ISSN 2078 – 7731

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Revista
Instituto de Ensayo de Materiales

Carrera
Ingeniería Civil - UMSA

Nº 14

- ESTUDIO DE LA FLUIDEZ, EXPANSIÓN, EXUDACIÓN Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LECHADAS PARA LA INYECCIÓN DE CABLES DE PRETENSADO, ELABORADAS CON 9 CEMENTOS DIFERENTES
- REVISIÓN DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN EL I.E.M. SOBRE ADHESIVOS CEMENTOSOS PARA BALDOSAS CERÁMICAS
- PLANTA PROCESADORA DE AGREGADOS - IEM (COTA COTA)
- EVALUACIÓN COMPARATIVA DE PROPIEDADES DE HORMIGONES ELABORADOS CON 4 FUENTES DE AGUA (POTABLE Y NO POTABLES) DISPONIBLES EN LA ZONA SUR DE LA CIUDAD DE LA PAZ
- DETERMINACIÓN COMPARATIVA:

  RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CEMENTOS DISPONIBLES EN LA CIUDAD DE LA PAZ Y PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE HORMIGONES ELABORADOS CON LOS CEMENTOS EN ESTUDIO (6 FUENTES)
- ANALISIS DE RESIDUO DE ESCORIA DE ESTAÑO PARA OBTENER CEMENTOS CON ADICION
- EVALUACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE UN SUELO

La Paz - Bolivia , diciembre de 2020

MISIÓN

Planificar, ejecutar y evaluar programas académicos y proyectos, tanto de investigación y desarrollo científico, tecnológico y humanístico, como de interacción social, en las áreas relacionadas con las estructuras, la geotecnia y los materiales de construcción.

VISIÓN

Ser el Instituto acreditado, con infraestructura, equipamiento y personal suficientes para realizar las actividades académicas de apoyo a la Carrera de Ingeniería Civil, Investigaciones pertinentes e interacción social en el campo de la construcción, acorde a las necesidades locales y nacionales.

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN GESTIÓN 2020

Nº	RESPONSABLE	NOMBRE DEL PROYECTO	ÁREA
1	Ing. Jorge Echazú Cortéz MSc. Ing. Verónica Gallardo Tapia	Evaluación de la Adherencia inicial y el tiempo de los Adhesivos cementosos (cemento cola) comercializados en el mercado local en la gestión 2019	MATERIALES
2	Ing. Jorge Echazú Cortéz MSc. Ing. Verónica Gallardo Tapia	Evaluación de la Adherencia inicial y el tiempo de los Adhesivos cementosos (cemento cola) con los aditivos DAIREN DA 1100 Y MEILOSE GMC 1165	MATERIALES
3	MSc. Ing. René Fernando Salgueiro Bustillos	Estudio Técnico - Económico - Ambiental de la estabilización química de suelos arcillosos para su empleo en proyectos viales en carreteras de la red vial fundamental de Bolivia	SUELOS Y MATERIALES
4	MSc. Ing. René Fernando Salgueiro Bustillos	Estudio de estabilización de taludes en macizos en suelo y rocosos empleando métodos de equilibrio límite y método numéricos	SUELOS Y GEOTECNIA
5	MSc. Ing. Victor Bermejo Franco	Zonificación geotécnica en el Distrito 4 de la ciudad de El Alto.	SUELOS Y GEOTECNIA
6	MSc. Ing. René Fernando Salgueiro Bustillos	Estudio de la eficiencia energética en ensayos SPT y su correlación con ensayos DPSH	SUELOS Y GEOTECNIA
7	Ing. Miguel Fernando Cerruto Anibarro	Estudio patológico de la infraestructura y de superestructura del puente vehicular ubicado sobre el río Saytu en el municipio de Mecapaca	HORMIGONES
8	MSc. Ing. Jahdiel Villafuerte Oporto	Evaluación de la seguridad sísmica de las estructuras patrimoniales: Caso de Estudio de la Catedral Mettroipolitana de La Paz. (Gestión 2020)	ESTRUCTURAS
9	MSc. Ing. Jahdiel Villafuerte Oporto	Diseño estructural con madera: Parte I - Estado del arte de las especies en Bolivia y normativas de diseño.(Gestión 2020)	ESTRUCTURAS
10	MSc. Ing. Jahdiel Villafuerte Oporto	Diseño de estructuras metálicas con aceros laminados en frío. Parte I - caracterización de los materiales. (Gestión 2020)	ESTRUCTURAS
11	MSc. Ing. Jahdiel Villafuerte Oporto	Introducción a las teorías de interacción suelo - estructura y sus diversas aplicaciones (Gestión 2020 - como inicios de investigación en futuras gestiones)	ESTRUCTURAS
12	MSc. Ing. Oscar Luis Pérez Loayza	Pavimentos Drenantes para zonas de altura	ASFALTOS
13	Ing. María del Cármen Cenzano Serrano	Análisis químico del río Choqueyapu en diferentes puntos de su curso para la elaboración de hormigones	QUÍMICA

La Paz - Bolivia, Diciembre 2020 Nº 14

Carrera de Ingeniería Civil - UMSA

Investigación y Desarrollo

Revista del Instituto de Ensayo de Materiales

U.M.S.A.

"Ing. Hugo Mansilla R."
1946 - 2020

DIRECTOR
MSc. Ing. Angel Ramos Maita
INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES

Revisión: MSc.Ing. Gricel Portillo Miranda

INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES
Av. Muños Reyes, calle 30
Campus Universitario (Cota Cota)
Teléfono: 2772111

Av. Villazón 1995
Teléfono: 2444086
E-mail: iem@umsa.bo
Web: www.iem.umsa.bo

DISEÑO E IMPRESION
Visióngraf Impresión y Diseño
Teléfonos: 715 82486 - 719 70855
E-mail: visiongrafpublicidad@gmail.com
La Paz - Bolivia

ISSN 2078 - 7731

DEPOSITO LEGAL 4-3-26-10

La Paz - Bolivia

"El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores"

La Paz, diciembre de 2020

Presentación

El instituto de ensayo de materiales "Hugo Mansilla Romero", siguiendo con su política de difusión de resultados de sus investigaciones, pone a consideración de docentes, estudiantes y demás personas interesadas en el rubro de la construcción, el 14avo número de la revista "Investigación y Desarrollo".

En esta revista se exponen siete artículos sobre trabajos de investigación que se realizaron en el I.EM. por docentes y estudiantes investigadores. Un artículo realizado en conjunto con la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro en el cual son expuestos resultados de ensayos realizados en la mencionada universidad.

Esperamos que los artículos sean de su interés, y que, sobre todo, puedan aportar en la práctica profesional de constructores y consultores dentro del campo de la Ingeniería Civil.

MSc. Ing. Angel Ramos Maita
Director
Instituto de Ensayo de Materiales.
UMSA

Contenido

ESTUDIO DE LA FLUIDEZ, EXPANSIÓN, EXUDACIÓN Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LECHADAS PARA LA INYECCIÓN DE CABLES DE PRETENSADO, ELABORADAS CON 9 CEMENTOS DIFERENTES 9

REVISIÓN DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN EL I.E.M. SOBRE ADHESIVOS CEMENTOSOS PARA BALDOSAS CERÁMICAS 19

PLANTA PROCESADORA DE AGREGADOS - IEM (COTA COTA) 31

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE PROPIEDADES DE HORMIGONES ELABORADOS CON 4 FUENTES DE AGUA (POTABLE Y NO POTABLES)DISPONIBLES EN LA ZONA SUR DE LA CIUDAD DE LA PAZ 44

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CEMENTOS DISPONIBLES EN LA CIUDAD DE LA PAZ Y PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE HORMIGONES ELABORADOS CON LOS CEMENTOS EN ESTUDIO (6 FUENTES) 54

ANALISIS DE RESIDUO DE ESCORIA DE ESTAÑO PARA OBTENER CEMENTOS CON ADICION 63

EVALUACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE UN SUELO 72

ESTUDIO DE LA FLUIDEZ, EXPANSIÓN, EXUDACIÓN Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LECHADAS PARA LA INYECCIÓN DE CABLES DE PRETENSADO, ELABORADAS CON 9 CEMENTOS DIFERENTES

Flora Marizol Quispe Apaza
florita_1524@hotmail.com

Geraldine Miriam Vera Vera
germiver15@gmail.com

Galo Zuleta Quispe
aldo.sule@gmail.com

Luis Adolfo Castro Vega
acastro@umsa.bo

Jorge Echazú Cortez
jechazuco@gmail.com

RESUMEN.-

En la construcción de vigas de hórmigon postesado, muy utilizadas en la superestructura de puentes, después de tesar los cables es necesario inyectar los mismos. La inyección es una lechada de cemento que se introduce en las vainas, y tiene como objetivo principal proteger a los cables de pretensado de la corrosión, además de adherirlos al hormigón de la viga, a fin de que actúen solidariamente. Es por ello que, para evaluar si la lechada es adecuada, es importante realizar los ensayos de fluidez, expansión, exudación y resistencia a compresión. La información que se tiene respecto a su dosificación es utilizando cementos tipo I, pero en el país existen solo cementos con adición de puzolana, por ello se realizó el estudio con los nueve diferentes cementos portland con adición (puzolana o fíller calizo) más comercializadas en toda Bolivia. Ya que cada cemento presenta diferente composición química y diferente comportamiento en los parámetros establecidos. Los resultados iniciales, mostraron que era necesario dividir los cementos estudiados en dos grupos: en el primer grupo, utilizando una dosis mínima de expansor, se lograron buenos resultados. En el segundo grupo se obtuvieron resultados satisfactorios con un superfluidificante, exceptuando el requisito de expansión.

Palabras clave: *Lechada. Pretensado. Tiempo de fluidez. Porcentaje de exudación. Porcentaje de expansión. Resistencia a compresión.*

ABSTRACT.-

In the construction of post-tensioned concrete beams, widely used in the superstructure of bridges, after tightening the cables it is necessary to inject them. The injection is a cement slurry that is introduced into the sheaths, whose main objective is to protect the prestressing cables from corrosion, in addition to bonding them to the concrete of the beam, so that they act jointly. For this reason, in order to evaluate whether the grout is adequate, it is important to carry out fluidity, expansion, exudation and resistance to compression tests. The information available regarding its dosage is using type I cements, but in the country there are only cements with the addition of pozzolana, for this reason the study was carried out with the nine different portland cements with addition (pozzolana or limestone filler) most marketed in all of Bolivia. Since each cement has a different chemical composition and different behavior in the established parameters. The initial results showed that it was necessary to divide the cements studied into two groups: in the first group, using a minimum dose of expander, good results were achieved. In the second group satisfactory results were obtained with a super-fluidizer, except for the expansion requirement.

Keywords: *Grout. Prestressed. Flow time. Percentage of exudation. Percentage of expansion. Compressive strength.*

1. INTRODUCCIÓN

La lechada de cemento es ampliamente utilizada en el caso de hórmigón postensado para proteger el acero contra la corrosión, además de adherirlo al hormigón de tal manera que ambos materiales actúen solidariamente.

Para poder garantizar el buen funcionamiento del material, es necesario controlar la fluidez y la exudación en estado líquido y en estado endurecido la resistencia a compresión y la expansión.

La mayor parte de los sistemas de postesado, recomiendan utilizar una dosificación de la lechada de cemento para el rellenado de vainas, pero éstas se basan en la utilización de cementos tipo I, lo que generaría dificultades ya que en nuestro país se utilizan cementos con adición de puzolana (IP) o fíller calizo (IF), mismos que tienen propiedades un tanto diferentes y no se ha realizado ningún estudio sistemático en nuestro medio, en cuanto a este tema. Por ejemplo, se conoce que, en los hormigones elaborados con estos tipos de cemento, el tiempo de fraguado es mayor y que la evolución de la resistencia a compresión en el tiempo, es lenta a edades tempranas. Por lo que se destaca la importancia de la presente investigación.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de las propiedades principales de las lechadas de cemento utilizadas para la inyección de cables de pretensado, elaboradas con nueve marcas de cementos diferentes con adición de puzolana o fíller calizo comercializados en el país.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Controlar la fluidez de las lechadas de cemento estudiadas en estado fresco.
- Determinar la resistencia a compresión de las lechadas en estado endurecido.
- Determinar la exudación y expansión.
- Comparar los resultados obtenidos de los cementos utilizados en el proyecto.

3. ALCANCE Y LIMITACIONES

Las distintas normativas dan valores límites para cada uno de los parámetros que debe cumplir la inyección, en la Tabla N∞1 se muestran estos valores.

Ensayo	Valor requerido		Fuente
	Valor	Unidad	
Tiempo de Fluidez	12.00	Segundos	ABC
Resistencia a 28 días	25.00	MPa	ABC
Porcentaje de Exudación	2.00	(%) máx.	ABC
Porcentaje de Expansión	2 - 6	(%)	AASHTO

Tabla 1. *Requisitos para la inyección*

Los materiales utilizados en la investigación se muestran en la Tabla N° 2.

MATERIALES UTILIZADOS	
Agua	
Cemento IP 30	VIACHA STANDARD LP 12, CAMBA, COBOCE, FANCESA, YURA, HUAYNA, EMISA,WARNES y El PUENTE
Aditivos Expansor	Intraplast Z y Euco span
Aditivos Fluidificante	Sikament N-100, Sikament 500-R, Sikament R-230
Aditivo Superfluidi-ficante	Viscocrette 5-800

Tabla 2. *Materiales utilizados*

Las pruebas preliminares y los ensayos de estudio, se realizaron en laboratorios del Instituto de Ensayo de Materiales, en base a las normas norteamericanas presentadas en la bibliografía del presente artículo.

4. MARCO TEORICO

4.1 LECHADA DE INYECCIÓN

Es el material formado por una mezcla homogénea de cemento, agua y aditivos, que se utiliza para aplicaciones ingenieriles, como ser: el llenado de vainas de cables de pretensado.

4.2 VAINAS

Las vainas son ductos donde se alojan los elementos tensores (cables de pretensado). que se tensarán una

vez haya endurecido el hormigón del elemento postensado. Gracias a sus ondulaciones o corrugado se consigue una total adherencia con el hormigón del elemento postensado, así como con la lechada que se inyectará en su interior una vez tensados los cables.

4.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia a compresión es una característica mecánica de la lechada de cemento. Se define como la capacidad para soportar una carga compresiva axial por unidad de área y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en MPa

4.4 FLUIDEZ

Según el reglamento CIRSOC 201 (2012), se define como fluidez de la lechada de inyección, al tiempo, medido en segundos, que tardan en escurrir por gravedad 1725 ± 5 ml de la mezcla por el cono de Marsh (ver Figura N∞ 1). En el momento de iniciar la inyección y durante el tiempo que dure la misma, la lechada de inyección deberá tener la fluidez que asegure el llenado completo de la vaina.

4.5 EXUDACIÓN

La exudación del hormigón fresco es el ascenso de una parte del agua de la mezcla como consecuencia de la sedimentación de los sólidos durante el tiempo que dura su fraguado, está influenciada por la cantidad de finos en los agregados y la finura del cemento. Algunos de los otros factores que afectan a la exudación son los siguientes:

- Una mala dosificación de la mezcla.
- Exceso de agua.
- Utilización de aditivos.
- La temperatura, ya que a mayor temperatura mayor es la velocidad de exudación.

4.6 EXPANSIÓN

También llamada estabilidad volumétrica. Se define como la variación de volumen que se produce en una lechada de inyección después de 3 horas transcurridas desde el inicio del ensayo. La lechada de inyección debe tener expansión respecto de su volumen inicial con el fin de garantizar el llenado completo de la vaina. (Reglamento CIRSOC 201, 2012).

4.7 TIEMPO DE FRAGUADO

Es la pérdida de plasticidad (rigidización) seguidadel endurecimiento que es la adquisición de resistencia de la pasta fraguada. El tiempo de fraguado disminuye al aumentar la temperatura (hasta los 30ºC). Por el contrario, cuando la temperatura es demasiado baja, el fraguado y endurecimiento se prolonga y a partir de los 0º C se detiene.

4.8 ADITIVO EXPANSOR

Es un producto en polvo, en algunos casos brillante, adicionadas en lechadas y morteros, que produce una expansión en el volumen durante el fraguado. (Química Suiza, 2010).

4.9 ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE

"Los superfluidificantes, también conocidos como reductores de agua de alto rango, son aditivos que, por sus características, pueden ser utilizados de dos maneras: para aumentar significativamente la trabajabilidad para un mismo contenido de agua sin producir segregación, o para disminuir significativamente el contenido de agua para la misma trabajabilidad. "El uso combinado de las dos funciones anteriores nos permite adaptarnos a cada circunstancia y conseguir una mejora de las características del hormigón y de su puesta en obra". (Blanco, 2010)

5. MARCO PRÁCTICO

5.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS

Una vez acopiados los materiales requeridos para el proyecto, se procedió a realizar la caracterización de los cementos mencionados mediante la realización de ensayos de densidad, finura Blaine, pasta normal, tiempo de fraguado y residuo insoluble.

5.2 ENSAYOS PRINCIPALES

5.2.1 ENSAYO DE FLUIDEZ

Este ensayo consiste en preparar la lechada (si lleva aditivos, estos se deben colocar de acuerdo a especificaciones del fabricante) y luego colocarla en el recipiente tipo embudo denominado cono de Marsh (ASTM C 939) (Figura N°1). Una vez colocada la

cantidad especificada de lechada en el cono (1725 ml), se procede a abrir la válvula de salida del aparato, arrancando al mismo tiempo un cronómetro para registrar el tiempo que tarda en salir toda la muestra. Ver Foto N° 1.

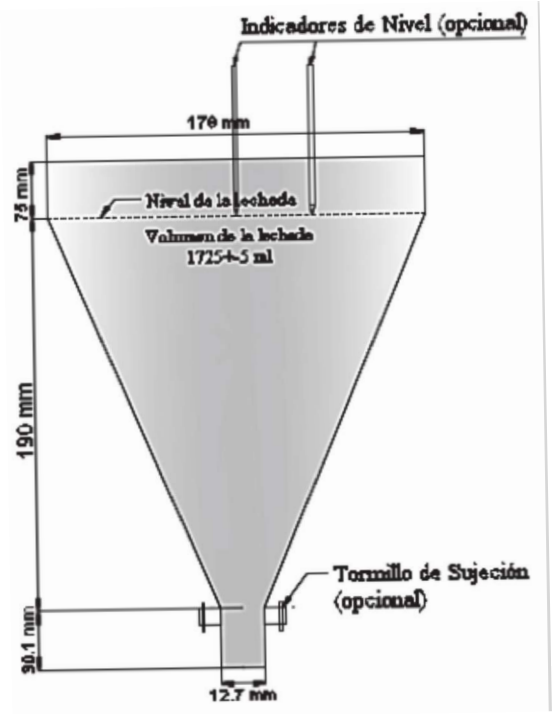


Figura 1. *Cono de Marsh*
Fuente: *Elaboración propia*

Foto 1. *Ejecución del ensayo de fluidez*
Fuente: *Elaboración propia*

El resultado del ensayo es la cantidad de segundos que transcurren entre el momento en que se abre la válvula del cono y el momento en que se interrumpe el flujo del material en la salida del mismo.

5.2.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Este ensayo importantísimo, consiste en preparar probetas cúbicas de lechada con ayuda de moldes con compartimientos de 2x2x2 pulgadas de lado (ASTM C 109) (Ver Foto N°2)

Foto 2. *Probetas para Compresión*
Fuente: *Elaboración propia*

Una vez que las probetas han fraguado, se procede al desmoldado y al curado en tanques de almacenamiento hasta la edad de ensayo (generalmente 28 días) (Ver Foto N° 3).

Foto 3. *Probetas en tanque de curado*
Fuente: *Elaboración propia*

Alcanzada la edad de ensayo, se procede a tomar las medidas de cada probeta para luego someterla al ensayo de Resistencia a compresión en una prensa con capacidad adecuada. (Ver Foto N° 4).

Foto 4. *Medición y ensayo de probetas*
Fuente: *Elaboración propia*

Se registra la carga máxima y se calcula la tensión, considerando las dimensiones medidas.

5.2.3 ENSAYO DE EXUDACIÓN Y EXPANSIÓN

Este ensayo se encuentra descrito en la Norma ASTM C 940. El objetivo es determinar el porcentaje de expansión de la lechada y la exudación producida por la decantación de los materiales pesados y el ascenso del agua a la superficie. Para ello se procede a preparar la lechada en una mezcladora y luego verter 800 ml de la misma en una probeta graduada. Se registra el volumen exacto y la hora. Luego se hace mediciones de la superficie sólida (para la expansión) y de la superficie líquida (para la exudación) cada 15 minutos durante la primera hora y luego cada hora hasta que dos lecturas consecutivas proporcionen resultados iguales. Una vez concluido el ensayo, se retira cuidadosamente el agua exudada para medir con precisión su volumen. En la Foto N°5 se observan muestras de ensayo.

Foto 5. *Muestras para expansión y exudación*
Fuente*: Elaboración propia*

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 RESULTADOS LECHADAS SIN ADITIVOS

En la Tabla N° 3 y el Gráfico N° 1, se muestran los resultados obtenidos para las lechadas elaboradas con los nueve cementos diferentes sin el uso de aditivos.

CEMENTO	a/c	Tiempo De Fluidez (seg)	RESISTENCIA MEDIA (9 cubos)		EXUDA-CIÓN
			7 días (MPa)	28 días (MPa)	Exudación máxima (%)
Cemento 1	0.512	12.19	21.96	33.56	1.67
Cemento 2	0.512	11.73	22.43	28.31	1.31
Cemento 3	0.550	12.23	30.52	37.90	2.29
Cemento 4	0.529	12.59	21.60	31.55	1.04
Cemento 5	0.607	11.90	15.75	22.15	5.83
Cemento 6	0.600	12.76	11.97	21.54	7.08
Cemento 7	0.508	11.72	15.51	23.40	1.92
Cemento 8	0.702	12.69	9.49	15.37	1.54
Cemento 9	0.644	13.20	10.85	18.86	3.75

Tabla 3. *Resultados lechadas sin aditivos*
Fuente: *Elaboración propia*

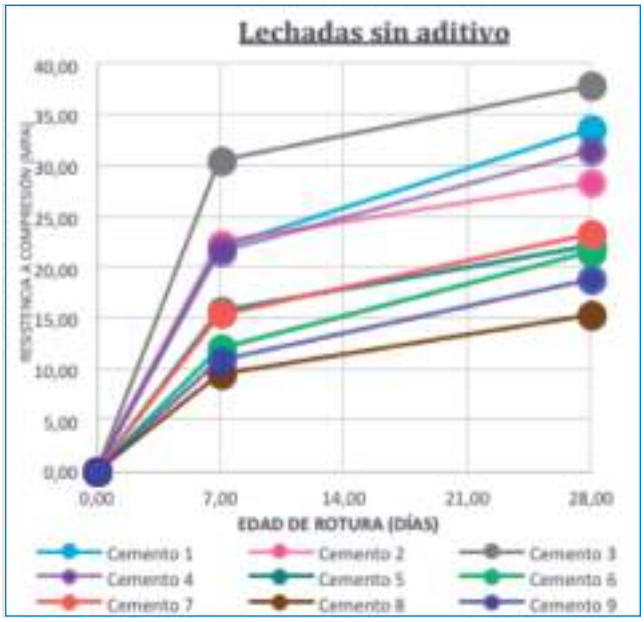


Gráfico 1. *Desarrollo de resistencias sin aditivos*
Fuente: *Elaboración propia*

De un análisis de los resultados obtenidos se tomó la determinación de dividir los cementos estudiados en dos grupos para darles un tratamiento diferenciado.

