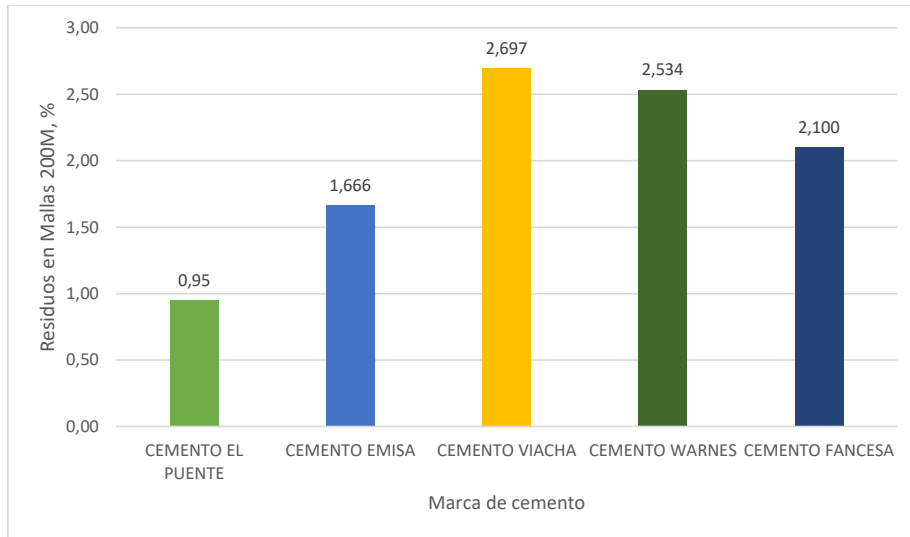
Los datos se presentan en gráficas, las cuales permiten observar el comportamiento de los datos con base al valor promedio obtenido en cada uno de los ensayos realizados a las muestras de cemento estudiadas.

4.1. Finura de cemento tipo IP-30,

El valor promedio más bajo de residuos retenidos en la malla 200M del cemento portland tipo IP-30, de las cinco marcas es el El Puente con 0.95% y el de mayor valor es Viacha con un valor promedio de 2.70 % tal como se observa en la Figura 4.1. Lo que significa que el cemento El Puente es mucho más fino que el cemento Viacha, porque el 99.05% de las partículas de cemento El Puente pasaron la malla 200M, mientras que del cemento Viacha, paso 97.3 % de las partículas. Por lo tanto se dice que mientras menos retención en la malla 200M, más fino es el cemento.

Figura 4.1.-

Residuos retenidos en la malla 200M, de los cinco cementos tipo IP-30

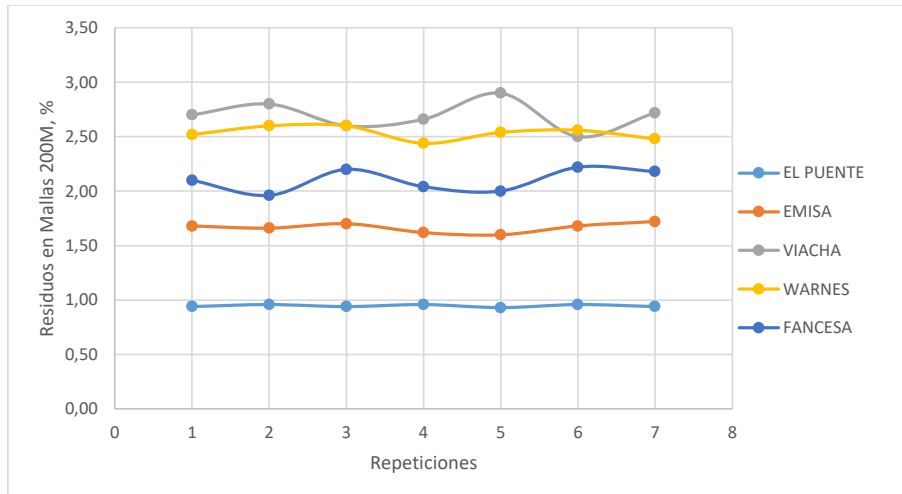


Fuente: Elaboración propia

El valor de finura (residuos retenidos en la malla 200M) promedio de los cinco cementos analizados fue de 1.99 %, el cual se acerca al valor de finura del cemento Fancesa, lo cual indica que éste presenta características intermedias entre las cinco marcas estudiadas, es decir adquisición de resistencia a edades tempranas lo cual no se observa en cementos con menor finura, se reduce el calor de hidratación y la exudación que presentan los cementos muy finos.

Figura 4.2.-

Comparación de los porcentajes retenidos en la malla 200M (finura) de los cinco cementos



Fuente: Elaboración propia

El cemento El Puente por ser demasiado fino, está expuesto a que la retracción y el calor de hidratación sean alto, al igual que tiene una mayor vulnerabilidad a la humedad, la cual provocará una meteorización tras un largo periodo de almacenaje. Al tener el cemento El Puente una finura tan elevada, su proceso de hidratación será más eficiente, ya que al ser, la partícula de cemento tan pequeña existe la probabilidad de que se hidrate por completo dando mejores características mecánicas en comparación con un cemento más grueso, en el cual, el núcleo de sus partículas nunca se hidrate por completo. El comportamiento de los residuos retenidos en la malla 200M se puede analizar en la Figura 4.1.

En la Figura 4.1, el cemento Viacha por tener una finura relativamente baja está expuesta a que su rendimiento sea bajo y el núcleo de la partícula en su interior no ocurra ninguna reacción o sea inerte.

Los valores de las siete repeticiones de la finura se muestran en la Figura 4.1 para los cementos estudiados, en la cual se observa partículas muy finas en la masa de cemento, que se deben a la inclusión de adición de puzolana, esta adición se caracteriza por presentar un tamaño menor a las partículas de clinker y yeso molidos.

En la Figura 4.1, la marca de cemento Emisa y Fancesa muestran sus repeticiones que su finura oscilan en un intervalo de 1.60 % a 2.22 %, por lo tanto estas dos marcas tendrán una velocidad de

hidratación y una resistencia muy parecidas, a diferencia del cemento El Puente que por tener una finura tan alta se prevé un aumento del calor de hidratación, menor exudación, mayor docilidad de la mezcla, menor resistencia al ataque de aguas agresivas y una mayor susceptibilidad a la meteorización tras un almacenamiento prolongado.

