

CAPÍTULO I

I.1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena y grava (u otro agregado), agua, aditivos. La mezcla elaborada endurece en encofrados o moldes que le dan la forma y dimensiones deseadas.

Puede considerarse como el conglomerante pétreo artificial que resulta de agregar grava a un mortero. Mientras se mantiene en su estado plástico, la mezcla recibe el nombre de hormigón fresco, después de fraguar y endurecer el hormigón posee muy buena resistencia a la compresión.

El hormigón elaborado con cemento Portland es un material de construcción, que gracias a su fácil moldeo, su composición con elementos que abundan en la naturaleza y su facilidad de incorporar otros materiales, no ha perdido vigencia hasta la fecha y es considerado el material más popular y de mayor uso en la construcción de viviendas, edificios, puentes, presas, sistemas de riego, pistas de aterrizaje, silos o bodegas, vías de comunicación y otras obras civiles.

Los ejemplos en la construcción de estructuras de hormigón con problemas, ante sus condiciones de servicio, son abundantes y de diferente naturaleza, éstos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes frentes como investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que en ella intervienen.

En cuanto a la puzolana se entiende, en sentido escrito, el producto natural de origen volcánico que, finamente dividido, no posee ninguna propiedad hidráulica pero contiene constituyentes (sílice y alúmina) capaces de fijar cal a la temperatura ambiente en presencia de agua formando compuestos de propiedades hidráulicas. En sentido amplio, el término puzolana se aplica también a otros productos artificiales, o naturales de origen no volcánico, que tienen análogas propiedades, tales como cenizas volantes, el humo de sílice, la tierra de diatomeas y las arcillas activada.

I.2. ANTECEDENTES

El estudio de hormigones de alto desempeño se viene desarrollando en todo el mundo desde hace aproximadamente una década. Actualmente se está abocado al tema de la resistencia. Una de las propiedades mecánicas que incide en la durabilidad, en cualquier tipo de hormigón, es la retracción por secado.

El mayor problema se presenta cuando la retracción o contracción no puede realizarse libremente, es decir el hormigón se encuentra restringido a los cambios volumétricos, ya sea por problemas de vínculos, encofrados, o por la forma del elemento constructivo. Este impedimento puede provocar una importante fisuración, la cual atenta contra la durabilidad y futuro comportamiento del hormigón, por cuanto las fisuras, además de provocar el debilitamiento del material, facilitan su agresión física y química, y especialmente, la de las armaduras, y puede afectar su capacidad para soportar las cargas de diseño, además de dañar su apariencia.

Uno de los materiales comunes clasificados como cementantes (aunque en realidad sólo en forma latente) es la puzolana, que es una material natural o artificial que contiene sílice en forma reactiva. Una definición más formal de la norma ASTM 618-91a describe la puzolana como un material sílice o silíceo y aluminoso el cual, en sí mismo, posee poco o ningún valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (Silicatos cálcicos hidratados).

El humo de sílice (H.S.) es un material de bajo peso específico, por este motivo este material ocupa bastante volumen y no se considera un problema su extracción. Por esto, este trabajo trata de buscar que este material procesado extraído de yacimientos, incremente su valor agregado, ya que el humo de sílice (H.S.) contiene un porcentaje muy alto de sílice como lo respaldan varios ensayos realizados por laboratorios especializados en el tema de hormigones.

Debido a su extrema finura, y a su alto contenido de sílice, se convierte en un material puzolánico muy efectivo que puede reaccionar con los productos de hidratación del cemento portland para formar materiales de cementación secundario durante el proceso de

hidratación. En un cemento portland hidratado, el hidróxido de calcio, que no llega a reaccionar, es vulnerable a ataques químicos y a la percolación.

En los concretos normales y proyectados que contienen humo de sílice (H.S.) el hidróxido de calcio es consumido a través de reacciones puzolánicas con el humo de sílice (H.S.) resultando en un concreto con muy baja permeabilidad y absorción y un incremento en la resistencia al deterioro bajo condiciones agresivas.

El humo de sílice (H.S.), presenta una gran variedad de características fisicoquímicas que es preciso estudiar, según la aplicación que se desee.

I.3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El presente trabajo desarrolla la adición del humo de sílice (H.S.) en reemplazo parcial del cemento, realizando los controles de calidad, ensayos de morteros necesarios, para posteriormente en base a los resultados obtenidos, realizar la dosificación en el hormigón, teniendo como finalidad demostrar que el humo de sílice (H.S.) como material cementante de adición mejora las propiedades del hormigón, sin costos elevados ya que se trata de un producto natural extraído de yacimientos existentes en nuestro medio. En su primera parte se revisan todos los conceptos básicos y ensayos mínimos para hormigones para su posterior dosificación en el hormigón.

Se realizan adiciones del humo de sílice (H.S.) en diferentes porcentajes en un diseño de un hormigón patrón, elaborado con cemento portland puro (patrón). El parámetro que influyó para la elección del cemento puro (patrón) fue, que no tiene ningún tipo de adición puzolánica en su fabricación a diferencia con el cemento IP 30 contiene un porcentaje mínimo de adición, Los parámetros de elección de los tipos de cemento son muy lejanos ya que el Portland puro actualmente no es comercializado pero dan buenos resultados en este tipo de trabajo de investigación, a diferencia del IP 30 que es el que más se utiliza en el ámbito de la construcción.

El problema presentado en este trabajo, es la resistencia de los hormigones y con respecto a la adición es el no aprovechamiento del humo de sílice (H.S.) en la elaboración y utilización de hormigones para la construcción en nuestro medio.

I.3.1 Planteamiento

Los materiales que no cumplen con los requisitos específicos para cada estructura, se tiende a sustituir por materiales con mejores características. Por costumbre se han usado hormigones convencionales los cuales necesariamente requieren de diferentes tipos de adiciones ya sean químicos o naturales adecuadas a un control de calidad lo que normalmente no se da en nuestro medio y en futuro inmediato se presentan las fallas sobre todo en la resistencia del hormigón, además de los tiempos en que se logra el aumento de la resistencia de los hormigones, principalmente en estructuras de gran envergadura.

Las principales causas que originan las fallas en los hormigones, con relación a las adiciones y a nuestro objetivo son:

- Desconocimiento del proceso de extracción y obtención del humo de sílice (H.S.) como materia prima para la elaboración de hormigones.
- Desconocimiento de la ubicación de los yacimientos del (H.S.) en nuestro medio. (Tarija-Bolivia).
- Desconocimiento de la incidencia del humo de sílice (H.S.) en la elaboración de hormigones.
- Desconocimiento de la composición química de la materia prima (H.S.).
- Desconocimiento del proceso de elaboración de hormigones con humo de sílice (H.S.).

De mantenerse la situación actual se incrementarán los problemas de fallas en los hormigones, que traerán los conflictos en la economía, en la no optimización de dimensionamiento (geometría) de elementos estructurales, también el desaprovechamiento de los yacimientos y la explotación de la materia prima (humo de sílice), etc.

Por lo que se hace necesario plantear como solución al problema presentado, es la adición del humo de sílice (H.S) en la elaboración de hormigones. Esta alternativa de solución se dará para los hormigones con baja resistencia.

I.3.2. Formulación

Como las adiciones incrementan la resistencia del hormigón, se realizara un análisis de la incidencia del humo de sílice (H.S.) en la elaboración de hormigones, en el presente trabajo se plantea establecer las dosificaciones con adiciones equivalentes a una capacidad de resistencia permitida, para obtener hormigones con mayor resistencia.

Mejorar la resistencia en los hormigones es uno de los objetivos que comúnmente se demanda en las estructuras.

I.3.3. Sistematización

Para el desarrollo del Proyecto de Investigación sobre el incremento de la resistencia en hormigones convencionales como alternativa es la adición del humo de sílice (H.S.) en remplazo parcial se plateó la siguiente metodología:

Para ésto se realizaran ensayos en los hormigones con adición del humo de sílice (H.S.) en porcentajes que varían de 5, 10, 15 y 20%, considerando el incremento o reducción del agua.

Para este tipo de ensayos seguimos la instrucción de trabajo de acuerdo a la normativa de control de calidad de la fábrica de cemento “EL PUENTE”, Código (OIJ-CCL. CC.032)

1ra alternativa sin aditivo

Se realizará en base a agregados y cemento una dosificación patrón y se comprobara las resistencias que se tiene a los 7, 14 y 28 días.

2da alternativa con aditivo

Se realizará en base a agregados y cemento más aditivo (humo de sílice) varias dosificaciones de acuerdo con la proporción de adición, para ver las variaciones de las resistencias que presenta en relación a la primera alternativa.

I.4. HIPÓTESIS

La hipótesis que se plantea en este trabajo de investigación es que, con la adición del humo de sílice (H.S.) en reemplazo parcial al cemento, se incrementará la resistencia a compresión de un hormigón convencional.

La hipótesis se respalda en el alto contenido de sílice en el humo de sílice (H.S.), el fenómeno que se presenta con este tipo de adición es la formación silicatos en un proceso natural de hidratación, en sí mismo la sílice, posee poco o ningún valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes

Para la comprobación, se decidió realizar este tipo de investigación ya que además de que dicho material aumenta la resistencia, también brinda otras propiedades al hormigón como se indica continuación:

El empleo de adiciones minerales activas, en la elaboración de hormigones se viene desarrollando desde hace unos años, habiendo trabajos publicados. En éstos, se concluyó que la incorporación del humo de sílice (H.S.) a los hormigones le brinda, a estos conglomerados de cemento, una serie de beneficios: control del calor de hidratación, mayor compactación, mayor resistencia etc.

I.5. OBJETIVOS

A continuación se presentan los siguientes objetivos.

I.5.1. Objetivo General

- Realizar, mediante ensayos de laboratorio y un control de calidad el “ANÁLISIS DE LA ADICIÓN DEL HUMO DE SÍLICE EN LA RESISTENCIA DE HORMIGONES CONVENCIONALES” y compararla con ensayos estandarizados y/o normalizados con una resistencia *patrón*, según la dosificación realizada.

I.5.2. Objetivos Específicos

Entre los objetivos específicos se establecen los siguientes:

- Realizar el análisis físico-químico del humo de sílice (H.S.) para garantizar que el procedimiento de extracción y procesamiento sea garantizado para dicho uso.
- Controlar la calidad del humo de sílice (H.S.) objeto del estudio y determinar su comportamiento en la adición en hormigones.
- Controlar la calidad del cemento para garantizar su implementación al hormigón.
- Adicionar el humo de sílice (H.S.) objeto del estudio entre los valores de 5, 10, 15 y 20 %, en reemplazo parcial del cemento portland puro patrón.
- Determinar el incremento del volumen de agua para el tipo de cemento objeto del estudio con adición del humo de sílice (H.S.).

Los objetivos específicos para el desarrollo de este tema de investigación se desglosan en análisis físico-químicos del cemento puro patrón y del humo de sílice (H.S.).

Posteriormente se desarrollan los objetivos específicos referidos al hormigón con los porcentajes de adición que mejor comportamiento tengan a la compresión.

I.5.2.1. Análisis químicos del cemento, y la adición de “H.S.”

- Se realizará el análisis químico del cemento con y sin adición además del humo de sílice puro según instrucción de trabajo de la fábrica de cemento el puente (**OIJ-CCL-CC.029** “ANÁLISIS QUÍMICO”), y según la Norma Boliviana **NB 060** (Disposiciones generales el análisis químico), y **NB 061** (Análisis químico).
- Se realizará el análisis de cal libre del cemento, y del humo de sílice según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.027** “DETERMINACIÓN DE CAL LIBRE”).
- Se realizará el análisis de residuo insoluble del humo de sílice según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.028** DETERMINACIÓN DE RESIDUO INSOLUBLE”).

I.5.2.2. Análisis físicos del cemento con y sin adición.

A continuación, se desarrollan todos los análisis físicos que se realizarán para alcanzar el objetivo específico del presente trabajo.

- Determinación del peso específico del cemento con y sin adición según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.023** y **NB 064**).
- Determinación de superficie específica Blaine del cemento con y sin adición, según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.019** y **NB 472**).
- Determinación de retenido en la malla #325 del cemento con y sin adición según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.020**).
- Determinación de consistencia normal del cemento con y sin adición, según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.017** y **NB 062**).
- Determinación del tiempo de fraguado del cemento con y sin adición según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.018** y **NB 063**).
- Determinación de la expansión Le Chatelier del cemento con y sin adición, según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.035** y **NB 643**).
- Determinación de la fluidez del cemento con y sin adición según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.021** y **NB 473**).
- Método para determinar la resistencia a compresión del cemento con y sin adición, según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.025** y **NB 470**).

I.5.2.3. Análisis Físicos Mecánicos del Hormigón

- Analizar las normas “ASTM C136” de la elaboración del hormigón y aplicar al estudio a realizar.
- Efectuar un buen control de los agregados a utilizar para la elaboración de las probetas de hormigón.
- Comparar los resultados obtenidos en las probetas realizadas mediante norma “ASTM C136” y las elaboradas con los porcentajes de adición del humo de sílice (H.S.), de las pruebas de control de calidad realizadas del cemento.

I.6. JUSTIFICACIÓN

Las razones por las cuales se plantea realizar el presente trabajo de investigación son las siguientes:

I.6.1. Académica

Profundizar los conocimientos adquiridos en el diseño y elaboración de hormigones con adición, analizando en base a dosificaciones la incidencia y el comportamiento del humo de sílice (H.S.) en la producción de hormigones convencionales.

I.6.2. Técnica

La composición química del humo de sílice (H.S.) se presenta como una justificación del trabajo que se pretende realizar. Ya que el humo de sílice (H.S.) al contener un alto porcentaje de sílice que es un material puzolánico que reacciona con el hidróxido de calcio presente en el cemento reaccionará al hidratarse éstos a temperatura ambiente, en presencia del agua, formando compuestos de propiedades hidráulicas silicatos cálcicos hidratados. En experiencias realizadas con este tipo de materiales silicios, se obtienen hormigones de alta resistencias.

I.6.3. Social

Bajar costos en la elaboración de hormigones y al mismo tiempo reducir secciones y dimensionamiento (geometría) de los elementos estructurales.

Mejorar las diferentes características de los hormigones.

Motivar el uso del humo de sílice (H.S.) en la elaboración de hormigones y aprovechar los yacimientos existentes en nuestro medio (Tarija).

CAPÍTULO II

II.1. DEFINICIÓN DEL HORMIGÓN.

El hormigón, también denominado concreto, es una mezcla de cemento Pórtland, agregado fino, agregado grueso, aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades prefijadas, especialmente la resistencia.

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.).

Cuando se proyecta una estructura de hormigón armado se establecen las dimensiones de los elementos, el tipo de hormigón, los aditivos, y el acero que hay que colocar en función de los esfuerzos que deberá soportar y de las condiciones ambientales a que estará expuesto.

Su empleo es habitual en obras de arquitectura e ingeniería, tales como edificios, puentes, diques, puertos, canales, túneles, etc. e incluso en aquellas edificaciones cuya estructura principal se realiza en acero, su utilización es imprescindible para conformar la cimentación.

II.2. MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGÓN

II.2.1. CEMENTO

Se llaman conglomerantes hidráulicos aquellos productos que, amasados con el agua, fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como sumergidos en agua, por ser estables en tales condiciones los compuestos resultantes de su hidratación. Los conglomerantes hidráulicos más importantes son los cementos.

En términos generales, un cemento se define como un material con propiedades adhesivas y cohesivas que dan la capacidad de unir fragmentos sólidos para formar un material resistente y durable.

Sin embargo, esta definición incluye gran cantidad de materiales cementantes y los que realmente importan desde el punto de vista de la construcción son los cementos hidráulicos; llamados así porque tienen la peculiaridad de desarrollar sus propiedades (fraguado y endurecimiento) cuando se encuentran en presencia de agua, en virtud a que experimentan una reacción química en ella.

El cemento constituye entre el 7 y el 15% de volumen total del concreto, y es el componente activo de la mezcla y por tanto influye en todas sus características.

Cada tipo de cemento está indicado para unos usos determinados; también las condiciones ambientales determinan el tipo y clase del cemento afectando a la durabilidad de los hormigones. Los tipos y denominaciones de los cementos y sus componentes están normalizados y sujetos a estrictas condiciones. La norma española establece los siguientes tipos: cementos comunes, los resistentes a los sulfatos, los resistentes al agua de mar, los de bajo calor de hidratación, los cementos blancos, los de usos especiales y los de aluminato de calcio. Los cementos comunes son el grupo más importante y dentro de ellos el Pórtland es el habitual.

Además del tipo de cemento, el segundo factor que determina la calidad del cemento, es su clase o resistencia a compresión a 28 días. Ésta se determina en un mortero normalizado y expresa la resistencia mínima, la que debe ser siempre superada en la fabricación del cemento.

No es lo mismo, ni debe confundirse la resistencia del cemento con la del hormigón, pues la del cemento corresponde a componentes normalizados y la del hormigón dependerá de todos y cada uno de sus componentes. Pero si el hormigón está bien dosificado, a mayor resistencia del cemento corresponde mayor resistencia del hormigón. A continuación, en las

siguientes tablas se presenta la clasificación y composición de los cementos y además sus categorías resistentes según la norma boliviana NB 011.

<i>Tabla 2.1. Clasificación de los Cementos Norma Boliviana NB 011</i>						
CLASIFICACION Y COMPOSICIÓN DE LOS CEMENTOS						
			PROPIEDADES EN MASA %			
TIPOS DE CEMENTO			COMPONENTES PRINCIPALES			COMPONENTES ADICIONALES
DENOMINACIÓN	DESIGNACIÓN	TIPO	CLINKER	PUZOLANA NATURAL	FILLER CALIZO	
CEMENTO PORTLAND	CEMENTO PORTLAND	I	95 a 100	-	-	0 a 5
	CEMENTO PORTLAND CON PUZOLANA	IP	60 a 94	6 a 40	-	0 a 5
	CEMENTO PORTLAND CON FILLER O CALIZA	IF	80 a 94	-	6 a 20	0 a 5
CEMENTO PUZOLÁNICO		P	45 a 60	40 a 55	-	0 a 5

Fuente: Norma Boliviana NB 011

<i>Tabla 2.2. Clasificación de los Cementos Norma Boliviana NB 011</i>				
CATEGORÍAS RESISTENTES DE LOS CEMENTOS				
NB 011				
CATEGORÍAS RESISTENTES		RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN (MPA)		
		MÍNIMAS A 3 DIAS	MÍNIMAS A 7 DIAS	MÍNIMAS A 28 DIAS
ALTA	40	17	25	40
MEDIA	30	10	17	30
BAJA	25	-	15	25

Fuente: Norma Boliviana NB 011

El cemento se encuentra en polvo y la finura de su molido es determinante en sus propiedades conglomerantes, influyendo decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas de su fraguado y primer endurecimiento. Al mezclarse con el agua, los granos de cemento se hidratan sólo en una profundidad de 0,01 mm, por lo que si los granos fuesen muy gruesos el rendimiento de la hidratación sería pequeño al quedar en el interior un núcleo inerte. Sin embargo, una finura excesiva provoca una retracción y calor de hidratación elevados. Además, dado que las resistencias aumentan con la finura hay que llegar a una solución de compromiso, el cemento debe estar finamente molido, pero no en exceso.

El almacenamiento de los cementos a granel se realiza en silos estancos que no permitan la contaminación del cemento y deben estar protegidos de la humedad.

En los cementos suministrados en sacos, el almacenamiento debe realizarse en locales cubiertos, ventilados, protegidos de la lluvia y del sol. Un almacenamiento prolongado puede provocar la hidratación de las partículas más finas por meteorización, perdiendo su valor hidráulico y que supone un retraso del fraguado y disminución de resistencias.

II.2.1.1. Fabricación del Cemento

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

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

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

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

II.2.1.1.1. MATERIAS PRIMAS

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

Como ya se ha indicado el grupo de los componentes principales incluye:

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

Donde a continuación se describe cada uno de estos componentes.