En el Gráfico N° 2, se muestra esta división.

Gráfico 2. *Selección de grupos de estudio*
Fuente: *Elaboración propia*

6.2 RESULTADOS LECHADAS GRUPO (G1)

Los cementos del primer grupo (G1), cumplen los requisitos de fluidez y resistencia a compresión sin la necesidad de utilizar aditivos fluidificantes, en tanto que los cementos del segundo grupo (G2) requieren de este aditivo, para disminuir la relación agua/cemento y así obtener la resistencia buscada.

En el grupo (G1) se incorporó aditivos expansores para cumplir con la expansión requerida, se realizaron las pruebas necesarias utilizando inicialmente el aditivo expansor "INTRAPLAST Z" con su dosis máxima, observandose que solo el cemento 3 presentaba algo de expansión, pero se reducía la resistencia a compresión comparándola con las de los que no contenían ningún tipo de aditivo. Por esta razón se utilizó el aditivo "EUCO SPAN" con dosis altas, sus resultados se muestran en la Tabla N°4 a continuación.

CEMENTO	Nº	a/c	Dosis de Eucospan (% máx)	TIEMPO DE FLUIDEZ (seg)	RESISTENCIA (MPa)		EXUDA-CIÓN	EXPAN-SIÓN
					Resist. 7 días (media de 3 cubos)	Resist. 28 días (media de 3 cubos)	Porcentajes máximos de exudación	Porcentaje máxima de expansión
Cemento 1	1	0.512	0.3	14.87	17.04	24.42	2.13	5.00
	2			13.27	14.26	19.93	2.00	4.38
	3			14.82	13.47	21.90	2.13	4.25
Cemento 2	1	0.512	0.24	13.78	16.89	22.44	1.50	5.00
	2			12.34	14.91	19.51	1.88	4.38
	3			13.97	12.86	17.69	2.10	4.00
Cemento 3	1	0.55	0.25	12.60	21.41	27.85	1.31	4.75
	2			12.10	22.77	24.52	1.25	4.75
	3			14.94	20.01	27.04	1.00	5.00
Cemento 4	1	0.529	0.3	14.60	16.30	20.03	1.25	4.75
	2			14.72	18.66	22.60	1.15	5.00
	3			14.94	15.44	22.10	1.25	4.38

Tabla 4. *Resultados Grupo G1 con aditivo expansor EUCOSPAN (dosis altas)*
Fuente: *Elaboración propia*

Como se puede observar, si bien se logró la expansión requerida para todos los casos, también se produjo una reducción de la resistencia por debajo del valor admisible para 3 de los 4 cementos estudiados.

Posteriormente se procedió a disminuir la dosis del aditivo hasta 0.2 %, a fin de conseguir las resistencias especificadas. En la Tabla N° 5 se muestran esos resultados.

CEMENTO	Nº	a/c	Dosis de Eucospan (% máx)	TIEMPO DE FLUIDEZ (seg)	RESISTENCIA (MPa)		EXUDA-CIÓN	EXPAN-SIÓN
					Resist. 7 días (media de 3 cubos)	Resist. 28 días (media de 3 cubos)	Porcentajes máximos de exudación	Porcentaje máxima de expansión
Cemento 1	1	0.512	0.2	13.50	18.39	28.55	2.05	3.75
	2			13.64	19.73	28.92	1.80	2.75
	3			13.82	17.59	26.54	1.63	2.63
Cemento 2	1	0.512	0.2	13.23	23.28	25.91	1.58	3.13
	2			12.81	16.49	20.75	1.69	3.75
	3			13.43	15.74	20.31	2.05	2.50
Cemento 3	1	0.55	0.2	13.31	23.80	28.56	1.25	3.75
	2			12.77	25.65	30.78	1.19	4.00
	3			12.80	21.51	27.04	1.25	3.75
Cemento 4	1	0.529	0.2	13.52	17.63	24.40	0.75	2.63
	2			15.79	16.56	23.27	0.75	2.50
	3			14.01	14.35	23.29	0.48	2.50

Tabla 5. *Resultados Grupo G1 con aditivo expansor EUCOSPAN (dosis mínimas)*
Fuente: *Elaboración propia*

Como puede ver se logra obtener la expansión especificada, pero solo dos cementos cumplen con el requisito de resistencia. Los siguientes gráficos muestran la variación de la resistencia y la expansión para los cementos del grupo (G1) con y sin aditivo expansor

Gráfico 3. *Resistencia lechadas con EUCOSPAN*
Fuente: *Elaboración propia*

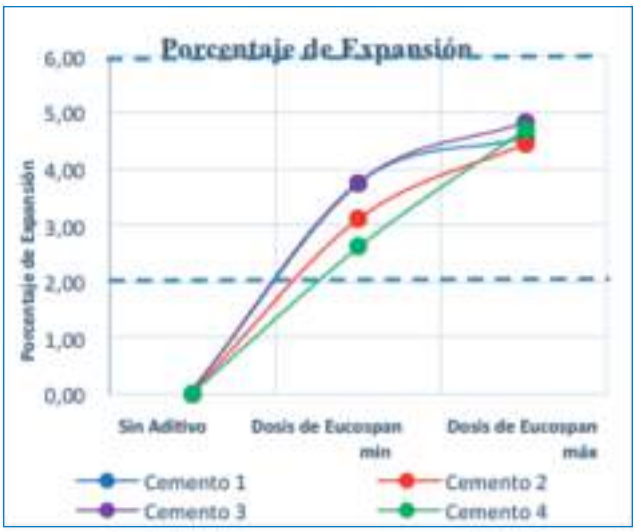


Gráfico 4. *Expansión lechadas con EUCOSPAN*
Fuente: *Elaboración propia*

Los cementos 1 y 3 tienen un comportamiento satisfactorio con las dosificaciones indicadas. Para los cementos 2 y 4, se deberá hacer más pruebas disminuyendo la dosis de Eucospan, o bien utilizando otro aditivo.

6.3 TRATAMIENTO LECHADAS GRUPO (G2)

6.3.1 ASPECTOS GENERALES

El grupo (G2) requirió un tratamiento más complejo, porque se necesitaba incrementar la resistencia y alcanzar el requisito de expansión, por tanto se tuvo que combinar aditivos fluidificantes con aditivos expansores. Inicialmente se hicieron varias pruebas con resultados insatisfactorios debido a las complejas interacciones entre los aditivos.

Para una determinada relación agua/cemento, las probetas cumplían con la resistencia a compresión especificada, pero no con la fluidez, entonces se utilizó fluidificantes, manteniendo la relación agua/cemento para cada caso. Los aditivos con los que se trabajó fueron:

- **Sikament R - 230 y Sikament 500 - R,** ambos tenían retardador de fraguado. Al momento de realizar los ensayos se observó que el tiempo de fraguado se prolongaba de 3 hasta 7 días, se verificó que dependía del porcentaje de dosis (la dosis era directamente proporcional al tiempo de fraguado). Las superficies de las probetas cúbicas era bastante porosa, motivo de las bajas resistencias obtenidas. (ver Foto N° 6).

Foto 6. *Probetas con fluidificantes SIKA*
Fuente: *Elaboración propia*

- **Sikament N-100,** a pesar de no tener retardador, el tiempo de fraguado fue de 1 día, las superficies de las probetas eran igual de porosas que en el caso anterior. (ver Foto 7).

Foto 7. *Probetas con Sikament N-100*
Fuente: *Elaboración propia*

De forma general todos estos cementos que necesitaban la incorporación de un fluidificante, presentaban un porcentaje de exudación bastante alto en relación al parámetro especificado, mientras que en estado endurecido las caras superiores de las probetas resultaron ser muy porosas. Tal situación afectó y redujo considerablemente la resistencia a compresión en todos los casos.

Como último recurso se utilizó el superfluidificante **Viscocrete 5-800** para aumentar la resistencia a compresión. Inicialmente se realizaron las

preparaciones con una dosis del 2,5%; las resistencias obtenidas sobrepasaron la resistencia especificada a los 7 días de edad, por ello que se optó descartar esta dosis y disminuirla a 1,5%, variando la relación agua /cemento.

6.3.2 RESULTADOS LECHADAS GRUPO (G2)

A continuación, se presentan los resultados más relevantes de las pruebas individuales para cada cemento con combinaciones de aditivos fluidificantes y expansores y los resultados de pruebas colectivas de los 5 cementos con el aditivo superfluidificante Viscocrete 5-800.

6.3.2.1 COMBINACIONES FLUIDIFICANTE-EXPANSOR PARA LOS CEMENTOS DE MANERA INDIVIDUAL

La Tabla N° 6 presenta el resumen de los resultados obtenidos para las propiedades principales (resistencia a compresión y expansión) en el análisis de las combinaciones estudiadas para los cementos de manera individual.

Cemento	Comb.1		Comb.2		Comb.3		Comb.4		Comb.5	
	Resist. (28d)	Expan.	Resist. (28d)	Expan.	Resist. (28d)	Expan.	Resist. (28d)	Expan.	Resist. (28d)	Expan.
5	---	---	---	---	---	---	---	---	✓	X
6	---	---	X	X	✓	X	✓	X	✓	X
7	X	X	---	---	---	---	---	---	---	---
8	---	---	---	---	✓	X	---	---	✓	X
9	---	---	---	---	---	---	✓	X	✓	X

Tabla 6. *Resultados de resistencia a compresión y expansión para las combinaciones estudiadas en los cementos de manera individual*

Donde:

Comb. 1: Sikament 500-R - Intraplast Z
Comb. 2: Sikament R-230 - Intraplast Z
Comb. 3: Sikament N-100 - Intraplast Z
Comb. 4: Sikament N-100 - Euco span
Comb. 5: Viscocrete 5-800 - Euco span

6.3.2.6 CEMENTOS CON SUPERFLUIDIFICANTE VISCOCRETE 5-800, SIN EXPANSOR

En vista de que no fue posible conseguir el cumplimiento de todos los requisitos al mismo tiempo para los cementos del Grupo (G2), se decidió prescindir del requisito de expansión, y dar a todos un tratamiento común con el aditivo superfluidificante viscocrete 5-800. Como se indicó anteriormente, se desecharon los resultados con 2.5 % de aditivo por dar resistencias muy por encima de los requerido y estudiar dos dosificaciones con diferentes relaciones agua/cemento y una dosis mínima de aditivo de 1.5 %. Las Tablas N° 7 y 8 muestran estos resultados.

CEMENTO	Nº	a/c	TIEMPO DE FLUIDEZ (seg)	Resistencia a 7 días (media de 3 cubos) (MPa)	EXUDACIÓN Porcentajes máximos de Exudación
Cemento 5	1	0.53	11.98	35.31	1.25
	2		11.63	38.48	
	3		11.45	33.12	
Cemento 6	1	0.55	13.10	30.96	1.25
	2		12.56	25.54	
	3		11.61	28.70	
Cemento 7	1	0.53	12.38	39.42	1.88
	2		14.00	27.87	
	3		13.68	33.49	
Cemento 8	1	0.55	12.78	42.65	1.88
	2		12.48	33.76	
	3		13.18	26.94	
Cemento 9	1	0.53	12.78	38.64	1.25
	2		13.04	35.27	
	3		12.20	41.84	

Tabla 7. *Resultados con Viscocrete al 1.5 % y relación a/c mínima*

CEMENTO	Nº	a/c	TIEMPO DE FLUIDEZ (seg)	Resistencia a 7 días (media de 3 cubos) (MPa)	EXUDACIÓN Porcentajes máximos de Exudación
Cemento 5	1	0.55	11.08	34.00	1.25
	2		11.40	30.59	
	3		11.80	28.33	
Cemento 6	1	0.57	13.51	25.19	1.25
	2		13.09	25.04	
	3		11.58	29.18	
Cemento 7	1	0.55	12.00	28.69	1.88
	2		11.43	28.91	
	3		12.56	28.94	
Cemento 8	1	0.57	12.73	33.98	1.88
	2		12.66	32.80	
	3		12.64	30.62	
Cemento 9	1	0.55	11.71	42.41	1.25
	2		12.03	36.55	
	3		11.78	37.63	

Tabla 8. *Resultados con Viscocrete al 1.5 % y relación a/c máxima*

Como se puede observar claramente, con estas dosificaciones se cumplen todos los requisitos indicados en la Tabla N° 1, excepto el de expansión, siendo posible disminuir un poco más la dosis de aditivo para abaratar costos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Los cementos del grupo G1, (Cementos 1 y 3) cumplen los requisitos establecidos con dosis mínimas del aditivo expansor Euco span. En el caso de los cementos 2 y 4, se debe reducir un poco más la dosis para alcanzar la resistencia establecida.

- En el caso de los cementos del grupo G2, no es posible obtener el cumplimiento de todos los requisitos bajo las condiciones y combinaciones estudiadas y por tanto no deberían ser usados en caso de que el requisito de expansión sea imprescindible. Exceptuando este requisito, se cumplen todos los demás, con dosis mínimas del aditivo superfluidificante Viscocrete 5-800.

7.2 RECOMENDACIONES

- En vista de que el comportamiento de cada cemento es muy diferente en combinación con los aditivos existentes en nuestro mercado, o sin la adición de estos, es necesario y recomendable realizar dosificaciones de la lechada de cemento para ser utilizada en la inyección de los cables de postesado con los materiales que se usaran en obra".

- Se recomienda también profundizar la presente investigación con otros aditivos que puedan estar disponibles en nuestro mercado.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] **ASTM C-188:** Método de Ensayo Estándar para la Densidad del Cemento Hidráulico.

[2] **ASTM C-204:** Método de prueba estándar para la finura del cemento hidráulico mediante el aparato de permeabilidad al aire.

[3] **ASTM C-187:** Método de prueba estándar para la cantidad de agua requerida para la consistencia normal de la pasta de cemento hidráulica.

[4] **ASTM C-191:** Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico con la aguja de Vicat.

[5] **ASTM C-109:** Método de Ensayo Estándar para la Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Muestras Cúbicas de 2 pulgadas o [50 mm] de lado).

[6] **ASTM - C939:** Método de Ensayo Estándar para el Flujo de Lechada para Hormigón con Agregado con Pre-colocado (método del cono de flujo).

[7] **ASTM - C940:** Método de Prueba Estándar para la Expansión y Exudación de Lechadas recién Mezcladas para Concreto con Agregado Pre-colocado en el laboratorio.

[8] **AASHTO. (2002):** Standard Specifications for Highway Bridges. 17th edición.

[9] **Barreda, E. J.** (9 de Abril de 2013). SlideShare. Obtenido de SlideShare: https://es.slideshare.net/JONAER/estructuras-postensadas-y-pretensadas

[10] **Echazú, J.** (2014). Materiales de Construcción y Laboratorio (Texto Base). La Paz.

[11] **García Fernandez,** C., & Mesa Sánchez, H. (2001). Metodología de la investigación y diseño estadístico de experimentos. La Habana.

[12] **Ingeniero de Caminos:** (25 de Mayo de 2016). Ingeniero de Caminos. Obtenido de Miguel Angel Vicente Pérez: https://ingeniero-de-caminos.com/exudacion-del-hormigon/

[13] **Las Cosas Claras para La Paz: (2018):** Puente Gemelo, al servicio de los paceños. Las Cosas Claras, 4-6.

[14] **Mollo, J.** (2005). Estudio de la retracción en hormigones fabricados con cementos existentes en La Paz y su modelación. La Paz.

[15] Montoya, J. (2011). Hormigón Armado. Barcelona: Gustavo Gili.

[16] Nawy, D. E. (1995). Prestressed Concrete. New Yersey: Prentice Hall College Div.

[17] Pardo Merino, A., & Ruiz Díaz, M. (2005). Análisis de Datos con SPS 13- Segunda parte. McGraw-Hill.

[18] Quimica Suiza. (2010). Euco span.

[19] Reglamento CIRSOC 201. (2012). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.

[20] Silva, O. J. (2018). Argos 360 en concreto. Obtenido de Argos 360 en concreto: https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/inyeccion-en-los-cables-de-puentes-preesforzados

[21] Silva, O. J. (2018). Propiedades físicas del cemento.

REVISIÓN DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN EL I.E.M. SOBRE ADHESIVOS CEMENTOSOS PARA BALDOSAS CERÁMICAS

Jorge Echazú Cortez
jechazuco@gmail.com

Verónica Gallardo Tapia
jechazuco@gmail.com

RESUMEN

En este artículo de revisión se recogen resultados de todas las investigaciones realizadas en el Instituto de Ensayo de Materiales desde el año 2012 hasta el año 2020, en relación a adhesivos cementosos para baldosas cerámicas (cementos cola) y se comparan las dosificaciones obtenidas en estas investigaciones con el fin de recomendar proporciones optimizadas que cumplan requisitos de la norma NB 127002 y que sean lo más económicas posible. Se obtuvieron dosificaciones optimizadas para uso en interiores y para situaciones en que no haya exposición al congelamiento.

Palabras Clave: *Adhesivo cementoso, cemento cola, adherencia inicial, tiempo abierto, adherencia después de inmersión, adherencia después de envejecimiento por calor, adherencia después de ciclos de congelamiento*.

ABSTRACT

This paper gathers the results of all researchs made in Instituto de Ensayo de Materiales from 2012 to 2020, related to cement based adhesives for ceramic tiles. The dosages obtained in these investigations are compared in order to recommend optimized proportions that meet the requirements of NB 127002 standard and that are as economical as possible. Optimized dossages were obtained for interior use and for enviroments were freezzing resistance is not requiered.

Keywords: *Cementitious tile adhesive, Initial tensile adhesion strength, Open time, Tensile adhesion strength after water immersion, Tensile adhesion strength after heat aging, Tensile adhesion strength after freeze-thaw cycles.*

1. INTRODUCCIÓN

En el Instituto de Ensayo de Materiales, desde el año 2012 se han ejecutado varias investigaciones en relación a un material de construcción utilizado a diario en obras de edificación; nos referimos al cemento cola, o más propiamente, adhesivo cementoso para baldosas cerámicas.

La norma boliviana establece que los adhesivos para baldosas cerámicas deben tener una adherencia inicial de por lo menos 0,5 MPa a 28 días; un tiempo abierto a 20 minutos igual o mayor a 0,5 MPa; y los tres ensayos de durabilidad (adherencia después de inmersión en agua, después de envejecimiento por calor y después de ciclos de hielo - deshielo) también deben cumplir con este valor mínimo.

Este trabajo pretende reunir los resultados obtenidos hasta la fecha para compararlos, evaluarlos y, finalmente, establecer si podemos indicar dosificaciones optimizadas para las diferentes aplicaciones en que se utilizan estos materiales.

2. DESARROLLO

En el primer trabajo de investigación [1] se propuso una dosificación elaborada en laboratorio (muestra patrón), misma que cumplió con el requisito de la norma NB 127002 para Adherencia inicial, no así para el Tiempo abierto. Esta mezcla contenía como aditivos, polvo redispersable DAIREN DA 1100 y

metilhidroxietilcelulosa TYLOSE MH 100001 P6, ambos de procedencia alemana. En la Tabla N° 1 se muestran las proporciones de la dosificación y en el Gráfico N° 1, se muestran los resultados obtenidos.

DOSIFICACIÓN PARA LA MUESTRA PATRÓN	
Material	**Proporción (%)**
Cemento Viacha IP 30	40
Arena Silícea	55
Polvo Calizo	5
Total	**100**
Polvo Redispersable (DA 1100)	1
Metilcelulosa (100001)	0.5

Tabla 1. *Proporciones de [1]*

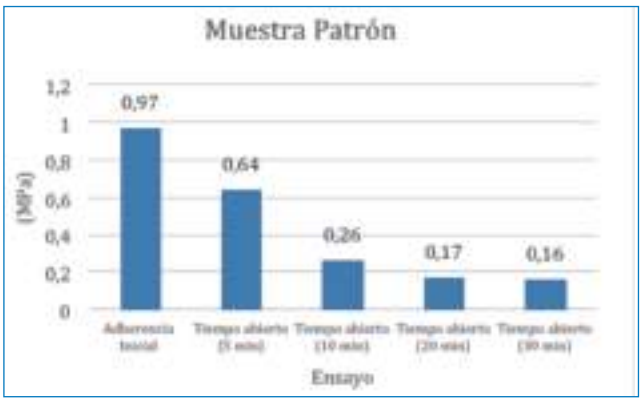


Gráfico 1. *Resultados de [1]*

Seguidamente se realizó un proyecto que abarcó los ensayos de durabilidad [2]. Se analizó la dosificación patrón propuesta en la anterior investigación en lo referente a los requisitos de Adherencia después de inmersión en agua, Adherencia después de envejecimiento por calor y Adherencia después de ciclos de hielo - deshielo; concluyendo que el adhesivo no cumple con ninguno de ellos. En el Gráfico N° 2 se muestran los resultados.

Gráfico 2. *Resultados de [2]*

La tercera investigación [3] se encargó de estudiar 7 diferentes dosificaciones. En esta ocasión se utilizaron los aditivos DAIREN DA 110 y TYLOSE MHS 150003 P4. Se hicieron variaciones en las cantidades de polvo redispersable y metilhidroxietilcelulosa, a través de un modelo multitabla tipo hexagonal. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios para todas las dosificaciones en los casos de Adherencia inicial y Tiempo abierto, obteniéndose valores muy superiores al mínimo requerido por la norma. En la Tabla N° 2, se muestran las proporciones; en el Gráfico N° 3, el modelo multitabla; en el Gráfico N° 4, los resultados para Adherencia inicial; y en los Gráficos N° 5, 6, 7 y 8, los resultados para Tiempo abierto a 5, 10, 20 y 30 minutos respectivamente.