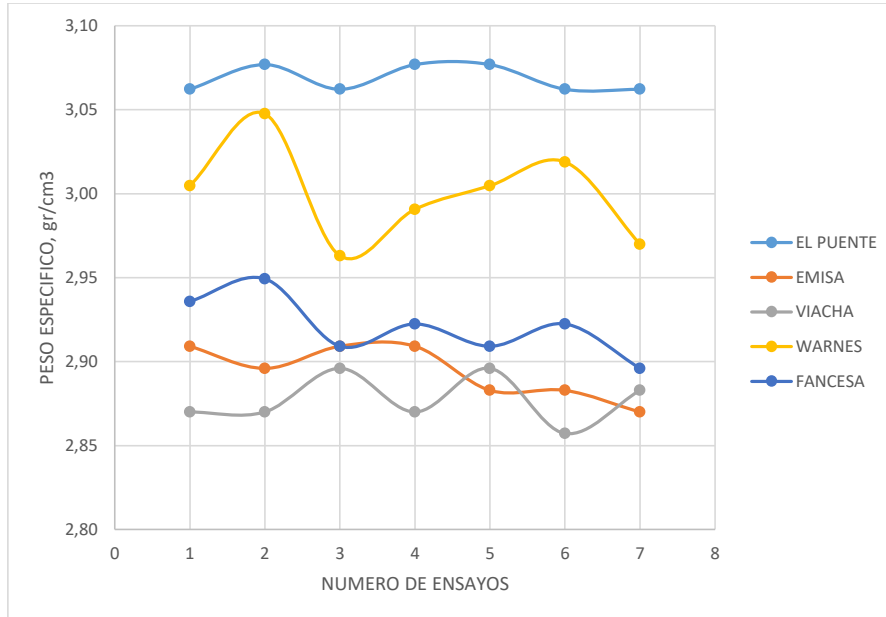
4.2. Peso específico de cemento tipo IP-30

La Figura 4.3. Muestra los resultados de las diez repeticiones del ensayo de peso específico realizados a las cinco marcas de cemento tipo IP 30, en la cual se observa que son cementos con adiciones, ya que la densidad de estos se encuentra por debajo del límite de 3.10g/cm^3 .

Este valor varía entre $3,10\text{ g/cm}^3$ y $3,15\text{ g/cm}^3$, para los cementos sin adiciones como es el caso de los cementos tipo II, III, IV y V este valor es inferior a $3,10\text{ g/cm}^3$ para el cemento adicionado tipo IP 30 dependiendo del tipo de adición y el porcentaje de sustitución del clinker. Cuando contiene otras adiciones para obtener los cementos adicionados, que son de menor peso específico a la del clinker puro, este valor desciende notablemente e igualmente ocurre para los cementos meteorizados. El peso específico del cemento no determina su calidad, pero analizado junto su finura se puede deducir si contiene o no adiciones.

Figura. 4.3

Comparación del peso específico de los cinco cementos



Fuente: Elaboración propia

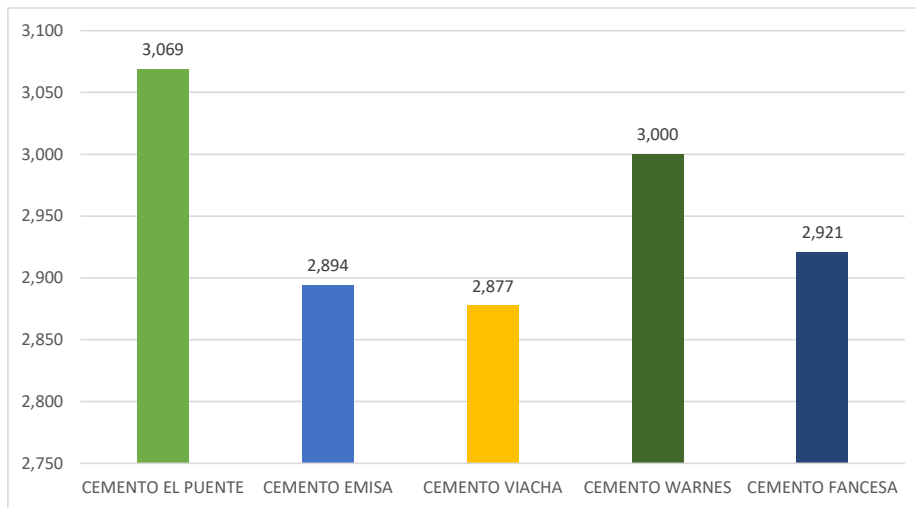
El cemento El Puente al tener un peso específico promedio alta (figura 4.3) se deduce que dicho cemento tiene poca cantidad de adicciones, pero si observamos el grado de finos en la figura 4.1 (porcentajes de residuos retenidos en la malla 200M), es mucho más fino que las otras, aparentemente nos indica que tiene mucha adicción, pero evidentemente no. Dado que las adicciones, son más livianas que el Clinker del cemento, lo que tendría que darnos un peso específico bajo, como no ocurre de esta forma, por lo tanto nos lleva a la conclusión de que: estos cementos tienen poca adicción pero, con una buena molienda del Clinker.

Ahora bien, el cemento Viacha, tiene un peso específico promedio bajo (ver figura 4.3), pero si nos vamos a la figura 4.1. Podemos observar que tiene un grado de fino menor, respecto a otras marcas de cemento, sucede lo contrario al cemento de marca El Puente. Esto nos muestra que, el cemento de marca Viacha, tiene contenido de adicción mayor que los otros cementos, pero con un bajo nivel de molido de Clinker.

En la Figura 4.3, el peso específico de los cinco cementos no tiene la misma similitud entre sí, lo cual indica que la cantidad de material adicionado que se usa para la realización del cemento, es distinta para cada uno.

El peso específico del cemento Emisa es similar a la del cemento Fancesa, puede ser un indicio de que estos dos cementos se fabricaron con cantidades de adiciones similares.