La Cal:

Cuantitativamente es el componente más importante del cemento la roca caliza es la que proporciona principalmente el CaCO_3 , el que a su vez proporciona la cal que interviene en la formación de los cuatro compuestos principales del cemento.

La roca caliza, al recalentarse se disocia en cal viva (CaO) y en anhídrido carbónico (CO_2).

Este proceso se efectúa rápidamente a 1000°C , cuando el material adquiere un color rojo vivo. La cal viva remanente no difiere mucho en su aspecto inicial pero ha experimentado una pérdida de peso del 44% debido al desprendimiento del anhídrido carbónico. Por ese motivo, su porosidad es mayor que la de la caliza original.

La Sílice:

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

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

Alúmina:

La alúmina u óxido de alúmina (Al_2O_3) se relaciona con la arcilla que contiene dicho óxido en cantidad considerable. Se considera en la composición normal de la arcilla que el porcentaje de sílice es aproximadamente el doble del correspondiente a la suma de la alúmina y el óxido férrico, y el de la alúmina es el doble del de óxido férrico.

En la química de los cementos, la alúmina tiene importancia ya que al igual que la sílice puede unirse en combinación geliforme con la cal y el agua.

Óxido de Hierro:

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

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

II.2.1.2. Composición Química del Cemento

Como anteriormente se menciona las materias primas del cemento son (cal, sílice, alúmina, y óxido de hierro), interactúan en el horno hasta alcanzar un estado de equilibrio químico para formar una serie de productos más complejos. Dichos productos se mencionan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. *Compuestos del Cemento Pórtland*

COMPUESTO	FÓRMULA QUÍMICA	ABREVIATURA USADA
SILICATO TRICÁLCICO	3CaOSiO_2	C_3S
SILICATO DICÁLCICO	2CaOSi_2	C_2S
ALUMINATO TRICÁLCICO	$2\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
FERROALUMINATO TETRACÁLCICO	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	CA_4F

Fuente: Tecnología del Hormigón Ing. O'Reill Vitervo ASTM C 150

Estos compuestos han sido llamados "Compuesto de Bogue". Generalmente la fórmula química de estos constituyentes se usa en forma abreviada con el único fin de facilitar su expresión y no utilizar un término complicado.

Los constituyentes C_3S y C_2S forman del 70 al 80% del cemento Pórtland son los más estables y los que más contribuyen a la resistencia del cemento.

El C_3S se hidrata más rápidamente que el C_2S y por tanto contribuye al tiempo de fraguado y a la resistencia inicial, su acción hidratadora esta comprendida entre las 24 horas y 7 días, provocando endurecimiento normal de la pasta de cemento y sus elevadas resistencias al séptimo día.

La contribución del C_2S toma lugar muy lentamente su acción endurecedora está comprendida entre los 7 a 28 días y puede continuar por encima de un año.

El C_3A se hidrata rápidamente y genera mucho calor; solamente contribuye a la resistencia a las 24 horas y es el menos estable de los cuatro principales componentes del cemento. Además, le da a los concretos propiedades indeseables, tales como cambios volumétricos y baja resistencia a los sulfatos.

El C_4AF cumple la acción de catalizar y aporta poca resistencia al concreto.

II.2.1.2.1. COMPONENTES INDESEABLES EN EL CEMENTO

Los cuatro componentes principales del cemento son la cal, sílice, alúmina, y el óxido férrico, como ya se describió previamente. Los restantes componentes puede decirse que son los indeseables en el cemento. A continuación se comentan brevemente.

a) Óxido cálcico libre, CaO

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

b) Óxido magnésico, MgO

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

c) Trióxido de azufre SO₃

El azufre proviene de la adición de piedra de yeso que se hace al clínker durante la molienda para regular su fraguado, pudiendo también provenir del combustible empleado en el horno. Un exceso de SO₃, puede conducir al fenómeno de falso fraguado, por lo que conviene ser estricto en la comprobación de que no se rebasa la limitación impuesta por el pliego correspondiente. Un contenido en SO₃, inferior al 4 % es aceptable.

d) Pérdida al fuego

Cuando su valor es apreciable, la pérdida al fuego proviene de la presencia de adiciones de naturaleza caliza o similar, que no suele ser conveniente. Si el cemento ha experimentado un prolongado almacenamiento, la pérdida al fuego puede provenir del vapor de agua o del CO₂ presentes en el conglomerante, siendo entonces expresiva de una meteorización del cemento.

e) Residuo insoluble

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

f) Alcalis

Proviene en general de las materias primas y se volatilizan en buena parte, encontrándose luego en el polvo de los humos de las fábricas de cemento. No suelen superar el 0,8 %.

II.2.1.3. Cemento Pórtland TIPO I

El cemento Pórtland es un producto comercial de fácil adquisición, que cuando se mezcla con el agua, ya sea sólo o en combinación con arena, piedra u otros materiales similares, tiene la propiedad de reaccionar lentamente hasta formar una masa endurecida. Esencialmente es un clínker, finamente molido, producido por la cocción a elevadas temperaturas, de mezclas que contienen cal, alúmina, fierro y sílice en proporciones determinadas.

II.2.1.3.1. Características del Cemento Pórtland

El cemento Pórtland es un polvo de color gris, más o menos verdoso, se vende en bolsas que tienen un peso neto de 50 Kg. y un pie cúbico de capacidad. En aquellos casos en que no se conozca el valor real, se tienen que realizar los ensayos para determinar el peso específico del cemento. Generalmente se toma el valor 3.14 gr. /cm^3 .

II.2.1.3.2. Clasificación del Cemento Pórtland

Los cementos Pórtland, se fabrican en cinco tipos, cuyas propiedades se han normalizado sobre la base de la especificación ASTM de normas para el cemento Pórtland (C-150).

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

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

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

TIPO IV: Es el cemento que se requiere bajo calor de hidratación.

TIPO V: Es el cemento del que se requiere alta resistencia a la acción de los sulfatos. Las aplicaciones típicas comprenden estructuras hidráulicas expuestas a aguas con alto contenido de álcalis y estructuras expuestas al agua de mar.

II.2.1.3.3. Fraguado y Endurecimiento

El fraguado es la pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento, hay dos etapas de fraguado:

- **Fraguado inicial:** Cuando la masa empieza a perder plasticidad.
- **Fraguado final:** Cuando la pasta de cemento deja de ser deformable y se convierte en un cuerpo rígido.

II.2.1.3.4. Calor de Hidratación:

Durante el proceso de endurecimiento se producen reacciones que generan calor. Cuando las reacciones son pequeñas y el calor puede liberarse, el calor de hidratación no es importante, pero al vaciar grandes volúmenes de concreto y cuando el calor no puede liberarse fácilmente, resulta un factor a tenerse muy en cuenta; la temperatura que genera la hidratación llega a los 50 °C en presas. Algunos investigadores han observado temperaturas mayores. Como la temperatura ambiente es menor, se producen descensos bruscos de ésta, ocasionando contracciones y en consecuencia, rajaduras.

En el vaciado de grandes volúmenes es indispensable controlar este aspecto, si no se desea sufrir desagradables sorpresas. Se debe usar cemento de bajo calor de hidratación y/o puzolanas. El calor de hidratación del cemento se mide en calorías gramo, cuanto menor sea el calor de hidratación del cemento menor será la temperatura a que se eleve el concreto.

II.2.1.3.5. Función del Yeso en el Cemento

La velocidad con la que se desarrolla el endurecimiento del cemento, debe de ser controlada dentro de ciertos límites para que se sea un producto útil en la construcción. Si las reacciones fuesen demasiado rápidas, el concreto endurecería rápidamente y no podría ser transportado y colocado sin ocasionarle daño.

Si las reacciones fuesen demasiado lentas, la demora en adquirir resistencia sería objetable. Por lo tanto, la velocidad de reacción debe controlarse. Esto se logra dosificando cuidadosamente la cantidad de yeso que se agrega al clínker durante la molienda.

II.2.1.3.6. Almacenamiento del cemento en obra

El cemento no debe ser guardado sin usarse mucho tiempo, pues conforme avanza el tiempo va perdiendo resistencia; esto es válido para todos los tipos de cemento.

Para el caso de cementos en sacos, bien guardados en almacenes cerrados y sobre tablillas de madera, la pérdida de resistencia probable es en 3 meses 15%, y en 6 meses 25% y así aumenta sucesivamente.

En el cemento guardado se forman grumos, la cantidad de éstos es un índice de su probable utilidad, si hay muchos grumos y éstos no pueden deshacerse con la presión de los dedos, generalmente quiere decir que el cemento va a dar pérdida apreciable de resistencia. En general, un límite apropiado de utilidad para el cemento en sacos es de 3 meses para cuando está en silos herméticos. Después del tiempo indicado, es importante hacer pruebas antes de usarlo.

Los límites proporcionados son para el caso de cemento bien almacenado, para cemento a la intemperie los límites son mucho menores, sobre todo si el tiempo es malo o lluvioso, en este caso puede inutilizarse en pocos días, si no se guarda convenientemente.

Para subsanar la pérdida de resistencia por almacenaje deberá incrementarse la dosificación en peso del cemento y mantener invariable la dosificación de los otros componentes de la mezcla.

II.2.1.4. Pruebas de las Propiedades del Cemento

II.2.1.4.1. Peso Específico

El peso específico o densidad del cemento es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que se ocupa en esa masa.

En el cemento portland puro, su valor varía entre 3.10 y 3.15 gr/cm³ y en el cemento Portland con adiciones suele estar entre 2.9 y 3.0 gr/cm³.

El valor del peso específico del cemento en realidad no indica la calidad de este, y su valor es usado principalmente para el diseño de mezclas.

Existe gran variedad de métodos para determinar la densidad del cemento de los cuales se pueden citar los de Le Chatelier, Schumann Mann, Condlot y otros.

➤ Procedimiento para determinar el peso específico según Norma NB 064

Se coloca en el frasco volumétrico de Le Chatelier, uno de los líquidos mencionado en la norma boliviana NB 064, hasta enrasar en una división comprendida entre las marcas 0 a 1 ml. se seca la parte interior del frasco en el baño termorregulador a la temperatura ambiente, donde permanece hasta que su contenido haya alcanzado la temperatura del baño, momento en el cual se efectúa la primera lectura.

La variación de la temperatura del líquido del frasco volumétrico no debe ser mayor de 0.2 °C. se pesa en un recipiente de vidrio, aproximadamente 64 gr. De cemento, secado previamente hasta peso constante, a una temperatura de 105 ± 5 °C, se agrega el cemento a

temperatura ambiente al líquido contenido en el frasco; se debe evitar que salpique el líquido y que el cemento quede adherido a las paredes interiores del frasco, por encima del nivel del líquido.

Estas operaciones se pueden realizar con la ayuda de un vibrador o empleando un embudo de vidrio de cuello largo. Inmediatamente después de esta operación se tapa el frasco.

Se toma el frasco por su parte superior. Se hace rotar inclinando alternadamente en uno y en otro sentido, hasta que colocado en posición vertical dejen de aparecer burbujas de aire.

Se sumerge el frasco nuevamente en el baño termorregulador y una vez alcanzado el equilibrio de temperatura, se realiza la lectura final.

La densidad del cemento se calcula mediante la ecuación descrita en la norma boliviana NB 064. El frasco volumétrico de Le Chatelier debe tener la forma indicada en la figura 2.1.



Figura 2.1. Frasco de Le Chatelier

II.2.1.4.2. Superficie Específica Blaine o finura

Esta es una de las propiedades más importantes del cemento, y se obtiene en la etapa de la molienda. Como la hidratación comienza sobre la superficie de las partículas del cemento, el área superficial total del cemento representa el material susceptible de hidratación. De esta manera, la velocidad de hidratación, y por tanto la resistencia, dependerá del grado de finura de los granos.

Una gran finura de los granos de cemento implica un mayor costo, además de hidratarse con mayor rapidez por la exposición a la atmósfera.

La medida de la finura se representa como el área superficial de las partículas contenidas en un gramo de material y se mide en cm^2/gr .

Existen varios métodos para medirla que pueden ser directos o indirectos tal como se aprecia en la tabla.

Tabla: 2.4 Métodos para Determinar la Finura

NOMBRE DEL METODO	
DIRECTO	Tamizado
INDIRECTO	Turbilímetro de wagner Permesbilímetro de Blaine

Fuente: Fábrica de Cemento EL PUENTE

➤ **Procedimiento para determinar la Superficie Específica Blaine Norma NB 472**

El tubo de permeabilidad se conecta herméticamente con el manómetro (véase Nota 4 NB 472), teniendo cuidado de que la capa de cemento no se altere. Se quita el aire contenido en la rama del manómetro, succionando con una pera de goma hasta que el líquido alcance la marca superior; luego se cierra herméticamente la válvula y se permite el pasaje de aire a través de la capa de cemento compactado. El cronómetro se pone en marcha en el momento en que el menisco del líquido en el manómetro, llegue a la segunda marca, es decir, a la marca que sigue la superior y el cronómetro se detiene en el momento en que el menisco llegue a la marca inferior. El lapso observado se anota en segundos, se anota también la temperatura ambiente en la que se hizo el ensayo, en grados centígrados. Para la calibración del aparato, se hacen como mínimo, tres determinaciones del tiempo de flujo, empleando respectivamente, tres porciones diferentes de la misma muestra (véase Nota 5 NB 472).

La calibración debe hacerla el mismo operador que efectúe las determinaciones de la superficie específica. En la figura 2.2 podemos ver el permeabilímetro BLAINE.



Figura 2.2 Permeabilímetro BLAINE

II.2.1.4.3. Consistencia de la Pasta Normal

El cemento, al amasarse con agua, forma una pasta suave y plástica que posteriormente se torna rígida y endurece presentando aspecto pétreo, debido a las reacciones químicas que se verifican entre el cemento y el agua.

Dependiendo de la cantidad de agua que se le agregue, el cemento alcanza una determinada fluidez, la que aumenta al incrementar la cantidad de agua. Esto quiere decir que habrá una determinada fluidez para una cierta cantidad de agua, considerada como consistencia normal.

La consistencia normal no es un parámetro directo que indique la calidad del cemento y por eso las normas no dan valores máximos o mínimos. Sin embargo, se considera como un parámetro complementario de otros ensayos que se tienen relación directa con la calidad del cemento como en el caso de los tiempos de fraguado y la estabilidad de volumen, que se estudiarán más adelante.

➤ Procedimiento para determinar la Consistencia Normar Según Norma NB 062

La consistencia se mide por medio del aparato de Vicat, representado en la figura 2.3, utilizando un émbolo de 10 mm. de diámetro acondicionado dentro de un soporte de agujas.

Una pasta experimental de cemento y agua se mezcla en la forma prescrita y se coloca en el molde. En seguida, se pone el émbolo en contacto con la superficie superior de la pasta y se suelta. Por la acción de su propio peso, el émbolo penetra en la pasta, la profundidad de penetración depende de la consistencia. Esto se considera una norma, de acuerdo con la Norma Boliviana NB 062, cuando el émbolo penetra en la pasta hasta un punto distante de 10 ± 1 mm. El contenido de agua de la pasta estándar se expresa como porcentaje por masa de cemento seco, y el valor normal varía entre 26 y 33 por ciento del peso del cemento.

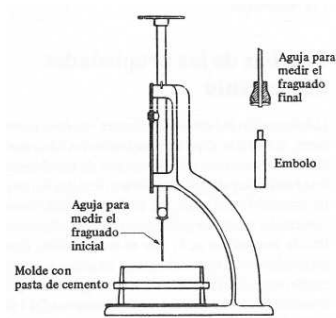


Figura 2.3.1



figura 2.3.2

Figura 2.3. Aguja de Vicat

II.2.1.4.4. Tiempo de Fraguado

Cuando el cemento se mezcla con el agua, formando de esta manera la pasta, mantiene una plasticidad casi constante durante un tiempo, luego del cual la pasta cambia de estado fluido a estado rígido, que se conoce como fraguado. El lapso que transcurre desde el mezclado hasta dicho cambio se conoce como tiempo fraguado. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere alguna resistencia, es conveniente diferenciar entre fraguado y endurecimiento, pues este último se refiere al aumento de resistencia de la pasta de cemento fraguada.

El tiempo de fraguado indica si la pasta está o no sufriendo reacciones de hidratación normales.

El tiempo de fraguado se mide empleando la aguja de Vicat (figura 2.3) con distintos accesorios de penetración. El método de prueba es prescrito por la Norma Boliviana NB 063.

II.2.1.4.4.1. Tiempo de Fraguado Inicial

Para determinar el fraguado inicial, se utiliza una aguja de Vicat con un diámetro de 1 mm. Esta aguja penetra en la pasta de consistencia normal, Colocada en un molde especial, bajo un peso prescrito.

La Norma Boliviana describe al tiempo de fraguado inicial como al tiempo transcurrido entre el momento en que se agrega el cemento al agua y el que marca una penetración de 25 mm. Su determinación se hace por la interpolación del resultado obtenido en las penetraciones registradas.

II.2.1.4.4.2. Tiempo de Fraguado Final

El fraguado final se caracteriza por que la pasta deja de ser deformable ante cargas relativamente pequeñas, con el cemento aún más hidratado.

El fraguado final se determina por medio de la misma aguja adaptada de 1mm de diámetro, se toma como fin de fraguado el tiempo transcurrido entre el momento en que se agrega el cemento al agua y el momento en el cual la aguja no deja marca visible en la pasta, realizando esta verificación en ambas bases de la muestra.

II.2.1.4.5. Estabilidad de volumen o sanidad del cemento

Esta propiedad se refiere a la habilidad de una pasta endurecida a conservar su volumen después del fraguado, ya que podría sufrir contracciones o aumentos de volumen, generando así esfuerzos perjudiciales a la masa de concreto endurecido.

Como se anotó anteriormente, durante el proceso de fraguado se incrementa la temperatura como consecuencia de reacciones químicas que se efectúan entre los componentes del cemento y el agua. Este aumento de temperatura hace que una parte del agua se evapore y origine una contracción en la pasta con un eventual agrietamiento. La contracción lineal puede ser de aproximadamente $150 \cdot 10^{-6}$ (0.015% en volumen) y generalmente se presentan los primeros dos o tres meses.

La expansión de cemento es causada por la periclaza (óxido de Mg cristalizado) y por la cal libre. La primera se forma por un enfriamiento lento de clinker y la segunda por una molienda deficiente de las materias primas, por una insuficiente temperatura en el horno, o por una inadecuada dosificación.

Como la expansión del cemento solo se manifiesta pasados varios meses o años, se necesita conocer la variación del volumen en forma acelerada y para esto existen dos métodos: El de Le Chatelier (fig. 2.4.1) y el del Autoclave (fig. 2.4.2). Este último consiste en medir el cambio de longitud de unas barras de sección cuadrada de 2,5 cm de lado y 25,4 cm de longitud, hechas con pasta de cemento y sometidas a un proceso acelerado de hidratación (curado durante 3 horas a 216°C y a una presión de 20Kg/cm^2). El cambio de longitud se llama expansión en autoclave y se expresa en porcentaje de la longitud de la longitud inicial.

El ensayo de las agujas de Le Chatelier. Consiste en medir el cambio de diámetro de cilindros hechos con pasta cemento de 3 cm de diámetro y 0,5 cm de altura curados en agua a temperatura ambiente o en agua en ebullición por 180min. El primero mide la expansión debida al exceso de cal libre y el segundo al de periclaza.

Cuando hay un cambio de volumen, bien sean por contracción o por expansión, se genera esfuerzos de tracción en la masa de concreto endurecida que suelen conducir a un rompimiento de la pasta ocasionando desde ligeros descascaramientos hasta el colapso de la estructura.



figura 2.4.1. Agujas de Le Chatelier



figura 2.4.2. Autoclave

Figura 2.4. Aparatos para medir la expansión

No existe ninguna prueba para detectar variaciones de volumen debidas a un exceso de sulfato de calcio, pero su contenido puede determinarse fácilmente por medio de un análisis químico.

II.2.1.4.6. Determinación de la Resistencia a Compresión

➤ Gradación de la arena

La arena usada para elaborar las probetas de ensayo, debe ser arena natural de sílice (mínimo 98%) con la siguiente composición granulométrica.