DOSIFICACIONES	
Material	**Proporción (%)**
Cemento Fancesa IP-40	35
Arena Silícea	57.6 - 58.6
Polvo Calizo	5
Polvo Redispersable (DA 1100) (Variable)	1 - 1.75
Metilcelulosa (150003) (Variable)	0.5 - 0.75
Total	**100**

Tabla 2. *Proporciones de [3]*

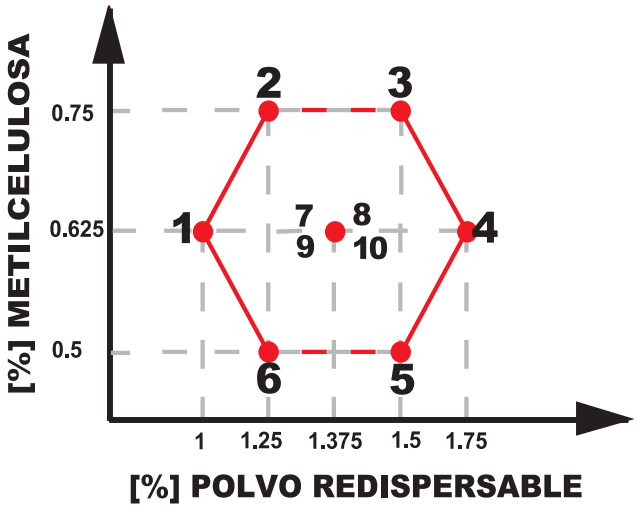


Gráfico 3. *Modelo multitabla de [3]*

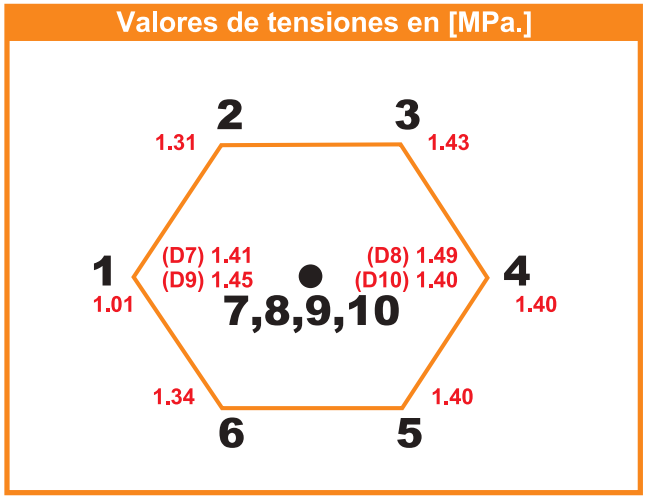


Gráfico 4. *Resultados para Adherencia inicial de [3]*

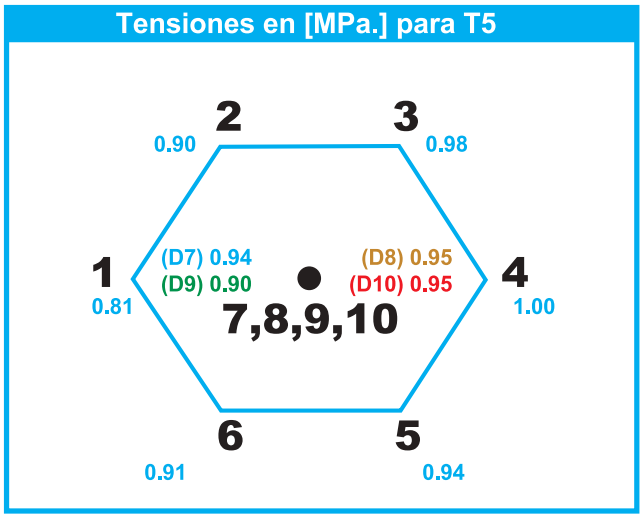


Gráfico 5. *Resultados para Tiempo abierto a 5 minutos de [3]*

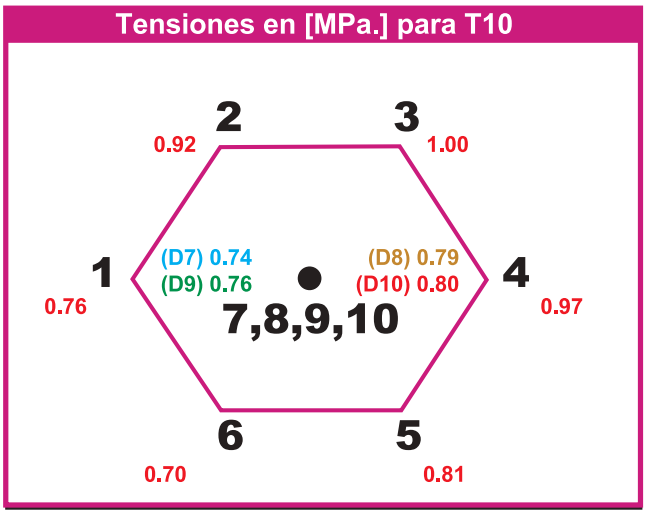


Gráfico 6. *Resultados para Tiempo abierto a 10 minutos de [3]*

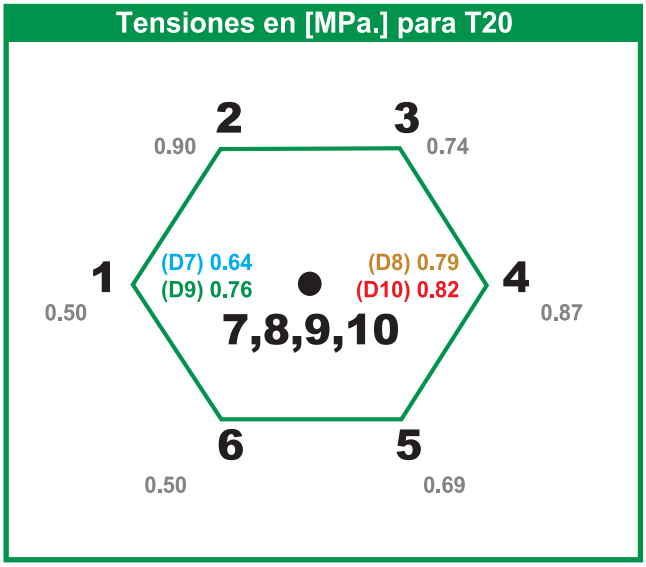


Gráfico 7. *Resultados para Tiempo abierto a 20 minutos de [3]*

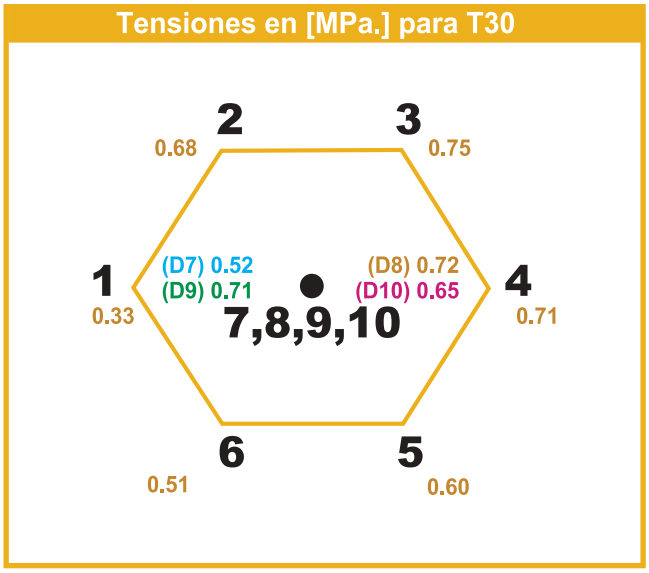


Gráfico 8. *Resultados para Tiempo abierto a 30 minutos de [3]*

Para analizar la durabilidad se realizaron ensayos en 4 de las 7 dosificaciones, verificando que las 4 cumplían los requisitos de Adherencia después de inmersión en agua y Adherencia después de ciclos de hielo - deshielo con valores muy superiores al especificado por norma; mientras que ninguna cumplió el mínimo requerido para Adherencia después de envejecimiento por calor. Los Gráficos N° 9, 10 y 11 muestran estos resultados.

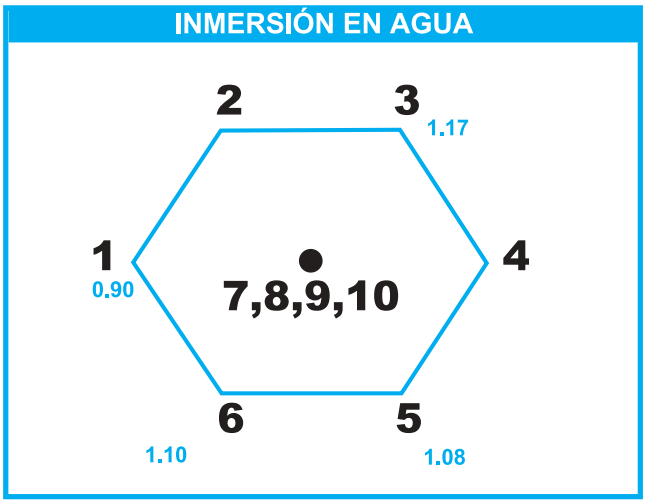


Gráfico 9. *Resultados para Adherencia después de inmersión en agua de [3]*

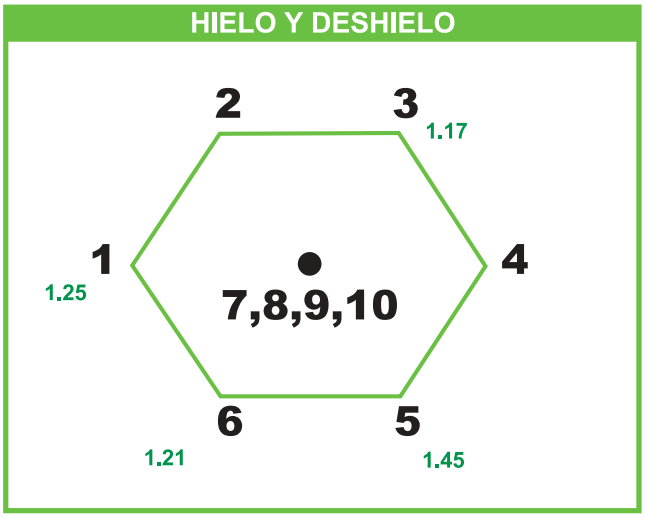


Gráfico 10. *Resultados para Adherencia después de hielo y deshielo de [3]*

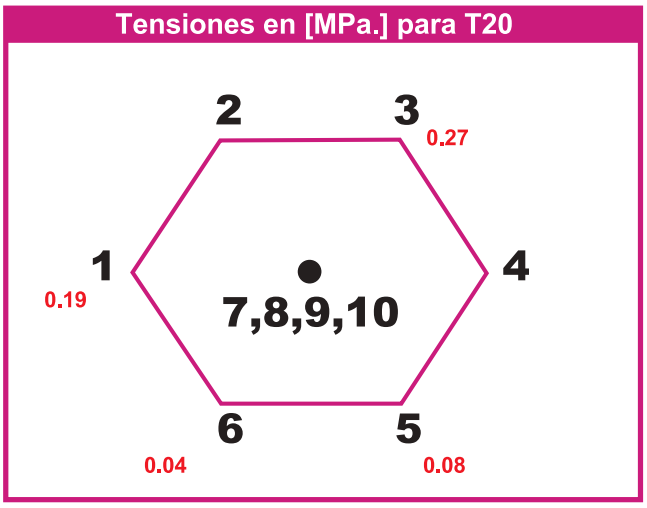


Gráfico 11. *Resultados para Adherencia después de envejecimiento con calor de [3]*

Una cuarta investigación [4], en vista de los resultados obtenidos en la anterior, se enfocó en el tema de la Adherencia después de envejecimiento por calor. En este sentido, para mejorar la adherencia de las mezclas, se incorporó bentonita además de polvo redispersable y metilhidroxietilcelulosa. El modelo usado también fue multitabla hexagonal. La Tabla N° 3 muestra las proporciones utilizadas en esta ocasión y el Gráfico N° 12 muestra las variaciones del modelo multitabla hexagonal.

DOSIFICACIONES	
Material	**Proporción (%)**
Cemento Fancesa IP 30	35
Arena Silícea	58
Polvo Calizo	7
Total	**100**
Polvo Redispersable (DA 1100)	1 - 5
Metilcelulosa (150003) + Bentonita	0.5 - 1

Tabla 3. *Proporciones usadas en [4]*

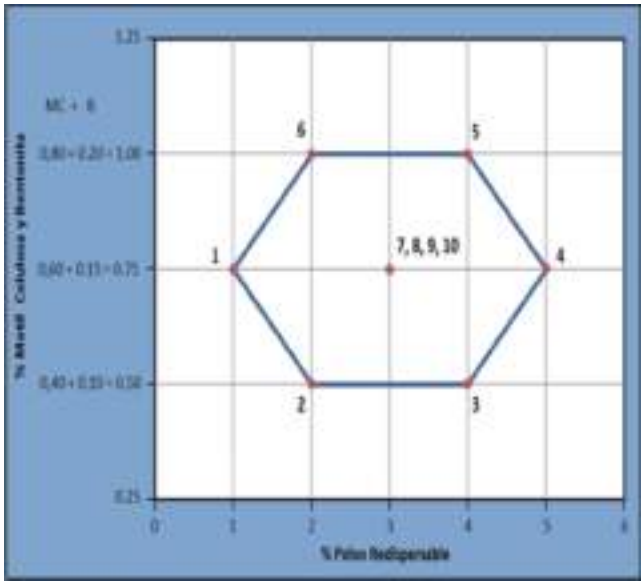


Gráfico 12. *Modelo multitabla en [4]*

Los resultados mostraron que 4 de las 7 dosificaciones superaron el requisito de la norma para este parámetro.

El Gráfico N° 13 muestra estos resultados.

Gráfico 13. *Resultados de Adherencia después de Envejecimiento por calor en [4]*

En función de las curvas de comportamiento obtenidas del diseño del experimento, se establecieron 3 dosificaciones para complementar el estudio con los ensayos de Adherencia inicial, Tiempo abierto, Adherencia después de inmersión en agua y Adherencia después de ciclos de hielo - deshielo. La Tabla N° 4 muestra las 3 dosificaciones (A, B y C); el Gráfico N° 14, las ubicaciones de estas dosificaciones en el modelo multitabla.

PROPORCIONES COMUNES			
Material	**Proporción (%)**		
Cemento Fancesa IP 30	35		
Arena Silícea	58		
Polvo Calizo	7		
Total	**100**		
Dosificaciones	**A**	**B**	**C**
Polvo Redispersable (DA 1100)	2.5	3	2
Metilcelulosa (150003)	0.4	0.4	0.6
+ Bentonita	0.1	0.1	0.15

Tabla 4. *Proporciones comunes y Dosificaciones A, B y C en [4]*

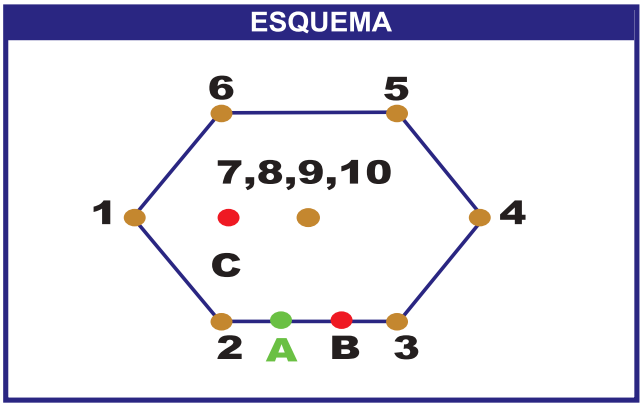


Gráfico 14. *Ubicaciones de las Dosificaciones en el modelo multitabla en [4]*

Todos los resultados obtenidos para Adherencia inicial cumplieron con el requisito mínimo de la norma, tal como se muestran en el Gráfico N° 15.

Gráfico 15. *Resultados de Adherencia inicial para A, B y C en [4]*

En el caso del ensayo de Tiempo abierto, las tres dosificaciones estudiadas cumplieron con el valor requerido por la norma para 20 minutos. Asimismo, se realizaron ensayos para 5, 10 y 30 minutos, mismos que se muestran en los Gráfico N°16, N° 17 y N°19 respectivamente. Como se puede verificar, todos los valores fueron superiores a 0,5 MPa, excepto la dosificación C a 30 minutos.

Gráfico 16. *Resultados de Tiempo abierto a 5 minutos para A, B y C en [4]*

Gráfico 17. *Resultados de Tiempo abierto a 10 minutos para A, B y C en [4]*

Gráfico 18. *Resultados de Tiempo abierto a 20 minutos para A, B y C en [4]*

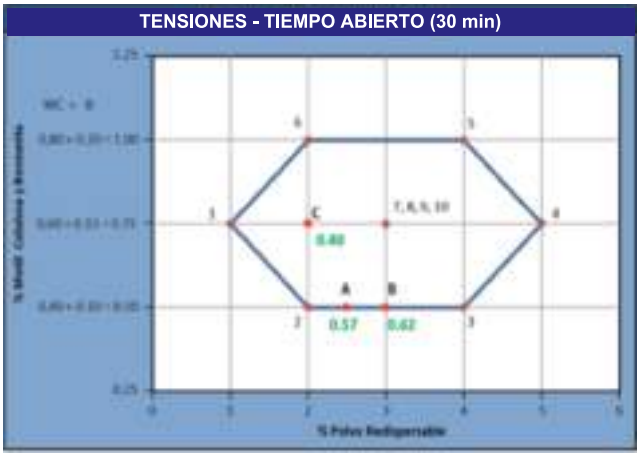


Gráfico 19. *Resultados de Tiempo abierto a 30 minutos para A, B y C en [4]*

Gráfico 20. *Resultados de Adherencia después de Inmersión en agua para A, B y C en [4]*

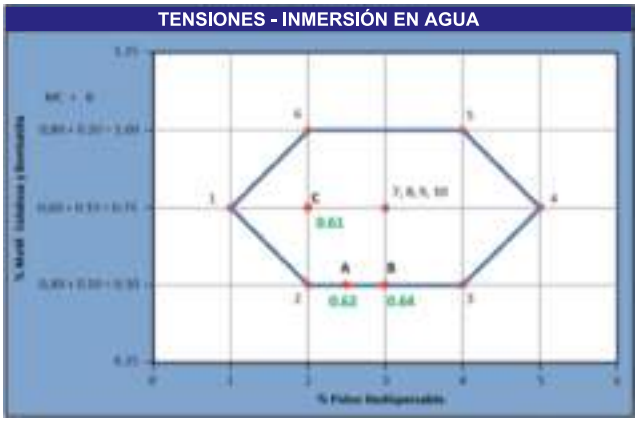


Gráfico 21. *Resultados de Adherencia después de Ciclos de hielo y deshielo para A, B y C en [4]*

Paralelamente al anterior, se realizaron un quinto y sexto trabajos [5] y [6], buscando dosificaciones más económicas que las obtenidas en la tercera investigación, que cumplan con el requisito de Adherencia después de inmersión en agua y el de Adherencia después de ciclos de hielo - deshielo, respectivamente. En estos dos trabajos se evaluaron 4 dosificaciones, mismas que no contenían bentonita, pues en pruebas preliminares se evidenció que ésta no tenía buen comportamiento cuando se presentan condiciones de humedad. La Tabla N° 5 muestra estas dosificaciones.

DOSIFICACIONES		
Material	**Proporción (%)**	
Cemento Fancesa IP 30	32	
Arena Silícea	60	
Polvo Calizo	8	
Total	**100**	
Dosificación 1	Polvo redispersable (DA 3510)	0.8
	Metilcelulosa (150003)	0.6
Dosificación 2	Polvo redispersable (DA 3510)	1
	Metilcelulosa (150003)	0.6
Dosificación 3	Polvo redispersable (DA 3510)	1.2
	Metilcelulosa (150003)	0.4
Dosificación 4	Polvo redispersable (DA 3510)	1.2
	Metilcelulosa (150003)	0.6

Tabla 5. *Dosificaciones en [5] y [6]*

Las 4 dosificaciones estudiadas para la Adherencia después de inmersión en agua cumplieron con el requisito de la norma; no así, con el requisito para la Adherencia después de ciclos de hielo - deshielo. Los Gráficos N° 22 y 23 presentan estos resultados. Se hace notar que en los ensayos de Adherencia después de ciclos de hielo y deshielo [6], no se obtuvieron resultados confiables para la dosificación número 4, por lo que estos fueron eliminados.

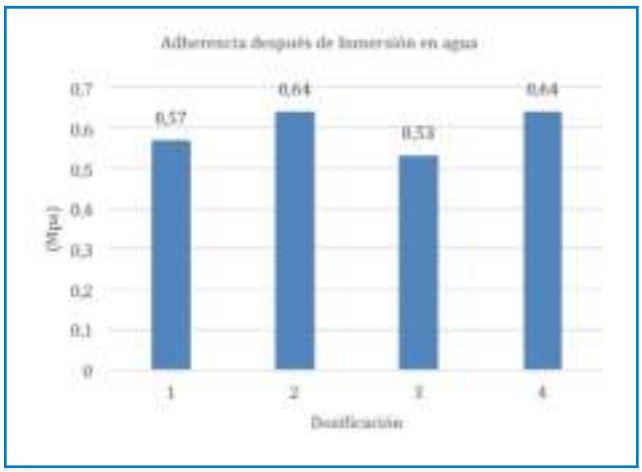


Gráfico 22. *Resultados obtenidos en [5]*

Gráfico 23. *Resultados obtenidos en [6]*

Además de lo mencionado, en la Investigación [6], se realizaron ensayos para comparar los polvos redispersables DA 1100 y DA 3510, este último es recomendado para uso en condiciones de humedad. Si bien no se desarrolló un trabajo riguroso con ayuda de un modelo estadístico, presentamos las condiciones de los ensayos y los resultados obtenidos para Adherencia inicial en la Tabla N° 6, por considerarlos de interés.

COMPARACIÓN POLVOS REDISPERSABLES		
Material	**Proporción (%)**	
Cemento Fancesa IP 30	32	
Arena Silícea	60	
Polvo Calizo	8	
Total	**100**	
Metilcelulosa (150003)	0.6	
	Proporción (%)	Adherencia Inicial (MPa)
Dosificación A (DA 1100)	1.2	0.385
Dosificación B (DA 1100)	2	0.424
Dosificación C (DA 3510)	1.2	0.083
Dosificación D (DA 3510)	2	0.286

Tabla 6. *Comparación de polvos Redispersables en [6]*

Posteriormente, se ejecutaron dos investigaciones [7] y [8], buscando dosificaciones óptimas que cumplan los requisitos de Adherencia inicial y Tiempo abierto, en condiciones donde no se presentará exposición a humedad severa ni riesgo de congelamiento. En esta oportunidad, se decidió utilizar bentonita (OPTIBEN-987 filosilicato de aluminio absorbente) en las dosificaciones con el fin de disminuir las cantidades de los otros aditivos, reduciendo así los costos. La bentonita fue combinada con la metilcelulosa en un modelo multitabla hexagonal como en una investigación anterior. La diferencia entre estas dos investigaciones fue la procedencia del cemento: Viacha IP-30 y Fancesa IP-30. La Tabla N° 7, muestra las proporciones de los materiales utilizados en [7].

DOSIFICACIONES	
Material	**Proporción (%)**
Cemento Viacha IP 30	35
Arena Silícea	58
Polvo Calizo	7
Total	**100**
Polvo Redispersable (DA 1100)	1.5
Metilcelulosa (150003) + Bentonita (Variable)	0.3 - 0.7 (Metilcelulosa) 0.05 - 0.15 (Bentonita)

Tabla 7. *Proporciones utilizadas en [7]*

El Gráfico N° 24 presenta los resultados para Adherencia inicial y los Gráficos N° 25, 26, 27 y 28 muestran los resultados para Tiempo abierto obtenidos en [7]. Como se puede observar, en ambos casos se obtuvieron resultados satisfactorios, inclusive para las dosificaciones más económicas.