Figura 4.4.-
Peso específico promedio de las cinco marcas de cemento tipo IP 30



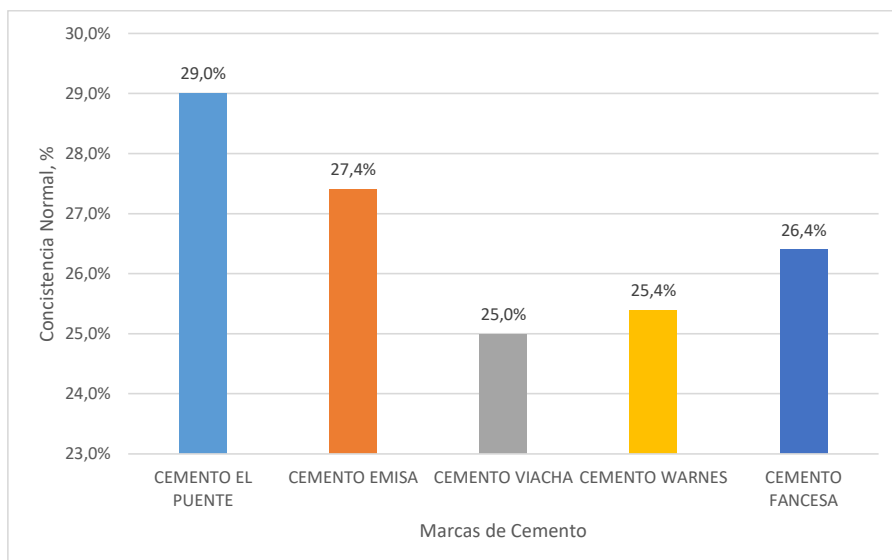
Fuente: Elaboración propia

Los cinco cementos analizados presentan un valor promedio de 2.952 g/cm³, por consiguiente al comparar este valor con los datos de la Figura 4.4, el cemento Fancesa es el que más se acerca al valor promedio de los cinco cementos y en consecuencia esta marca de cemento es la que presenta características intermedias en comparación con las otras marcas.

4.3. Consistencia normal y tiempo de fraguado de los cementos tipo IP-30

En la Figura 4.5 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de consistencia normal realizados a las cinco marcas de cemento analizadas, como se puede observar el cemento El Puente tiene el valor más alto de consistencia normal 29%, seguido por el cemento Emisa con un valor de 27,4%, el cemento Fancesa posee un valor de 26,4%, el cemento Warnes 25,4 % y cemento Viacha presentó el menor valor de consistencia normal 25%.

Figura 4.5.-
Consistencia normal de los cinco cementos de tipo IP 30



Fuente: Elaboración propia

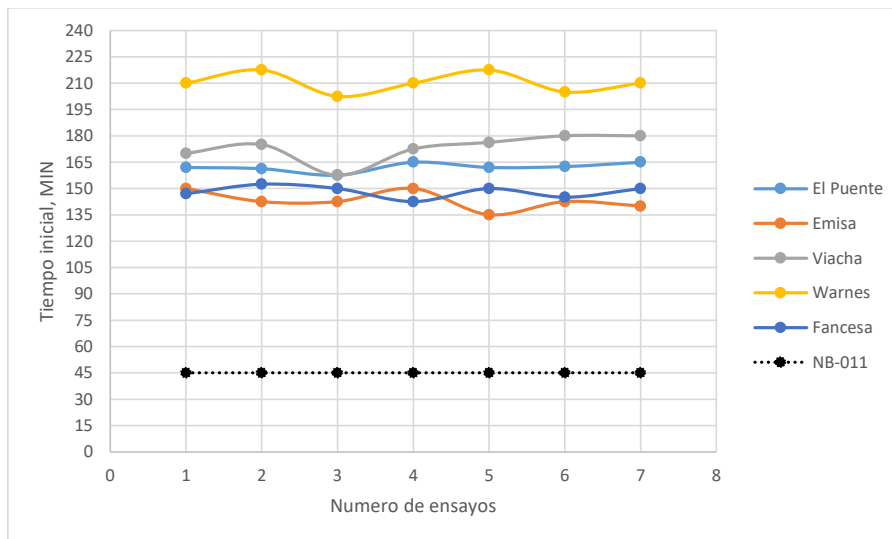
La norma boliviana NB 011, no establece un valor mínimo ni máximo para la consistencia normal.

Se evidencia en la Figura 4.5 que los cementos estudiados presenta un valor similar de consistencia normal a excepción del cemento El Puente que presento un valor más elevado a todos los cementos estudiados, esto puede tener consecuencias negativas en la resistencia a compresión del cemento El

Puente, puesto que una mayor cantidad de agua de amasado para adquirir una manejabilidad adecuada, aumenta la relación a/c, en comparación con los demás cementos estudiados.

Figura 4.6.-

Comparación de inicio de fraguado de las cinco marcas de cemento tipo IP 30

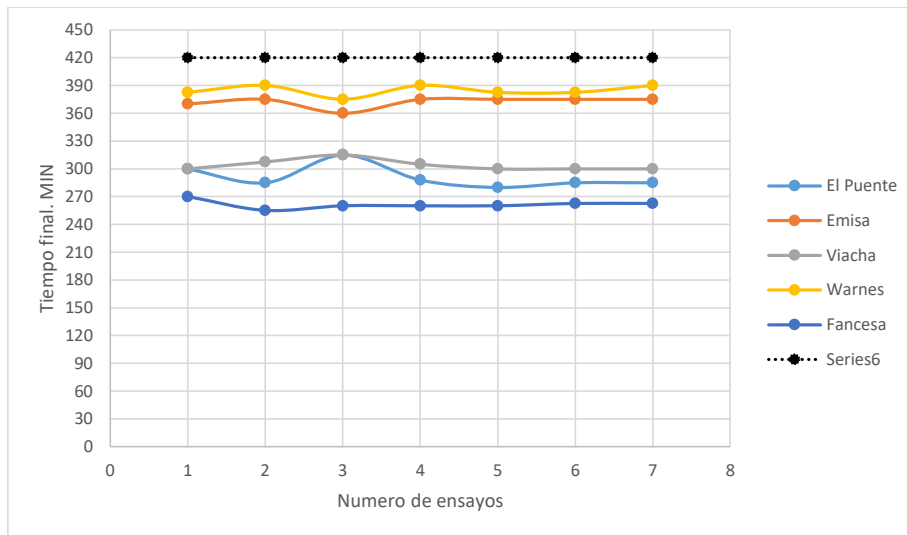


Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de los tiempos de fraguado de las marcas de cemento estudiadas se pueden observar en la Figura 4.6 el fraguado inicial y fraguado final en la Figura 4.7, en las cuales se observa que los resultados iniciales se encuentran en los rangos establecidos en la NB-011, siendo para el tiempo de fraguado inicial mayor a 45 minutos y menor a 7 horas o 420 minutos para el tiempo de fraguado final.