Tabla 2.5. Gradación de la Arena

TAMIZ	PORCENTAJE RETENIDO
150 μm	98 \pm 2
300 μm	75 \pm 5
425 μm	30 \pm 5
600 μm	2 \pm 2
1.18 μm	0

Fuente: Norma Boliviana NB 470

Las probetas que van a ser ensayadas a las 24 hrs. se sacan de la cámara húmeda e inmediatamente se pasan a la máquina de prueba; sí se sacan varias al mismo tiempo, deben cubrirse con una toalla húmeda hasta el momento de iniciar el ensayo. Si se saca del

recipiente de almacenamiento más de una probeta a la vez para ser ensayadas, se las debe mantener en agua a una temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a una profundidad suficiente de manera que queden completamente cubiertas hasta el momento del ensayo. Todas las probetas correspondientes a una determinada edad de ensayo se romperán dentro de la tolerancia permisible indicada a continuación.

Tabla 2.6. Tolerancia para Ensayos a Compresión

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24 Hr.	± 0.5 Hr.
3 Días	± 1 Hr.
7 Días	± 3 Hr.
28 Días	± 12 Hr.

Fuente: Norma Boliviana NB 470

Las superficies de los cubos deben secarse y los granos de arena sueltos o las incrustaciones, deben retirarse de las caras que van a estar en contacto con los bloques de apoyo de la máquina de ensayo; se debe comprobar, mediante una regla, que estas caras sean planas (véase Nota 1 NB 470). En caso de que tengan una curvatura apreciable deben rasparse hasta obtener superficies planas y si ésto no es posible, se deben desechar las probetas.

II.2.1.4.7. Determinación de la Fluidéz

Se limpia y se seca la plataforma de la mesa de flujo, colocando en seguida el molde en su centro. Usando el palustre, se coloca una capa de mortero, de unos 25 mm de espesor, cuya fluidéz se quiere determinar y se apisona con 20 golpes del compactador, uniformemente distribuidos. Con una segunda capa de mortero, se llena totalmente el molde y se apisona como la primera capa.

La presión del compactador debe ser tal que asegure el llenado uniforme del molde. Se enrasa el mortero con la parte superior del molde, empleando el palustre. Después de llenar el molde de acuerdo con la norma NB 473, se limpia y se seca la plataforma de la mesa,

teniendo cuidado de eliminar el agua que queda alrededor de la base del molde, Después de un minuto de terminada la operación de mezclado, se quita el molde por medio de un movimiento vertical y se deja caer la plataforma desde una altura de 12,7 mm. (1/2”), 25 veces en 15 segundos. Luego se mide el diámetro de la base de la muestra a lo largo de cuatro direcciones uniformemente distribuidas y se calcula el diámetro promedio.

La expresión de los resultados se indica en la Norma Boliviana NB 473. En La Figura 2.5 y 2.6 se representa el equipo utilizado en este ensayo según la Norma Boliviana NB 473.

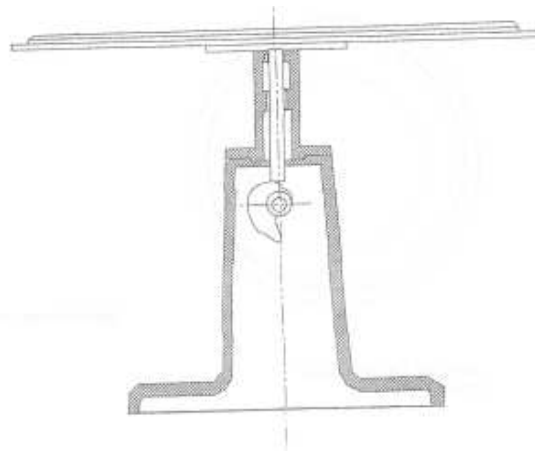


Figura 2.5. Mesa de sacudidas

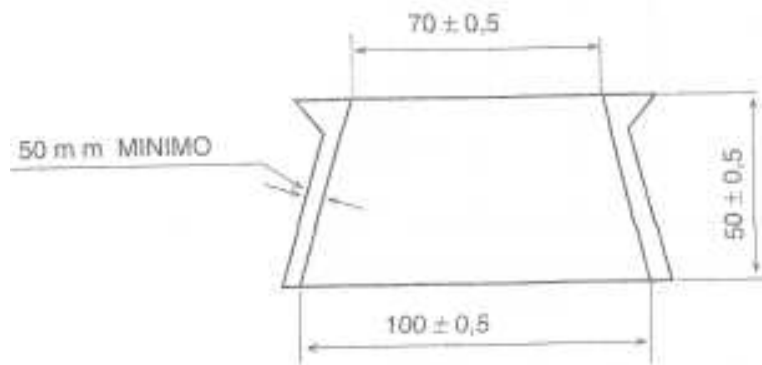


Figura 2.6. Molde Mesa de Sacudidas

II.2.2. AGUA

El agua es un elemento fundamental en la preparación del concreto, está relacionada con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del concreto endurecido.

II.2.2.1. El Agua en el Concreto

El agua se usa en la elaboración del concreto para propósitos diferentes: como agua de mezclado, como agua de curado y como agua de lavado de los agregados. El agua de mezclado forma aproximadamente el 15% del volumen total del concreto, un 5% sirve para hidratar el cemento y el 10% restante lubrica al concreto y luego se evapora durante el proceso de fraguado. El agua de curado se utiliza después de que el concreto ha fraguado y tiene como función la de seguir hidratando al cemento. El agua de lavado de los agregados no participa activamente en la mezcla de los concretos, pero es importante en el procesamiento de los agregados. En términos generales el agua a utilizar, tanto en el mezclado como el curado del concreto, debe ser potable y cuando se trata de utilizar aguas cuyo comportamiento es desconocido, se hace imprescindible su ensayo y comparación con agua de reconocidas buenas características para producir concreto.

II.2.2.2. Requisitos que debe cumplir

El agua a emplearse en la preparación del concreto deberá ser limpia y estará libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, material orgánico y otra sustancia que puedan ser nocivas al concreto o al acero.

Si se tuvieran dudas de la calidad del agua a emplearse en la preparación de una mezcla de concreto, será necesario realizar un análisis químico de ésta, para comparar los resultados con los valores máximos admisibles de las sustancias existentes en el agua a utilizarse en la preparación del concreto que a continuación indicamos:

Tabla 2.7. Requisitos que debe Cumplir el Agua

Sustancias Disueltas	Valor Máximo Admisible
Cloruros	300 ppm
Sulfatos	300 ppm
Sales de magnesio	150 ppm
Sales Solubles	1500 ppm
P.H.	Mayor de 7
Sólidos en suspensión	1500 ppm
Materia Orgánica	10 ppm

Fuente: Norma ASTM D

También deberá hacerse un ensayo de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, preparando testigos con agua destilada o potable y con el agua cuya calidad se quiere evaluar, considerándose como satisfactorias aquellas que arrojen una resistencia mayor o igual al 90% que la del concreto preparado con agua potable.

Un método rápido para conocer la existencia de ácidos en el agua, es por medio de un papel tornasol, el que sumergido en agua ácida tomará un color rojizo.

II.2.3.AGREGADOS

II.2.3.1. Ubicación, Antecedentes y Descripción de la Cantera.

Para la realización del presente trabajo de investigación, se utilizaron materiales granulares extraídos de canteras (rio San Juan del Oro) del puente comunidad ubicada a 110km hacia el norte, departamento de Tarija.

La metodología de extracción del material fue la siguiente:

El material se extrae como grava y grava arenosa, luego se procede al zarandeado y clasificado según granulometría indicada, separando los finos de los gruesos.

Las características del material extraído son muy buenas, ya que la arena presenta un módulo de finura de 2.5 (media), además cumple requisitos de granulometría y no es una arena lajeada.

II.2.3.1.1. Definición

Llamados también áridos, son materiales inertes que se combinan con los conglomerantes (cemento, cal, etc.) y el agua formando los concretos y morteros.

La importancia de los agregados radica en que constituyen alrededor del 75% en volumen, de una mezcla típica del concreto.

II.2.3.1.2. Clasificación

Los agregados naturales se clasifican en:

Agregados finos

- Arena fina.
- Arena Gruesa.

Agregados Gruesos

- Grava
- Piedra

II.2.3.2. Agregado Fino

II.2.3.2.1. Definición

Se considera como agregados finos a la arena o a la piedra natural finamente triturada, de dimensiones reducidas y que pasan el tamiz 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ ") y que cumple con los límites establecidos en la Norma ASTM.

Las arenas provienen de la desintegración natural de rocas; y que arrastrados por corrientes aéreas o fluviales se acumulan en lugares determinados.

II.2.3.2.2. Requisitos de Uso

El agregado fino será arena natural. Sus partículas serán limpias, de perfil preferentemente angular, duro, compactas y resistentes.

El agregado fino deberá estar libre cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica u otras sustancias perjudiciales. Debe cumplir las normas sobre su granulometría.

Se recomienda que las sustancias dañinas, no excedan los porcentajes máximos siguientes:

1°) partículas deleznable 3%

2°) material más fino que la malla N° 200: 5%

II.2.3.2.3. Granulometría (límites según la ASTM).

La granulometría es la distribución por tamaños de las partículas de arena. La distribución del tamaño de partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas.

Las mallas normalizadas utilizadas para el agregado fino son las N°4, 8, 16, 30, 50 y 100.

Los requerimientos en cuanto a granulometría que debe cumplir la arena de acuerdo a la ASTM es el que se da en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Límites de Granulometría para la Arena Según la ASTM

MALLA		Porcentaje acumulado que pasa	
$\frac{3}{8}$ "	9.5 mm.	-	100
N° 4	4.75 mm.	95	100
N° 8	2.36 mm.	80	100
N° 16	1.18 mm.	50	85
N° 30	600 μ m.	25	60
N° 50	300 μ m.	10	30
N° 100	150 μ m.	2	10

Fuente: Norma C 136 – 04

La Norma ASTM, exceptúa los concretos preparados con más de 300 Kg. /m³ de cemento los porcentajes requeridos para el material que pasa las mallas N° 50 y N° 100 que, en este caso pueden reducirse a 5% y 0% respectivamente.

Esta exposición se explica porque el mayor contenido de cemento contribuye a la plasticidad del concreto y la compacidad de la pasta, función que cumple el agregado más fino.

Además, la norma prescribe que la diferencia entre el contenido que pasa una malla y el retenido en la siguiente, no debe ser mayor al 45% del total de la muestra. De esta manera se tiene una granulometría más regular.

En general, en cuanto a granulometría se refiere, los mejores resultados se obtienen con agregados de granulometrías que queden dentro de las normas y que den curvas granulométricas suaves.

II.2.3.3. Agregados Gruesos

II.2.3.3.1. Definición

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz 4.75 mm (Nº4) proveniente de la desintegración natural o mecánica de las rocas, y que cumple con los límites establecidos en la norma ASTM.

El agregado grueso puede ser grava, piedra chancada, etc.

II.2.3.3.2. Clasificación

- **GRAVAS:**

Comúnmente llamadas “canto rodado”, es el conjunto de fragmentos pequeños de piedra, provenientes de la disgregación natural de las rocas, por acción del hielo y otros agentes atmosféricos, encontrándose corrientemente en canteras y lechos de ríos, depositados de forma natural .

Cada fragmento ha perdido sus aristas vivas y se presentan en forma más o menos redondeadas.

Las gravas pesan de 1600 a 1700 Kg. /m³.

- **PIEDRA PARTIDA O CHANCADA:**

Se denomina así, al agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas o gravas. Como agregado grueso se puede usar cualquier clase de piedra partida siempre que sea limpia, dura y resistente.

Su función principal es la de dar volumen y aportar su propia resistencia. Los ensayos indican que la piedra chancada o partida da concretos ligeramente más resistentes que los hechos con piedra redonda.

II.2.3.3.3. Requisitos de Uso

El agregado grueso deberá estar conformado por partículas limpias, de perfil preferentemente angular o semi - angular, duras o compactas, resistentes y de textura preferentemente rugosa.

II.2.3.3.4. Granulometría (límites según la ASTM).

El agregado grueso deberá estar graduado dentro de los límites establecidos en la Norma ASTM C-33, los cuales están indicados en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Requerimientos de Granulometría del Agregados Grueso

ASTM No	Tamaño Nominal	% que pasa por los tamices normalizados												
		100mm 4"	90 mm 3½"	75 mm 3"	63 mm 2½"	50 mm 2"	37.5mm 1½"	25 mm 1"	19 mm ¾"	12.5mm ½"	9.5mm ¾"	4.75mm Nº4	2.36mm Nº8	1.18mm Nº16
1	90 a 37.5 mm 3½" a 1½"	100	90-100		25-60		0-15		0-5					
2	63 a 37.5 mm 2½" a 1½"			100	90-100	35-70	0-15		0-5					
3	50 a 25.0 mm 2" a 1"				100	90-100	35-70	0-15		0-5				
357	50 a 4.75 mm 2" a Nº4				100	95-100	35-70		10-30		0-5			
4	37.5 a 19mm 1½" a ¾"					100	90-100	20-55	0-15		0-5			
467	37.5 a 4.75mm 1½" a Nº4					100	95-100		35-70		10-30	0-5		
5	25 a 12.5 mm 1" a ½"						100	90-100	20-55	0-10	0-5			
56	25 a 9.5 mm 1" a ¾"						100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5		
57	25 a 4.75 mm 1" a Nº4						100	95-100		25-60		0-10	0-5	
6	19 a 9.5 mm ¾" a ¾"							100	90-100	20-55	0-15	0-5		
67	19 a 4.75 mm ¾" a Nº4							100	90-100		20-55	0-10	0-5	
7	12.5 a 4.75mm ½" a Nº4								100	90-100	40-70	0-15	0-5	
8	9.5 a 2.36mm ¾" a Nº8									100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: ASTM C 33-82

II.2.3.4. Características de los Agregados

II.2.3.4.1. Módulo de Fineza (MF)

El módulo de finura es un parámetro que se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices especificados que cumplan con la relación 1:2 desde el tamiz 149 μ (N°100) en adelante hasta el tamaño máximo presente y divididos por 100.

El módulo de finura se puede considerar como el tamaño promedio ponderado de un tamiz, del grupo, en el cual el material es retenido, siendo el 149 μ (N°100) el primer tamiz del grupo, el 297 μ (N°50) el segundo, el 59 μ (N°30) el tercero, etc. Así por ejemplo, un MF de 3.0 significa que el tamiz 595 μ (N°30) es el tamaño promedio (es el tercer tamiz del grupo). Sin embargo, un número infinito de gradaciones pueden tener un mismo valor del MF y por consiguiente, este parámetro sólo debe ser usado para la comparación de materiales cuya gradación sea similar, y resulta valioso para medir ligeras variaciones en un agregado procedente de una misma fuente, o sea, una verificación periódica.

En América es más frecuente el uso del MF de la arena (o sea la suma de los porcentajes acumulados desde el tamiz 149 μ o N°100 hasta el N°4 y dividido por 100) para evaluar qué tan fina o gruesa es una arena, pero también es muy empleado como parámetro para el diseño de mezclas. Si se considera que el MF de una arena adecuada para producir concreto debe de estar entre 2.3 y 3.1, donde un valor menor que 2 indica una arena fina, 2.5 una arena de finura media y más de 3.0 una arena gruesa.

II.2.3.4.2. Tamaño máximo del agregado grueso (TM)

Se define como la abertura del menor tamiz por el que pasa el 100% de la muestra. Como su nombre lo indica, es el tamaño de las partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregados y que en algunos casos puede ser único.

II.2.3.4.3. Tamaño Máximo Nominal (TMN)

El tamaño máximo nominal es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y está definido como el siguiente tamiz que le sigue a la abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más. Por esta razón la mayoría de las especificaciones granulométricas se dan en función del tamaño máximo nominal y comúnmente se estipula de tal manera que el agregado cumpla con los siguientes requisitos:

- El TMN no debe ser mayor que 1/5 de la dimensión menor de la estructura.
- El TMN no debe ser mayor que 1/3 del espesor de una losa.
- El TMN no debe ser mayor que 3/4 del espaciamiento libre máximo entre las barras de refuerzo.

II.2.3.4.4. Humedad Natural.

El contenido de agua dentro de un agregado, expresado en porcentaje es por definición:

$$\% \text{Humedad} = \% w = (H - S) / S * 100$$

Donde:

% w= porcentaje de humedad

H = peso del agregado húmedo.

S = peso del agregado en condición seca.

II.2.3.4.5. Porcentaje de Absorción.

Es la cantidad de agua que un agregado necesita para pasar de la condición seca a la de saturado superficialmente, se expresa generalmente en porcentaje.

$$\% \text{ absorción} = \% a = (D - S) / S * 100$$

Donde:

% a = % de absorción

D = peso del agregado saturado y superficialmente seco

S = peso del agregado en condición seca.

II.2.3.4.6. Humedad Superficial

La humedad superficial viene dada por la diferencia entre el contenido de humedad (%w) y el porcentaje de absorción (%a)

Casos que se presentan:

Si %w > %a

En este caso el agregado aporta agua a la mezcla (agua libre) y dicha cantidad debe ser disminuida del agua para encontrar el agua efectiva o neta.

Si %w < %a

En este caso el agregado tomará agua de la mezcla (agua que le falta) para llegar a la condición ideal, debiendo aumentarse dicha cantidad de agua a la mezcla para no modificar el agua de diseño.

II.3. MATERIALES PUZOLANICOS

II.3.1. GENERALIDADES.

Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se encuentran finamente divididos y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes".

En Europa, en forma similar se utiliza la definición de puzolanas dada por Massaza en el Quinto Congreso Internacional de la Química del cemento del año 1974, que dice: "se define como puzolanas a aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alumina, capaces de reaccionar con cal en presencia de agua y formar por esta reacción compuestos con propiedades cementantes".

Del análisis de las definiciones previas surgen como necesarios para la reacción puzolánica una determinada finura del material, que se expresa fundamentalmente por la superficie

específica de sus partículas; un activador como el hidróxido de calcio que genere un ambiente con elevado pH a fin de lograr la solubilización de los compuestos silíceos o aluminosos de débil cristalinidad y la presencia de agua en el medio reaccionante.

II.3.2. TIPOS DE PUZOLANAS.

Básicamente existen dos tipos de puzolana, llamadas puzolanas naturales y artificiales.

- Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes.
- Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado (pfa), escoria de altos hornos granulada y molida (ggbfs).

II.3.3. PUZOLANAS NATURALES.

II.3.3.1. Cenizas volcánicas:

Se forman por erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas que son templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo.

II.3.3.2. Tufos o tobas volcánicas (zeolitas)

Producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación diagenética.

II.3.3.3. Tierras de diatomeas (diatomitas)

Puzolanas de origen orgánico. Depósitos de caparzones silíceos de microscópicas algas acuáticas unicelulares (diatomeas).

A continuación el autor presenta una descripción más amplia referente a las cenizas volcánicas, debido a la importancia de las mismas.

II.3.3.4. Cenizas Volcánicas.

- **Materiales sedimentarios químicos:** sedimentos silicios como la ftanita y el pedernal constituidos por 95 % o más de sílice fibrosa micro cristalina y sílice amorfa y cuarzo cripto cristalino, cuyo origen se debe a la precipitación de la sílice contenida en el agua de mar. Tierras silíceas, de diatomeas, constituidas por caparazones de diatomeas o radiolarios marinos, formados por sílice amorfa.

- **Materiales volcánicos:** se genera a partir de la roca cuarteada y separada en partículas diminutas durante un episodio de actividad volcánica explosiva. La naturaleza normalmente violenta de una erupción, incluyendo chorros de vapor de agua (*erupción freática*), produce como resultado una gran cantidad de magma y tal vez roca sólida que rodea el viento volcánico, torneando las partículas hasta reducirlas al tamaño de granos de arena.