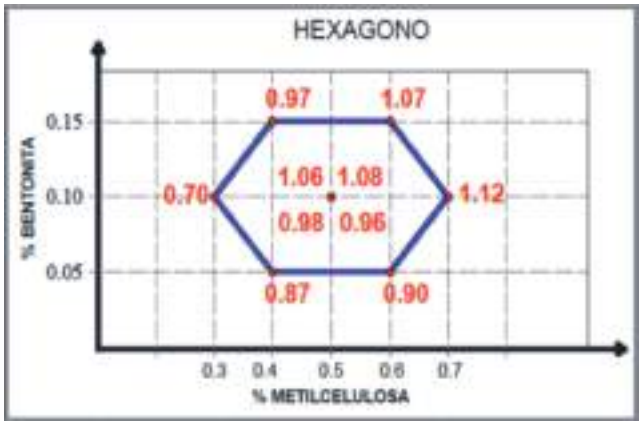


Gráfico 24. *Resultados para Adherencia Inicial en [7]*

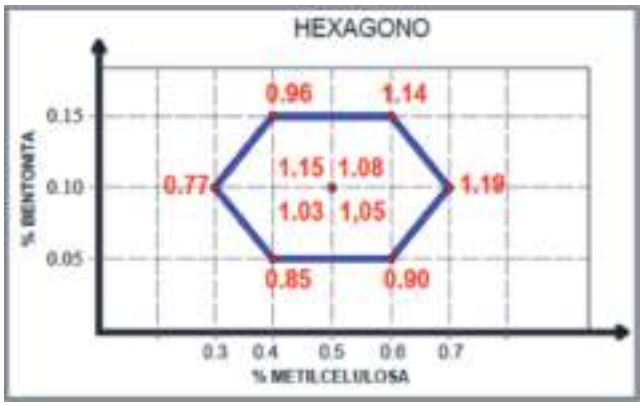


Gráfico 25. *Resultados para Tiempo abierto a 5 minutos en [7]*

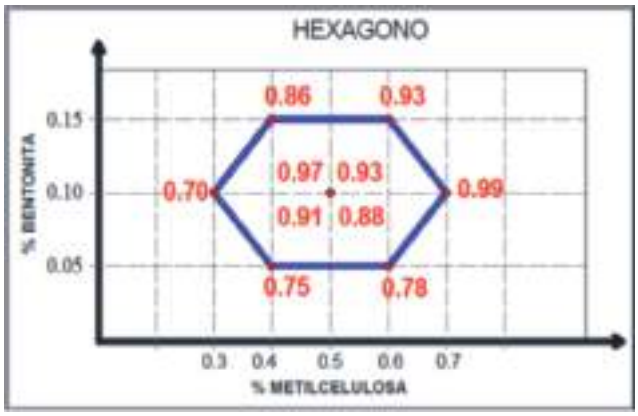


Gráfico 26. *Resultados para Tiempo abierto a 10 minutos en [7]*

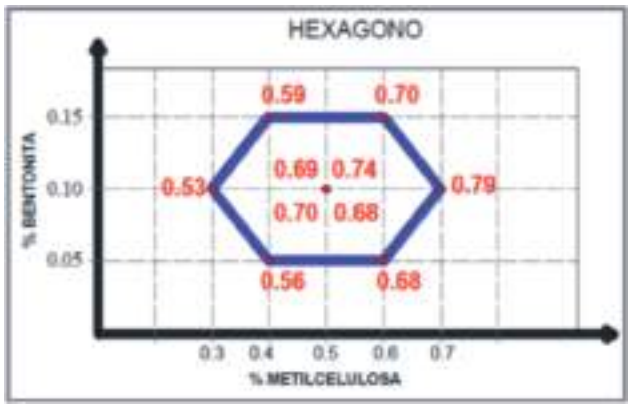


Gráfico 27. *Resultados para Tiempo abierto a 20 minutos en [7]*

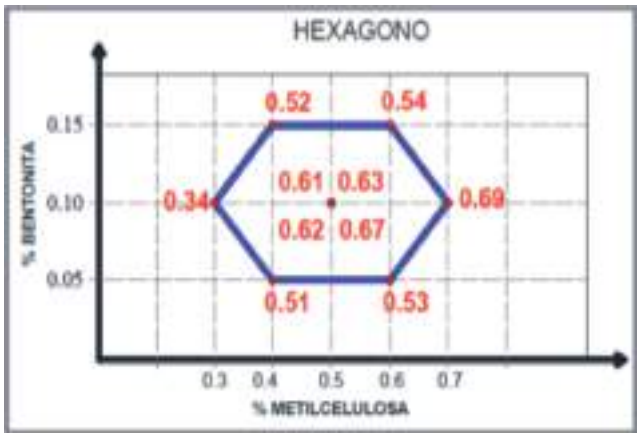


Gráfico 28. *Resultados para Tiempo abierto a 30 minutos en [7]*

La Tabla N°8, presenta las condiciones utilizadas en la investigación [8], el Gráfico N° 29 los resultados para Adherencia inicial y los Gráficos N° 30, 31, 32 y 33 los resultados para Tiempo abierto a 5, 10, 20 y 30 minutos.

DOSIFICACIONES	
Material	**Proporción (%)**
Cemento Fancesa IP 30	32
Arena Silícea	60
Polvo Calizo	8
Total	**100**
Polvo Redispersable (DA 1100)	1
Metilcelulosa (150003) + Bentonita (Variable)	0.3 - 0.7 (Metilcelulosa) 0.05 - 0.15 (Bentonita)

Tabla 8. *Proporciones utilizadas en [8]*

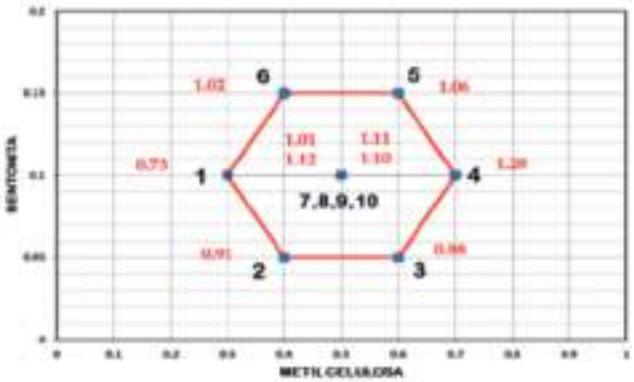


Gráfico 29. *Resultados para Adherencia Inicial en [8]*

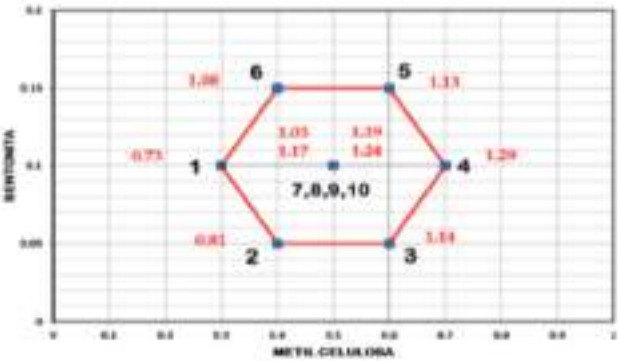


Gráfico 30. *Resultados para Tiempo abierto a 5 minutos en [8]*

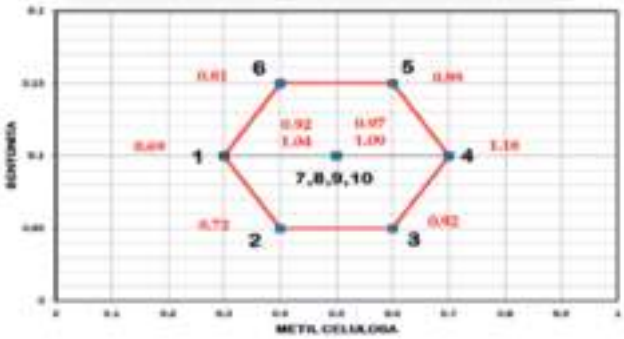


Gráfico 31. *Resultados para Tiempo abierto a 10 minutos en [8]*

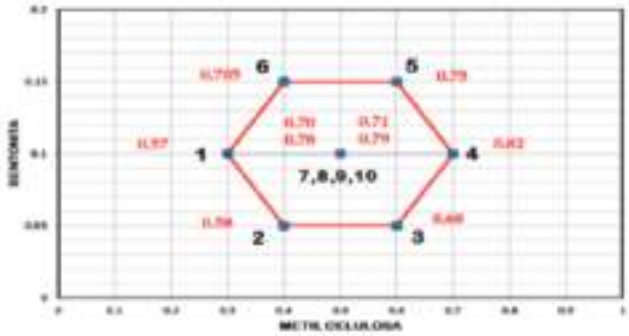


Gráfico 32. *Resultados para Tiempo abierto a 20 minutos en [8]*

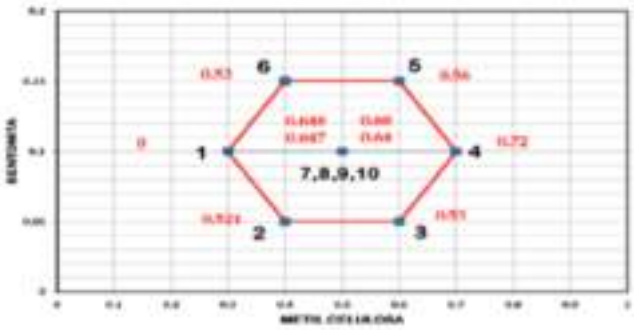


Gráfico 33. *Resultados para Tiempo abierto a 30 minutos en [8*

También en esta ocasión, se obtuvieron resultados satisfactorios tanto para la Adherencia inicial como para el Tiempo abierto, consiguiendo de esta manera, dosificaciones más económicas que las obtenidas en anteriores trabajos para estos dos requerimientos.

Finalmente, en ocasión de haberse introducido en el mercado nacional, metilhidroxietilcelulosa de procedencia china, con menor costo que la de procedencia alemana, es que se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de este nuevo aditivo [9]. En esta oportunidad, se utilizó cemento Ecebol de alta resistencia (IP 40). En las pruebas preliminares se alcanzó un valor de Adherencia inicial de 0.58 MPa así como un Tiempo abierto también de 0.58 MPa para 20 minutos con 35 % de cemento, 65 % de arena silícea, 1 % de polvo redispersable y 0.25 % de metilcelulosa (estos últimos añadidos al 100 % constituido por cemento y arena). En base a esta experiencia, se determinó plantear la investigación con las proporciones mostradas en la Tabla N° 9 y se realizaron ensayos de Adherencia inicial, Adherencia después de inmersión en agua, Adherencia después de envejecimiento por calor y Adherencia después de ciclos de hielo - deshielo. Los resultados se presentan en los Gráficos N° 34, 35, 36 y 37.

Material (%)	DOSIFICACION					
	A	B	C	D	E	F
Cemento Ecebol IP 40	30	35	30	35	30	35
Arena Silícea	70	65	70	65	70	65
Polvo Redispersable (DA 1100) (*)	0.7	0.7	1	1	1	1
Metilcelulosa (Meilose GMC 1165) (China) (*)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.2	0.2
(*) se añadieron al 100 % constituido por cemento y aena						

Tabla 9. *Proporciones utilizadas en [9]*

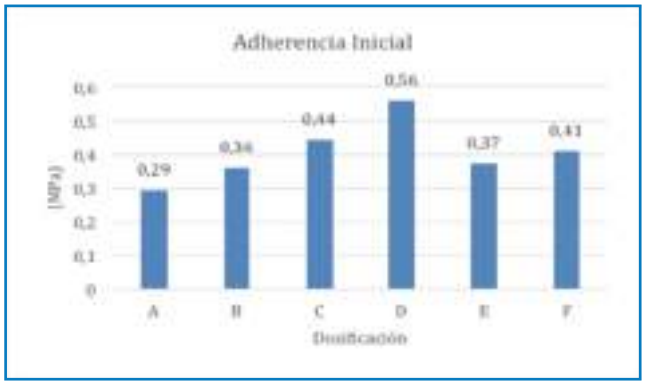


Gráfico 34. *Resultados de Adherencia inicial en [9]*

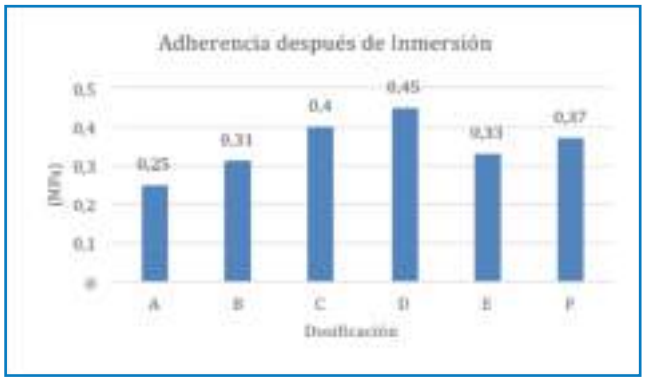


Gráfico 35. *Resultados de Adherencia después de inmersión en agua en [9]*

Gráfico 36. *Resultados de Adherencia después de envejecimiento por calor en [9]*

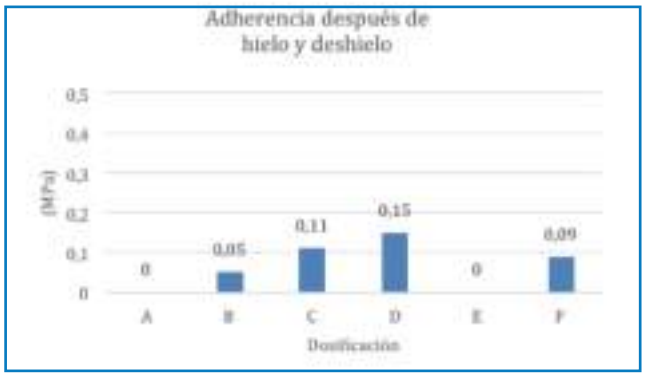


Gráfico 37. *Resultados de Adherencia después de ciclos de hielo y deshielo en [9]*

Como se puede observar, solamente la dosificación D, presentó un resultado satisfactorio para la Adherencia inicial. Se confirmó el resultado obtenido en las pruebas preliminares, esta vez con un valor de 0.56 MPa. No se obtuvieron buenos resultados para los ensayos de durabilidad en ninguna de las dosificaciones estudiadas, por tanto, para este propósito, se deberá profundizar el estudio incrementando la cantidad de aditivos en la mezcla.

3. DISCUSIÓN

- Se logran valores de Adherencia Inicial de 0.73 MPa con cemento Fancesa IP-30, 1 % de polvo redispersable (DAIREN DA 1100) y con 0.3 % de metilhidroxilcelulosa (TYLOSE MHS 150003 P4) más 0.1 % de bentonita (OPTIBEN-987 filosilicato de aluminio absorbente) (Ver [8]). Esto mejora lo obtenido en la investigación [3], que daba un valor de 1.01 MPa pero con 1 % de polvo redispersable, 0.625 de metilhidroxilcelulosa y con 35 % de cemento Fancesa IP-40. Asimismo, los valores obtenidos en [7]: 0.7 MPa con 35 % de cemento Viacha IP 30, 1.5 de polvo redispersable y 0.3 + 0.1 de metilcelulosa más bentonita, logran el mismo objetivo.

- En lo referente al Tiempo Abierto, en la investigación [3] con 35 % de cemento Fancesa IP 40, se obtuvieron valores de 0.5 MPa para 20 minutos con 1 % de polvo redispersable (DAIREN DA 1100) y con 0.625 % de metilhidroxilcelulosa (TYLOSE MHS 150003 P4). Esto también es mejorado en la investigación [8], donde se obtuvo un valor de 0.57 MPa con 1 % de polvo redispersable y 0.3+0.1 de metilcelulosa más bentonita y 32 % de cemento Fancesa IP 30, Lo mismo ocurrió en la investigación [7], donde se obtuvo un valor de 0.53 MPa con las mismas proporciones de aditivos y 35 % de cemento Viacha IP 30. Estos dos últimos resultados son para ambientes donde no habrá exposición a humedad severa ni riesgo de congelamiento.

- En cuanto al envejecimiento por calor, no se obtuvieron valores satisfactorios en el proyecto [3], pero si en el proyecto [4] con 35 % de cemento Fancesa IP 30, 3 % de polvo redispersable y 0.6+0.15 % de metilcelulosa más bentonita. Esto, según las curvas del modelo analizado, se podría reducir a 2 % de polvo redispersable y 0.6+0.15

de metilcelulosa más bentonita o bien a 2.5 % de polvo redispersable y 0.4+0.1 de metilcelulosa más bentonita para obtener valores mayores a 0.5 MPa.

- En los ensayos de Adherencia después de inmersión, lo mejor que se obtuvo fueron valores de 0.57 MPa con 32 % de cemento Fancesa IP 30, 0.8 % de polvo redispersable DA 3510 y 0.6 % de metilcelulosa, o bien 0.53 MPa con la misma proporción de cemento, 1.2 % de polvo redispersable DA 3510 y 0.4 % de metilcelulosa. Todo esto en la investigación [5].

- Los ensayos de adherencia después de ciclos de hielo y deshielo mostraron, con la investigación [3], un valor de 1.25 MPa con 1 % de polvo redispersable DA 1100 y 0.625 de metilcelulosa. Se trató de optimizar esa dosificación con el proyecto [6], pero no fue posible hacerlo.

- Utilizando metilcelulosa de procedencia china, se logran valores satisfactorios para Adherencia inicial y Tiempo abierto con 35 % de cemento Ecebol IP 40, 1 % de polvo redispersable DA 1100 y 0.25 % de metilcelulosa de acuerdo con la investigación [9]. Para cumplir los requisitos de durabilidad, se deben aumentar las proporciones de los aditivos.

4. CONCLUSIONES

- Las dosificaciones: 2 % de polvo redispersable y 0.6 + 0.15 e metilcelulosa más bentonita; o bien, 2.5 % de polvo redispersable y 0.4+0.1 de metilcelulosa más bentonita, ambas utilizando 35 % de cemento Fancesa IP 30, 58 % de arena y 7 % de polvo calizo, cumplen todos los requisitos de la Norma de la manera más económica excepto la resistencia a ciclos de hielo y deshielo, por lo que podemos recomendar estas dosificaciones para un adhesivo de uso común que no estará expuesto a condiciones de congelamiento ni choques térmicos importantes . Estas mezclas se elaborarán con TYLOSE 150003 P4 y DAIREN DA 1100.

- En el caso de adhesivos cementosos para uso en interiores, mismos que no estarán sujetos a exposición a humedad, la dosificación más económica es 35% de cemento Ecebol IP-40, 1% de polvo DAIREN DA 1100 y 0,25 % de metilcelulosa Meilose GMC 1165.

- Queda por investigar dosificaciones que cumplan todos los requisitos de la norma: adherencia inicial, tiempo abierto y los tres ensayos de durabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

[1] **M. Alvarez, M. Jorge**, J. Echazú, and V. Gallardo, "Control de calidad de los cementos cola". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2011.

[2] **M. Quispe, B. Chanez**, J. Echazú, and V. Gallardo, "Ensayos de durabilidad en cementos cola". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2011.

[3] **M. Asturizaga**, P. Choque, H. Gutiérrez, J. Echazú, and V. Gallardo, "Evaluación de distintas dosificaciones de adhesivos para baldosas cerámicas en función de la adherencia y durabilidad". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2016.

[4] **M. Chacón**, H. Colque, J. Echazú, and Ga, "Estudio de la adherencia después de envejecimiento por calor de adhesivos cementosos con adición de bentonita (cemento cola) para baldosas cerámicas". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2018.

[5] **M. Céspedes**, V. Gallardo, and J. Echazú, "Estudio de la adhrencia después de inmersión en agua de adhesivos cementosos (cemento cola), para baldosas cerámicas, elaborados con cemento FANCESA IP-30". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2017.

[6] **C. Lucana**, V. Gallardo, and J. Echazú, "Estudio de la adherencia después de ciclos de congelamiento y descongelamiento de adhesivos cementosos con cemento FANCESA IP-30 (cementos cola), para baldosas cerámicas". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2018.

[7] **R. Conde**, J. C. Fernández, J. Echazú, and V. Gallardo, "Estudio de adhesivos cementosos para baldosas cerámicas, elaborados con cemento Viacha y adición de bentonita". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2018.

[8] **R. Sirpa**, J. Sucasaca, J. Echazú, and V. Gallardo, "Estudio de adhesivos cementosos con cemento FANCESA IP-30 y adición de bentonita, para baldosas cerámicas". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2018.

[9] **P. Casas**, F. Chui, J. Echazú, and V. Gallardo, "Estudio de la adherencia inicial y la durabilidad de adhesivos cementosos (cementos cola) con los aditivos: Dairen DA 1100 y Meilose GMC 1165". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2020.

PLANTA PROCESADORA DE AGREGADOS - IEM (COTA COTA)

Paulino Freddy Dorado Alejo
fredd508508@gmail.com

Adan Torrez Laura
adan-torrez@hotmail.com

Fernando M. Cerruto Anibarro
fcerruto@umsa.bo

RESUMEN

La investigación estudia la factibilidad de la instalación de una planta procesadora de agregados, que podría ser implementada en el campus universitario de Cota Cota aledaño al rio Jilusaya (de donde se plantea realizar la explotación), realizando los estudios físico-mecánicos al agregado, dosificación de hormigones y la planificación de la infraestructura requerida, por tanto, se proponen alternativas para que se pueda aprovechar el agregado en las investigaciones realizadas por el Instituto de Ensayo de Materiales.

Palabras clave:

Agregados, planta procesadora, propiedades físico-mecánicas, granulometría, dosificación, resistencia a compresión

ABSTRACT:

The research studies the feasibility of the installation of an aggregates processing plant, which could be implemented on the Cota Cota university campus near the Jilusaya river (from where it is planned to carry out the exploitation), carrying out the physical-mechanical studies to the aggregate, dosage of concrete and the planning of the required infrastructure, therefore, alternatives are proposed so that the aggregate can be used in the investigations carried out by the Materials Testing Institute.

Keywords: *Aggregates, processing plant, physical-mechanical properties, granulometry, selecting proportions, compression resistance.*

1. JUSTIFICACIÓN GENERAL

El Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) para el desarrollo de innumerables proyectos de investigación emplea grandes cantidades de agregados.

Los agregados adquiridos de diferentes proveedores, muchas veces no satisfacen los requisitos para su uso inmediato y requieren de adecuaciones, tales como, las correcciones granulométricas, exceso de material más fino que el tamiz Nº 200 y otros.

La presente investigación estudia la factibilidad de implementar una planta procesadora de agregados en el campus Universitario de Cota Cota explotando el material pétreo del lecho del río Jilusaya para solventar la demanda interna de agregados del IEM. De implementarse la planta se daría un paso inicial para la producción controlada de agregados, implementando mejoras en la calidad del producto e innovando procedimientos técnicos - económicos para ser difundidos a los productores artesanales.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SECTOR DE EMPLAZAMIENTO DEL PROYECTO

2.1. RIVERA DEL RÍO JILUSAYA

El campus universitario, sector de la Facultad de Ingeniería se encuentra ubicado en la zona sur de la ciudad de La Paz en cercanías de la calle 30 de Cota Cota (ver Figura 1), el cual es colindante al río Jilusaya cuyo material sedimentable se pretende aprovechar para producir agregados.

Fig. 1. *Vista satelital del sector de emplazamiento del proyecto (Fuente: Google Earth)*

Se prevé que la planta sea ubicada en cercanías del río Jilusaya (ver Figura 2) dentro del campus universitario y acorde al Plan director de Unidad de Infraestructura de Ingeniería.

Fig. 2. *Vista panorámica de la ribera del río Jilusaya (Fuente: Propia*

Fig. 3*. Plan Director del campus universitario de Cota Cota (Fuente: UDI de Ingeniería)*

2.2. ÁREA DISPONIBLE

La Fig. 3 contempla la construcción de nuevos institutos de investigación, obras viales y una canalización que atravesará el campus universitario llevando las aguas del río Jilusaya.

El proyecto de canalización aún se encuentra en proceso de elaboración, el cual dispondrá de plazoletas de sedimentación, para minimizar la cantidad de material arrastrado. En éste sentido, la planta procesadora de agregados, debería estar en cercanías de la plazoleta de sedimentación y acorde al plan director del campus universitario.

En la Fig. 4, se muestra en una región sombreada el área disponible para la implementación de la planta procesadora de agregados, la cual ha sido propuesta en base a la planificación vial e infraestructural prevista para el campus universitario. Esta área sombreada se encuentra dentro de los límites catastrales del campus universitario y aledaño al trazado de la canalización del río Jilusaya.

Fig. 4. *Área disponible para la ubicación de la planta procesadora de agregados* ***(Fuente:*** *Elaboración propia en base al plan director y a Google Earth)*

2.3. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS

La Fig. 5, muestra el relieve topográfico en el área en estudio.