Figura 4.7.-

Comparación del fraguado final en las cinco marcas de cementos tipo IP 30



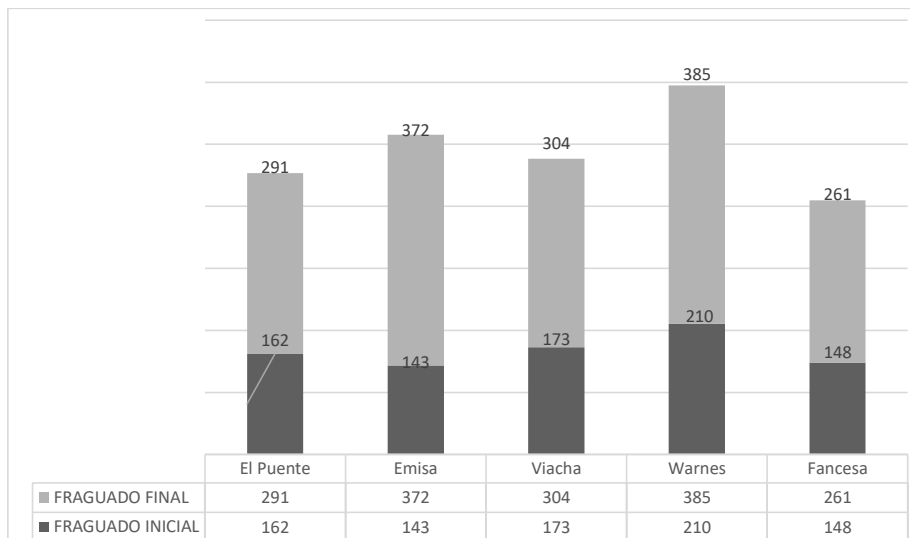
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.8 se observa que el cemento Emisa y Fancesa presentaron valores más bajos para el tiempo de fraguado inicial de 143 y 148 minutos, con una diferencia de cinco minutos y para el fraguado final, teniendo el valor más bajo el cemento de marca Fancesa con un promedio de 261 minutos, lo cual indica que este cemento presenta un tiempo de manejo menor a los demás cementos analizados, en contraste a esto, presentará resistencia en menor tiempo, siendo un cemento ideal para las obras que necesiten de un desencofrado rápido.

Los demás cemento presentaron tiempos de fraguado inicial similares, cemento El Puente con un tiempo de 162 minutos, seguido del cemento Viacha con 173 minutos y 210 minutos para el cemento Warnes, siendo este último el más alejado de todos.

Figura 4.8.-

Tiempo de fraguado inicial y final promedio de cinco cementos tipo IP-30



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al tiempo de fraguado final el cemento Warnes se tardó en conseguir el tiempo de fraguado final de 385 minutos en comparación con las otras cuatro marcas de cemento, que presentaron un tiempo de fraguado final, de 372 minutos para el cemento Emisa, 304 minutos para el cemento Viacha, 291 minutos para el cemento El Puente y 261 minutos para el cemento Fancesa. Esto indica que el cemento Warnes adquiere las resistencias más lento en comparación con las demás marcas de cemento, con menor calor de hidratación, lo cual hace de este cemento la mejor opción para su utilización en obras masivas las cuales solicitan que el concreto utilizado en éstas genere la menor cantidad de calor de hidratación.

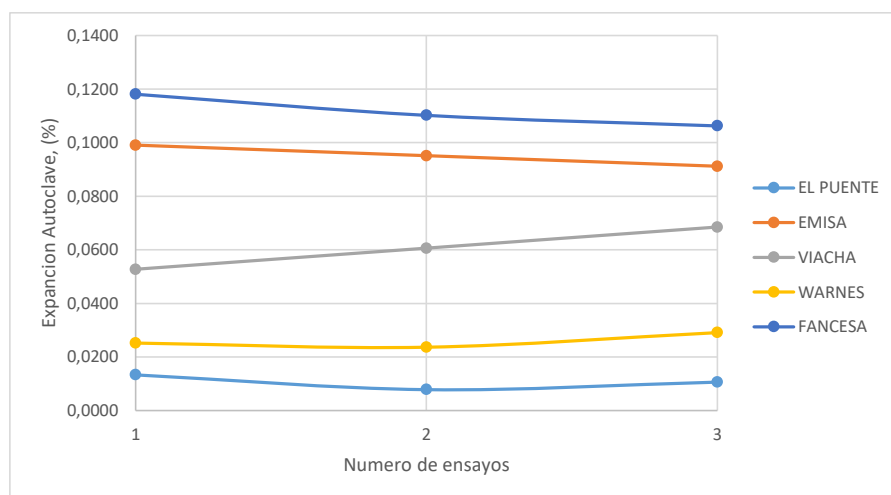
4.4. Expansión por autoclave del cemento tipo IP-30

En la Figura 4.9 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de estabilidad volumétrica realizados por el método de autoclave a las cinco marcas de cementos estudiadas en el presente trabajo.

Los cementos Fancesa y Emisa presentaron las más altas expansiones promedio en los ensayos realizados, pero por muy debajo de los límites de la norma NB 011, ver figura 4.9.

Figura 4.9

Valores promedio de la expansión por medio del método de Autoclave de cinco marcas de cementos tipo IP-30