La pluma que se ve a menudo sobre un volcán en erupción está compuesta principalmente de cenizas y vapor. La eyección de grandes cantidades de ceniza provoca un cono de cenizas. La acumulación de cenizas tiende a cementarse hasta formar capas de una roca llamada toba volcánica. Las partículas más finas pueden ser arrastradas por el viento a lo largo de muchos kilómetros, que dan al paisaje un aspecto "polvoriento" al depositarse.

- **Materiales Piroclásticos:** El vidrio volcánico está también presente en tobas, tufas, y bombas volcánicas. Estas últimas se encuentran presentes en diversas proporciones en los sedimentos pampeanos como consecuencia de la actividad volcánica cordillerana de fines del Terciario y del Cuaternario (5 millones de años).

El término piroclasto se refiere a cualquier material volcánico sólido arrojado al aire durante una erupción.

La primera puzolana natural empleada en construcciones fue la ceniza volcánica del Monte Versubio (Italia), encontrada cerca de la ciudad Pozzuoli, que le dio el nombre.

Aunque los compuestos químicos son similares, el material vidrioso formado por el lanzamiento violento de la magna fundida en la atmósfera, es más reactiva con la cal, que la ceniza volcánica formada por erupciones menos violentas.

La generación de puzolanas naturales adecuadas está, por lo tanto, limitada a sólo a algunas regiones del mundo.

Las buenas puzolanas a menudo se encuentran como cenizas finas, pero también en forma de grandes partículas o tufos (ceniza volcánica solidificada), que deben ser triturados para emplearse como puzolana. Sin embargo, la calidad de dichas puzolanas puede variar grandemente, incluso dentro de un mismo depósito.

II.3.4. TIPOS DE PUZOLANAS ARTIFICIALES.

II.3.4.1. Ceniza de Combustible Pulverizado (Ceniza Volante):

Las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.

Comparando los procesos de producción de ceniza de combustible pulverizado (pfa), más conocida como ceniza volante, y de cemento Pórtland, ordinario (OPC), queda claro por que razón la pfa puede emplearse como sustituto parcial de éste último.

El carbón de piedra finamente molido es inyectado a gran velocidad con un chorro de aire caliente (aproximadamente. 1500°C) en un horno en las estaciones de generación de electricidad. El contenido carbónico se quema instantáneamente, y la materia restante (que comprende sílice, alúmina y oxido de hierro) se funde en suspensión, formando finas partículas esféricas por el rápido enfriamiento, mientras son llevados por los gases de combustión.

Las partículas esféricas, huecas, vidriosas de pfa tienen la misma finura que el OPC, por lo que no es necesaria una mayor molienda. La adición de pfa genera un concreto fresco más trabajable (probablemente debido al efecto de cojinete de bolas de las partículas esféricas) y homogéneo (dispersando el cemento y distribuyendo uniformemente el agua).

Otras ventajas de emplear la pfa son:

Con el incremento del tiempo, se desarrollan mayores resistencias que el concreto sin pfa.

La pfa no influye negativamente el comportamiento estructural de las piezas de concreto.

Comparada con el concreto de OPC, el concreto de pfa es más liviano, menos permeable (debido a su compactación más densa) y con un mejor acabado

El concreto de pfa es además más resistente al ataque del sulfato y a la reacción sílice-álcali.

Los concretos en los cuales se reemplaza entre 35 a 50% del peso de OPC por pfa han mostrado comportamientos satisfactorios.

Los áridos derivados de la ceniza volátil muestran una excelente adhesión en concretos de pfa, contribuyendo favorablemente a su comportamiento y durabilidad.

En territorio boliviano no existe prácticamente producción de cenizas volantes, ya que no existen las usinas térmicas, por no haber plantas de este tipo.

II.3.4.2. Escoria de Alto Horno Granulada Molida:

Principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

La escoria de alto horno es un material fundido que se asienta sobre el lingote de arrabio en la parte inferior del horno. Esta es producida por los diversos componentes en el horno cuando se llega a los 1400° a 1600°C.

Un enfriamiento lento de la escoria genera un material cristalino, empleado con árido un rápido enfriamiento con aire o agua bajo presión forma pelotillas vidriosas (escoria expandida > 4 mm., adecuado con árido ligero) y gránulos menores de 4 mm., que poseen propiedades hidráulicas cuando se muelen finamente.

La escoria triturada se mezcla con OPC para producir cemento Pórtland, de alto horno (PBFC), en el que el contenido de escoria puede llegar al 80%. Sin embargo, ya que el PBFC es más lento para reaccionar que el OPC, la reactividad se reduce a mayor porcentaje de escoria.

Aunque la resistencia temprana de los concretos de PBFC generalmente es menor que de los concretos de OPC, es probable que la resistencia final sea mayor. La más lenta reactividad del PBFC genera menos calor y puede ser ventajoso en donde el agrietamiento térmico es un problema.

Además de hacer más trabajable el concreto fresco, el PBFC tiene gran resistencia al ataque químico y su capacidad de proteger el refuerzo de acero la hace adecuada para emplear en concretos reforzados y pretensado.

II.3.4.3. Humo de Sílice:

EL humo de sílice (H.S) es un aditivo mineral amorfo, de gran finura, extraído de canteras existentes en nuestro medio.

Debido a su extrema finura, y a su alto contenido de sílice, se convierte en un material puzolánico muy efectivo el cual puede reaccionar con los productos de hidratación del cemento portland para formar materiales de cementación secundario durante el proceso de hidratación. En un cemento portland hidratado, el hidróxido de calcio, que no llega a reaccionar, es vulnerable a ataques químicos y a la percolación.

En los concretos normales y proyectados que contienen humo de sílice (H.S.), el hidróxido de calcio es consumido a través de reacciones puzolánicas con el humo de sílice (H.S.),

resultando en un concreto con muy baja permeabilidad y absorción y un incremento en la resistencia al deterioro bajo condiciones agresivas.

El humo de sílice reactiva es de gris oscura a blanca, dependiendo del carbón residual en ella, que no tiene efecto negativo si es menor de 10%. Para mejorar su reactividad, el humo de sílice es pulverizado en un molino de bolas por aproximadamente una hora, o más si contiene sílice cristalina. El humo de sílice puede reemplazar hasta 30% del cemento de un mortero o concreto. Alternativamente, puede ser mezclada con 30 a 50% de cal hidratada para ser empleada como cemento en morteros, enlucidos y concreto en masa.

II.3.4.3.1. Características del Humo de Sílice.

El humo de sílice presenta un alto contenido de sílice como lo dice su nombre. La importancia de la adición de materiales es la relación de costos existente entre el cemento y el humo de sílice en países en vías de desarrollo. A partir de allí se ensayan hormigones aptos para ser aplicables en viviendas de muy bajo costo. Con este objetivo se abordan trabajos experimentales destinados a conseguir hormigones a base de puzolanas naturales.

II.3.4.4. Cenizas de Caña De Azúcar:

Obtenidas durante la producción del azúcar de caña, quemadas a temperaturas de 800° a 1000 ° C.

II.3.4.5. Sílice Condensada:

Partículas esféricas de elevada área superficial y tamaño menor a una micra, generadas por la condensación de vapores en la producción de carburo de silicio.

II.3.4.6. Sílice Geotérmica:

Partículas de tamaño submicrónico, de elevada área superficial, producidas como incrustaciones en líneas de vapor geotermal en plantas de generación de electricidad.

II.3.4.7. Arcillas Termo-Activadas:

Por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.

II.3.5. CLASIFICACIÓN DE LAS PUZOLANAS SEGÚN NORMA ASTM C 618.

Según la Norma ASTM C 618 las puzolanas se clasifican de la siguiente manera.

Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tufos y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias.

Clase F: son cenizas volantes con menos del 10% de óxido de calcio, resultantes de la combustión de la antracita y carbón bituminoso. Presentan un alto contenido de aluminio silicatos amorfos y en menor proporción aluminio silicatos cristalinos, cuarzo, magnetita, hematita y hasta un 10 % de carbón sin quemar. Presentan solo actividad puzolánica.

Clase C: de alto contenido de óxido de calcio (entre 15 y 35%), resultantes de la combustión del lignito y carbón sub bituminoso. Presentan elevados contenidos de aluminio silicatos amorfos y pequeñas cantidades de minerales cristalinos como aluminatos tricálcicos y sulfatos alcalinos con menos de un 1% de carbón sin quemar. Un elevado porcentaje de los minerales cristalinos presentes resulta reactivo y le confiere a la ceniza propiedades cementantes, las que se suman a la actividad puzolánica

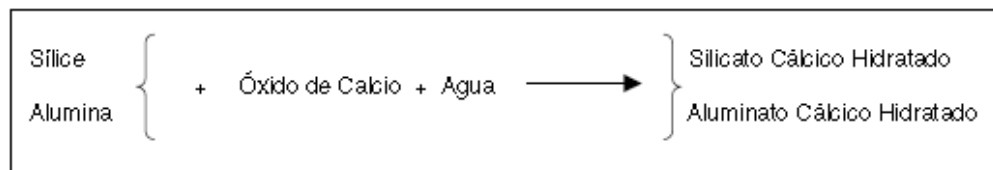
II.3.6. PROPIEDADES DE LA PUZOLANA.

Las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna. Se prefiere puzolanas con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) sea mayor del 70%. Se trata que la puzolana tenga una estructura amorfa.

En el caso de las puzolanas obtenidas como desechos de la agricultura (cenizas de la caña de azúcar y el arroz), la forma más viable de mejorar sus propiedades es realizar una quema controlada en incineradores rústicos, donde se controla la temperatura de combustión, y el tiempo de residencia del material.

II.3.7. LA REACCIÓN PUZOLÁNICA

La reacción puzolánica consiste en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina, amorfos o débilmente cristalizados en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, generándose aluminosilicatos di cálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento Pórtland. **Es decir que es un proceso natural de formación de cemento.** Esta reacción es irreversible y puede escribirse esquemáticamente del siguiente modo:



II.3.7.1. EFECTOS DE LAS PUZOLANAS EN EL HORMIGÓN.

a). Resistencia Mecánica a la Compresión:

El Hormigón elaborado a partir de una puzolana presenta un desarrollo de resistencia más lento no obstante conforme van pasando los días va adquiriendo una resistencia mayor que la resistencia de un hormigón elaborado con cemento Pórtland.

b). Permeabilidad:

Los hormigones elaborados con puzolanas tienen una menor permeabilidad por lo que son más resistentes al ataque de los sulfatos.

c) Tendencia a la Fisuración:

El uso de puzolanas en la elaboración del hormigón hace que la misma tienda a bajar su velocidad de exudación, aumentando relativamente la tendencia a la fisuración por retracción plástica. No obstante, la ejecución de una adecuada protección y curado minimizan o eliminan la posibilidad de este tipo de fisuras.

II.4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

II.4.1. Resistencia a Compresión y Característica del Hormigón

La resistencia a compresión simple es la característica mecánica más importante de un hormigón. Su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas. Ahora bien, los valores de ensayos que proporcionan las distintas probetas son más o menos dispersos, en forma variable de una obra a otra, según el cuidado y rigor con que se confeccione el hormigón; y esta circunstancia debe tenerse en cuenta al tratar de definir un cierto hormigón por su resistencia.

El problema puede plantearse así: dados n resultados obtenidos al ensayar a compresión simple n probetas cilíndricas 15 x 30 cm. de un mismo hormigón, determinar un valor que sea representativo de la serie y por consiguiente, del propio hormigón.

Tradicionalmente se ha seguido el criterio de adoptar, para dicho valor, la media aritmética f_{cm} de los n valores de roturas, llamada resistencia media. Pero este valor no refleja la verdadera calidad del hormigón en obra, al no tener en cuenta la dispersión de la serie.

Si tenemos dos hormigones con la misma resistencia media, no cabe duda de que es más fiable aquel que presenta menor dispersión. Por consiguiente, el coeficiente de seguridad que se adopte en el cálculo debe ser mayor para el hormigón más disperso. La conclusión que se extrae es que, el adoptar la resistencia media como base de los cálculos conduce a coeficientes de seguridad variables según la calidad de la ejecución.

Para eliminar este inconveniente y conseguir que se trabaje con un coeficiente de seguridad único, homogéneo en todos los casos, se ha adoptado modernamente el concepto de resistencia característica del hormigón, que es una medida estadística que tiene en cuenta no sólo el valor de la media aritmética f_{cm} de las roturas de las diversas probetas, sino también la desviación típica relativa o coeficiente de variación δ , de la serie de valores.

Se define, como resistencia característica f_{ck} , del hormigón a aquel valor que presenta un grado de confianza del 95 por 100, es decir, que existe una probabilidad de 0,95 de que se presenten valores individuales de resistencia de probetas más altos que f_{ck} . De acuerdo con esta definición y admitiendo la hipótesis de distribución estadística normal (Fig. 2.7), la resistencia característica viene dada por la expresión:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1.65 * s \quad \dots\dots\dots(2.1) \text{ (Resistencia característica)}$$

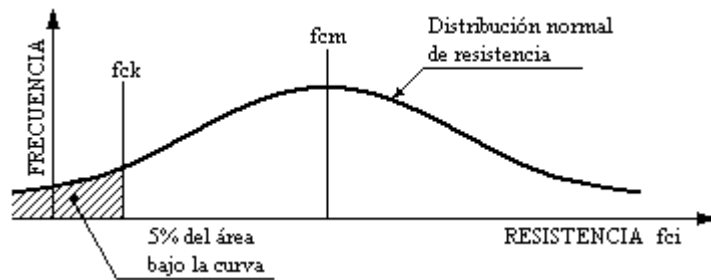


Figura 2.7. Definición de Resistencia Característica (f_{ck})

Donde f_{cm} es la resistencia media y δ el coeficiente de variación de la población de resistencias:

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci} \quad (2.2) \text{ (La media)}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n-1}} \quad (2.3) \text{ (desviación estándar)}$$

$$\delta = \frac{S}{f_{cm}} \quad (2.4) \text{ (Coeficiente de variación)}$$

No debe confundirse la expresión dada para f_{ck} , que es una definición (válida para $n = \infty$), con los estimadores de la resistencia característica, que se emplean para aceptar o rechazar un hormigón determinado en obra, a partir de un número relativamente pequeño de determinaciones.

El valor del coeficiente de variación δ depende de las condiciones de ejecución del hormigón. Para los hormigones fabricados en central el coeficiente de variación suele oscilar entre 0,08 y 0,20, según la calidad de la planta. Un coeficiente de variación superior a 0,20 es propio de los hormigones fabricados a mano o en pequeñas hormigoneras de obra, los cuales no son aconsejables salvo, para obras de pequeña importancia.

El concepto de resistencia característica se refiere, por antonomasia, a la resistencia a compresión medida sobre probetas cilíndricas 15 x 30 de veintiocho días de edad, fabricadas, conservadas y rotas según métodos normalizados; pero puede hacerse extensivo a cualquier tipo de ensayo, clase de probeta, modo de conservación y edad del hormigón, ya que se trata de una definición de tipo estadístico. Siempre que se hable, en esta obra, de resistencia característica, nos referimos a la primera definición, salvo advertencia en contrario.

➤ **Influencia de la edad del concreto**

En la práctica, normalmente se especifica que el concreto alcanza la máxima resistencia a la compresión a la edad de 28 días. La explicación es porque durante ese tiempo el aumento de resistencia es muy bajo.

Si se toma como base la resistencia máxima a la compresión a los 28 días, el aumento promedio de la resistencia con el tiempo es aproximadamente la que se indica en tabla 2.10.

*Tabla 2.10. Incremento Aproximado Promedio de la Resistencia a la Compresión del
Concreto con el Tiempo*

EDAD (días)	% RESISTENCIA CON RESPECTO A LA DE 28 DIAS
1	12
3	40
7	70
14	90
28	100
56	110
90	120
180	125

Fuente: Tecnología del Hormigón Ing. O'Reill Vitervo ASTM C 150

CAPÍTULO III

III.1.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

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

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

Las características principales de esta investigación son:

- Se requiere mínimo dos grupos: uno experimental (variables independientes) y otro de control (variables dependientes).
- Se requiere tener un control total de las variables independientes.
- Se quiere determinar cual es el porcentaje que mejor se comporta a compresión con el cemento portland puro (patrón) objeto del estudio para su posterior comparación en hormigones ya elaborados.

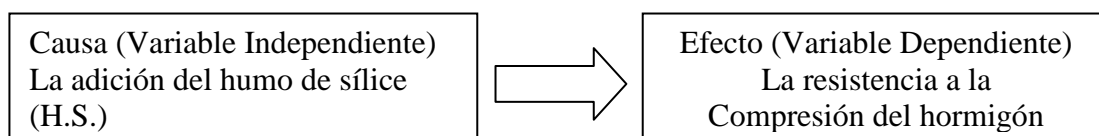
III.2. OBJETO DE ESTUDIO.

El objeto en esta investigación es el análisis del comportamiento de la resistencia a la compresión del cemento Portland puro (patrón) “El Puente”, conforme se le va incrementando la adición del humo de sílice, en reemplazo parcial del cemento en porcentajes de 5, 10, 15 y 20%; para su posterior dosificación al hormigón, y realizar un análisis de la resistencia a compresión con las diferentes adiciones en los hormigones.

III.3. VARIABLES

De acuerdo al objeto de estudio mencionado anteriormente podemos identificar la principal característica de una investigación experimental, que debe de constar de una causa o variable independiente (la adición del humo de sílice) la cual es manipulada y un efecto o variable dependiente (la resistencia a la compresión del hormigón) que es comparado y analizado.

Las variables objeto de este estudio son la adición del humo de sílice al cemento variando en porcentajes del 5, 10, 15 y 20% en reemplazo parcial de cemento, determinando el incremento de agua para que la adición reaccione con el cemento y así ayudar también en la resistencia del hormigón. Cabe resaltar que primero será determinada la resistencia a compresión del cemento para su posterior dosificación en el hormigón con los porcentajes que mejor comportamiento tengan a la compresión con la cantidad requerida de agua para un desarrollo satisfactorio de la resistencia a compresión.



III.4. HIPÓTESIS

La hipótesis que se plantea en este trabajo de investigación es que, con la adición del humo de sílice en reemplazo parcial al cemento se incrementará la resistencia a compresión de un hormigón convencional.

La hipótesis se respalda en el alto contenido de sílice en la puzolana (H.S.), el fenómeno que se presenta con este tipo de adición es la formación silicatos en un proceso natural de hidratación, en sí mismo la sílice, posee poco o ningún valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad reaccionará químicamente con el

hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas cementantes.

Para la comprobación, se decidió realizar este tipo de investigación ya que además de que dicho material aumenta la resistencia también brinda otras propiedades al hormigón.

III.5. MUESTREO DE LOS MATERIALES

Para la selección de los materiales a ser utilizados en esta investigación se tomarán muestras representativas para realizar el estudio de cada una de ellas y así obtener resultados confiables. Debido a que para determinar las características de los materiales que interfieren en la elaboración del hormigón dependen de aspectos particulares se procedió de la siguiente manera para obtener estos resultados.

III.5.1. AGREGADOS

Según datos proporcionados de la planta de cemento, la cantidad de la muestra representativa varía con el tamaño máximo del agregado y por tal motivo, para la extracción de las muestras se consideró las siguientes cantidades:

Tabla 3.1 Pesos Mínimos de las Muestras

TAMAÑO MAXIMO (Pulg.)	PESO DE LA MUESTRA EN (Kg.)
Nº 8	10
Nº4	10
3/8''	10
1/2''	15
3/4''	25
1''	50
1 1/2''	75
2''	100
2 1/2''	125
3	150
3 1/2''	175

Fuente: Manual Para Ingenieros "Ensayos de Materiales"

Como el tamaño máximo del agregado grueso de la cantera que se pretende estudiar tiene un tamaño máximo de 1'' en la cual no se presenta mucha variabilidad, se optó por realizar tres veces cada uno de los ensayos requeridos, tomando muestras de 50 Kg. como se indica en la tabla 3.1 De la misma manera se procedió con la obtención de las muestras del agregado fino las mismas que tuvieron un peso de 10 Kg.