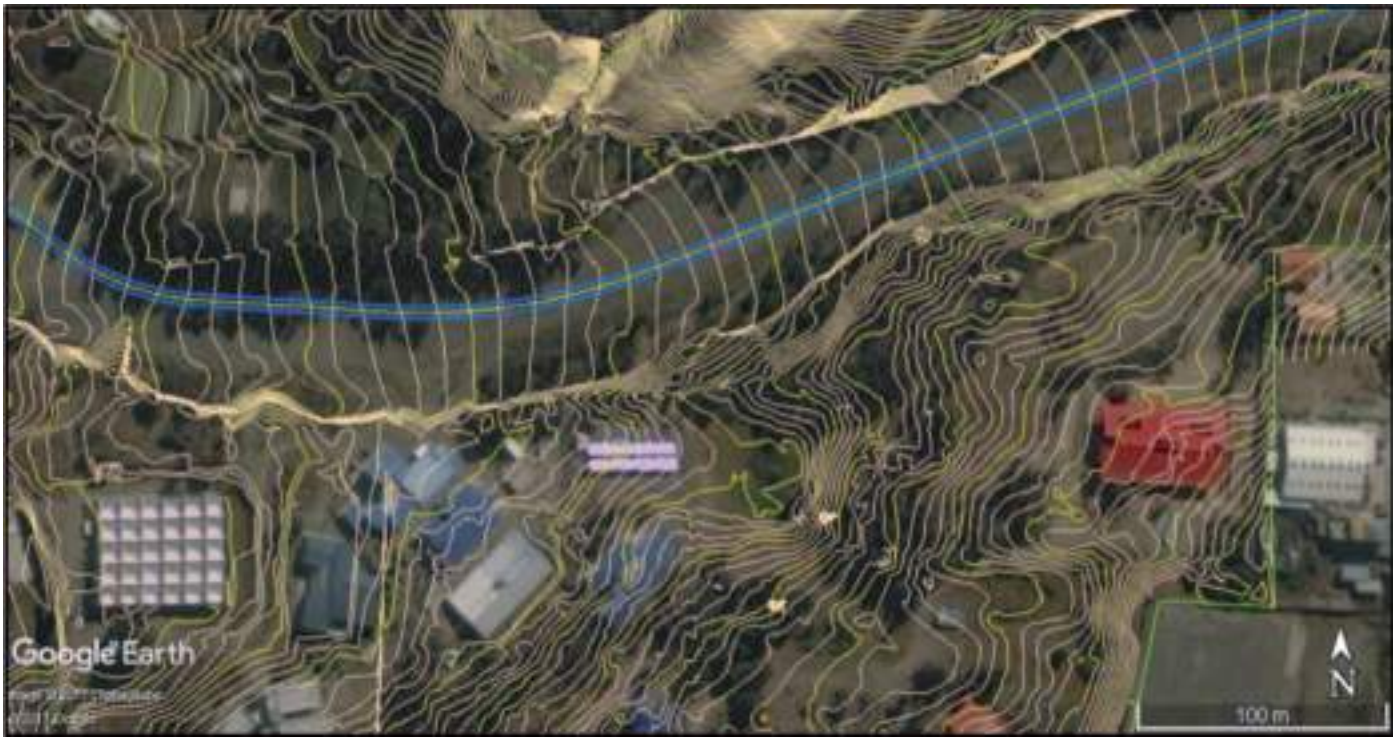


Fig. 5. *Mapa topográfico del campus universitario (Fuente: Elaboración propia en base al plano topográfico proporcionado por la UDI de ingeniería y a Google Earth)*

2.4. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

El estudio geológico y unidades estratigráficas del área de emplazamiento del proyecto se han obtenido con la colaboración de la UDI de Ingeniería, dichos estudios han sido elaborados para los proyectos del Plan Director del campus universitario de Cota Cota.

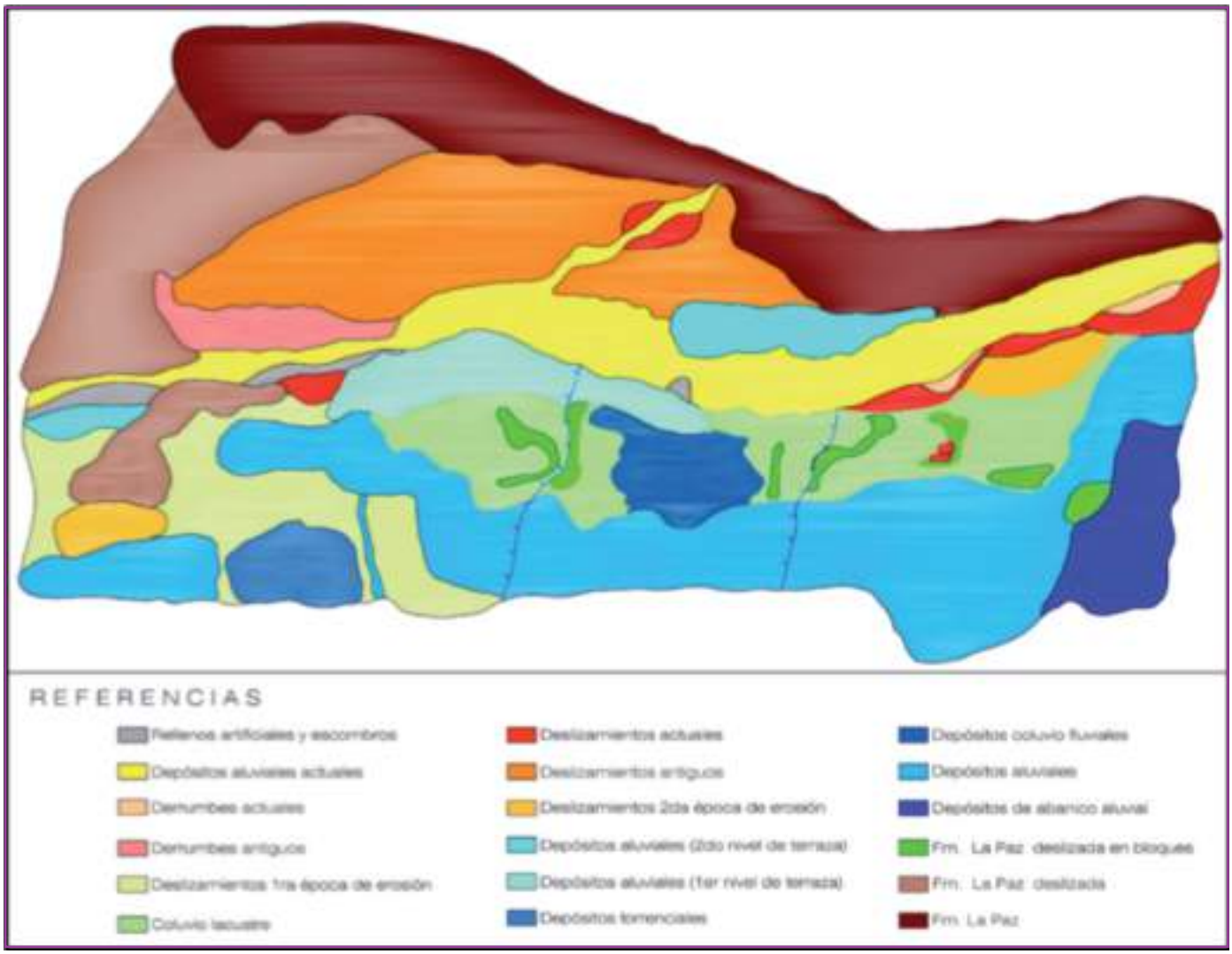


Fig. 6. *Mapa geológico y de unidades litoestratigráficas del campus universitario de Cota Cota (**Fuente:** UDI de Ingeniería)*

La Fig. 6, muestra distintas unidades litoestratigráficas presentes en el área del proyecto, entre los cuales se muestra en color amarillo los depósitos aluviales que conforman la amplia llanura aluvial del río Jilusaya (material aprovechable para la extracción de agregados).

2.5. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

El Instituto de Hidráulica e Hidrología IHH en conjunto con la SMGIR realizó la caracterización hidrológica de los caudales de crecida en la cuenca del río Jilusaya para determinadas tormentas de lluvia haciendo una modelación precipitación - escorrentía, cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.

T (años)	Q (m^3/s)
5	32.4
10	40.3
25	50.7
50	59.1
100	67.5
200	76.0
500	87.3

Tabla 1. *Caudales para distintos periodos de retorno*

3. CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO NATURAL

Realizando la toma de muestras correspondiente al material sedimentable del lecho del río Jilusaya, se determinó lo siguiente:

- El material sedimentario presente en el río se compone del 6% de finos (limos y arcillas), 29% de arenas, 44% gravas, 21% manzanos, las cuales se han obtenido mediante análisis granulométricos realizados por peso y métodos de medición directa. Se puede observar la predominancia del material pétreo, lo que hace factible el aprovechamiento como agregado de construcción, asimismo el material grueso tiene un porcentaje significativo, el cual puede ser aprovechado como elemento desplazador (piedra manzana) o como materia prima para chancado.

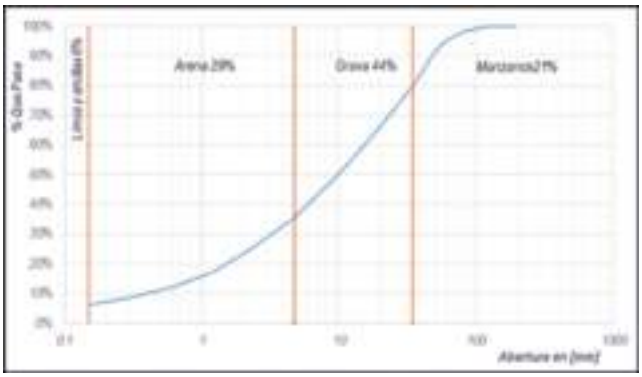


Fig. 7. *Curva Granulométrica del lecho del río Jilusaya (**Fuente:** Elab. Propia)*

- En cuanto a las propiedades físicas, tales como el peso específico, porcentaje de absorción, peso unitario y porcentaje de vacíos, tienen valores que son característicos de un agregado de densidad normal.

- El material que pasa el Tamiz N° 200 en la grava es del 2.42% y en la arena es del 15.53%, valores que se salen de la normativa para agregados de construcción y confirman la necesidad de implementar un dispositivo de lavado de los agregados en el proceso de tratamiento.

- El porcentaje de partículas planas en relación de 1/3 es del 39.9% y en la relación 1/5 es del 21.2% mismas que se encuentran muy por encima de las recomendaciones de elaboración de hormigones.

- El ensayo de Terrones de Arcilla para el agregado grueso es del 1.74% y para la arena es del 1.47% los cuales están dentro de los límites permisibles de la norma (5% y 3% respectivamente) indicando que los agregados no sufrirán alteraciones físicas en el proceso de lavado.

- El ensayo de colorimetría ha mostrado que el agregado no presenta exposición perjudicial de materia orgánica, por tanto el agregado del rio Jilusaya no está contaminado, siendo apto para su uso en elaboración de hormigones.

- El porcentaje de degradación del agregado grueso es del 21.8% lo que nos indica que el agregado puede ser utilizado para todo tipo de estructuras incluso aquellas que se encuentran sometidas a procesos erosivos.

- En cuanto a las propiedades químicas, la reacción álcali - agregado del yacimiento en estudio, vaciado con cemento Viacha IP-30, para el agregado fino, resultó no ser reactivo según la NBRI considerándose como agregado inocuo (no dañino). Por tanto, el agregado debería utilizarse sólo con cementos Tipo IP.

- La durabilidad en Sulfato de Sodio del agregado grueso y fino dio pérdidas para la grava del 10.45% y de la arena es del 6.60% cumpliendo con los requerimientos mínimos de la norma (12% y 10% respectivamente), por lo cual se puede señalar, que el agregado es resistente al deterioro por acción del sulfato de sodio, considerándose resistente a los agentes climáticos.

- El análisis petrográfico nos proporcionó una identificación de los tipos y variedades de las rocas y minerales presentes en los agregados donde se pudo observar que la cantidad de rocas pizarrosas tiene una notable predominancia, razón por la cual para evitar la generación de partículas planas y alargadas, debería utilizarse en el proceso de chancado chancadoras de impacto, chancadoras de bolas o chancadoras cónicas.

- El material arrastrado por el río Jilusaya puede ser utilizado como agregado para la elaboración de hormigones, pero es necesario realizar tratamientos previos (lavado, seleccionado y ocasionalmente chancado) para mejorar sus características y tener un aprovechamiento óptimo como agregado.

4. CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO TRATADO

El agregado que ha sido utilizado para dosificar hormigones, se ha adecuado tratando de asemejar el producto final que una planta productora de agregados procesaría, anticipando los tipos de agregados, ya sea totalmente rodado, totalmente chancado o un agregado combinado de acuerdo a la oferta de material que proporciona el Río Jilusaya.

El Agregado Natural del río Jilusaya ha sido modificado, tomando las consideraciones que se detallan a continuación.

Agregado grueso.

Para la elaboración de hormigones, se ha considerado tres tipos de agregado grueso con un tamaño máximo nominal de $^3/_4$":

- *Agregado Rodado*, que se obtuvo del lecho del río Jilusaya, separando el material fino (arena) por la malla N°4 y tamizando en la malla de 1" (para obtener un TMN $^3/_4$"); asimismo se ha lavado el agregado para que cumpla los requerimientos exigidos por las normas.

- *Agregado Chancado*, proveniente del material pétreo del rio Jilusaya (manzanos), los cuales han sido machacados con una chancadora de mandíbulas de 25 x 40 [cm]. Seguidamente se procedió al tamizado y lavado correspondiente

- *Agregado Combinado*, el cual está compuesto por el 32% de agregado chancado y el 68% de agregado rodado, mezclados con su granulometría original y separados por tamices para armar una nueva granulometría que se encuentre dentro de los límites superior e inferior propuestos por la ASTM C33[1] La elección del porcentaje de mezclado, surgió del proporcionamiento natural de la ribera del río Jilusaya entre arenas, gravas y cantos rodados (manzanos), entre las cuales el material potencial a ser chancado tiene un 32% del total del material aprovechable del río.

[1].Norma ASTM C33 / C33 M - 13, Standard Specification for Concrete Aggregates, Grading requirements for Coarse Aggregates.

De los ensayos realizados en el laboratorio de hormigones del IEM, se obtuvieron los resultados mostrados en las siguientes figuras 8 a 11y tablas 2 a 3, las cuales corresponden a los tres tipos de agregado grueso y al agregado fino.

Con los agregados obtenidos del lecho del río Jilusaya, se realizaron amasados de hormigón estructural tomando las siguientes consideraciones:

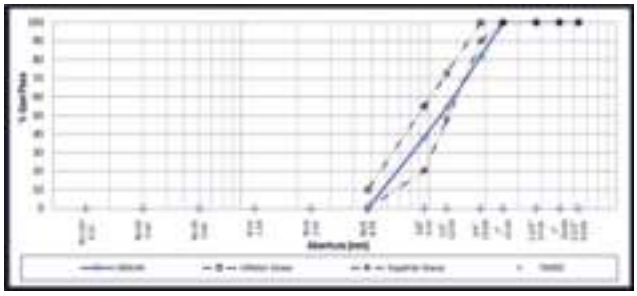


Fig. 8. *Curva Granulométrica del agregado grueso Rodado (Fuente: Elab. Propia)*

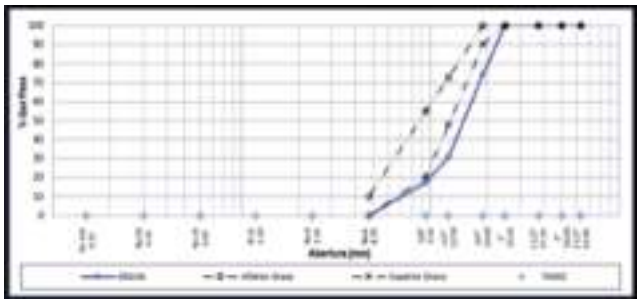


Fig. 9. *Curva granulométrica del agregado grueso Chancado (Fuente: Elab. Propia)*

Fig. 10. *Curva granulométrica del agregado grueso Combinado (Fuente: Elab. Propia)*

- El método de dosificación fue de la ACI 211.1 empleando la curva de Füller.

- Cemento: Tipo IP - 30, variando en tres cantidades 300, 400 y 500 [kg/m^{3}H°]

- Agregado grueso: agregado rodado, agregado chancado y agregado combinado, todos con un TMN $^3/_4$", procedente del río Julisaya.
- Agregado fino: un solo tipo, procedente del río Julisaya.
- Agua: agua potable de la red de distribución pública, zona sur de la ciudad de La Paz (Laboratorio IEM), buscando un asentamiento esperado de 7 ± 1 [cm]

CARACTERISTICA	AGREGADO RODADO	AGREGADO CHANCADO	AGREGADO COMBINADO	NORMA
Análisis granulométrico	—	—	—	ASTM C-136
Módulo de fineza	6.80	7.08	6.62	ASTM C-136
Peso Específico sss	2.654	2.624	2.633	ASTM C-127
Peso Específico seco	2.607	2.583	2.589	ASTM C-127
Absorción (%)	1.822%	1.588%	1.715%	ASTM C-127
Peso Unitario Suelto (Kg/m^3)	1523	1354	1507	ASTM C-29
Peso Unitario Compactado (Kg/m^3)	1760	1548	1608	ASTM C-29
Porcentaje de huecos suelto (%)	41.559%	47.586%	41.791%	ASTM C-29
Porcentaje de huecos Compactado (%)	32.504%	40.086%	37.875%	ASTM C-29
Material que pasa el Tamiz Nº 200 (%)	0.75%	0.49%	0.44%	ASTM C-117
Terrones de Arcilla y Partículas desmenuzables (%)	1.26%	0.79%	0.71%	ASTM C-142
Desgaste Los Angeles (%)	22.5%	22.3%	20.9%	ASTM C-131
Partículas Planas y Alargadas rel 1/3(%)	42.5%	42.2%	47.1%	
Partículas Planas y Alargadas rel 1/5 (%)	20.7%	17.9%	22.9%	
Caras Producidas por Fracturas (%)	2.02%	96.94%	45.66%	

Tabla 2. *Propiedades físico-mecánicas del agregado grueso*
(Fuente: Elaboración Propia)

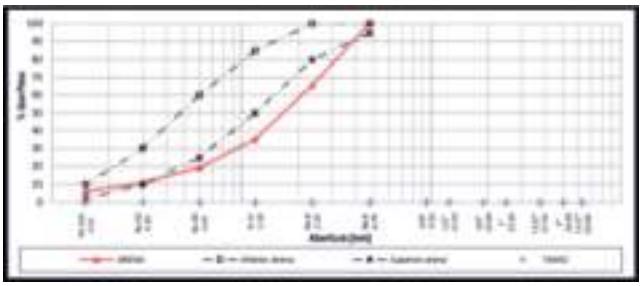


Fig. 11. *Curva granulométrica del agregado Fino*
(Fuente: Elab. Propia)

CARACTERISTICA	VALOR	NORMA
Análisis granulométrico	—	ASTM C-136
Módulo granulométrico	3.63	ASTM C-136
Peso Específico sss	2.628	ASTM C-128
Peso Específico seco	2.557	ASTM C-128
Absorción (%)	2.776%	ASTM C-128
Peso Unitario Suelto (Kg/m^3)	1642.1	ASTM C-29
Peso Unitario Compactado (Kg/m^3)	1856.0	ASTM C-29
Porcentaje de huecos suelto (%)	35.771%	ASTM C-29
Porcentaje de huecos Compactado (%)	27.404%	ASTM C-29
Material que pasa el Tamiz Nº 200 (%)	2.15%	ASTM C-117
Equivalente Arena (%)	84.1%	ASTMD 2419
Terrones de Arcilla y Partículas desmenuzables (%)	1.37%	ASTM C-142
Contenido de Materia Orgánica (Colorimetría)	Aceptado	ASTM C-40

Tabla 3. *Propiedades físico-mecánicas del agregado fino*
(Fuente: Elaboración Propia)Dosificación de Hormigones

5. RESISTENCIA CARACTERÍSTICA ESTIMADA A COMPRESIÓN, *fck,est*

Según el análisis estadístico y considerando los números de amasada para cada tipo de agregado, se obtuvieron los resultados a 28 días mostrados en la Tabla 4 y la Fig. 12.

Los resultados de resistencia característica evaluada a los 28 días, señalan que las resistencias alcanzadas con el hormigón elaborado con agregado netamente chancado es superior a los resultados del hormigón elaborado con el agregado rodado; la diferencia que presentan está en función del consumo de cemento, ya que para 300 [kg/m^3] se eleva la resistencia en 7.7%, para 400 [kg/m^3] se eleva un 8.8% y para 500 [kg/m^3] se alcanza un 10.3%. Por lo tanto, para un alto consumo de cemento es conveniente realizar el proceso de chancado.

TIPO DE AGREGADO	CONTENIDO DE CEMENTO [Kg/m3]	RESIST. CARACT. PARA PROBETAS DE 10 x 20 *fck* [MPa]
Agregado Rodado	*300*	*14.2*
	400	*21.7*
	500	*26.2*
Agregado Chancado	*300*	*15.3*
	400	*23.6*
	500	*28.9*
Agregado Combinado	*300*	*15.0*
	400	*22.3*
	500	*27.6*

Tabla 4. *Resistencias características estimadas*
(Fuente: Elaboración Propia)

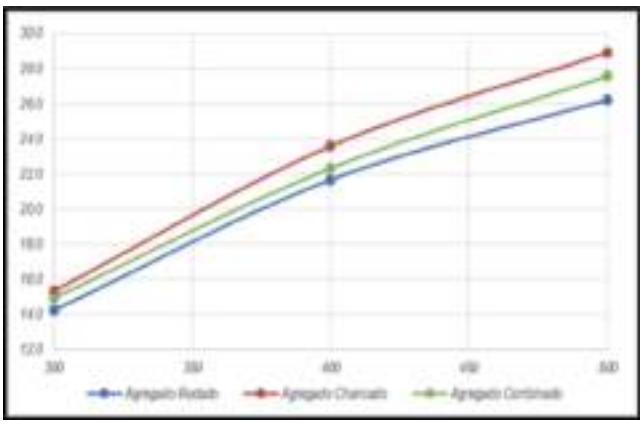


Fig. 12*. Comportamiento de las resistencias en los distintos tipos de agregados analizados*

6. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE PLANTAS PROCESADORAS DE AGREGADOS

6.1. ALTERNATIVA 1: SEPARACIÓN DE ARENAS Y LAVADO DE FINOS

Esta alternativa se plantea como un método tradicional de obtención de agregados, en la que, se tienen procesos de lavado, separado del sobretamaño y separación de grava y arena.

La separación del agregado fino se da entre el dispositivo de ingreso (alimentador) y una zaranda de abertura N°4 con un impulso de chorro de agua proveniente de las piscinas de recirculación; posteriormente, las arenas en un medio líquido se dirigen al dispositivo de lavado (lavador de arena) donde el rotor del equipo dirige la arena lavada a una cinta transportadora que acopia las arenas en su ubicación final. El agregado grueso es retenido por la zaranda N°4 y se dirige a una zaranda de 1" para obtener un tamaño máximo nominal de $^3/_4$"; el sobretamaño retenido por dicha zaranda se acopiará para otros usos.

La producción de agregado grueso no es controlada, es decir que el proceso no incluye la clasificación por tamaños, la granulometría es tal cual como ofrece el rio.

Con respecto a la maquinaria móvil, la alternativa está planteada con una Retroexcavadora mixta y un camión Volquete de 4 m^3 con su dispositivo de preseleccionado del agregado natural de una abertura de 2".El área total requerida para la presente alternativa es 700 m^2, con una capacidad de producción de 6 t/hr.