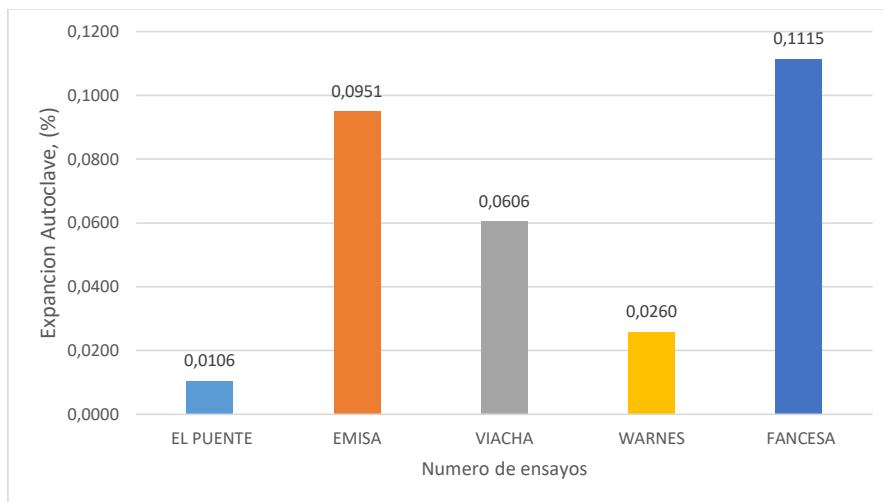
Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.10 se muestran los valores promedio de los ensayos realizados a los cinco cementos, teniendo una expansión mayor los cementos Emisa y Fancesa, lo que es curioso que, estos dos cementos presentan propiedades muy favorables con respecto a los demás cementos de estudio, pero ahora en este caso nos muestran una situación desfavorable, lo cual es un indicio, de que estos cementos tienen un contenido de, *óxido de cal libre* levemente mayor a las demás cementos, pero la incidencia no es mucha, ya que cumplen los requisitos de límites de expansión, presentados en la

norma boliviana NB 011. Con un promedio de 0.0951% para el *cemento* Emisa y 0.11 para el cemento Fancesa, lo cual están por debajo de 1 %, dato limite prescrito por la norma NB 011.

Figura 4.10.-

Valores promedio de la expansión por medio del método de Autoclave de cinco marcas de cemento tipo IP-30



Fuente: Elaboración propia

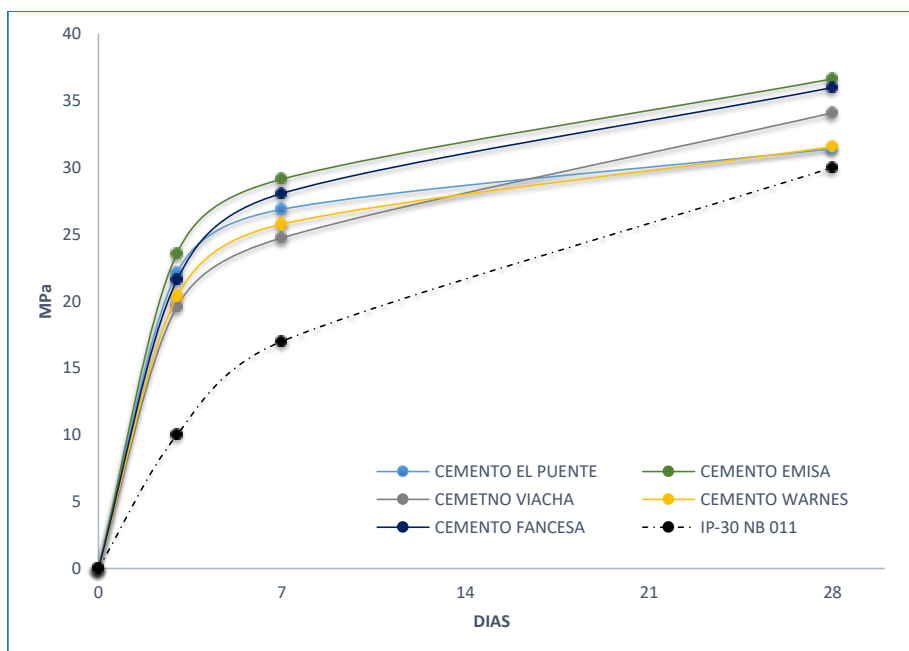
El cemento El Puente fue el que presentó menor expansión, de lo cual se deduce que su composición química presenta una menor cantidad de óxido de cal libre (periclusa), ya que la cal libre al entrar en contacto con el agua produce una reacción de hidratación, la cual provoca que la partícula de periclusa aumente su volumen provocando la expansión de la pasta de cemento, mortero o concreto.

Si vemos la figura 4.4 vemos que los cementos El Puente y Warnes presentan un peso específico elevado en relación a los otros tres, y ahora en la expansión presenta valores inferiores a los demás, al evidenciar esto vemos, que los de mayor peso específico contienen menor cal libre en su composición.

4.5. Resistencia de los morteros a la compresión con cemento tipo IP-30

En la Figura 4.11 se muestran los resultados de la resistencia promedio obtenidos en la determinación de las resistencias a la compresión a edades de 3, 7 y 28 días de las cinco marcas de cemento tipo IP-30 estudiadas.

Figura 4.11.-
Resistencia promedio de las cinco marcas de cemento tipo IP-30



Fuente: Elaboración propia

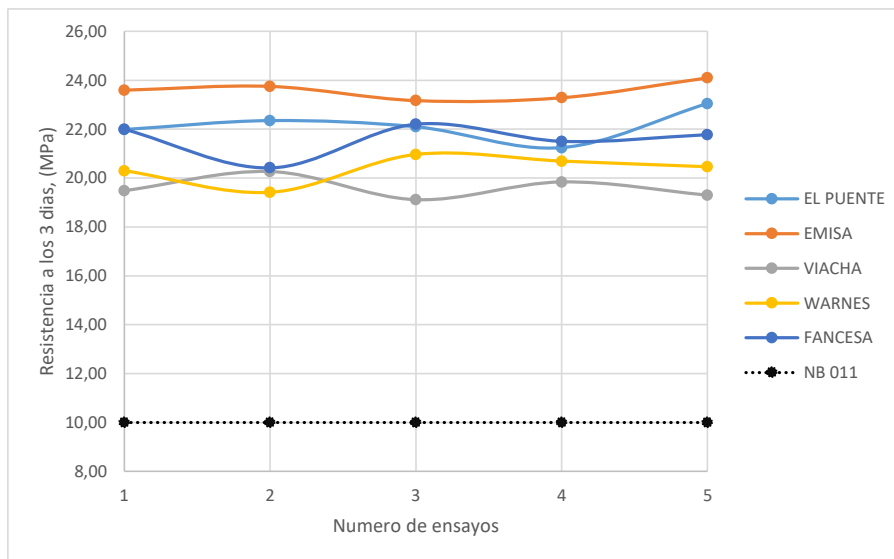
De acuerdo a las Figura 4.11, se puede observar claramente que todos los cementos estudiados cumplen con el requisito principal que estipula la norma boliviana NB 011.