III.5.2. HUMO DE SÍLICE

El humo de sílice acopiada para esta investigación es un material muy fino, lo cual se encuentra en volúmenes elevados y fue extraído de yacimientos existentes en nuestro medio ubicado a 10Km de la ciudad de Tarija (la pintada) carretera hacia Bermejo.

El humo de sílice es un material proveniente de cenizas volcánicas y este material al ser extraído y ser tamizado hasta llegar a un nivel de polvo posee gran cantidad de sílice, es muy importante saber en que estado se encuentra esta sílice ya que se puede presentar como amorfo o cristalino.

La adición por el alto contenido de sílice, es por este motivo que se desarrolla esta investigación, ya que este es un material puzolánico. En sí la sílice, posee poco o ningún valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas cementantes, y de este modo incrementar la resistencia de un hormigón.

Para garantizar la calidad del humo de sílice, se realizará el análisis químico pertinente.

III.5.3. MORTEROS

El muestreo seleccionado fue el aleatorio estratificado (tipo de muestreo probabilística), debido a que se desea estudiar distintos grupos homogéneos. Para tal caso, se empleó la siguiente ecuación, perteneciente a poblaciones finitas:

$$n_0 = \left(\frac{z}{\varepsilon}\right)^2 * p * q \quad \text{Ec.3.1}$$

Donde:

n_0 = Cantidad teórica de elementos de la muestra.

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

ε = Error asumido en el cálculo.

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

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

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

Tabla 3.2 Valores estandarizados en función del grado de confiabilidad

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

Fuente: Elaboración Propia

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

Como se trata de un número de estratos igual a 5, se asume un error del 10% donde $\varepsilon = 0.10$

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

Tabla 3.3. Valores de la probabilidad de la población que no presenta las características

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

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

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

Aplicando la Ec. 3.1. Resulta:

$$n_0 = \left(\frac{1.96}{0.10} \right)^2 * 0.99 * 0.01 = 3.80$$

Ahora se calcula, el número de muestras real, con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \quad \text{Ec.3.2.}$$

Donde:

n = Cantidad real de la muestra a partir de la población o estratos asumidos.

n_0 = Cantidad teórica de elementos de la muestra.

N = Número total que conforma la población o estratos totales de la población.

Considerando que:

Se analizará un solo tipo de mortero, el convencional con el que se encuentra con la adición de humo de sílice propuesto, además de tener distintos porcentajes de adición, hay un total de 5 estratos, por lo que:

$$n = \frac{3.80}{1 + \frac{3.80}{5}} = 2.16 \approx 3$$

De acuerdo a lo anterior se estableció, que la muestra representativa de las probetas a ensayar para cada estrato, son 5. A continuación se presenta la distribución realizada del número de muestras a ser ensayadas para cada condición:

Tabla 3.4. Número de Morteros de Cemento Pórtland puro (patrón) con y sin Adición

# de días	Resistencia de 30 Mpa				
	Estándar	5% H.S.	10% H.S.	15% H.S.	20% H.S.
1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3
7	3	3	3	3	3
14	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3
Total	13	13	13	13	13

Fuente: Elaboración Propia

III.5.3.1 Determinación del Contenido Óptimo de Agua

Esta determinación del contenido de agua se determinara realizando el ensayo de fluidez siguiendo la norma NB 473 para cada muestra con porcentajes de adición de humo de sílice lo que tiene que cumplir con una fluidez de 110+-5.

III.5.4. HORMIGONES

El análisis para hormigones tiene las mismas características que para los morteros, a excepción del número de estratos.

Para la elaboración de hormigones se descartó la prueba a compresión al primer día ya que es el más desfavorable de la adición, para quedar con un número de estratos igual a cuatro.

Cabe resaltar que este trabajo de investigación está dirigido al comportamiento que sufre el hormigón con la adición del humo de sílice al cemento, Por tal motivo, el estudio previo del cemento con adición, arrojará resultados de las pruebas a compresión del cemento. Los porcentajes que se estudian en cementos son cuatro (5, 10, 15, y 20%).

El hormigón será elaborado en probetas cilíndricas estandarizadas (de altura igual a dos veces el diámetro), de 6''x 12'' ó 15 x 30 cm., de acuerdo a la norma ASTM C 39.

Para tener una muestra representativa del número exacto de probetas cilíndricas es complicado, por tal motivo se hizo uso de la estadística, como se muestra a continuación.

Se realizarán ensayos con el cemento elegido, que se encuentra con y sin adición del humo de sílice propuesto, además de tener distintos porcentajes de adición, se obtiene un total de 4 estratos, por lo que resulta:

$$n = \frac{3.80}{1 + \frac{3.80}{4}} = 1.95 \approx 2$$

De acuerdo a lo anterior, se estableció, que la muestra representativa de las probetas a ensayar para cada estrato, son 4, a continuación se presenta la distribución realizada del número de muestras a ser ensayadas para cada condición:

Tabla 3.5. Número de probetas de Hormigón

# de Días	Resistencia de 300 Kg./cm ²				
	Estándar	5 % “H.S.”	10 % “H.S.”	15 % “H.S.”	20% “H.S”
3	1	1	1	1	1
7	2	2	2	2	2
14	2	2	2	2	2
28	3	3	3	3	3
Total	8	8	8	8	8

Fuente: Elaboración Propia

III.6. ENSAYOS ESTANDAR DE LABORATORIO

Con el fin de comparar resultados de otras investigaciones similares, u otros investigaciones que desean realizarse para duplicar o continuar el presente trabajo, el desarrollo de los ensayos se basó en las normas A.S.T.M. Parte 14 “Manual de Ensayos Para Agregados y Concreto”. Donde el procedimiento seguido para cada uno de los ensayos se describen en forma completa y suficientemente clara, por lo tanto en lo presente capitulo se presenta como referencia la codificación de las pruebas realizadas en los componentes del hormigón y en el concreto.

III.6.1 CEMENTO

III.6.1.1 Análisis Químicos del Cemento, y la Adición de “Humo de Silice”

- Análisis químico según instrucción de trabajo de la Fábrica de Cemento El Puente (OIJ-CCL-CC.029 “ANÁLISIS QUÍMICO”), y según la Norma Boliviana NB 060 (Disposiciones Generales: Análisis Químico), y NB 061 (Análisis Químico). ASTM C 114-91 ANÁLISIS QUÍMICO

III.6.1.2 Análisis Físicos del Cemento con y sin Adición

A continuación se presentan todos los análisis físicos que se realizarán para alcanzar el objetivo específico del presente trabajo.

- Determinación del peso específico de los cementos con y sin adición según instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.023 y NB 064).
- Determinación de superficie específica Blaine de los cementos con y sin adición, según instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.019 y NB 472). ASTM C 204 - 91
- Determinación de retenido en la malla 325 de los cementos con y sin adición según instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.020).
- Determinación de consistencia normal de los cementos con y sin adición, según instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.017 y NB 062).ASTM C 187 - 91
- Determinación del tiempo de fraguado de los cementos con y sin adición según instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.018 y NB 063). ASTM C 183
- Determinación de la expansión Le Chatelier de los cementos con y sin adición, según instrucción de trabajo (**OIJ-CCL-CC.035** y **NB 643**).
- Determinación de la fluidez de los cementos con y sin adición según instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.021 y NB 473). ASTM C 230 - 91
- Método para determinar la resistencia a compresión de los cementos con y sin adición, según instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.025 y NB 470). ASTM C 230-91.

Cabe aclarar que las normativas bolivianas están basadas en las Normas ASTM, y en normativas UNE, y que las instrucciones de trabajo son una compilación de estas dos, para su mejor entendimiento.

III.6.2 AGUA

El agua usada para la elaboración tanto de los morteros para medir la resistencia de los cementos y los hormigones fue agua destilada, ya que esta agua es pura y según instrucción

de trabajo de la fábrica, ésta debe utilizarse esta agua para el control de calidad de todos los cementos y/o hormigones

III.6.3 AGREGADOS

Las especificaciones de los ensayos que se realizaron en los agregados fueron proporcionados por la planta cementera “EL PUENTE” fueron los siguientes:

- ASTM D 75-82 MUSTREO DE AGREGADOS
- ASTM C 702-80 REDUCCIÓN DE MUESTRAS DE CAMPO A TAMAÑO DE ENSAYO
- ASTM C 33-82 ESPECIFICACIÓN DE AGREGADOS PARA CONCRETO
- ASTM C 136-82 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA AGREGADOS FINOS Y GRUESO
- ASTM C 127-81 PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO
- ASTM C 128-79 PESO ESPEO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO.
- ASTM D 2419-79 EQUIVALENTE DE ARENA PARA AGREGADO FINO.
- ASTM C 29-78 PESO UNITARIO Y PORCENTAJE DE VACÍOS PARA AGREGADOS GRUESO Y FINO.

III.6.4 CONCRETO

- ASTM C 470-81 ESPECIFICACIONES PARA MOLDES CILÍNDRICOS.
- ASTM C 192-81 FABRICACIÓN Y CURADO DE PROBETAS DE HORMIGÓN EL LABORATORIO
- ASTM C 172-82 MUSTREO DE CONCRETO FRESCO.
- ASTM C 143-78 SLUM PARA CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND
- ASTM C 138-81 PESO UNITARIO Y CONTENIDO DE VACÍOS PARA CONCRETO
- ASTM C 617-76 CAPINADO EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO.

- ASTM C 39-81 ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILINDRICAS
- ASTM C 670-81 PREPARACIÓN DE INFORME DE PRECISIÓN EN ENSAYOS PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

III.7. TEORÍA ESTADÍSTICA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

III.7.1 CÁLCULO DEL ERROR EXPERIMENTAL PROMEDIO

Existen muchos métodos para determinar el error experimental, pero se aconseja utilizar el cálculo de error de Gauss, que sea un método sencillo de aprender, aplicar y que permita extraer el valor medio y el error promedio de una serie de mediciones experimentales dadas, usando las conocidas fórmulas estadísticas:

$$MEDIA = X = \frac{\sum X_i}{n} \text{ Ec. (3.3)}$$

$$DES\dot{V}.STD. = s = \left(\frac{\sum (X_i - X)^2}{(n-1)} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ Ec. (3.4)}$$

$$ERROR\ EXPERIMENTAL = \delta = \frac{\left(\frac{\sum (X_i - X)^2}{(n-1)} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{\sum X_i}{n}} \text{ Ec. (3.5)}$$

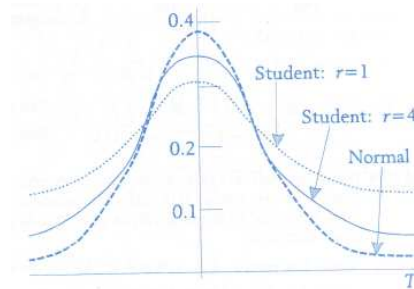
III.7.2 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES

Para la determinación de la resistencia característica se utilizó la tabla de de “t” de student ya que este método es aplicable para cualquier número de ensayos; a continuación se presenta la teoría distribución de “t” de student.

La gráfica adjunta muestra a la Distribución t de Student, es una curva simétrica respecto de 0. Se la compara con la curva normal, note que es ligeramente más achatada que la curva

normal. Sus correspondientes colas que se extienden a izquierda y derecha son ligeramente más altas que en la curva normal.

Figura 3.1 Curva Normal, Curvas “t” de student



La Distribución “t” de Student con r grados de libertad es adecuada cuando el número de elementos de una muestra es pequeño (En la práctica menor a 30).

La distribución “t” de Student se aproxima a una Distribución Normal $N(0,1)$, cuando r tiende ∞ , En la práctica se considera buena la aproximación para $N > 30$.

En la práctica la Distribución “t” de Student se emplea en la TEORÍA DE LAS PEQUEÑAS MUESTRAS y particularmente cuando se estudia la CONFIABILIDAD.

GRADOS DE LIBERTAD se entiende por grados de libertad a las opciones que se presentan en la estimación de un cálculo.

III.7.3. DEFINICIÓN DE RESISTENCIA MEDIA Y RESISTENCIA CARACTERÍSTICA

➤ Resistencia media

Dado un conjunto de n probetas cilíndricas, hechas con hormigón de una cierta calidad, las cuales son ensayadas a compresión, se obtendrá un conjunto de n valores de la tensión de rotura del material generalmente distintos entre si, se define como resistencia media.

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci} \text{ Ec. (3.6)}$$

Donde:

f_{cm} : Resistencia media

n: número de probetas ensayadas

f_{ci} : Tensión de rotura para cada probeta

➤ Desviación estándar

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} \text{ Ec.3.7.}$$

Donde:

f_{ci} = Valores de cada observación.

f_{cm} = Media de la muestra.

n = Número de elementos de la muestra

➤ Resistencia característica

La resistencia media es un valor que representa mejor la calidad del hormigón que cualquiera de los resultados aislados de cada probeta, sin embargo no da una idea precisa de la homogeneidad de la calidad del hormigón. Con el propósito de tener en cuenta este problema se introdujo el concepto de resistencia característica del hormigón. Que se define:

$$f_{ck} = f_{cm} - K * s \text{ Ec. (3.8.)}$$

Donde:

f_{ck} : Resistencia característica del hormigón

s: Desviación estándar

El valor de K para encontrar la resistencia característica del hormigón es un valor tal que es igualado o superado, como mínimo, por el 95% de las probetas ensayadas. En la tabla N° 3.5. se indica los valores de K.

Tabla 3.6. Distribución “t” de Student (Grado de confiabilidad 95%)

Número de ensayos menos uno	K	Numero de ensayos menos uno	K
1	6.31	17	1.74
2	2.92	18	1.73
3	2.35	19	1.73
4	2.13	20	1.72
5	2.02	21	1.72
6	1.94	22	1.72
7	1.90	23	1.71
8	1.86	24	1.71
9	1.85	25	1.71
10	1.81	26	1.71
11	1.80	27	1.7
12	1.78	28	1.7
13	1.77	29	1.7
14	1.76	30	1.7
15	1.75	Mayor a 30	1.64
16	1.75		

Fuente: Estadística y probabilidades “Shaum” y Hormigón Armado Autor: Pozzi Azzaro

CAPÍTULO IV

IV.1. FASE I: SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

IV.1.1 CEMENTO

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

IV.1.2. HUMO DE SÍLICE

La condición principal por el cual optamos por utilizar el humo de sílice en la elaboración de hormigones, es el alto contenido de sílice en su composición química con un 95%, lo cual dicho material se remplazara en un porcentaje óptimo en el cemento.

El humo de sílice es un material proveniente de cenizas volcánicas y este material al ser extraído y ser tamizado hasta llegar a un nivel de polvo posee gran cantidad de sílice, es muy importante saber en qué estado se encuentra esta sílice ya que se puede presentar como amorfo o cristalino.

La adición por el alto contenido de sílice, es por este motivo que se desarrolla esta investigación, ya que este es un material puzolánico, se sabe que en sí mismo la sílice, posee poco o ningún valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas cementantes, y de este modo incrementar la resistencia de un hormigón.

IV.1.3. AGREGADOS

Los agregados utilizados para realizar esta tarea de investigación fueron extraídos de canteras que se encuentran ubicadas a 11 km de la fabrica procesadora de Cemento “El PUENTE “, alojadas en el rio San Juan del Oro, La ubicación geográfica de esta zona de explotación se encuentra ubicada en la localidad del EL PUENTE provincia Méndez del departamento de Tarija, distante a 110 km de la capital, carretera hacia al Norte.

Para esta tarea, se planificó ir al sitio, para tomar muestras que en este caso, la toma de muestra se realizo de acuerdo a lo que detalla las normas ASTM.

Los materiales de la cantera “EL PUENTE” proviene de canto rodado, por lo que para su explotación como grava gravilla o arena deben ser separados por medio de mallas convencionales.

Luego de acopiado este material, se procedió al lavado y seleccionado por los tamices de 1”, ¾”, 1/2” y 3/8”. Para separar el agregado de desecho, para así obtener la porción de grava y arena respectivamente como, lo indican los manuales de laboratorio y las normas.

IV.2. FASE II: PROCESAMIENTO Y EXTRACCION DEL HUMO DE SILICE

Prácticamente para llevar adelante este trabajo de investigación la material fue extraído de yacimientos existentes en nuestro medio a 10 km de la ciudad de Tarija (la Pintada) carretera a bermejo.

Se observa en la figura 4.1 la existencia de dicho material objeto de estudio.



Figura 4.1 Yacimientos de la Materia Prima



Figura 4.2 Extracción de la Materia Prima

La puzolana natural empleada, como se especificó en el apartado anterior, fue el Humo de Sílice. La misma se obtuvo extraída directamente de yacimientos.

Posteriormente a la obtención de la materia prima que es el humo de sílice se realizó una selección con el tamiz N° 100; una vez obtenida el H.S. preseleccionado, se procedió a su molienda en un molino de bolas con capacidad de 5 Kg. como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3 Selección del Material



Figura 4.4 Molino de bolas

El control de finura de molido se realizó mediante el permeabilímetro Blaine, como se muestra en la figura N° 4.5, Controlando su finura aproximada mediante el peso para un cemento IP-30 ($m=2.005$ g) ya que está determinación de la masa se realiza con el peso específico del cemento, una vez que éste alcance la finura deseada.



Figura 4.5. Permeabilmetro Blaine

Para alcanzar la finura deseada se realizaron controles cada 10 minutos, en el molino de bolas mostrado en la figura 4.5, hasta alcanzar una finura entre 2600 a 4600 cm^2/gr . Este es uno de los parámetros prefijados ya que un cemento Pórtland IP 30, tiene esta finura y para evitar que este aspecto influya en la determinación de la resistencia se optó por obtener esta finura de molido. Ya que a mayor finura del cemento se obtienen mayores resistencias a menores edades.

IV.3. FASE III: AGREGADOS

En si para llevar adelante esta tarea, las proporciones de pesos y la granulometría de los agregados tanto el grueso como el fino los datos fueron proporcionado por la Fabrica Cementera “EL PUENTE”.

A continuación se muestra el análisis granulométrico de de los agregados.

IV.3.1. Agregados”El Puente”

Los agregados que se manejan en El Puente, tienen las características de ser previamente lavados, clasificados y secados para luego ser empleados en el moldeo de los hormigones, ésto garantiza trabajar con una relación agua-cemento casi constante.

Y lo más importante: tener una relación directa en cuanto a resistencias físicas con los morteros aunque este aspecto pasó un estudio realizado, otro de los aspectos es que se mantiene un cono de Abraham, sea cual fuere el volumen de hormigones.



Figura 4.6. Material sin tamizar ni lavado

IV.3.2. Dosificación de agregados “El Puente”

Las dosificaciones empleadas en la elaboración de probetas El Puente corresponden a tres tipos de granulometrías que son grava, gravilla y las arenas, además están son lavadas clasificadas y secadas, como se muestran en la fotografía.



Figura: 4.7 Material Seleccionado de acuerdo a tamices

IV.3.3. Estudios de Granulometrías

Las granulometrías realizadas en los agregados de **El Puente** responden a los cuadros mostrados en la parte de abajo, el nombre de módulos de finuras y el cumplimiento corresponde a las normas ASTM C136. El método consiste en realizar una granulometría formada por el número de mallas seleccionadas por las que se hace atravesar una muestra representativa, cuyo rango debe estar entre: 2.3 y 3.1

Tabla 4.1. Granulometría

Nº	µm	Residuo en malla	% de Retenido
8	2.36	77.53	30.19
16	1.18	89.95	42.61
30	0.60	98.48	51.14
50	0.30	111.10	63.76
100	0.15	140.76	93.42
200	0.075	146.32	98.98
Fondo		146.61	98.28

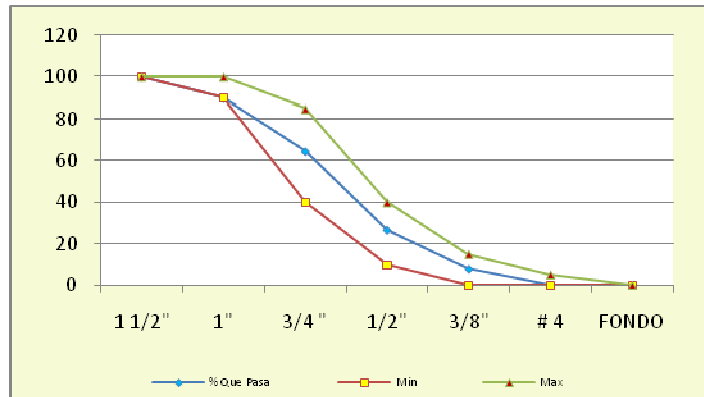
MF **2.81**

Fuente: Fábrica de Cemento EL PUENTE

IV.3.4. Agregados Gruesos El Puente

Los agregados en general que se usan en El Puente se mostraron en la fotografía partes arriba, para tener resultados similares sólo para estos casos de comparación se ha variado, pero normalmente responde a las gráficas mostradas, que además cumplen la normativa ASTM C 56.