El costo estimado de inversión de la infraestructura, equipamiento y Maquinaria para esta alternativa será de Bs. 871,149.62 (Ochocientos setenta y un mil ciento cuarenta y nueve 62/100 bolivianos).

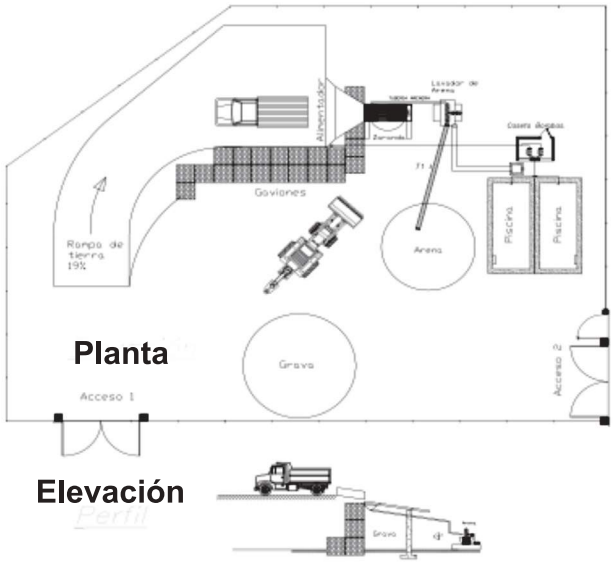


Fig. 13. *Esquema en elevación y perfil de la Alternativa 1: Separación de arenas y lavado de finos (**Fuente:** Elaboración. Propia)*

6.2. ALTERNATIVA 2: CHANCADO, SEPARACIÓN DE ARENAS Y LAVADO DE FINOS

La segunda alternativa busca obtener agregado fino y agregado grueso, añadiendo un proceso de chancado para aprovechar el sobretamaño que se retiene en la zaranda de 1".

El proceso de tratamiento es similar al indicado en la Alternativa 1, con la variante de que en la presente alternativa, se procesa agregado rodado y chancado simultáneamente. El sobretamaño retenido en la zaranda de 1" entra a la chancadora y el material chancado sale a una cinta transportadora que lo redirige al alimentador.

Asimismo, la alternativa plantea aprovechar los manzanos existentes en el río menores a 5" (25 cm) de esta manera se aprovechará de mejor manera el material ofrecido por el río y se obtendrá agregado rodado en combinación con el agregado chancado. La maquinaria móvil es similar al propuesto en la Alternativa 1 y el área total requerida es 755 m^2.

El costo estimado de inversión para esta alternativa será de Bs 982,713.57 (Novecientos ochenta y dos mil setecientos trece 57/100 bolivianos).

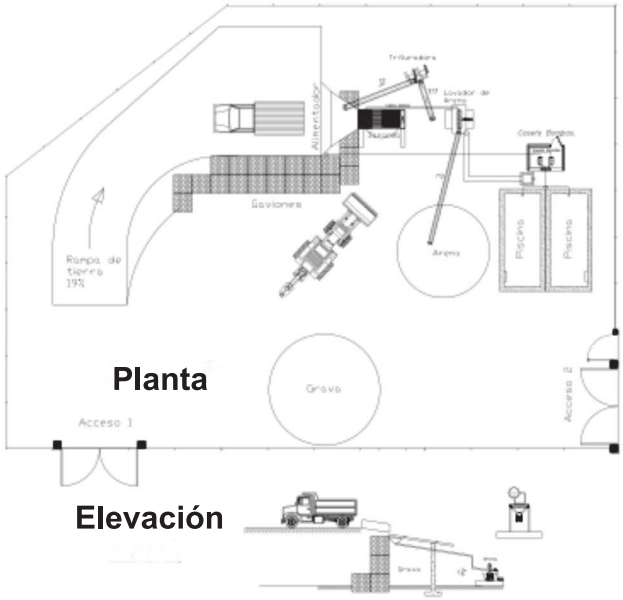


Fig. 14. *Esquema en elevación y perfil de la Alternativa 2: Chancado, separación de arenas y lavado de finos (**Fuente:** Elaboración. Propia)*

6.3. ALTERNATIVA 3: CLASIFICACIÓN MECANIZADA Y LAVADO DE FINOS EN UNA ZARANDA VIBRATORIA DE PISOS

La tercera alternativa busca obtener agregado fino y agregado grueso, añadiendo un proceso de clasificación mecanizada para obtener la separación por tamiz del agregado grueso.

El proceso de lavado y separación de arena es similar al indicado en la Alternativa 1; el agregado grueso será sometido a un proceso de clasificación mecanizada que lo separa por tamices de la serie gruesa (Nº4, 3/8”, 1/2" y 3/4”). El árido fino se someterá a un proceso de lavado y acopiado.

El material clasificado del agregado grueso será acopiado en un buzón temporal debajo del sistema de clasificado, de donde periódicamente la retroexcavadora tendrá que llevar el material a su disposición final acopiándolo para que esté listo para su uso. La granulometría final podrá ser adecuada de acuerdo a los requerimientos que se tenga.

La maquinaria móvil es similar al propuesto en las anteriores alternativas y el área total requerida es 940 m^2.

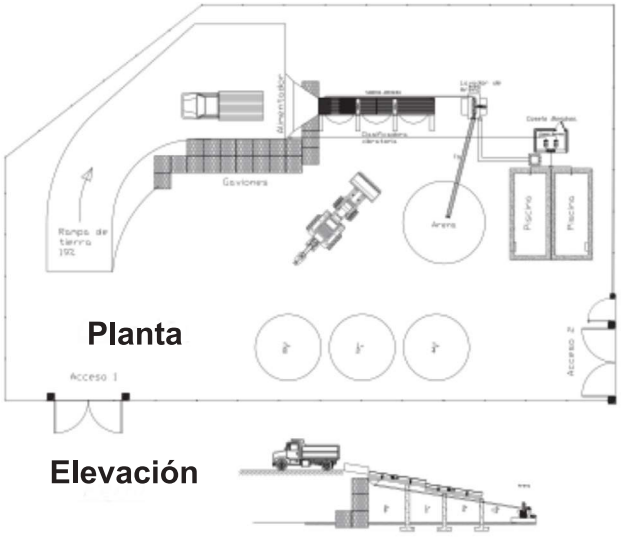


Fig. 15. *Esquema en elevación y perfil de la Alternativa 3: Clasificación mecanizada, separación de arenas y lavado de finos (**Fuente:** Elaboración. Propia)*

El costo estimado de inversión para esta alternativa será de Bs 1,070,884.59 (Un millón setenta mil ochocientos ochenta y cuatro 59/100 bolivianos)

6.4. ALTERNATIVA 4: CHANCADO, CLASIFICACIÓN MECANIZADA Y LAVADO DE FINOS EN UNA ZARANDA VIBRATORIA DE PISOS

La cuarta alternativa busca obtener agregado fino y agregado grueso, añadiendo un proceso de clasificación mecanizada para obtener la separación por tamiz del agregado grueso y un proceso de chancado para aprovechar el sobretamaño del zarandeo y los manzanos del río Jilusaya.

El proceso de tratamiento, es similar a la Alternativa 3, donde el agregado grueso será sometido a un proceso de clasificación mecanizada separando por tamices de la serie gruesa (Nº4, 3/8”, 1/2" y 3/4”) y el sobretamaño y manzanos serán tratados con un proceso de chancado, que es similar al expuesto en la Alternativa 2, en la que el agregado chancado vuelve a la alimentadora y se clasifica por tamices.

El material clasificado del agregado grueso será acopiado en un buzón temporal debajo del sistema

de clasificado, de donde periódicamente la retroexcavadora tendrá que llevar el material a su disposición final acopiándolo para que esté listo para su uso. La granulometría final podrá ser adecuada de acuerdo a los requerimientos que se tenga.

La maquinaria móvil es similar al propuesto en las anteriores alternativas y el área total requerida es 940 m^2.

El costo estimado de inversión para la Alternativa 4 será de Bs 1,206,404.95 (Un millón doscientos seis mil cuatrocientos cuatro 95/100 bolivianos).

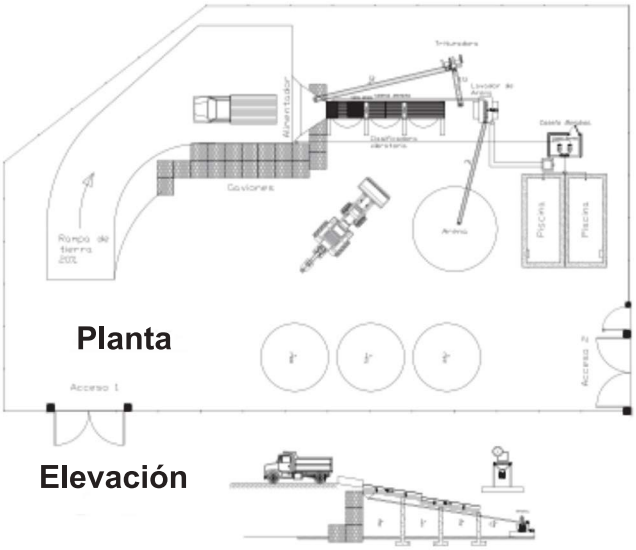


Fig. 16. *Esquema en elevación y perfil de la Alternativa 4: Chancado, clasificación mecanizada, separación de arenas y lavado de finos (**Fuente:** Elaboración. Propia)*

7. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para analizar la factibilidad económica, se calculó el Valor Actual Neto de las distintas alternativas considerando el costo del material obtenido como un indicador del beneficio. Si bien el agregado será para consumo interno del IEM, va a representar un ahorro de la compra de dicho material para realizar las investigaciones de sus distintas áreas.

7.1. COSTOS DE OPERACIÓN

La siguiente tabla muestra los costos de operación y mantenimiento de la infraestructura y el equipamiento para las cuatro alternativas que anualmente se emplearían desde la puesta en marcha del proyecto y para distintos periodos anuales de trabajo (12 meses, 9 meses, 6 meses 4 meses, 2 meses, 1 mes y 1 día de trabajo al año).

ALTERNATIVA	0.05 MESES (1 Día)	1 MES (20 días)	2 MESES (40 días)	4 MESES (80 días)	6 MESES (120 días)	9 MESES (180 días)	12 MESES (240 días)
Alternativa 1	4750.5	31359.1	59368.3	115386.5	174754.8	258782.2	342809.6
Alternativa 2	5865.5	34659.1	64968.3	125586.5	190554.8	281482.2	372409.6
Alternativa 3	5700.5	33259.1	62268.3	120286.5	182554.8	269582.2	356609.6
Alternativa 4	7725.5	37659.1	69168.3	132186.5	201354.8	295882.2	390409.6

Tabla 5. Costos de operación y mantenimiento por cada alternativa [Bs]
*(**Fuente:** Elaboración Propia)*

7.2. MONTOS POR PRODUCCIÓN DE AGREGADOS

La tabla 6 muestra la capacidad de producción anual total de las cuatro alternativas en metros cúbicos, para distintos periodos de trabajo.

ALTERNATIVA	0.05 MESES (1 Día)	1 MES (20 días)	2 MESES (40 días)	4 MESES (80 días)	6 MESES (120 días)	9 MESES (180 días)	12 MESES (240 días)
Alternativa 1	31.0	619.2	1238.4	2476.9	3715.3	5573.0	7430.6
Alternativa 2	41.0	819.1	1638.2	3276.4	4914.6	7371.9	9829.2
Alternativa 3	32.8	655.6	1311.3	2622.5	3933.8	5900.7	7867.6
Alternativa 4	43.7	874.6	1749.2	3498.3	5247.5	7871.2	10494.9

Tabla 6. *Producción estimada anual por alternativa en [m^3] (**Fuente:** Elaboración Propia)*

La tabla 7, muestra los costos unitarios por metro cúbico de agregado propuestos para las cuatro alternativas, (considerando el costo comercial de acuerdo a los distintos proveedores en nuestro medio).

ALTERNATIVA	ARENA [Bs/m3]	GRAVA [Bs/m3]
Alternativa 1	100.0	70.0
Alternativa 2	100.0	80.0
Alternativa 3	100.0	90.0
Alternativa 4	100.0	100.0

Tabla 7. *Costos asumidos por metro cubico de agregado producido,[Bs/m3]*
*(**Fuente:** Elaboración Propia)*

En la Tabla 8, se muestra los montos que debieran erogarse para cubrir la producción factible (compra)

de la planta en cualquier alternativa.

ALTERNATIVA	0.05 MESES (1 Día)	1 MES (20 días)	2 MESES (40 días)	4 MESES (80 días)	6 MESES (120 días)	9 MESES (180 días)	12 MESES (240 días)
Alternativa 1	2804.5	52089.9	104179.7	208379.4	312539.1	468808.7	625078.2
Alternativa 2	3596.2	71923.5	143846.9	287693.8	431540.8	647311.1	863081.5
Alternativa 3	3096.1	61921.8	123843.6	247687.2	371530.8	557296.3	743061.7
Alternativa 4	4372.9	87457.8	174915.7	349831.4	524747.0	787120.5	1049494.1

Tabla 8. *Costo anual estimado para cubrir producción de agregados considerando costo comercial[Bs]* (***Fuente***: *Elaboración Propia)*

La tabla 9 muestra el costo de producción de cada metro cúbico de agregado, que exceptuando una producción de 1 día, presenta costos mucho menores que el costo comercial (tabla 7).

ALTERNATIVA	0.05 MESES (1 Día)	1 MES (20 días)	2 MESES (40 días)	4 MESES (80 días)	6 MESES (120 días)	9 MESES (180 días)	12 MESES (240 días)
Alternativa 1	153.2	5.1	47.9	46.6	47.0	46.4	46.1
Alternativa 2	143.1	42.3	39.7	38.3	38.8	38.2	37.9
Alternativa 3	173.8	50.7	47.5	45.9	46.4	45.7	45.3
Alternativa 4	176.8	43.1	39.5	37.8	38.4	37.6	37.2

Tabla 9. *Costo unitario de producción, por periodo y poralternativa [Bs/m3]* (***Fuente:*** *Elaboración Propia)*

7.3. VALOR ACTUAL NETO

La Tabla 10 muestra el VAN para las cuatro alternativas en un periodo de recuperación de 10 años, con una tasa de oportunidad del 12% anual.

ALTERNATIVA	0.05 MESES (1 Día)	1 MES (20 días)	2 MESES (40 días)	4 MESES (80 días)	6 MESES (120 días)	9 MESES (180 días)	12 MESES (240 días)
Alternativa 1	-788021.3	-679188.6	-564627.8	-335506.2	-122321.9	221360.5	565042.8
Alternativa 2	-908913.2	-700142.8	-502168.3	-106219.1	269035.4	862959.1	1456882.8
Alternativa 3	-980192.4	-819788.1	-663210.5	-350055.3	-57118.9	412614.0	882346.8
Alternativa 4	-1109033.8	-840236.6	-574068.2	-41731.3	461347.8	1259853.1	2058358.4

Tabla 10. *Valor Actual Neto para las cuatro alternativas* (***Fuente:*** *Elaboración Propia)*

En la Fig. 17, muestra el punto en el que una alternativa para un determinado número de días de trabajo al año, deja de ser viable económicamente; asimismo, se puede observar que la Alternativa 4 se recupera con aproximadamente 84 días y la Alternativa 1 con 140 días (4 meses y 7 meses respectivamente).

La Fig. 18, es una adaptación de la anterior figura, para observar la variación del valor actual neto con la producción anual, donde la Alternativa 4 se hace viable luego de producir 3650 m^3 de agregado y la alternativa 1 se hace viable al producir 4350 m^3 de agregado cada año durante el periodo de retorno.

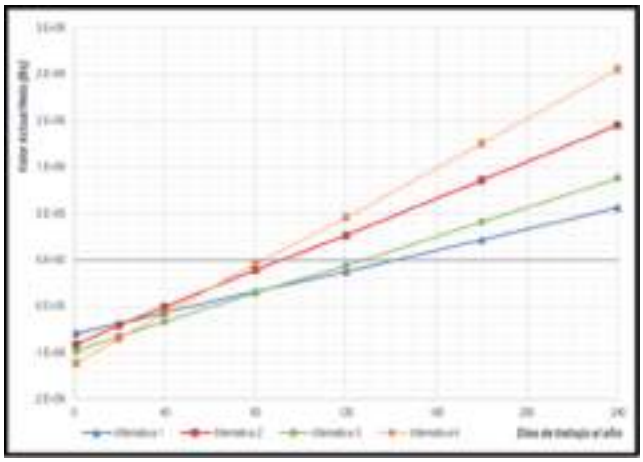


Fig. 17. *Análisis de sensibilidad VAN vs días de trabajo anuales* (***Fuente:*** *Elaboración Propia)*

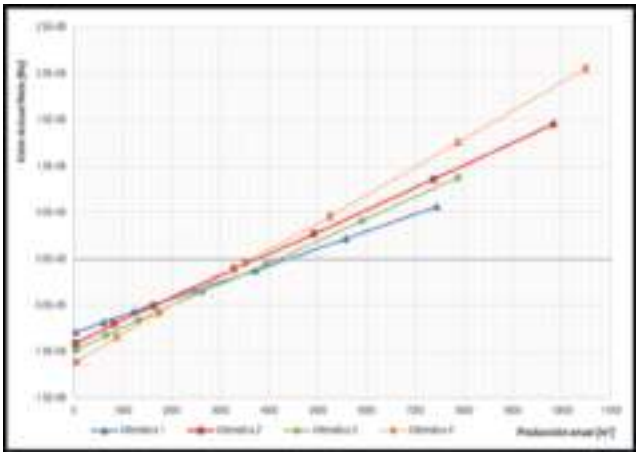


Fig. 18. *Análisis de sensibilidad VAN vs producción anual* (***Fuente:*** *Elaboración Propia)*

8. CONCLUSIONES

- El material arrastrado por el río Jilusaya puede ser utilizado como agregado, pero es necesario realizar tratamientos previos (lavado, seleccionado y ocasionalmente chancado) para mejorar sus características y tener un aprovechamiento óptimo de los agregados.

- Técnicamente, el agregado del lecho del río Jilusaya con ayuda del tratamiento correspondiente es apto para la elaboración de hormigón estructural.

- La infraestructura propuesta para las cuatro alternativas (rampas de carga y descarga, para evitar el uso de cintas transportadoras que eleven el material bruto hasta la alimentadora) permitiría aprovechar el relieve topográfico de la zona.

- Se evidencia la necesidad de implementar piscinas de recirculación de aguas para el aprovechamiento óptimo del agua, el cual servirá para el decantamiento de material suspendido (limos y arcillas) que permitan en cierta medida la clarificación del agua, de manera que pueda ser reutilizada.

- Para que la planta funcione plenamente y ser ecupere la inversión, se requiere una producción de 8.2 t/hr (capacidad para una cuadrilla de una volqueta de 4 m^3 y una retroexcavadora mixta) y no más de 15 t/hr para no sobrepasar el rendimiento máximo de la maquinaria estática.

La información planteada (gráficos y tablas) posibilitaría la toma de decisiones en función a la disponibilidad de recursos para su implementación y la necesidad de volúmenes de producción, sin embargo, a continuación se hace un análisis de dos de las alternativas:

- El proyecto sería rentable después de producir anualmente 4350 m^3 con la alternativa 1 (alternativa más simple de implementar), y a los 3650 m^3 de agregado con la alternativa 4 (alternativa de mayor inversión y producción). Éste análisis consideró los costos referenciales del agregado en el mercado y el valor actual neto igual a cero que es el punto donde se empieza a hacer rentable la alternativa.

- También se constató que la alternativa 1 se hace factible con 140 días (7 meses) de trabajo al año, y con 84 días (4 meses) de trabajo para la alternativa 4, considerando que en un día de trabajo se obtienen 31 m^3 de agregados en la Alternativa 1 y 44 m^3 de agregados en la Alternativa 4.

- El análisis de sensibilidad VAN vs. Producción indicó que la alternativa 4 presenta una mejor recuperación de la inversión a diferencia de la alternativa 1.

9. RECOMENDACIONES

Agregados.

- El agregado del río Jilusaya, debe previamente clasificarse y lavarse adecuadamente para la elaboración de hormigones.

- Es imprescindible realizar periódicamente los estudios físico - mecánicos, químicos y petrográficos para le evaluación de un banco de explotación de agregados.

- Se recomienda la utilización del agregado fino para elementos de poca altura, vale decir, para estructuras donde no sea necesario tener mucha plasticidad debido a que los resultados lo categorizaron como una arena gruesa.

- Para la eliminación de partículas planas y alargadas se recomienda la utilización de un proceso secundario de chancado con chancadoras de impacto, de bolas o con chancadoras cónicas.

Hormigón.

- Se recomienda el uso del agregado del lecho del río Jilusaya como material constituyente del hormigón estructural, en elementos estructurales de edificaciones y/o cualquier obra civil que requiera una resistencia media a la compresión de 30 MPa equivalente a un hormigón H-27 y un asentamiento de 6 a 8 cm.

- A futuro, se recomienda verificar y analizar las características de retracción y fluencia del hormigón y su influencia en los elementos estructurales.

- Se recomienda estudiar hormigones con el uso de aditivos y adiciones en cuanto a su resistencia y durabilidad.

Planta de Agregado

- Se recomienda implementar una planta procesadora de agregados para darle un adecuado tratamiento al material arrastrado por el río Jilusaya. La planta con un proceso simple de explotación (lavado del material) generaría un volumen mensual de 19 m^3 de agregado fino y grueso e implementando un proceso de chancado y clasificado, incrementaría la producción en un 41.4% alcanzando un volumen mensual de 875 m^3.

- Es recomendable la operación mecanizada de la planta, en caso de excedentes que no pueda emplear

el IEM la Facultad de Ingeniería podría emplear los agregados en las obras civiles que encara.

- Los buzones han sido dimensionados para un día de trabajo, por lo tanto, se debe retirar el material al final de cada jornada a las áreas dispuestas dentro de la planta para su acopio. Si el material excede los espacios destinados, se deberá tener otros espacios dentro del campus universitario.

- Se recomienda realizar un estudio de decantación a detalle del agua que circula por el lecho del río, ya que éste es un elemento vital para el lavado del agregado.

- Se recomienda buscar alternativas de fuentes de agua para el uso en las piscinas de recirculación.

- En etapa de producción se recomienda ajustar la producción anual de la planta de agregados con un estudio detallado de arrastre de sedimentos.

- Se recomienda producir 8.2 t/hr para que la planta tenga un ritmo de trabajo tal que permita la retribución de la inversión. Por otro lado, no se debe exceder las 15 t/hr debido a la máxima capacidad de la planta.

- Las características del agregado obtenido posibilitarían su uso en concreto asfáltico (particularmente con las alternativas 3 y 4), por tanto, se recomienda ampliar la investigación para este fin.

10. COSTO DE LA INVESTIGACIÓN

El costo total de la investigación asciende Aproximadamente a 91000.00 Bs ($US 13000.00), que corresponde al 100% de contraparte por parte del Instituto de Ensayo de Materiales de la Universidad Mayor de San Andrés (ensayos y procedimientos de laboratorio).

11. BIBLIOGRAFÍA

[1] **Cerruto Anibarro Fernando M.**, "Guía de ensayos (Agregados - Hormigón)". Segunda edición, La Paz - 2009.

[2] **Fernandez Canovas Manuel**, "Hormigón". Editorial Rugarte, Madrid - 1996, 2000.

[3] **Cerruto Anibarro Fernando M.**, "Introducción al diseño de mezclas de hormigón". Séptima edición, La Paz - 2015.

[4] **Neville Adam M.**, "Tecnología del Concreto". IMCYC, A.C. - Tomo 1 y 2 - 1980.