En la figura 4.11 los cementos Emisa y Fancesa, presentan resistencias muy similares, se observa que a edades de 3, 7 y 28 días presentan un mejor comportamiento, con una variación mínima de resistencia, el cemento Emisa es más elevada que el cemento Fancesa.

Por otro lado se puede observar también que, el cemento Fancesa y el cemento El puente presentan a edades tempranas un buen desempeño de resistencia. Pero a edades de 28 días el cemento El Puente tiene un bajo desempeño de resistencia, siendo el más bajo en comparación a los otros cementos estudiados.

El cemento Warnes y Viacha tienen un desempeño de resistencia similar, a edades tempranas, pero a edades de 28 días, con un desempeño mejor de resistencia el cemento Viacha.

Figura 4.12.-
Comparación de las resistencias mecánicas a edad de 3 días de los cinco cementos tipo IP-30



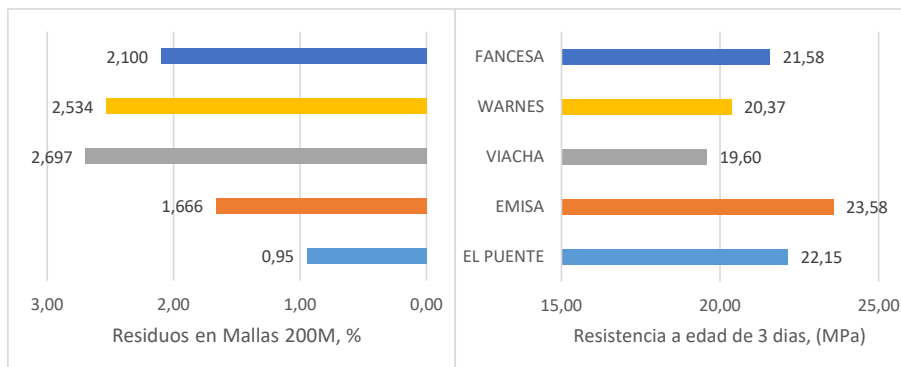
Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.12 se muestran los resultados de los ensayos de resistencias a la compresión a una edad de 3 días para las cinco marcas de cementos estudiados, se observa que las cuatro marcas sobrepasan los límites mínimos de resistencia especificado en la norma NB 011, con más de 10 MPa. Siendo el cemento de marca Emisa, el más elevado que los otros cementos y sobrepasando los límites de la NB 011, prácticamente con un valor de 19 MPa.

El cemento Fancesa y El Puente se manifiestan a los 3 días con una resistencia similar, ocupando una tercera posición más elevada respecto a los demás cementos de estudio.

En la figura 4.13 se puede observar claramente, que la resistencia mecánica a la compresión a edad de 3 días, es prácticamente proporcional a su finura, ya que al ser más fino el cemento mayor rapidez de hidratación de sus partículas. Vemos en la misma figura que el cemento El Puente tiene la característica de ser más fina en relación a otras marcas de cemento, entonces podría decirse que este cemento tendría que tener mayor resistencias que las otras, ¿entonces por qué no tiene mayor resistencia? La explicación ya se dijo anteriormente, y es porque ésta tiene la propiedad de tener mayor finura, pero poca adición, ver figura 4.4, se observa claramente que esta tiene un peso específico elevado, por lo tanto contiene poca adición, recordando que los cementos con adicciones tienen el peso específico inferior a 3.10 gr/cm^3 y el cemento El Puente 3.069 gr/cm^3 , esta próximo al límite de este parámetro.

Figura 4.13.-
Comparación entre la finura del cemento y la resistencia a la compresión a 3 días de las cinco marcas de cementos tipo IP-30



Nota: En el lado izquierdo de la figura, el módulo de finura de los cementos expresados en porcentaje de residuos retenidos en la malla 200M, lo cual indica que mientras menos retención más fina es el cemento.

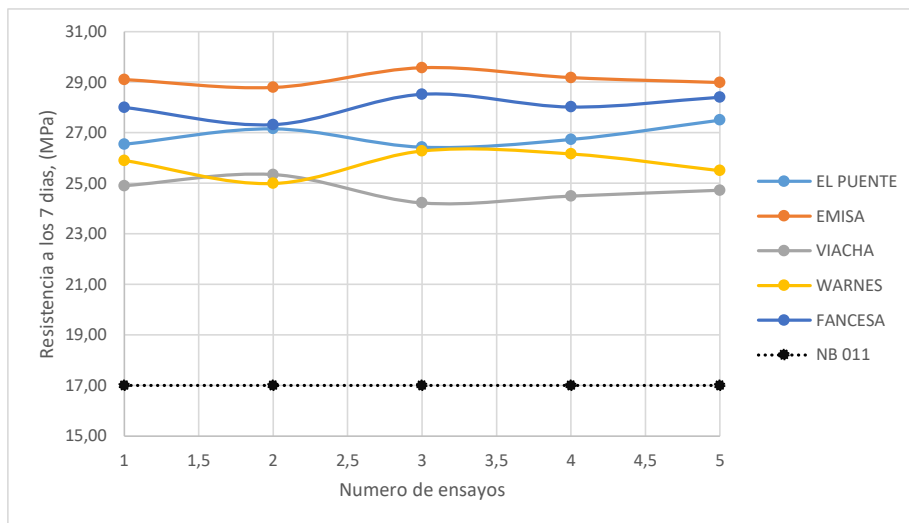
Fuente: Elaboración propia

La resistencia a los 7 días de los cementos Emisa y Fancesa tiene las resistencias a la compresión más elevadas, por lo tanto tienen cierta similitud los componentes que actúan en este periodo de tiempo.

Pero todos cumplen con los límites de resistencia estipulados en la norma boliviana NB 011, como se muestra en la figura 4.14.