Gráfico: 4. Gráfica de la Granulometría de los Agregados



Fuente: Fábrica de Cemento EL PUENTE

Proporciones de pesos para el diseño de hormigones dosificación para 8 cilindros

Agregado grueso.

Tabla 4.2. Pesos del Agregado Grueso

# Tamiz	%	Kg.
1 1/2"	0	0
1"	5	2,2
3/4"	39	17
1/2"	31	13,6
3/8"	25	10,9
#4	0	0
Fondo	0	0
Total		43,7

Fuente: Fábrica de Cemento EL PUENTE

Agregado fino.

Tabla4.3. Peso del Agregado Fino

# Tamiz	peso (Kg.)
100	21,7
40	21,7
Total	43,4

Fuente: Fábrica de Cemento EL PUENTE

IV.4. FASE IV: ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE LOS CEMENTOS Y LA ADICIÓN DEL HUMO DE SÍLICE

Previo a la realización de todos los ensayos físicos químicos de los cementos con y sin adición de “Humo de Sílice” se realizó la homogenización de la mezcla en el molino de bolas mostrado en la Figura 4.4. Por un periodo de 30 minutos.

IV.4.1. ANÁLISIS QUÍMICO

IV.4.1.1 ANÁLISIS QUÍMICO DEL HUMO DE SILICE”

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

- Norma Boliviana NB 061 y NB 062.
- Instrucción de trabajo (OIJ-CCL-CC.029 “ANÁLISIS QUÍMICO”)

Tabla 4.4 Composición Química del Humo de Sílice

N°	Componente	HUMO DE SILICE Contenido Porcentual		Media
		Muestra 1	Muestra 2	%
1	SiO ₂	94,56	94,42	94,49
2	Al ₂ O ₃	0,31	0,32	0,31
3	Fe ₂ O ₃	0,21	0,21	0,21
4	CaO	0,28	0,25	0,27
5	MgO	0,18	0,22	0,20
6	SO ₃	0,18	0,17	0,18
7	PPF	4,26	4,26	4,26
8	R ₂ O ₃	0,52	0,53	0,52
9	Cal libre	0,02	0,02	0,020
10	Residuo Ins.	31,56	31,56	31,56

TOTAL= 99,92

Fuente: Elaboración Propia

Este análisis químico es el respaldo para la utilización del Humo de Sílice en el diseño de hormigones, mediante el procedimiento explicado anteriormente para la obtención del humo de sílice, ya que en este estudio se puede evidenciar el alto contenido de sílice.

Otro de los factores determinante es su porcentaje de cal libre igual a 0%, por este motivo este tipo de puzolana es primordial en el proceso de fraguado del cemento ya que no aporta cal libre, esta cal es la que produce expansión en el cemento y mayor calor de hidratación por ese motivo las normas no permiten más del 2% de este. Cabe aclarar que para este estudio se siguió con los mismos procedimientos de análisis que para un cemento. Los análisis químicos de los cementos se encuentran detallados en el Anexo 1, (análisis químico) en la figura 4.9 se muestra la sílice obtenida de los ensayos químicos tanto para el humo de sílice como para el ensayo del con el 10% de adición.



Figura 4.8 Contenido de Sílice”

Los cuatro parámetros fundamentales que respaldan este trabajo es el contenido de sílice en la puzolana objeto de estudio, residuo insoluble, pérdida por fuego, y el contenido de cal libre en los cementos para que la sílice reacciones, ya que estos parámetros son los que más van a influir en el periodo de evolución de los hormigones con este tipo de adición.

IV.4.1.2. Análisis químico del cemento Portland Puro y del Cemento con el 10% de adición

En este apartado se detalla el análisis químico del cemento portland puro (patrón) y del cemento portland con 10% de adición ya que con el 10% de adición nos dieron mejores resultados que respaldan a la hipótesis planteada.

Tabla 4.5. Análisis Químico del C.P.P.

Cemento Portland Puro (patrón)		
N°	Componente	CONTENIDO
		Muestra 1
1	SiO ₂	23,04
2	Al ₂ O ₃	5,79
3	Fe ₂ O ₃	2,92
4	CaO	58,99
5	MgO	3,47
6	SO ₃	2,73
7	PPF	4,26
8	Cal libre	1,2701
9	Residuo Ins.	6,380
TOTAL=		101,20

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.6. Análisis Químico del C.P.P. con 10% de adición

N°	Componente	Cemento con 10% adición
		CONTENIDO
		Muestra 1
1	SiO ₂	29,12
2	Al ₂ O ₃	5,19
3	Fe ₂ O ₃	2,92
4	CaO	53,43
5	MgO	3,13
6	SO ₃	2,49
7	PPF	1,95
8	Cal libre	0,8791
9	Residuo Ins.	4,800
TOTAL=		98,22

Fuente: Elaboración Propia

El análisis químico de los cementos se detalla en el Anexo 1, donde se podrá verificar que el cemento que mejores características químicas tiene, es el cemento Pórtland puro (patrón), esto va dando pautas de cual será el cemento que se comporte mejor a los ensayos destructivos del mortero y hormigones.

IV.4.2. ANÁLISIS FÍSICOS

IV.4.2.1 Determinación del Peso Específico

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

Tabla 4.7. Pesos específicos

Cemento	% Adicción	Peso específico
		(gr./ml)
Patrón	0	3,14
Patrón	5	3,00
Patrón	10	2,98
Patrón	15	2,94
Patrón	20	2,88
Puzolana	100	2,38

Fuente: Elaboración Propia



Figura 4.9. Ensayo de Peso específico

IV.4.2.2 Determinación de la Superficie Específica Blaine \

Las partículas de cemento, debido a su pequeño tamaño, no pueden caracterizarse por medio de tamices; de este modo, se necesitan otros métodos para medir el tamaño de partícula.

El método más común es el de permeabilidad al aire de Blaine (ASTM - C204).

El ensayo consiste en medir el tiempo en que una columna de agua desciende una altura dada, como se ve en la figura 4.11. Este método depende del flujo de aire a través de un lecho de cemento preparado en la celda del aparato (permeabilímetro de Blaine, figura 4.11). El flujo de aire es función del tamaño y número de poros, lo cual es función del tamaño de partícula. Para determinar la superficie específica, se considera a las partículas como esferas.

El área superficial se expresa en m²/kg o cm²/gr de cemento. Los resultados dependerán de la temperatura a la que se haga el ensayo.

La fórmula para la obtención de la masa se la obtiene previa calibración del aparato mostrado en la figura 4.11

Fórmula para determinar la masa de la muestra

Calibración Blaine \longrightarrow $M = 1.681914 * d * 0,5$ Ec. 4.1

Determinación Blaine \longrightarrow $B \left(\frac{cm^2}{g} \right) = \sqrt{t_{(s)}} * 450.012$ Ec. 4.2

Tabla 4.8. Determinación de la Superficie Específica Blaine

MOLIENDA (Minutos)	Cemento	% Adición	Peso Especifico (gr./ml)	Peso de muestra (gr.)	Tiempo (seg.)	Blaine (cm ² /gr)
-	Patrón	0	3,14	2,8563	65	3628,11
1:40	Patrón	5	3,00	2,5229	120	4929,63
1:30	Patrón	10	2,98	2,5027	105	4611,25
1:30	Patrón	15	2,94	2,4682	123	4990,87
1:30	Patrón	20	2,88	2,4245	110	4719,77
1:30	Puzolana	100	2,38	2,0015	60	3485,78

Fuente: Elaboración Propia



Figura: 4.10. Permeabilmetro Blaine

Este ensayo es muy importante, ya que si las finuras de molino no están en los rangos de un cemento Pórtland IP 30, se corre el riesgo de no estar midiendo con los mismos parámetros los diferentes tipos de adición a los cementos. Como al tener mayor finura el cemento, se obtendrá mayores resistencias a menores edades, este fenómeno nos puede conducir a errores en la medición de la resistencia de los morteros como de los hormigones.

IV.4.2.3 Determinación Retenido malla N° 325

El objetivo de este ensayo es la determinación del porcentaje de retenido en la malla 325 para controlar su finura de molido, el porcentaje de retenidos en la malla #325 se determina mediante la fórmula de calibración de la malla mostrada en anexo 2

Tabla 4.9. Determinación Retenido Malla #325

Cemento	% Adicción	Retenidos (gr.)	Retenidos (%)
		Malla #325	Malla #325
Patrón	0	0,0723	14,279
Patrón	5	0,0860	16,985
Patrón	10	0,0680	13,430
Patrón	15	0,0792	15,642
Patrón	20	0,0677	13,371
Puzolana	100	0,0970	19,158

Fuente: Elaboración Propia

IV.4.2.4 Determinación Consistencia Normal

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

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

Tabla 4.10. Determinación de la Consistencia Normal

Cemento	% Adicción	Peso (gr.)	Agua (gr.)	Consistencia
Patrón	0	350,0	93,00	0,266
Patrón	5	350,0	96,00	0,274
Patrón	10	350,0	97,00	0,277
Patrón	15	350,0	98,00	0,280
Patrón	20	350,0	99,00	0,283

Fuente: Elaboración Propia

IV.4.2.5 Determinación del Tiempo de Fraguado

La finalidad de este estudio es la de determinar el tiempo de fraguado inicial y final y que cumplan con las normas establecidas en el capítulo anterior.

Tabla 4.11. Determinación del Tiempo de Fraguado Inicial y Final

Cemento	% Adicción	TIEMPOS DE FRAGUADO	
		Inicial (Hrs: min)	Final (Hrs: min)
Patrón	0	2:25	3:30
Patrón	5	2:38	3:55
Patrón	10	2:59	4:15
Patrón	15	3:11	4:25
Patrón	20	3:41	4:50

Fuente: Elaboración Propia.

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

En el tiempo de fraguado final, se indica que no debe ser mayor a 12 horas, ya que si no se cumple con este parámetro se obtienen resistencias bajas (especialmente a cortas edades).

IV.4.2.6 Determinación de la Estabilidad del Volumen Le Chatelier

Este ensayo es realizado para determinar la estabilidad del volumen, además de medir la expansión de la muestra mediante las Agujas de Le Chatelier mostrado en la figura 4.12, nos referimos a la estabilidad ya que el fenómeno de expansión no es sólo debido al calor libre, sino también a la presencia de álcalis.

Tabla 4.12. Determinación de la Expansión

Cemento	% Adicción	Edad	Longitud	Longitud	Expansión (%)
		(días)	Inicial (mm)	Final (mm)	
Patrón	0	1	18,00	18,00	0,00
Patrón	5	1	7,00	7,00	0,00
Patrón	10	1	15,00	15,00	0,00
Patrón	15	1	4,00	4,00	0,00
Patrón	20	1	8,00	8,00	0,00

Fuente: Elaboración Propia



Figura: 4.11. Aguja de Le chatelier

IV.4.2.7 Gradación de la Arena

La gradación de la arena se realizó de acuerdo a la Norma Boliviana y orden de trabajo de la fábrica, para el control de calidad de los cementos como se describe a continuación:

Tabla 4.13 Gradación de la Arena

TAMIZ	PORCENTAJE RETENIDO	PESO DE LA ARENA (gr.)
(+#100)	-	40
150 μm (#100)	98 \pm 2	470
300 μm (#50)	75 \pm 5	915
425 μm (#40)	30 \pm 5	570
600 μm (#30)	2 \pm 2	40
1.18 μm (#16)	0	-

Fuente: Norma Boliviana 470

IV.4.2.8. Determinación de la Resistencia en Cementos

Para la determinación de la resistencia a compresión de los cementos se utilizan las fórmulas detalladas en el Capítulo III, donde explican detalladamente las variables de cada una de las fórmulas. Los resultados de estos ensayos se encuentran en el anexo 2.

➤ *Resistencia media*

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci} \text{ Ec. (3.6.)}$$

➤ *Desviación estándar*

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} \text{ Ec.3.7.}$$

➤ *Resistencia característica*

$$f_{ck} = f_{cm} - K * s \text{ Ec. (3.8)}$$

El valor de K para encontrar la resistencia característica del hormigón es un valor tal que es igualado o superado, como mínimo, por el 95% de las probetas ensayadas. En la tabla 3.5 se indican los valores de K.

➤ **Determinación de la fluidez**

La fluidez es una medida de la consistencia de la pasta de cemento expresada en términos del incremento del diámetro de un espécimen moldeado por un medio cono, después de sacudir un número específico de veces.

El ensayo para determinar la fluidez NB 473, se realiza en una mesa de sacudidas la que se coloca la muestra en dos capas que son compactadas con una varilla normada en un molde normado. Se deja la muestra en el molde por 1min y luego se retira el molde quedando la muestra sobre el plato de la mesa de sacudidas. Se inicia una

secuencia de 25 golpes y se realizan 5 medidas del diámetro de la muestra expandida por los golpes. La sumatoria de estas medidas debe dar 110±5.

Éste es el parámetro que se debe tomar muy en cuenta en la elaboración de morteros ya que con este método podemos medir el % de fluidez, la grafica 4.13 y 4.14 muestra los componentes de la mesa de flujo.



Figura 4.12. Mesa de flujo



Figura 4.13. Medición de diámetros

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

$$\% \text{Fluidez} = \left(\frac{\text{DIÁMETRO...PROMEDIO} - \text{DIÁMETRO...ORIGINAL}}{\text{DIÁMETRO..ORIGINAL}} \right) * 100 \quad \text{Ec. 4.2}$$

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

Tabla 4.14. Determinación de la Fluidez

Cemento	% Adicción	Contenido de agua (ml.)	fluidez
			(%)
Patrón	0	359,00	87,00
Patrón	5	386,00	106,00
Patrón	10	388,00	107,00
Patrón	15	389,00	113,00
Patrón	20	390,00	112,00

Fuente: Elaboración Propia

IV.4.2.8.1 Resistencia a compresión en cementos con fluidez 110 ± 5

En esta sección es donde se elegirá cuál es el % de adición que mejor comportamiento tiene y se trabajara de acuerdo al comportamiento a la resistencia a compresión de los morteros trabajando con una porcentaje de fluidez constante según norma, de 110 ± 5 . Después de estos ensayos ya determinamos el porcentaje óptimo lo cual aumenta la resistencia, se hizo un análisis haciendo variar la fluidez y determinar el contenido de agua más óptimo, y su posterior dosificación en hormigones y precisar la influencia de la adición del “Humo de Sílice” en hormigones sometidos a compresión.

El incremento del porcentaje de fluidez se analiza ya que las premisas indican que este tipo de adición incrementa el consumo de agua y todos los estudios hasta aquí realizados solo mantienen el contenido de agua de un cemento normal, y esto provoca pérdida de trabajabilidad o menor porcentaje de fluidez.

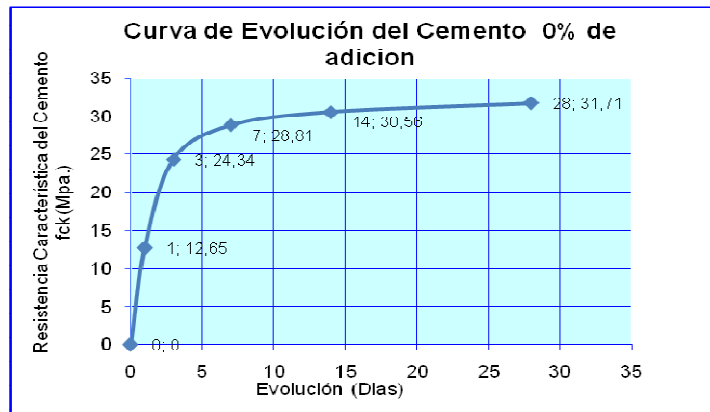
IV.4.2.8.1.1 Resistencia a compresión cemento Patrón, con y sin adición

Tabla 4.15 Resistencias Cemento Patrón Fluidez 110 ± 5

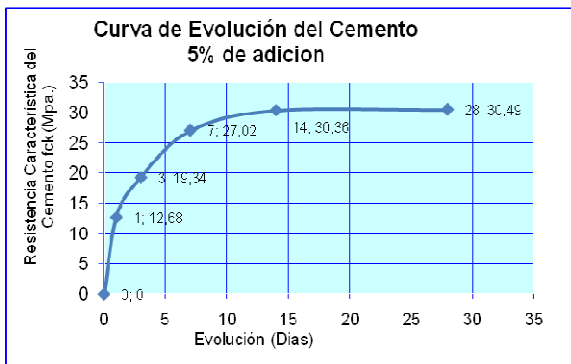
PERIODO DE EVOLUCION (Días)	RESISTENCIA CARACTERISTICA fck (Mpa.)				
	% de adición de Humo de Sílice				
	0	5	10	15	20
0	0	0	0	0	0
1	12,65	12,68	8,46	4,63	4,68
3	24,34	19,34	19,33	15,83	11,58
7	28,81	27,02	27,28	23,66	21,42
14	30,56	30,36	34,30	29,90	27,43
28	31,71	30,49	37,02	33,68	32,37

Fuente: Elaboración Propia

Graficas 4.1 Curvas de evolución Cemento Patrón fluidez 110±5

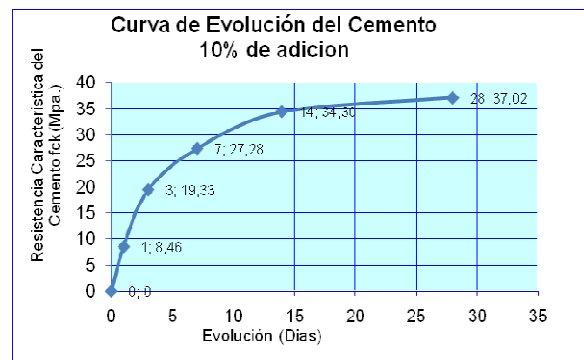


Grafica 4.1.1. - Fuente: Elaboración Propia

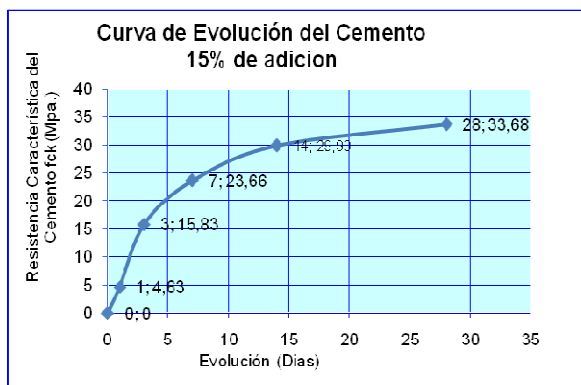


Grafica 4.1.2

Fuente: Elaboración Propia

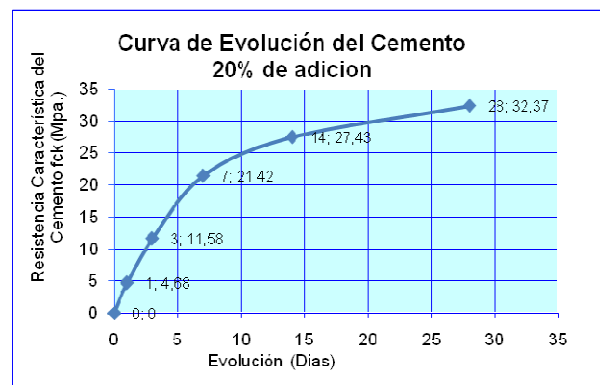


Grafica 4.1.3



Grafica 4.1.4.