[5] **Cerruto Anibarro Fernando M.**, "Guía de ensayos (Agregados - Hormigón)". Segunda edición, La Paz - 2009.

[6] **ACI**, "Práctica recomendable para Dosificar Concreto Normal y Pesado (ACI 211.1-74)". Instituto Mexicano del cemento y concreto, A.C.

[7] **ASTM**, "Anual Book of ASTM Standards section 4 - volume 04.02". Concrete and Aggregates - 2004.

[8] **Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego** "Guía Técnica para el aprovechamiento de Áridos en cauces de ríos y Afluentes" 2010.

[9] **Reglamento Ley N°3425** "Aprovechamiento de Áridos y Agregados" 2009

[10] **Ministerio de Urbanismo y Vivienda** "Norma Boliviana del Hormigón Armado CBH-87" Editorial Neografis, SRL, 1987.

[11] **Waddell Jhoseph J. Dobrowolski Joshep A**. "Manual de la Construcción con Concreto - Tomo II" 3° Edición, México 1997.

[12] **Proyecto de Grado:** Dorado A. Paulino, Torrez L. Adan, Cerruto A. Fernando - "Implementación de una planta procesadora de agregados en los predios del campus universitario de Cota Cota" - IEM, UMSA.

[13] **Proyecto de Grado**: Brañez Peña Miguel A., Cerruto A. Fernando - "Influencia de las partículas planas y alargadas del agregado grueso relación 1:3 en hormigones preparados con cemento portland con adición de puzolana tipo IP-30"- IEM, UMSA.

[14] Proyecto de Grado: Mendoza Gutierrez, Grover, Cerruto A., Fernando- "Influencia en la compresión, tracción y flexión de las partículas planas y alargadas del agregado grueso con relación 1:5 en hormigones preparados con cemento portland con adición de puzolana tipo IP-30" - IEM, UMSA.

[15] Rios Quispe, Rolando "Caracterización hidrológica de los caudales de crecida en la cuenca del río Jilusaya"

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE PROPIEDADES DE HORMIGONES ELABORADOS CON 4 FUENTES DE AGUA (POTABLE Y NO POTABLES)DISPONIBLES EN LA ZONA SUR DE LA CIUDAD DE LA PAZ

Fernando M. Cerruto Anibarro
fcerruto@umsa.bo

Ma. del Carmen Cenzano Serrano
cdeuer@yahoo.com

RESUMEN:

La investigación muestra propiedades en estado fresco y endurecido determinadas a lo largo del tiempo en hormigones preparados contres dosificaciones de referencia, en las que, la única variable circunstancial fue la procedencia del agua. En las mezclas se emplearon 4 fuentes de agua(una de la red pública-EPSAS y tres vertientes ubicadas en las zonas de Cota Cota, Collpajahuira y Amor de Dios de la ciudad de La Paz). En total fueron elaboradas 19 revolturas de hormigón y fueron ensayadas 152 probetas cilíndricas a las edades de 7, 28, 91 y 210 días.

Palabras clave: *Cemento, hormigón, resistencia a compresión, rendimiento.*

ABSTRACT:

The research shows properties in the fresh and hardened state determined over time in concretes prepared with three reference dosages, in which the only circumstantial variable was the origin of the water. In the mixtures, 4 water sources were used (one from the public network-EPSAS and three springs located in the Cota Cota, Collpajahuira and Amor de Dios areas of the city of La Paz). In total, 19 concrete revolts were made and 152 cylindrical specimens were tested at the ages of 7, 28, 91 and 210 days.

Keywords: *Cement, concrete, compression resistance, yield*

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

La carencia de agua potable en la ciudad de La Paz a finales de la gestión 2016 evidenció la necesidad de buscar fuentes alternativas para su empleo en el rubro de la construcción. Debido a esa problemática se han formulado una serie de iniciativas para el uso de agua no potable en la elaboración de hormigones, dado que, reducir los procesos constructivos es inviable.

Para precautelar el recurso agua (potable), la tendencia o posible solución sería:

- Utilizar AGUAS NO POTABLES para la preparación de hormigones,
- Reutilizar el agua de curado y de lavado,

En esta investigación realizada en 2018, se elaboraron diversos hormigones con agua potable y no potable para evaluar efectos en la resistencia del hormigón (Hº).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERAL

Determinar y comparar propiedades en estado fresco y endurecido de hormigones elaborados con agua potable y no potable, para así, evaluar la pertinencia

del uso de agua no potable en la preparación de mezclas de hormigón.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las aguas no potables mediante ensayos químicos,
- Elaborarhormigones utilizando aguas no potables y agua potable,
- Determinar propiedades en estado frescoy en estado endurecido del Hº,
- Elaborar graficas de comportamiento Edad vs Resistencia a compresión,

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

Elaboración de hormigones con los siguientes alcances y limitaciones

- Dosificaciones: 3 consumos de cemento,
- Revolturas: 2 revolturas por cada dosificación, es decir, 1 con agua potable y 1 con agua en estudio (6 en total),
- Propiedades en estado fresco del Hº: asentamiento, peso unitario y contenido de aire,
- Propiedades en estado endurecido del Hº: geometría, peso y resistencia a compresión de probetas cilíndricas,
- Probetas: 8 probetas cilíndricas por revoltura (144 válidas),
- Edades de ensayo a compresión: *7, 28, 91 y 210[días],*
- Grava: De chancadora, *TMN 1/4",*
- Arena: De rio, *TMN Nº 4,*
- Cemento: 1fuente*Tipo IP30,*
- Agua: 1 potable y 3 vertientes
- Asentamiento: Estimado de *6 ± 1 [cm],*
- Emplazamiento: Laboratorios del IEM en el campus universitario de Cota Cota.

2. DESARROLLO

2.1. MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales fueron caracterizados antes de ser utilizados en las diferentes revolturas de Hº.

2.1.1. CEMENTO

Los valores del peso específico y del peso de cada bolsa empleada en la Investigación se muestran en la Tabla 1.

2.1.2. AGREGADOS

Un resumen de las propiedades se muestra en la Tabla 2.

2.1.3.AGUA

El agua potable que procede de la red pública de la zona sur de La Paz (amasado, curado y lavado) cumple con la NB 512. La procedencia de las aguas no potables (amasado) y sus propiedades químicas se muestran en las Tablas 2 a 4.

Las vertientes estudiadas se localizan en el Macrodistrito V Sur de la ciudad de La Paz. Los sectores en los cuales se puede realizar la toma de aguas y el estado actual se muestran en las Fotografías 1 a 3.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL CEMENTO				
Pe	*Cemento*	*Peso bolsa, [kg]*		
2.873	*Tipo IP30*	*1*	*2*	*3*
	Muestreo: Julio de 2018	*50.550*	*50.715*	*50.875*
	Promedio	*50.713*		

Tabla 1. *Propiedades físicas del cemento*

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES				
PE	MATERIAL	ABSORCIÓN [%]	PUc [kg/m^3]	PUs [kg/m^3]
1.000	*Agua*			
2.579	*Grava*	*2.557*	*1711*	*1583*
2.537	*Arena*	*2.659*	*1806*	*1597*

Tabla 2. *Propiedades físicas de los materiales*

FUENTE DE AGUAS NO POTABLES- VERTIENTES *FUENTE: SECRETARIA MUNICIPAL DE GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS						
Nº	PROCEDENCIA	UBICACIÓN		*Q, [L/s]	*Q, [L/d]	MUESTREO
1	Cota Cota	Campus Universitario UMSA (calle 27)	https://goo.gl/maps/SKivrz9yhCpzozEq6	0.2	17280	13-jun-2018
2	Collpajahuira	Debajo del Puente Esperanza	https://goo.gl/maps/X5DTRF9b7oURMqGW6	1.1	95040	18-jun-2018
3	Amor de Dios	Av. Hernán Siles Zuazo	https://goo.gl/maps/6cAgX1yJSmpJK9cP6	Tanque> 90000		11-jul-2018

***Tabla 3**. Fuente de aguas no potables- Vertientes*
***Fuente:** Secretaria municipal de gestión integral de riesgos* [1]

***Fotografía 1.** Vertiente Cota Cota - Campus universitario UMSA (Calle 27)*

***Fotografía 2**. Vertiente Collpajahuira - Puente Esperanz*

[1] Unidad técnica dependiente del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (https://www.lapaz.bo/gobierno/smgir/)

Fotografía 3. *Vertiente Amor de Dios - Av. Hernán Siles Zuazo*

PARÁMETRO	1 COTA COTA	2 COLLPAJAHUIRA	3 AMOR DE DIOS	VALOR LÍMITE, CBH-87
Exponente de hidrógeno pH	8.18	7.45	7.89	≥ 5
Sustancias disueltas totales, [g/L]	0.17	0.68	1.00	≤ 15 [g/L]
Contenido en sulfatos expresados en ión, [g/L]	0.10	0.59	0.08	≤ 1 [g/L]
Contenido en ion cloro Cloro, [g/L]	0.03	0.03	0.02	≤ 1 [g/L] para HºPº /≤ 6 [g/L] para HºAº, en masa
Sustancias orgánicas solubles en éter, [g/L]	13.20	13.20	12.00	≤ 15 [g/L]
Hidratos de carbono	0.00	0.00	0.00	0

Tabla 4. *Propiedades químicas del agua no potable*

2.2. DOSIFICACIONES

Las dosificaciones de referencia(base de datos del Área de Hormigones - IEM) para cada amasadase muestran en la Tabla 5.

Luego de preparadas las revolturas, en gabinete se calculó la dosificación realmente empleada (DRE) (Cerruto 2015) de cada una de ellas, como se aprecia en las Tablas 6 a 8.

NOTA: El cálculo de la DRE permite verificar que la sumatoria de volúmenes absolutos de los materiales introducidos en la hormigonera (agua, cemento, grava, arena y aire atrapado) corresponda a 1.000 [m^3].

3. RESULTADOS

3.1. HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

Las propiedades más importantes del hormigón en estado fresco obtenidas en laboratorio fueron el asentamiento medido en el cono de Abrams (ASTM C143), el peso unitario, rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón fresco (ASTM C 138).

NOTA: Los cálculos de cada dosificación se realizaron mediante el método de la ACI 211.1

MATERIALES	DOSIFICACIÓN 1		DOSIFICACIÓN 2		DOSIFICACIÓN 3	
	PESO [Kg/m^3]	VOL. ABSOLUTO [m^3]	PESO [Kg/m^3]	VOL. ABSOLUTO [m^3]	PESO [Kg/m^3]	VOL. ABSOLUTO [m^3]
Agua	207	0.207	205	0.205	236	0.236
Cemento	388	0.130	476	0.159	546	0.183
Grava	858	0.327	798	0.304	724	0.276
Arena	815	0.322	743	0.293	678	0.268
Aire	—	0.015	—	0.039	—	0.037
TOTAL	**2268**	**1.000**	**2221**	**1.000**	**2185**	**1.000**
Asentamiento	6 ± 1 [cm]		6 ± 1 [cm]		6 ± 1 [cm]	

Tabla 5. *Dosificación Base de referencia - Cantidad de Materiales por 1.0 [m^3] de hormigón*

	Agua 1		Agua 2		Agua 3	
	1 Potable	1 Cota Cota	2 Potable	2 Collpajahuira	3 Potable	3 Amor de Dios
Agua, [Kg/m^3]	207	206	206	209	205	206
Cemento, [Kg/m^3]	389	386	387	388	385	386
Grava, [Kg/m^3]	861	855	856	861	852	855
Arena, [Kg/m^3]	817	811	814	813	811	814
Peso materiales para 1 [m^3], [Kg/m^3]	**2273**	**2258**	**2263**	**2271**	**2253**	**2261**
Aire atrapado, [%]	0.193%	0.843%	0.643%	0.175%	1.093%	0.705%
Asentamiento, [cm]	6.5	9.5	7.0	7.0	7.5	6.0
PUHºfresco, [kg/m^3]	2317	2302	2307	2315	2296	2305A

***Tabla 6**. Dosificación 1 Realmente Empleada (DRE 1)-Cantidad de Materiales por 1.0[m^3] de hormigón*

	Agua 1		Agua 2		Agua 3	
	1 Potable	1 Cota Cota	2 Potable	2 Collpajahuira	3 Potable	3 Amor de Dios
Agua, [Kg/m^3]	207	207	207	210	207	206
Cemento, [Kg/m^3]	482	482	481	484	480	480
Grava, [Kg/m^3]	809	809	807	814	806	805
Arena, [Kg/m^3]	752	753	751	754	750	749
Peso materiales para 1 [m^3], [Kg/m^3]	**2250**	**2251**	**2246**	**2261**	**2243**	**2239**
Aire atrapado, [%]	1.494%	1.451%	1.664%	0.935%	1.833%	1.966%
Asentamiento, [cm]	6.5	5.0	6.5	5.0	5.0	6.0
PUHºfresco, [kg/m^3]	2291	2292	2291	2302	2283	2280

***Tabla 7.** Dosificación 2 Realmente Empleada (DRE 2) - Cantidad de Materiales por 1.0 [m^3] de hormigón*

	Agua 1		Agua 2		Agua 3	
	1 Potable	1 Cota Cota	2 Potable	2 Collpajahuira	3 Potable	3 Amor de Dios
Agua, [Kg/m^3]	234	236	241	250	248	249
Cemento, [Kg/m^3]	553	556	552	552	552	553
Grava, [Kg/m^3]	738	742	730	724	722	723
Arena, [Kg/m^3]	687	690	686	683	685	686
Peso materiales para 1 [m^3], [Kg/m^3]	**2213**	**2224**	**2210**	**2209**	**2206**	**2211**
Aire atrapado, [%]	1.602%	1.119%	1.296%	0.783%	0.990%	0.773%
Asentamiento, [cm]	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
PUHºfresco, [kg/m^3]	2250	2261	2247	2246	2243	2248

***Tabla 8.** Dosificación 3 Realmente Empleada (DRE 3) - Cantidad de Materiales por 1.0 [m^3] de hormigón*

El asentamiento fluctúa entre *6.0 [cm]* y *9.5 [cm]* como se aprecia en las Tablas 6 a 8.

El contenido de aire atrapado fluctúa entre *0.193 [%]* y *1.966 [%]* como se aprecia en las Tablas 6 a 8.

El peso unitario del hormigón fresco se mantiene en un rango entre *2243 [kg/m^3]* y *2317 [kg/m^3]* como se aprecia en las Tablas 6 a 8.

NOTA: Los procesos de amasado con hormigoneras pequeñas inducen a errores relativamente

elevados, por tanto, es de esperar que existan diferencias entre la Dosificación aprobada (Tabla 5) y aquella que es ejecutada finalmente (Tablas 6 a 8), sin embargo, esa variación debiera ser aceptable, de no ser así, deben implementarse las medidas correctivas pertinentes.

Las DRE (Tablas 6 a 8) evidencian que pueden existir diferencias aceptables entre lo planificado y lo ejecutado.

No se realizó ninguna alteración u optimización de cantidades de materiales ni de propiedades evaluadas por la procedencia del agua en cada dosificación.

3.2. HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

Las propiedades determinadas fueron la resistencia a compresión y el peso unitario (ASTM C39).

Las curvas de comportamiento de la resistencia media a compresión con la edad por tipo de agua empleada y para las tres dosificacionesse aprecian en las Figuras 1 a 3.

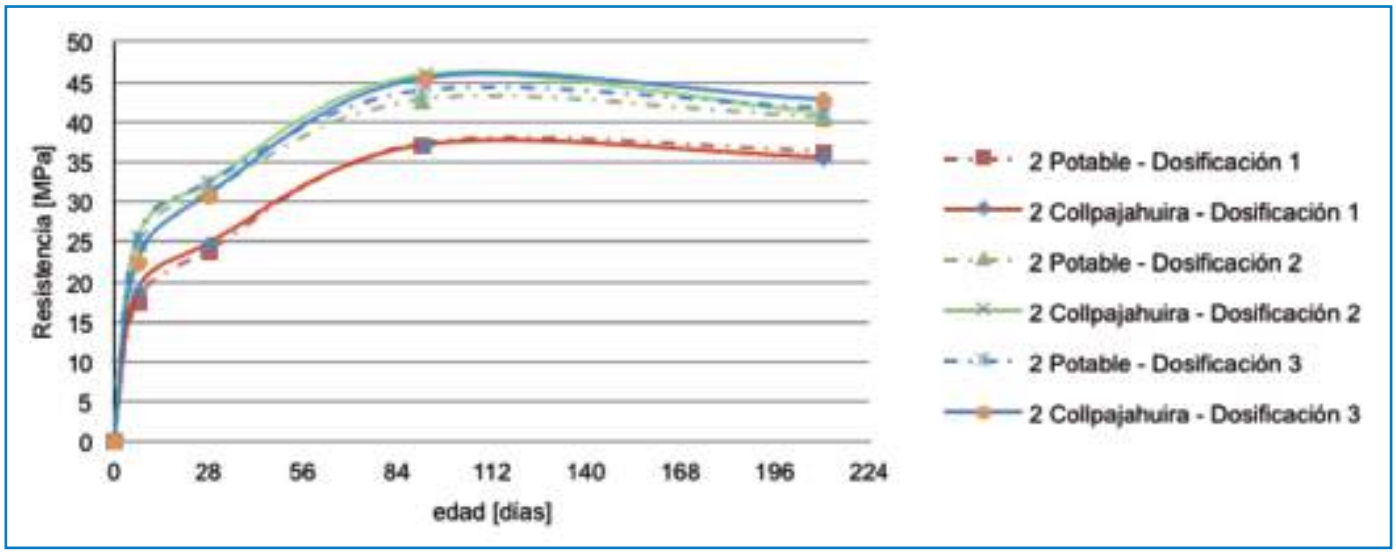


***Figura 1**. Resistencia media a compresión - Hormigones con agua potable y de vertiente Cota Cota*

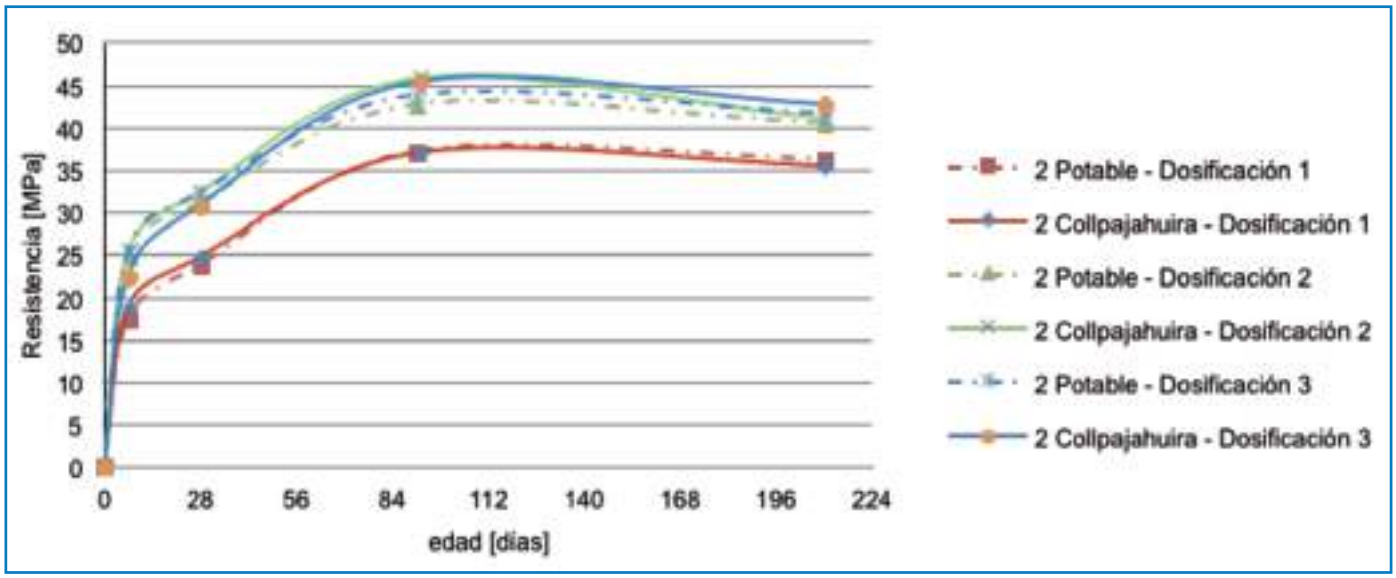


***Figura 2**. Resistencia media a compresión - Hormigones con agua potable y de vertiente Collpajahuira*

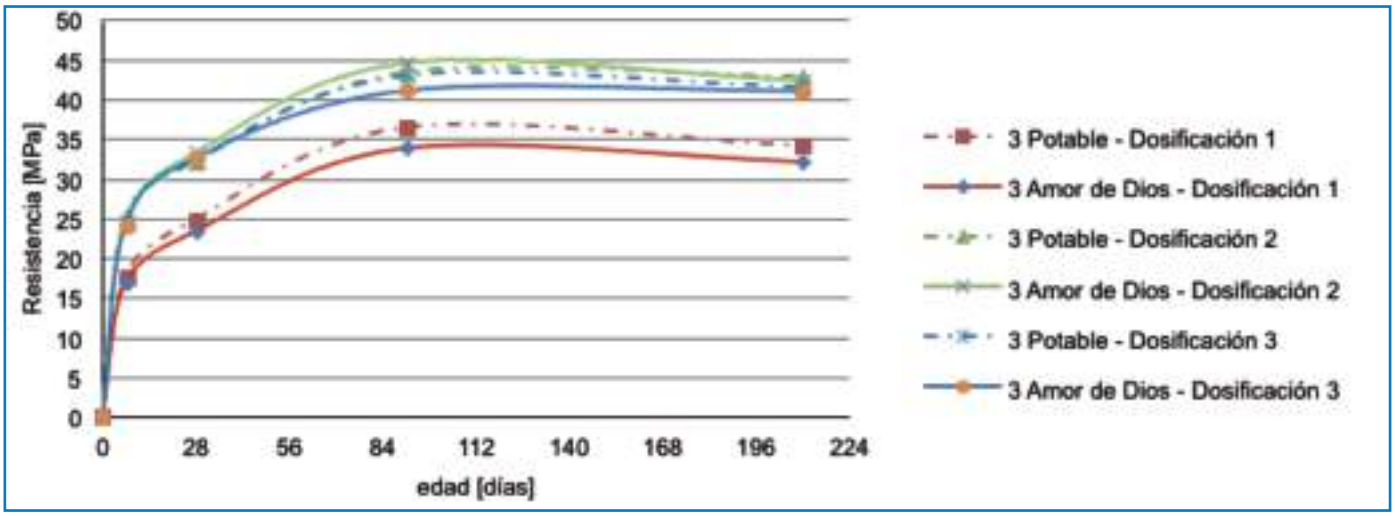
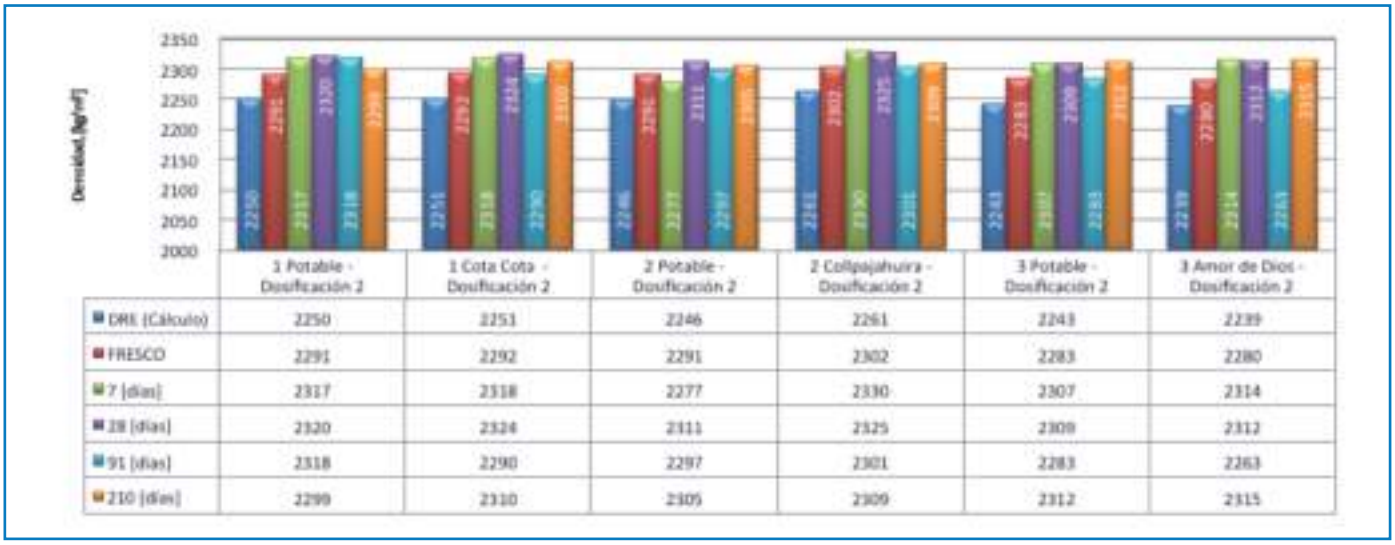