Figura 4.14.-

Comparación de las resistencias mecánicas a edad de 7 días de los cinco cementos tipo IP-30

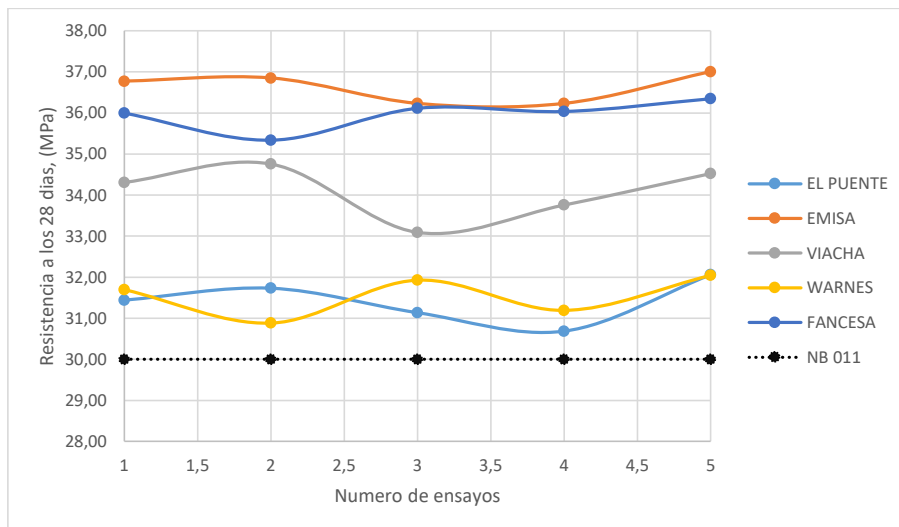


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.15 las repeticiones de la resistencia del cemento, se presenta la mayor resistencia a los 28 días para el cemento Emisa, con un promedio 36.62 MPa, seguido por una diferencia mínima, por el cemento Fancesa con un promedio de 35.97 MPa, estos dos cementos tienen la particularidad de tener un crecimiento en resistencia similar a cualquier edad, (ver figura 4.11), dando como conclusión que estos dos cementos tienen las proporciones similares en adiciones (ver figura 4.16) y componentes en el Clinker.

Figura 4.15.-

Comparación de las resistencias mecánicas a edad de 28 días de los cinco cementos tipo IP-30



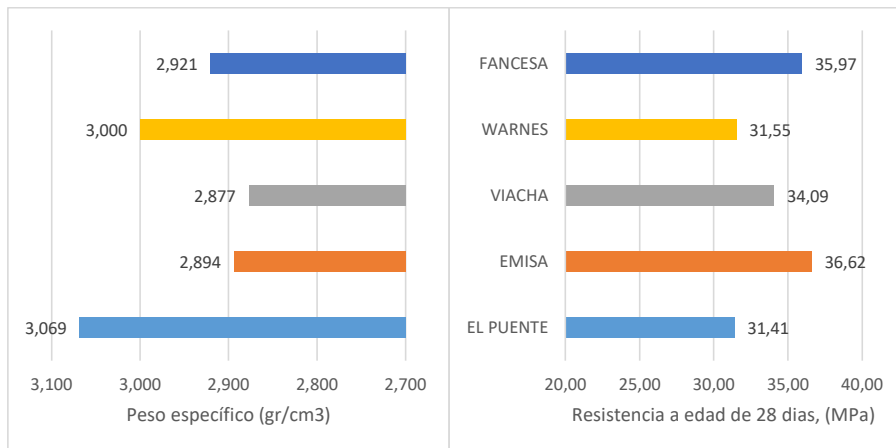
Fuente: Elaboración propia

El la figura 4.16 se puede observar claramente el comportamiento de la resistencia a la compresión a los 28 días en relación al peso específico (este valor nos muestra la cantidad de adición que tiene un cemento), el cemento Emisa y Fancesa tienen un peso específico similar, y consecuentemente una resistencia muy semejante entre sí. Ahora bien, los cementos Warnes y El Puente tienen el peso específico más elevado, o sea tienen poca incorporación de adiciones, a consecuencia de éste nos da valores de resistencia inferiores a los otros cementos. ¿Pero qué pasa con el cemento Viacha? Tiene un peso específico el más bajo que los otros cementos de estudio, efecto de una incorporación mayor de adiciones que los otros cuatro cementos, a consecuencia de incorporación de mucha adición,

incluso mayor que el cemento Emisa y Fancesa, a diferencia de estas dos marcas de cemento, resulta una resistencia a la compresión menor a la del cemento Emisa y Fancesa.

Figura 4.16.-

Comparación entre peso específico y la resistencia a la compresión a los 28 días, de cinco marcas de cemento tipo IP-30

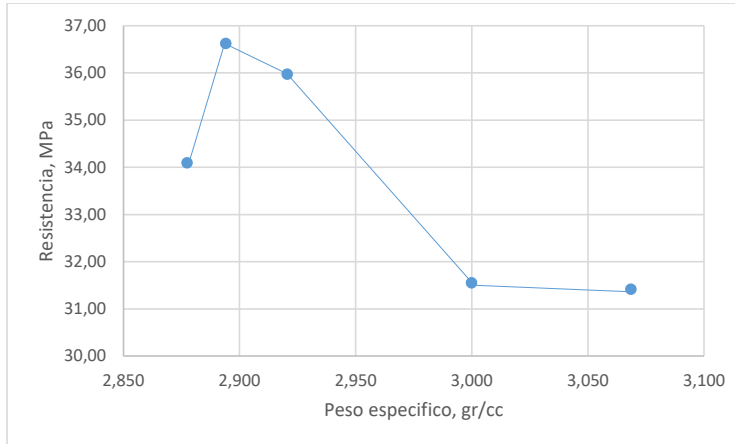


Nota: De la figura 4.16 a lado izquierdo se muestra el peso específico de los cinco cementos estudiados, para la compresión del grado de incorporación de adiciones en el cemento

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.17.-

Resistencia a la compresión a edad de 28 días Vs peso específico



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.17 podemos corroborar la teoría, sabiendo que un cemento más ligero contiene más adición de puzolana, pero también la adición de puzolana en mucha proporción o poca proporción afecta en el desarrollo de la resistencia como se puede evidenciar en la gráfica.

4.6. Comparación de resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio con los especificados por el fabricante

Tabla 4.1.-

Comparación de resultados con los especificados del fabricante de la marca cemento El Puente tipo IP-30.