Fuente: Elaboracion Propia



Grafica 4.1.5.

En la gráfica 4.15. se puede notar el comportamiento que tiene la adición de Humo de Silice en sus diferentes porcentajes. Es evidente que el 5% de adición de “Humo de Silice” tiene un comportamiento muy bajo a lo largo de su periodo de evolución, esto nos indica que la sílice no está reaccionando y en ves de ayudar a la resistencia este porcentaje de adición, está inactivo. El 10% de adición es el porcentaje que mejor se comporta de todos teniendo un incremento considerable de resistencia a los 28 días, y manteniendo un comportamiento muy parecido a los 7, y 14 días, este fenómeno se debe a que este porcentaje está reaccionando con el hidróxido de calcio presente en el cemento.

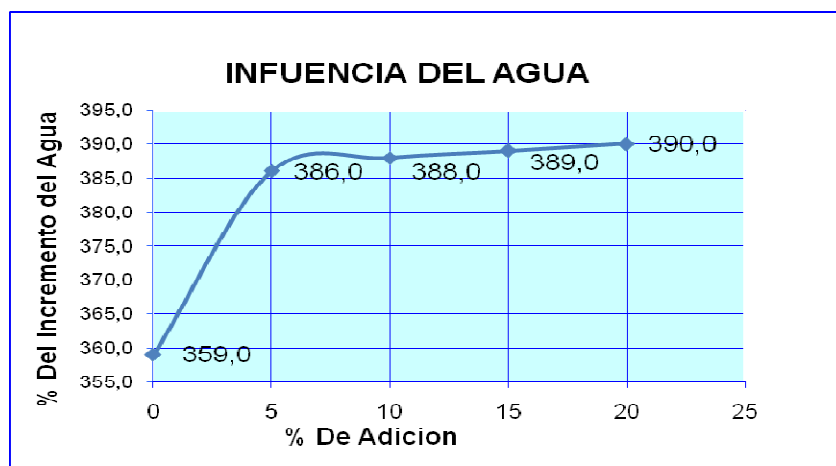
IV.4.2.8.1.2. Determinación del Incremento de Agua

Tabla 4.16 Incremento de agua por % de adición

Cemento	% Adicción	Contenido de agua (ml.)	fluidez	Incremento agua(%)
			(%)	
Patrón	0	359,00	87,00	0
Patrón	5	386,00	106,00	6,99
Patrón	10	388,00	107,00	7,47
Patrón	15	389,00	113,00	7,71
Patrón	20	390,00	112,00	7,94

Fuente: Elaboracion Propia

Grafica 4.2 Incremento de Agua en Morteros fluidez 110 ± 5



Fuente: Elaboracion Propia

La Tabla 4.16 indica los porcentajes de incremento de agua óptimos para una fluidez de 110 ± 5 , ya que con esta fluidez el contenido de agua se incrementa beneficiando a la evolución del cemento. Por tal motivo estos porcentajes de agua serán los que se incrementarán en los hormigones. Cabe aclarar que en los morteros no se calcula el porcentaje de absorción de la arena, ni el contenido de humedad, para tal motivo se tendrá que realizar la corrección, sin tomar en cuenta el incremento de agua por corrección en la arena. Este es un aspecto que se debe tomar muy en cuenta antes de realizar la dosificación con estos porcentajes y factores antes mencionados.

IV.5. FASE V: DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

IV.5.1 DOSIFICACIÓN MEZCLA PATRÓN 0% DE ADICION

Las proporciones de pesos de la dosificación para el diseño de hormigones fue proporcionada por la fábrica de cemento EL PUENTE detallado en ANEXO 3.

Tabla 4.17. Dosificación Patrón Materiales Secos

Ingredientes	Peso Seco 8 Cilindros
<i>Cemento</i>	20 kg.
<i>Agua</i>	9,1 lt.
<i>Grava</i>	43,7 kg.
<i>Arena</i>	43,4 kg.
<i>total</i>	<i>116,2 kg.</i>

Fuente: Elaboración Propia

IV.5.2 DOSIFICACIÓN MEZCLA PATRÓN CON ADICIÓN

IV.5.2.1 DOSIFICACIÓN MEZCLA PATRÓN CON 5% DE ADICIÓN “H.S.”

Tabla 4.18. Dosificación con 5% de “H.S.” Materiales Secos

Ingredientes	Peso Seco 8 Cilindros
<i>Humo de Silice</i>	1 kg.
<i>Cemento</i>	19 kg.
<i>Agua</i>	9,74 lt.
<i>Grava</i>	43,7 kg.
<i>Arena</i>	43,4 kg.
<i>total</i>	116,84 kg.

Fuente: Elaboración Propia

IV.5.2.2. DOSIFICACIÓN MEZCLA PATRÓN CON 10% DE ADICIÓN “H.S.”

Tabla 4.19. Dosificación con 10% de “H.S.” Materiales Secos

Ingredientes	Peso Seco 8 Cilindros
<i>Humo de Sílice</i>	2 kg.
<i>Cemento</i>	18 kg.
<i>Agua</i>	9,78 lt.
<i>Grava</i>	43,7 kg.
<i>Arena</i>	43,4 kg.
<i>total</i>	116,88 kg.

Fuente: Elaboración Propia

IV.5.2.3. DOSIFICACIÓN MEZCLA PATRÓN CON 15% DE ADICIÓN “H.S.”

Tabla 4.20. Dosificación con 15% de “H.S.” Materiales Secos

Ingredientes	Peso Seco 8 Cilindros
<i>Humo de Sílice</i>	3 kg.
<i>Cemento</i>	17 kg.
<i>Agua</i>	9,8 lt.
<i>Grava</i>	43,7 kg.
<i>Arena</i>	43,4 kg.
<i>total</i>	<i>116,90 kg.</i>

Fuente: Elaboración Propia

IV.5.2.4. DOSIFICACIÓN MEZCLA PATRÓN CON 20% DE ADICIÓN “H.S.”

Tabla 4.21. Dosificación con 20% de “H.S.” Materiales Secos

Ingredientes	Peso Seco 8 Cilindros
<i>Humo de Sílice</i>	4 kg.
<i>Cemento</i>	16 kg.
<i>Agua</i>	9,82 lt.
<i>Grava</i>	43,7 kg.
<i>Arena</i>	43,4 kg.
<i>total</i>	<i>116,92 kg.</i>

Fuente: Elaboración Propia

IV.6. FASE VI: ELABORACIÓN Y CURADO DE HORMIGONES

IV.6.1 ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE HORMIGÓN.

Después de haber obtenido ya las cantidades de los materiales, se procedió a realizar la elaboración de la mezcla. El procedimiento de elaboración de los especímenes cilíndricos se basó en la norma ASTM C-139.

Los materiales y equipos empleados para la preparación del hormigón, fueron: una hormigonera eléctrica, un cono de Abrams y base, varilla compactadora, regla enrasadora,

probetas de vidrio de 20 ml., brochas, recipientes, cucharas, badilejos, baldes, guantes y material de limpieza (secadores, escobas, detergentes, etc.).

El proceso de mezclado fue el siguiente:

- Para el mezclado de los materiales en la hormigonera se introdujo en el tambor una pequeña porción del agua de mezcla, aproximadamente un 10%, añadiendo luego los materiales sólidos grava, cemento, arena en este orden, conjuntamente con el 80% del agua. El 10% de agua restante se termina de introducir cuando todos los materiales se encuentran en la mezcladora. El tiempo de mezclado depende en gran parte de la eficiencia de la mezcladora pero un tiempo de minuto y medio se considera satisfactorio.
- Una parte de la mezcla se la vació en el recipiente para realizar en el ensayo de asentamiento en el cono de Abrams, el que fue llenado en tres capas, apisonando cada una de ellas con 25 golpes, una vez llenado el cono se lo enrasó con la regla y se midió el asentamiento.
- Una vez realizado el control de la mezcla se prosiguió con el llenado de los moldes de la siguiente manera:
- Se llenaron los moldes con hormigón en tres capas iguales apisonando cada capa con 25 golpes y también vibrando cada capa con un combo de goma dando 15 golpes en el exterior esto con el fin de eliminar las burbujas de aire. La tercera capa se la enrasa con el borde del molde con la regla y un badilejo.

IV.6.2. CURADO DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN

El curado de las probetas se lo realizó introduciendo las misma en piscinas con agua y cal en donde se encontraron sumergidas en su totalidad, hasta que se realice el ensayo mecánico de resistencia a la compresión, el mismo que se la realizó en tres diferentes edades de 3,7, 14 y 28 días.

IV.6.3. ENSAYO MECÁNICO DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

El ensayo mecánico de resistencia de las probetas cilíndricas, se efectuó según la norma ASTM C 39; donde el esfuerzo a la compresión del espécimen es calculado dividiendo la máxima carga leída durante el ensayo, por el área de la cara axial del mismo.

El equipo empleado fue: una prensa hidráulica, balanza eléctrica, un flexo metro.

El procedimiento ejecutado se describe a continuación:

- Se verificó con un flexometro las dimensiones de las probetas.
- Todas las muestras fueron pesadas antes de su respectivo ensayo.
- Luego se colocaron las probetas en la parte inferior de la prensa, limpiando ésta con anterioridad.
- Se alineó la muestra, con el centro de la parte superior de la prensa (soporte con cabeza movable), y se verificó que la carga esté en cero.
- Inmediatamente se cerró la prensa, y empezó a aplicar la carga continuamente, hasta que la probeta falló, registrando así la máxima carga soportada por la probeta o de rotura. Observando así el tipo de falla que presentaban cada una.

IV.7. FASE VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.7.1 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESIÓN

➤ *Análisis de la resistencia característica a compresión.*

- *Resistencia media a la compresión.*

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci} \quad Ec.3.6.$$

Donde:

f_{cm} : Resistencia media

n: Número de probetas ensayadas

f_{ci} : Tensión de rotura para cada probeta

- *Desviación estándar*

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} \quad \text{Ec 3.7.}$$

Donde:

f_{ci} = Valores de cada observación.

f_{cm} = Media de la muestra.

n = Número de elementos de la muestra.

- *Resistencia característica.-*

Para determinar la resistencia característica del hormigón, se aplicaron ciertos criterios probabilísticos, según la distribución de probabilidades de “t” de student, donde:

$$f_{ck} = f_{cm} - K * s \quad \text{Ec.3.8.}$$

Donde:

f_{ck} : Resistencia característica del hormigón

s: Desviación estándar

El valor de K para encontrar la resistencia característica del hormigón es un valor tal que es igualado o superado, como mínimo, por el 95% de las probetas ensayadas. En la tabla N° 3.5 se indica los valores de K.

IV.7.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

IV.7.2.1 Resultados del Análisis de Hormigones con Adición de “Humo de Sílice”

Para un mejor entendimiento se presenta la gráfica con el hormigón convencional y con sus diferentes porcentajes de adición para realizar un estudio comparativo más detallado.

Tabla 4.22. Resistencias del Hormigón con % de Adición de “Humo de Silice”

PERÍODO DE EVOLUCIÓN (Días)	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA fck(Mpa.)				
	% de Adición de Humo de Sílice				
	0	5	10	15	20
0	0	0	0	0	0
3	27,82	24,60	24,03	22,14	18,83
7	33,55	29,19	32,12	29,09	24,67
14	37,24	35,42	37,46	34,17	30,35
28	42,41	42,14	43,06	37,82	37,55

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 4.3 Curvas de Evolución del Hormigón con y sin Adición de “Humo de Silice”

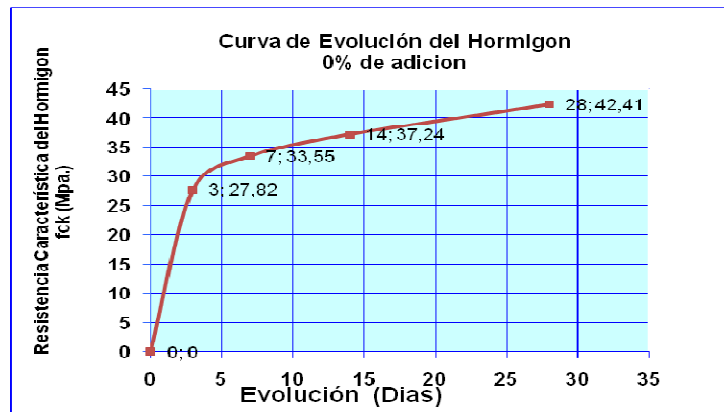
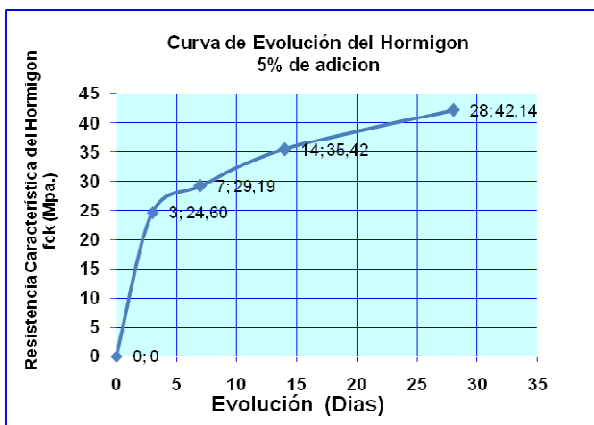
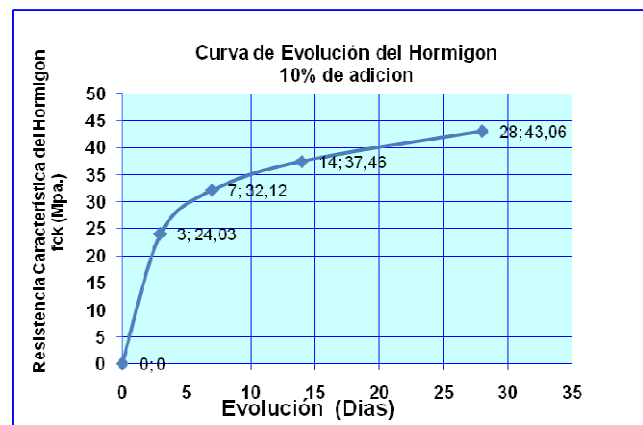


Grafico 4.3.1. Fuente: Elaboración Propia

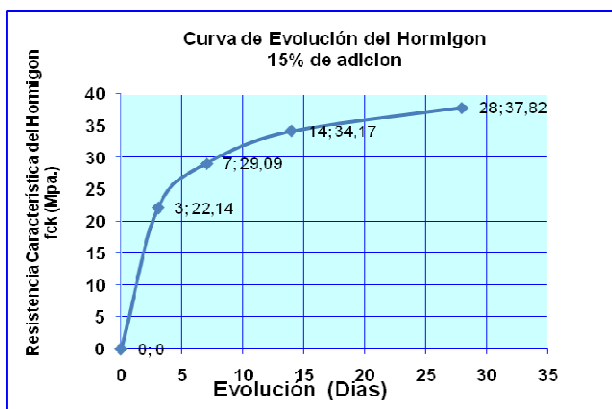


Grafica 4.3.2.

Fuente: Elaboración Propia

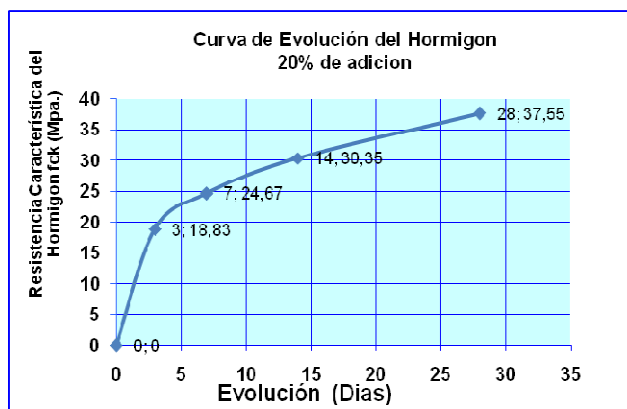


Grafica 4.3.3.



Grafica 4.3.4.

Fuente: Elaboración Propia



Grafica 4.3.5.

Como se puede observar en las Graficas 4.17, el hormigón convencional tiene mayor resistencia para la que fue calculado, debido a la mayoración que se le da para garantizar que llega a una resistencia de diseño real.

Se puede observar claramente que el hormigón con adición del 10% por ciento se comporta muy bien, adquiriendo una mayor resistencia que la del hormigón convencional además de que su periodo de evolución es muy favorable, puesto que a los 7 días adquiere una resistencia muy parecida a la del hormigón convencional, a los 14 días se ve un incremento muy considerable, pero cercano al hormigón convencional. Además, se puede observar una curva muy bien definida evolucionando a lo largo del tiempo de manera muy favorable.

La adición del 20% genera una curva muy parecida a la del 15%, excepto a los 28 días que llega a una resistencia muy parecida a la del hormigón convencional, debido a que hay un porcentaje de adición en exceso que no está reaccionando.

IV.7.3. ANÁLISIS DE LA ADICIÓN DE HUMO DE SÍLICE EN HORMIGONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN

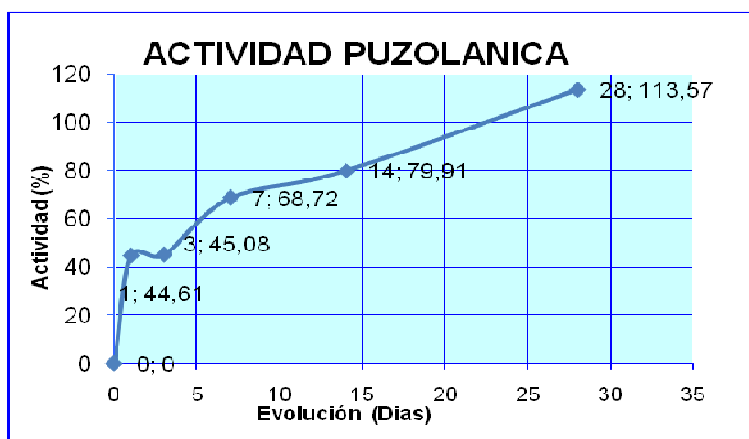
IV.7.3 .1. Índice de Actividad Puzolánica

Tabla 4.23. Índice de Actividad Puzolánica con 20% de Adición de “Humo de Silice”

PERIODO DE EVOLUCION (Dias) "X"	Resistencia Caracteristica 0% fck(Mpa.)	Resistencia Caracteristica 20% fck(Mpa.)	ACTIVIDAD PUZOLANICA	ACTIVIDAD PUZOLANICA (%)
0	0	0	0	0
1	12,65	5,64	0,45	44,61
3	24,34	10,97	0,45	45,08
7	28,81	19,80	0,69	68,72
14	30,56	24,42	0,80	79,91
28	31,71	27,92	1,14	113,57

Fuente: Elaboracion Propia

Gráfica 4.4. Curva de actividad puzolánica con y sin adición de “humo de silice”



Fuente: Elaboracion Propia

Se puede apreciar en la curva de evolución cómo se va incrementando su actividad puzolánica puesto que de acuerdo a lo que va evolucionando va aumentando su actividad, y a los 28 días llegando a evolucionar favorablemente hasta alcanzar una actividad del 113.57% de su actividad puzolánica lo que indica que es un material de alta actividad, que

constituye de un parámetro que aumenta la resistencia con respecto al hormigón convencional.

IV.7.3.2 Análisis Pesos Específicos del Hormigón (cemento patrón)

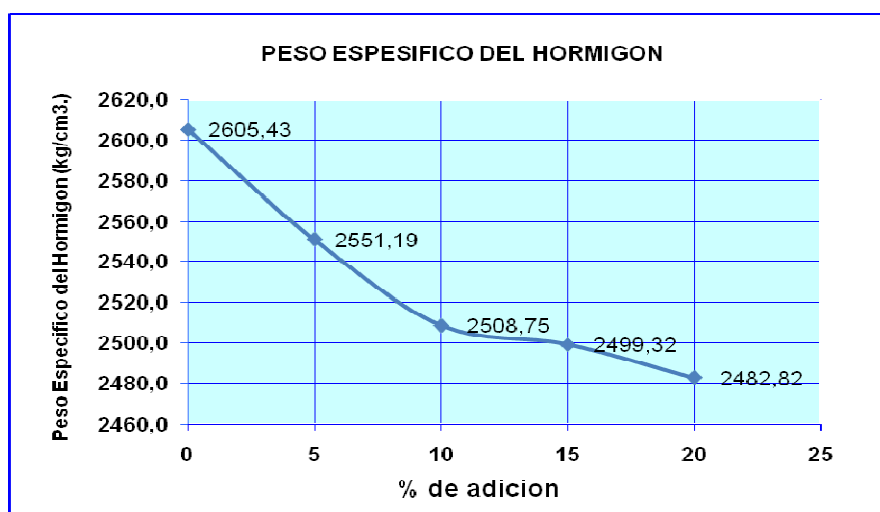
IV.7.3.1 Media de los Pesos Específicos del Hormigón

Tabla 4.24. Pesos Específicos del Hormigón

% Adición	Peso Especifico (Kg/m3)
0	2605,43
5	2551,19
10	2508,75
15	2499,32
20	2482,82

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 4.5. Análisis de la Adición de “H.S.” en el Peso Especifico del Hormigón



Fuente: Elaboración Propia

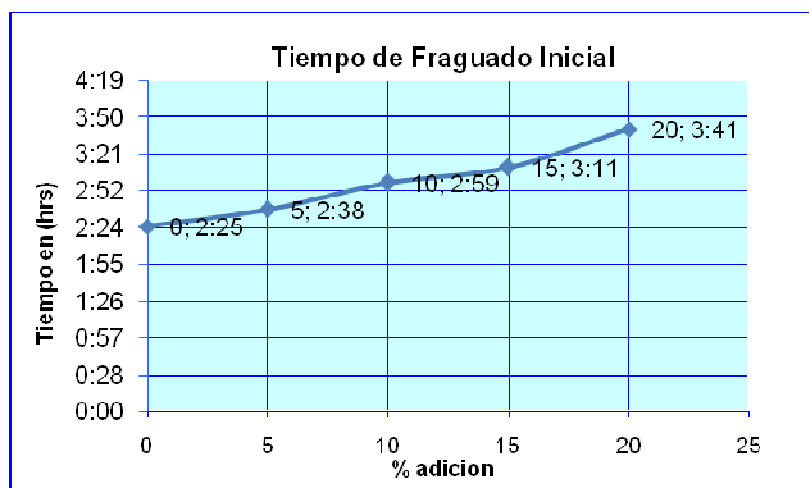
En la Gráfica 4.5 se puede observar que los porcentajes de adición influyen en el peso específico de los hormigones; este fenómeno ocurre gracias al bajo peso específico de la adición del humo de sílice, bajando su peso específico con adición de 20% de humo de sílice.

IV.7.3.3 Influencia en el Tiempo de Fraguado

Tabla 4.25. Tiempos de Fraguado Inicial y Final

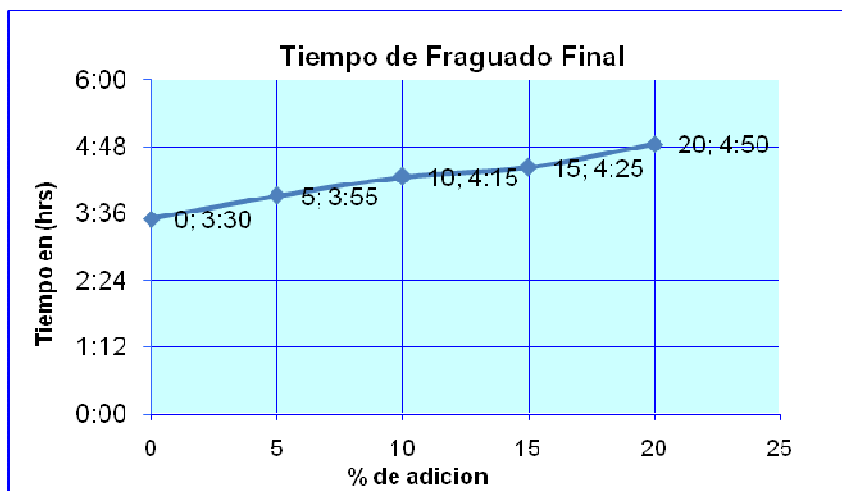
Cemento	% Adicción	TIEMPOS DE FRAGUADO	
		Inicial (Hrs:min)	Final (Hrs:min)
Patrón	0	2:25	3:30
Patrón	5	2:38	3:55
Patrón	10	2:59	4:15
Patrón	15	3:11	4:25
Patrón	20	3:41	4:50

Grafica 4.6. Análisis de la Adición de “humo de sílice” en el Fraguado Inicial



Fuente: Elaboración Propia

Grafica 4.7. Análisis de la Adición de “Humo de Sílice” en el Fraguado Final



Fuente: Elaboracio Propia

Cabe resaltar que los tiempos de fraguados fueron medidos en el control de calidad de los cementos, ya que no se cuenta con la metodología para realizar este parámetro de fraguados inicial, y final en el hormigón.

Se observa que los tiempo de fraguado (tanto inicial como final) sufren un incremento considerable, pero se ajustan a los tiempos requeridos por las normativas que indican que para un tiempo de fraguado inicial debe ser mayor a 45 minutos, y un tiempo final de fraguado menor de 12 horas.

Además, en la gráfica se puede observar que el tiempo de fraguado inicial según el tipo de adición adquiere una curva que no está muy bien definida, y por el contrario, el tiempo de fraguado final según el porcentaje de adición, adquiere un comportamiento más definido parecido más a una recta.

IV.7.3.4 Influencia en la Expansión

Tabla 4.26. Expansión de los Cemento con y sin Adición de “Humo de Sílice”

Cemento	% Adición	Edad	Longitud	Longitud	Expansión
		(días)	Inicial (mm)	Final (mm)	(%)
Patrón	0	1	18,00	18,00	0,00
Patrón	5	1	7,00	7,00	0,00
Patrón	10	1	15,00	15,00	0,00
Patrón	15	1	4,00	4,00	0,00
Patrón	20	1	8,00	8,00	0,00

Fuente: Elaboración Propia

Este parámetro fue medido en el control de calidad de los cementos con el método de ensayo estabilidad del volumen, con las Agujas de Le Chatelier.

El análisis de la adición en la expansión del los cementos como de los hormigones con adición del humo de sílice es muy favorable, ya que la expansión se reduce.

Este fenómeno de expansión se produce por el calor de hidratación de los cementos y al ser la ceniza un material puzolánico reduce esta propiedad, además de incrementar el consumo de agua, este fenómeno del incremento de agua es favorable para reducir la expansión en los cementos en el proceso de hidratación; además de aportar con ésto también es favorable en el proceso de evolución reduciendo la expansión puesto que los álcalis reaccionan a largo plazo y la sílice presente en el humo de sílice.

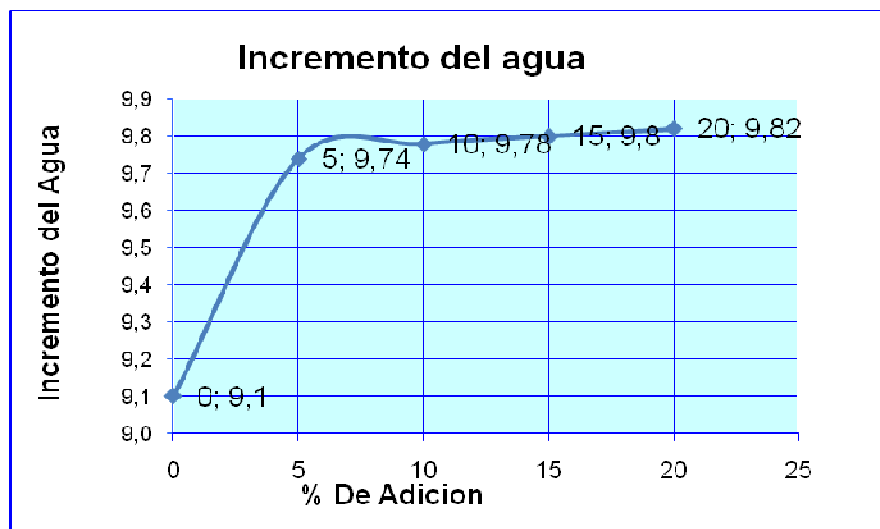
IV.7.3.5. Influencia en el Incremento de Agua

Tabla 4.27. Incremento de Agua de Acuerdo al % de Adición

Cemento	% ADICION	Incremento de agua (lt.)
Patrón	0	9,1
Patrón	5	9,74
Patrón	10	9,78
Patrón	15	9,8
Patrón	20	9,82

Fuente: Elaboración Propia

Grafica 4.8. Análisis de la adición de “humo de sílice” en el Incremento de Agua en Hormigones



Fuente: Elaboración Propia

IV.8. CAMPO DE APLICACIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas a compresión del hormigón se determinó que el porcentaje más favorable de adición de Humo de sílice es el 10%, este tipo de adición incrementa su resistencia en un 30.23% como lo demuestra el índice de actividad puzolánica a los 28 días.

A continuación se realizará un análisis comparativo del hormigón convencional con una resistencia de 210 Kg./cm² con un hormigón con dosificación de 300Kg./cm² con adición del 10% de humo de sílice como se desarrolló la investigación.

IV.8.1 Análisis de Precios

IV.8.1.1 Precios de cementos por Bolsas.

Tabla 4.28. Precios IP-30 con Toba

PRECIOS DEL CEMENTO IP - 30 con toba							
COMPONENTES	% MATERIAL	PRECIO UNIT \$/ton	PRECIO bs/kg	%DE PROD.	Precio(bs/kg) (+)Produccion	Bolsa 50kg	Precio al mercado por bolsa
CLINKER	78	45	0,31	4,1	1,28	39	50,08
YESO	10	4,5	0,03	3	0,09	5	0,47
TOBA	12	3,9	0,03	2	0,05	6	0,33
						total	50,88
						Bolsa	0,25
						TOTAL	51,13

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.29. Precios IP-30 con 10% de Adición de Humo de Sílice

PRECIOS DEL CEMENTO IP - 30 con humo de sílice con 10% de adición							
COMPONENTES	% MATERIAL	PRECIO UNIT \$/ton	PRECIO bs/kg	%DE PROD.	Precio(bs/kg) (+)Producción	Bolsa 50kg	Precio al mercado por bolsa
CLINKER	80	45	0,31	4,1	1,28	40	51,36
YESO	10	4,5	0,03	3	0,09	5	0,47
H.S.	10	0,5	0,00	1	0,0035	5	0,02
						total	51,85
						Bolsa	0,25
						TOTAL	52,10

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.30. Precios IP-30 con 20% de Adición de Humo de Sílice

PRECIOS DEL CEMENTO IP - 30 con humo de sílice con 20% de adición							
COMPONENTES	% MATERIAL	PRECIO UNIT \$/ton	PRECIO bs/kg	%DE PROD.	Precio(bs/kg) (+)Producción	Bolsa 50kg	Precio al mercado por bolsa
CLINKER	70	45	0,31	4,1	1,28	35	44,94
YESO	10	4,5	0,03	3	0,09	5	0,47
H.S.	20	0,5	0,003	1	0,0035	10	0,03
						total	45,45
						Bolsa	0,25
						TOTAL	45,70

Fuente: Elaboración Propia

IV.8.1.2. Analisis de Precios por m3 de Hormigón

Tabla 4.31. Hormigón con Cemento IP-30 12% Adición de Toba

DOSIFICACION 1:2:3			
COMPONENTE	RENDIMIENTO	PECIO UNIT. (bs)	PRECIO TOTAL(m3)
CEMENTO	325 kg/m3	1,023	332,48
GRAVA	0,7 m3/m3	65	45,5
ARENA	0,5 m3/m3	37,5	18,75
			396,73

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.32. Hormigón con Cemento IP-30 10% Adición de Humo de Sílice

DOSIFICACION 1:2:3			
COMPONENTE	RENDIMIENTO	PECIO UNIT. (bs)	PRECIO TOTAL(m3)
CEMENTO	325 kg/m3	1,042	338,65
GRAVA	0,7 m3/m3	65	45,5
ARENA	0,5 m3/m3	37,5	18,75
			402,9

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.33. Hormigón con Cemento IP-30 20% Adición de Humo de Sílice

DOSIFICACION 1:2:3			
COMPONENTE	RENDIMIENTO	PECIO UNIT. (bs)	PRECIO TOTAL(m3)
CEMENTO	325 kg/m3	0,914	297,05
GRAVA	0,7 m3/m3	65	45,5
ARENA	0,5 m3/m3	37,5	18,75
			361,3

Fuente: Elaboración Propia

Analizando el precio del cemento “EL PUENTE” el costo por bolsa en la fábrica es de 51.13Bs. Mientras tanto la elaboración de un cemento con el 10% de adición de humo de sílice tiene un costo de 52.10Bs. lo cual se incrementa el precio en un 1.86% pero es un cemento más eficiente con respecto a la resistencia, ahora un cemento elaborado con 20%

de adición de humo de sílice es de 45.70Bs la bolsa donde se reduce el 10.6% del precio con una resistencia comparativa con respecto al cemento EL PUENTE.

Un hormigón diseñado con cemento EL PUENTE tiene un costo de 396.76Bs el metro cubico, y en cuanto a un hormigón con el 10% de adición de humo de sílice se da un costo de 402.9Bs. lo cual se incrementa un 1.52% pero se obtienen resistencias muy favorables, ahora con respecto a un hormigón elaborado con un 20% de adición de humo de sílice se tiene un costo de 361.3Bs. lo cual se reduce en un 8.94% y obtenemos una resistencia similar a lo que se logra con cemento EL PUENTE.

CAPITULO V

V.1 CONCLUSIONES

Como conclusión de este trabajo de investigación, mediante un control de calidad de los cementos y Hormigones se pudo llegar a lo siguiente:

- El humo de sílice aumenta la resistencia a compresión, lo que se pudo comprobar con los ensayos realizados basados en las diferentes normas que se tiene en la elaboración de morteros y hormigones, donde llegamos a los resultados óptimos por lo cual se puede garantizar que el uso del humo de sílice es favorable en el diseño de hormigones. Según la hipótesis planteada en este trabajo de investigación fue, que con la adición del humo de sílice obtendremos hormigones de alta resistencia.
- En conclusión para respaldar la hipótesis planteada en este trabajo de investigación con respecto a los hormigones es posible describir los resultados obtenidos de acuerdo a los porcentajes de adición y a los ensayos realizados bajo un seguimiento de normas y un control de calidad, En si un hormigón elaborado con cemento que tiene un 5% de adición de H.S. en remplazo parcial, llegamos a obtener una resistencia característica de 42.14 Mpa. a los 28 días, con una adición del 10% obtuvimos una resistencia característica de 43.06 Mpa. a los 28 días, con una adición del 15% obtuvimos una resistencia característica de 37.82 Mpa. a los 28 días, con una adición de 20% obtuvimos una resistencia de 37.55 Mpa. esto demuestra que con el 10% de adición de H.S. es posible obtener una resistencia más elevada por lo que ésto favorece en el diseño de hormigones enfocados a obtener alta resistencia.
- El humo de sílice en un 10 % de adición al cemento Portland puro (patrón) en reemplazo parcial, con el porcentaje de 95% de sílice mostrado en el Anexo 1 (análisis químico), y siguiendo el procedimiento de obtención detallado en el

Capítulo IV, se obtuvieron buenos resultados de resistencia a la compresión, tanto en morteros como en hormigones, además de muchos otros beneficios, como control de expansión, mayor compactación, menor peso específico, mayor trabajabilidad, mayor docilidad.

- Se concluye que el cemento Pórtland puro (Patrón) es el más adecuado para realizar este tipo de adición, ya que este cemento es de mejor calidad, puesto que no contiene aún ningún tipo de adición, como el IP 30 que ya tiene una adición de un 12% de Toba, que es un material silíceo aluminoso.
- El humo de sílice en un 5, 10,15 y 20 % de adición en reemplazo parcial del cemento disminuye la expansión de los morteros, controlando el calor producido por la hidratación de las partículas del cemento, y resultando menores expansiones y por consiguiente se podrá vaciar volúmenes más grandes de hormigón ya que esta puzolana controla el calor de hidratación.
- La adición del humo de sílice en diferentes porcentajes que se adicionan en sustitución del cemento genera mayor tiempo de fraguado tanto inicial como final que están dentro de la normativa que prescribe la utilización de este cemento.
- El humo de sílice según la norma ASTM, se la clasifica como Clase N, por su alto contenido de sílice.
- Se concluye que uno de los aspectos que influye para que este tipo de adición reaccione convenientemente es su bajo contenido de residuo insoluble en la elaboración de cementos con humo de sílice, puesto que si es muy alto la sílice contenida en la puzolana no reaccionara ya que el residuo insoluble esta ligado directamente al contenido de sílice.
- Uno de los aspectos principales para que la sílice contenida en la puzolana reaccione es el contenido de cal libre, puesto que se sabe que la sílice contiene, poca

o ninguna reacción cementante, y es la presencia de la cal libre, hace que la sílice reaccione.

V.2. RECOMENDACIONES

Para el uso de este tipo de adición se recomienda lo siguiente:

- Para que el hormigón alcance una mayor resistencia se recomienda utilizar en reemplazo parcial del cemento Portland puro un 10% de adición de “humo de sílice”
- Para el estudio de este tipo de puzolána se recomienda usar equipo preventivo ya que este tipo de puzolana contiene gran contenido de sílice, esta sílice contenida en el humo de sílice o cualquier otro tipo de sílice son cancerígenas. Por tanto se recomienda el uso de equipo de protección personal.
- Aún no se recomienda el uso de este tipo de adición en obras importantes ya que los estudios realizados en este trabajo de investigación, fueron desarrollados a cortos plazo.
- Para una posterior utilización del humo de sílice en cualquier tipo de obra se recomienda realizar estudios a largo plazo, para determinar su comportamiento mas a profundo.
- Para garantizar el contenido de sílice, en la puzolana se recomienda que se realicen los ensayos químicos detallados en el Anexo 1.
- Para realizar este tipo de investigación referido a adiciones ya sea con humo de sílice u otros tipos de puzolanas, se debe empezar por un análisis y ensayos de morteros haciendo un seguimiento minucioso de las normas, para posteriormente elaborar hormigones, objeto de estudio.

BIBLIOGRAFÍA PRELIMINAR PARA EL DESARROLLO.

- 1.-ACI Committee 229, ACI 318R-05:** Controlled Low-Strength Materials (Reapproved 2005), American Concrete Institute, 2005.
- 2.-ACI Committee 116, ACI 211R:** “Cement and Concrete Terminology”, American Concrete Institute, 2000.
- 4.- Silica Fume user’s manual.** Tomado de la página deConstruaprende <http://foros.construaprende.com/concreto-de-alto-desempeño-hda-empleando-microsilice-vt6247.html-hilit=microsilice>
- 5.- Becker E.,** “Cemento Portland Puzolánico, Propiedades y Recomendaciones de Uso”, Loma Negra, Argentina, 2009, pag 1. Disponible en www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/PPP.pdf
- 6.-Jiménez Montoya,** op Hormigón Armado. cit., p.128
- 7.- ASOCEM 2000** La Microsílice, Adición en el Concreto En: Boletín Técnico ASOCEM No 084 <http://www.construccion.org.pe> http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento_portland
- 8.- González-isabel,** Germán, Hormigón de alta resistencia, INTEMAC, España 1993.
- 9.- NORMAS BOLIVIANAS Y CODIGOS DE TRABAJO DE LA FABRICA DE CEMENTO EL PUENTE.(SOBOCE).**
- 10.-Tecnología del Hormigón Ing. O’Reill Vitervo ASTM C 150**