DESCRIPCIÓN		UNI	Resultados de ensayos	Especificados por el fabricante	IP-30 NB 011
RESIDUOS EN MALLAS	200M	%	0,95	0,88	
PESO ESPECÍFICO		gr/cc	3,069	3,02	
TIEMPO DE FRAGUADO	INICIAL	min	162,18	158	>45
	FINAL	Hrs	4:51	4:53	<7
EXPANSIÓN AUTOCLAVE		%	0,01	-	<1
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	3 DIAS	MPa	22,15	22,96	>10
	7DIAS	MPa	26,87	-	>17
	28DIAS	MPa	31,41	-	>30

Fuente: Sociedad Boliviana de Cemento 2008

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez realizado los ensayos físicos – mecánicos, de las cinco marcas de cemento (El Puente, Emisa, Viacha, Warnes y Fancesa), se llegó a las siguientes conclusiones:

Los cinco cementos estudiados en el presente trabajos, cumplieron con las exigencias físicas – mecánicas, prescritas en la norma boliviana NB 011.

Existe una relación entre la finura y el desarrollo de resistencia a edades tempranas al observar que la elevada finura del cemento El Puente, Emisa y Fancesa tienen elevada resistencia a la compresión a edad de 3 días (ver figura 4.13), a diferencia de los cementos Viacha y Warnes, tienen un endurecimiento más lento, a consecuencia de una finura más baja.

Si comparamos el cemento El Puente con el cemento Viacha, sucede un fenómeno interesante, el cemento El Puente por su elevada finura, endurece más rápido que el cemento Viacha (ver figura 4.13), ahora si vemos la figura 4.11 vemos que el cemento Viacha supera la resistencia a la compresión a los 28 días al cemento El Puente, lo cual indica que la influencia de la finura influye en las edades tempranas y no necesariamente a edades mayores.

Ahora bien, vemos que el cemento El Puente presenta más fineza que los otros cuatro cementos, por lo tanto, puede decirse que dicho cemento produce mayor calor de hidratación, lo cual puede ser favorable o desfavorable dependiendo a la situación en la que se la emplee. Este aumento de

temperatura puede ser indeseable, después del endurecimiento, el enfriamiento no uniforme de la masa de concreto hasta la temperatura ambiente puede crear tensiones de tracción (esfuerzos de tensión) indeseables. Por otro lado, el aumento de la temperatura en el concreto causado por el calor de hidratación es frecuentemente beneficioso en clima frío, pues ayuda a mantener las temperaturas favorables para el curado.

Se puede sacar ventaja de esta propiedad, durante el tiempo frío, para mantener temperaturas adecuadas de curado mediante el aislamiento que brinda el encofrado. Además una finura más elevada aumenta la trabajabilidad en el hormigón o mortero.

Se pudo identificar que el cemento Viacha, tiene la característica de tener las partículas más gruesas que las otras cuatro, por lo tanto produce menor calor, endurecimiento más lento, por lo tanto este cemento es aconsejable para lugares cálidos.

Se llegó a la conclusión que los cementos de peso específico más bajo, producen resistencia a la compresión más elevadas a edad de 28 días, debido a que contienen mayor adición puzolánica, ya que cuanto más adición contenga el cemento, menor peso específico. Por ejemplo el cemento Emisa y Fancesa nos dieron un bajo peso específico, dando como resultado resistencias elevadas en relación a los otros tres cementos. Sucediendo lo contrario en el cemento El Puente y el cemento Warnes, teniendo mayor peso específico, pero menor resistencia. ¿Pero qué pasa con el cemento Viacha, si presenta menor peso específico, por lo tanto más adición puzolánica que las otras cuatro? Sucede que, al agregarle elevada adición, la resistencia desciende de acuerdo al incremento de adición. Por lo tanto las proporciones de adiciones deben ser lo suficiente y necesario en proporción si se quiere obtener al resistencia y mejor performance. Estas adiciones están normadas en la NB 011.

Se identificó también que los cementos de alta finura, necesitan un porcentaje mayor de agua para obtener la consistencia normal.

Los cementos Emisa y Fancesa tienen los tiempos de inicio de fraguado más corto de 2h 23min y 2h 28min, por lo tanto menor tiempo de manipuleo del hormigón fresco, mientras que el cemento Warnes con 3h 30min, Viacha con 2h 53min y El Puente con 2h 42min.

Los cementos estudiados presentaron valores de expansión muy bajos en comparación a lo normado en la NB 011, lo cual indica que su composición química de éstos posee un bajo porcentaje de cal

libre, indicio de procesos de fabricación bien ajustados. Curiosamente, los cementos con mejores propiedades mecánicas, como ser Emisa y Fancesa presentaron expansiones elevadas en relación a las demás estudiadas. Lo que nos lleva a la conclusión de que la cal libre no es del todo perjudicial en adecuadas proporciones, ya que al expandirse en el tiempo de fraguado, ésta llega a ocupar los mayores espacios vacíos posibles.

En este estudio se analizó el comportamiento físico-mecánico del cemento como un elemento individual por lo tanto se recomienda complementar el estudio del comportamiento de diferentes cementos al ser parte integral de una mezcla de concreto.

Se recomienda complementar este tipo de estudios con el análisis químico de estos cementos para complementar los resultados obtenidos en este trabajo, con lo cual se puede tener una visión más clara del comportamiento de estos cementos y las razones de porqué se presentan valores con alta variación entre uno y otro cemento.

Para elegir un cemento comercial para una construcción, la variable más importante es cómo se comporta cada una de ellas indistinto de la marca de cemento, esto con el fin de que éste cumpla con los parámetros establecidos del diseño que se desea realizar, y así poder utilizar lo mejor de cada cemento respecto a la situación en la que se encuentre, la zona de la obra y el tipo de edificación que se desea realizar. Igualmente en la actualidad el uso de aditivos cumple un papel fundamental en el concreto hidráulico ya que está en función de mejorar y reducir los costos de inversión en las construcciones.

Se recomienda al constructor tomar en cuenta las cualidades de los cementos disponibles en su respectivo medio, ya sea en su performance o costo, para ejecutar con más calidad de trabajo según al tipo de obra.

Se recomienda que a la hora de realizar cualquier hormigonado se tome en cuenta el tiempo de preparación de la mezcla, el tiempo de transporte y su vaciado, que sumados todos esos tiempos deben ser menores o iguales que el tiempo de inicio de fraguado del cemento que se está utilizando. Para evitar posteriores fisuramientos indeseados en el hormigón.

Se recomienda almacenar los cementos en lugares libres de toda humedad, mucho más los cementos con granos más finos, para evitar la motorización del cemento.

Se recomienda un curado del hormigón riguroso, puesto que independiente de cada cemento, las curaciones malas hacen que el desarrollo de la resistencia sea deficientes y no alcance su resistencia prevista.