Figura 3. *Resistencia media a compresión - Hormigones con agua potable y de vertiente Amor de Dios*

Los valores de densidad en el cálculo teórico, estado fresco y a lo largo del tiempo (probetas no drenadas) son:

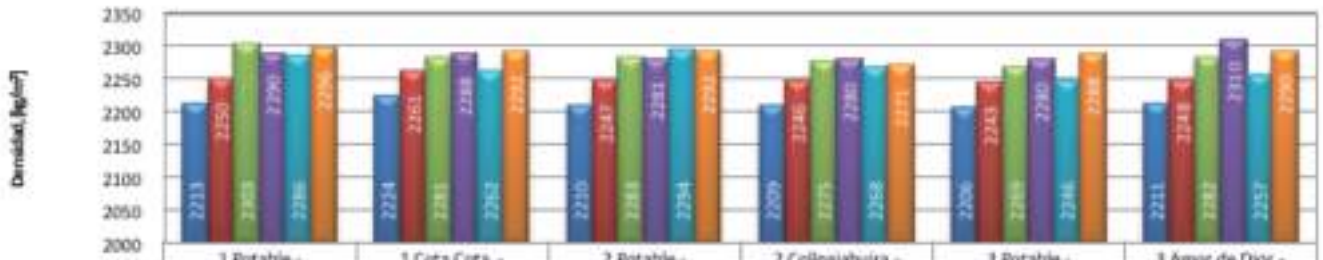


	1 Potable - Dosificación 2	1 Cota Cota - Dosificación 2	2 Potable - Dosificación 2	2 Collpajahuira - Dosificación 2	3 Potable - Dosificación 2	3 Amor de Dios - Dosificación 2
DRE (Cálculo)	2250	2251	2246	2261	2243	2239
FRESCO	2291	2292	2291	2302	2283	2280
7 [días]	2317	2318	2277	2330	2307	2314
28 [días]	2320	2324	2311	2325	2309	2312
91 [días]	2318	2290	2297	2301	2283	2263
210 [días]	2299	2310	2305	2309	2312	2315

Figura 4. *Evolución de la densidad - Hº con agua potable y 3 vertientes - Dosificación 1*

	1 Potable - Dosificación 2	1 Cota Cota - Dosificación 2	2 Potable - Dosificación 2	2 Collpajahuira - Dosificación 2	3 Potable - Dosificación 2	3 Amor de Dios - Dosificación 2
DRE (Cálculo)	2250	2251	2246	2261	2243	2239
FRESCO	2291	2292	2291	2302	2283	2280
7 [días]	2317	2318	2277	2330	2307	2314
28 [días]	2320	2324	2311	2325	2309	2312
91 [días]	2318	2290	2297	2301	2283	2263
210 [días]	2299	2310	2305	2309	2312	2315

Figura 5. *Evolución de la densidad - Hº con agua potable y 3 vertientes - Dosificación 2*



	1 Potable - Dosificación 3	1 Cota Cota - Dosificación 3	2 Potable - Dosificación 3	2 Collpajahuira - Dosificación 3	3 Potable - Dosificación 3	3 Amor de Dios - Dosificación 3
DRE (Cálculo)	2213	2224	2210	2209	2206	2211
FRESCO	2250	2261	2247	2246	2243	2248
7 [días]	2303	2281	2283	2275	2269	2282
28 [días]	2290	2288	2281	2280	2280	2310
91 [días]	2286	2262	2294	2268	2246	2257
210 [días]	2296	2292	2292	2271	2288	2290

Figura 6. *Evolución de la densidad - Hº con agua potable y 3 vertientes - Dosificación 3*

Las Figuras 4 a 6 muestran los valores de peso unitario compactado del hormigón endurecido (PUc) y su evolución con la edad, también se incluyen valores de cálculo (DRE) y en estado fresco. Los valores obtenidos corresponden a hormigones de densidad normal.

Las Figuras 7 a 9 muestran el incremento porcentual de la resistencia a compresión obtenida con agua de vertiente respecto del agua potable.

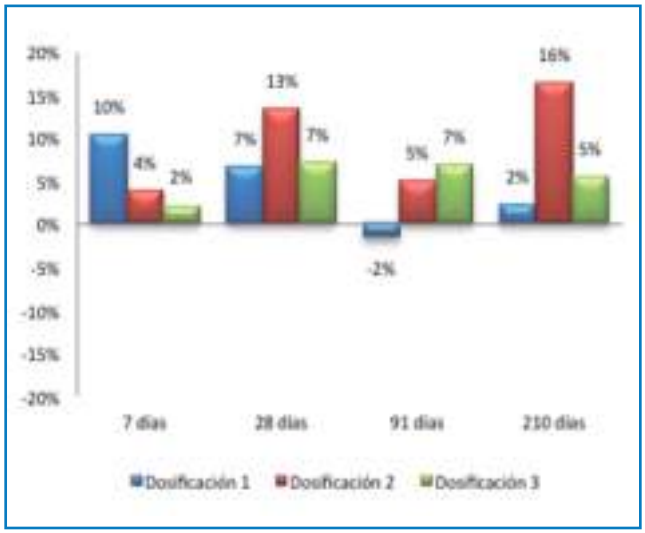


Figura 7. *Incremento de resistencia media - Vertiente Cota Cota respecto al agua potable*

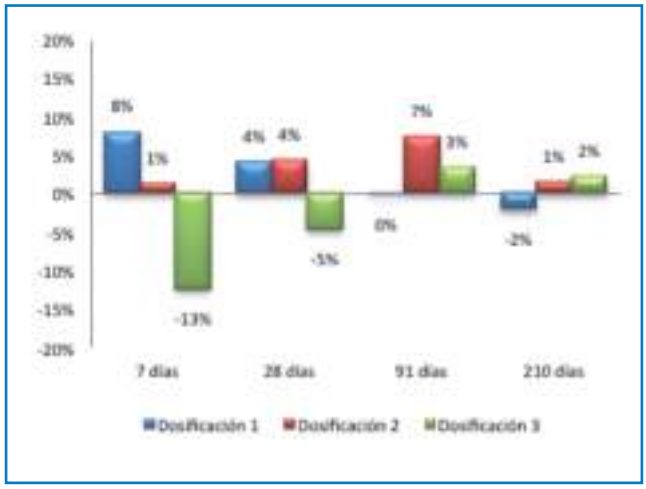


Figura 8. *Incremento de resistencia media- Vertiente Collpajahuira respecto al agua potable*

Los incrementos de resistencia obtenidos con agua de Cota Cota (Figura 7) deben tomarse con precaución, puesto que, a priori podría asumirse que corresponde la optimización del consumo de cemento, sin embargo, al no contar con información técnica sobre el tiempo de fraguado, exudación y durabilidad de los hormigones no es aconsejable realizar la reducción del consumo de cemento (salvo que se investigue adecuadamente el efecto).

Con agua de Collpajahuira (Figura 8), los decrementos en la Dosificación 3 se producen a edades tempranas y se reducen a edades tardías.

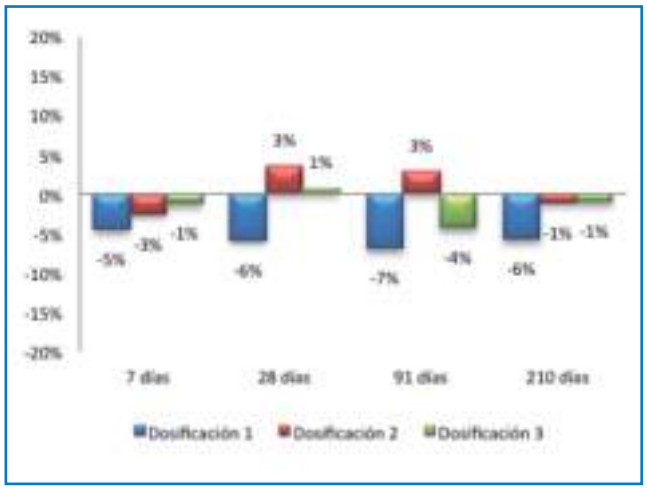


Figura 9. *Incremento de resistencia media - Vertiente Amor de Dios respecto al agua potable*

Los decrementos más evidentes (Figura 9) se verifican en la Dosificación 1 con agua Amor de Dios (- *6 [%]* en promedio) lo cual se revierte con mayores consumos de cemento.

En general se evidencia que el uso de las aguas de vertiente (no potables) permite obtener hormigones pon propiedades equivalentes (estadísticamente) a aquellos preparados con agua potable.

Las Tablas 9 a 11 muestran la resistencia característica estimada ($f_{ck,est}$) lograda con los diferentes hormigones, en los que, se emplearon las aguas en estudio.

NOTA: Para fines de aplicación del criterio Aceptación / Rechazo, debe emplearse la *Resistencia característica estimada* ($f_{ck,est}$) y no así la *Resistencia media a compresión* (f_{cm}).

	1 Potable	1 Cota Cota	2 Potable	2 Collpajahuira	3 Potable	3 Amor de Dios	Hormigón tipo (probable)
$f_{ck,est}$, [MPa]	19.8	21.4	20.7	21.5	21.9	20.1	**H 21**

Tabla 9. *Resistencia característica estimada -Dosificación 1*

	1 Potable	1 Cota Cota	2 Potable	2 Collpajahuira	3 Potable	3 Amor de Dios	Hormigón tipo (probable)
$f_{ck,est}$, [MPa]	24.5	30.0	26.3	28.0	28.4	28.2	**H 25**

Tabla 10. *Resistencia característica estimada -Dosificación 2*

	1 Potable	1 Cota Cota	2 Potable	2 Collpajahuira	3 Potable	3 Amor de Dios	Hormigón tipo (probable)
$f_{ck,est}$, [MPa]	27.3	29.5	27.5	26.7	27.8	28.7	**H 29**

Tabla 11. *Resistencia característica estimada -Dosificación 3*

Respecto a los costos del empleo de agua[2] no potable, los mismos, dependen de la distancia de transporte, sin embargo, el uso de agua no potable contribuye con la ejecución de proyectos amigables con el medio ambiente y a evitar probables crisis de agua potable.

4. CONCLUSIONES

- La investigación logró cumplir exitosamente todos los objetivos planteados.
- Las propiedades en estado fresco del hormigón como ser el asentamiento, porcentaje de aire atrapado, y densidad son equivalentes para cada dosificación e independientes de la fuente de agua que se emplea.
- Las propiedades en estado endurecido del hormigón como la resistencia a compresión y densidad son equivalentes para cada dosificación e independientes de la fuente de agua que se emplea.
- Las aguas no potables cumplen los requisitos químicos para su empleo en hormigones, por tanto, según la CBH-87 se establece que se pueden lograr hormigones con propiedades equivalentes a aquellos preparados con agua potable,
- Con agua de la vertiente Collpajahuira en la Dosificación 3 se evidencian pérdidas de resistencia a edades tempranas que se revierten a edades tardías,

[2] Al momento, no existe una tarifa conocida oficialmente para el uso de las aguas de vertientes.

- Con agua de la vertiente Amor de Dios en la Dosificación 1 se evidencian pérdidas de resistencia en todas edades de ensayo,

- Las dosificaciones realmente empleadas (DRE) reflejan los valores verdaderos con los cuales se obtuvieron las propiedades en estado fresco y endurecido.

- En consecuencia, se establece que las aguas no potables estudiadas pueden emplearse en la preparación de hormigones, sin embargo, debe estudiarse adecuadamente el tipo de aplicación de cada mezcla.

5. RECOMENDACIONES

- Las dosificaciones planteadas en esta investigación no deben ser utilizadas directamente en cualquier obra. El constructor debe solicitar expresamente dosificaciones para cada caso en particular,

- Sobre la base de la Resistencia a compresión es recomendable el uso de aguas no potables en la preparación de hormigones, sin embargo, aún se desconoce el efecto en la durabilidad de dichos hormigones,

- Previo al uso de aguas no potables y con cierta regularidad se recomienda la preparación de revolturas de prueba con hormigones y/o morteros en condiciones de obra,

- La dosificación a emplearse en obra (consumo de cemento) deberá considerar posibles pérdidas de resistencia en función a la fuente de agua no potable,

- Con aguas no potables deben evaluarse adecuadamente los plazos de desencofrado,

- El curado debe realizarse por un periodo no menor de 10 días para cementos del Tipo IP,

- Otras fuentes no evaluadas de agua no potable podrían ser aplicables para la producción de hormigones, sin embargo, se recomienda que el constructor realice mínimamente los ensayos del agua (Tabla 4)

- Si las aguas de vertientes fueran a ser usadas masivamente en la construcción, las autoridades competentes debieran planificar la construcción de tanques elevados para acumularagua que permita un flujo constante durante la descarga o evitar contaminaciones y esperas largas (u otra obra pertinente).

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con recursos del Instituto de Ensayo de Materiales. Se pondera la participación de los técnicos de laboratorio Nicolas Condori Ulo, Vidal Elias Cachi y de los estudiantes Elio Coyo Quispe (2018) y Amalia X. Oblitas Villarroel (2018)

7. REFERENCIAS

[1] IEM. 2019. "Verificación de propiedades de hormigones elaborados con 4 fuentes de agua (potable y no potables) disponibles en la zona sur de la ciudad de La Paz", La Paz, UMSA.

[2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 2009. ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009), United States.

[3] CERRUTO F. 2015. "Introducción al diseño de mezclas de hormigón", 7ª Edición, La Paz.

[4] IBNORCA.1986 - CBH-87 Norma Boliviana de Hormigón Armado.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CEMENTOS DISPONIBLES EN LA CIUDAD DE LA PAZ Y PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE HORMIGONES ELABORADOS CON LOS CEMENTOS EN ESTUDIO (6 FUENTES)

Fernando M. Cerruto Anibarro
fcerruto@umsa.bo

Verónica Gallardo Tapia
vgallardo@umsa.bo

Jorge Echazú Cortes
jechazuco@gmail.com

RESUMEN:

La investigación muestra una evaluación comparativa de la resistencia a compresión de cementos muestreados entre julio y agosto de 2018 (6 fuentes), así como, la variación del peso unitario y de la resistencia a compresión en función de la edad de los hormigones preparados mediante una dosificación de referencia, en la que, la única variable es el cemento procedente de diferente fuente y que esté disponible en la ciudad de La Paz.

Palabras clave: *Cemento, hormigón, resistencia a compresión del cemento, resistencia a compresión del hormigón*

ABSTRACT:

The following report shows a comparative evaluation of compresive strength for six different blended cements, sampled between july and august 2018 in La Paz city, as well as the variation of unit weigth and compresive strength of concrete at different ages, prepared with a reference dossage where the only variable is the origen of the cement.

Keywords: *cement, concrete, compresive strength of cement, compresive strength of concrete*

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Las Especificaciones Técnicas y la normativa relativa al Hormigón estructural empleadas en el diseño y construcción estipulan características apropiadas para cementos del ***Tipo I*** [1] , consiguientemente, es de enorme interés contar con información de características determinadas para cementos del ***Tipo IP*** o ***Tipo IF*** accesibles en La Paz.

La disponibilidad y variabilidad de cementos en nuestro medio hace imprescindible el control de calidad ejecutado por una Institución ajena a los intereses de los fabricantes y que proteja al usuario. La extensa experiencia con que cuenta el Instituto de Ensayo de Materiales en el control de calidad del cemento y del hormigón la habilita para ejercer este derecho en representación del usuario.

Con esta investigación se presentan resultados para que el usuario disponga de información técnica acorde a los cementos que se emplean en la ciudad de La Paz.

La investigación muestra resultados de cementos muestreados entre julio y agosto de 2018.

[1] Prácticamente no disponible en el mercado nacional

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar comparativamente la resistencia a compresión de cementos disponibles en la ciudad de La Paz, así como, las propiedades en estado fresco y endurecido de hormigones preparados con dichos cementos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la resistencia a compresión de muestras de cemento procedentes de 6 fuentes [2] , que sean accesibles en la ciudad de La Paz,
- Elaborar hormigones y determinar sus propiedades en estado fresco y en estado endurecido,
- Elaborar gráficas de comportamiento Edad vs Resistencia a compresión de hormigones preparados con los cementos en estudio.

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

La investigación se enmarcó en los siguientes alcances y limitaciones:

Materiales:

- Cemento: 6 fuentes - *CEMENTO 1 IP30, CEMENTO 3 IP30, CEMENTO 2 IP30, CEMENTO 4 IF30, CEMENTO 5 IP40 y CEMENTO 6 IF40,*
- Grava: *Hampaturi, TMN $^3/_4$",*
- Arena: *Irpavi, TMN Nº 4.*

Las propiedades evaluadas y la normativa aplicada fueron:

Cementos:

Resistencia a compresión - Edades de ensayo a *7 y 28 [días]* (NB 470).

Hormigones:

- Dosificación: Constante para todos los cementos con determinación y registro de propiedades en estado fresco y endurecido (ACI 211.1),
- Asentamiento previsto: *6 ± 1 [cm]* (ASTM C143),
- Peso unitario, rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón fresco (ASTM C 138),
- Resistencia a compresión - Edades de ensayo a *7, 28, 98 y 182 [días]* (ASTM C39).

Emplazamiento:

- Laboratorios del IEM en el campus universitario de Cota Cota.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación fue encarada simultáneamente por las Áreas de Materiales de Construcción y Hormigones del Instituto de Ensayo de Materiales de la UMSA.

2.1. MATERIALES

2.1.1. CEMENTO

La Tabla 1 muestra las resistencias mínimas que deben satisfacer los cementos.

Valores del peso específico, peso y precio de las bolsas de cemento se muestran en la Tabla 2.

La Figura 1 muestra los pesos verificados de las bolsas de cemento, en la que se constata la diferencia respecto al peso nominal indicado en la bolsa.

2.1.2. AGREGADOS

Resumen de las propiedades determinadas se muestra en la Tabla 3.

2.1.3. AGUA

El agua utilizada proviene de la red pública de la zona sur de La Paz (amasado, curado y lavado).

[2] Se asume como fuente: la marca, el tipo, categoría resistente y/o origen del cemento empleado en esta investigación

3. ANÁLISIS RESULTADOS

3.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS CEMENTOS

- Todas las fuentes de cemento cumplieron con el requisito de resistencia a *7 [días]* (ver Figura 2),
- Sólo el *50 [%]* de las fuentes de cemento cumplieron con el requisito de resistencia a *28 [días]* (Figura 2).

	CEMENTO	
	Categoría resistente media, [MPa]	Categoría resistente alta, [MPa]
Resistencia a compresión a 7 [días]	17.0	25.0
Resistencia a compresión a 28 [días]	30.0	40.0

Tabla 1. *Requisitos de resistencia mínima a compresión del cemento según NB470*

	CEMENTO 1 IP30	CEMENTO 2 IP30	CEMENTO 3 IP30	CEMENTO 4 IF30	CEMENTO 5 IP40	CEMENTO 6 IF40
Peso específico	2.873	2.879	2.918	2.987	3.011	3.002
Peso verificado - bolsa de cemento, [kg]	50.875	42.100	49.325	50.550	50.025	50.575
Precio de la Bolsa (Zona sur - La Paz), Bs	58.0	46.0	50.0	52.0	52.0*	54.0

Tabla 2. *Propiedades físicas de los cementos y costo de la bolsa*
*En Cochabamba - Muestra obtenida mediante una solicitud de servicios hacia el Área de Química de Materiales

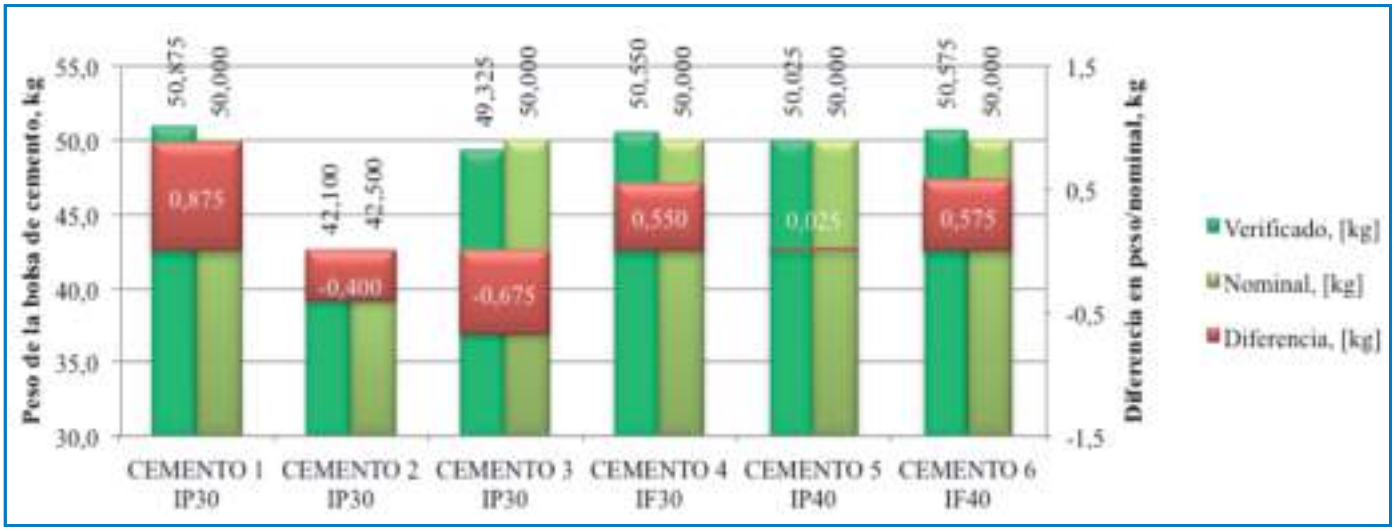


Figura 1. *Peso nominal y peso verificado de cada bolsa de cemento*

PE	MATERIAL	ABSORCIÓN, [%]	PUc, [kg/m^3]	PUs, [kg/m^3]
1.000	Agua			
2.571	Grava	2.636	1652	1583
2.538	Arena	2.434	1731	1468

Tabla 3. *Propiedades físicas del agua y de los agregados*

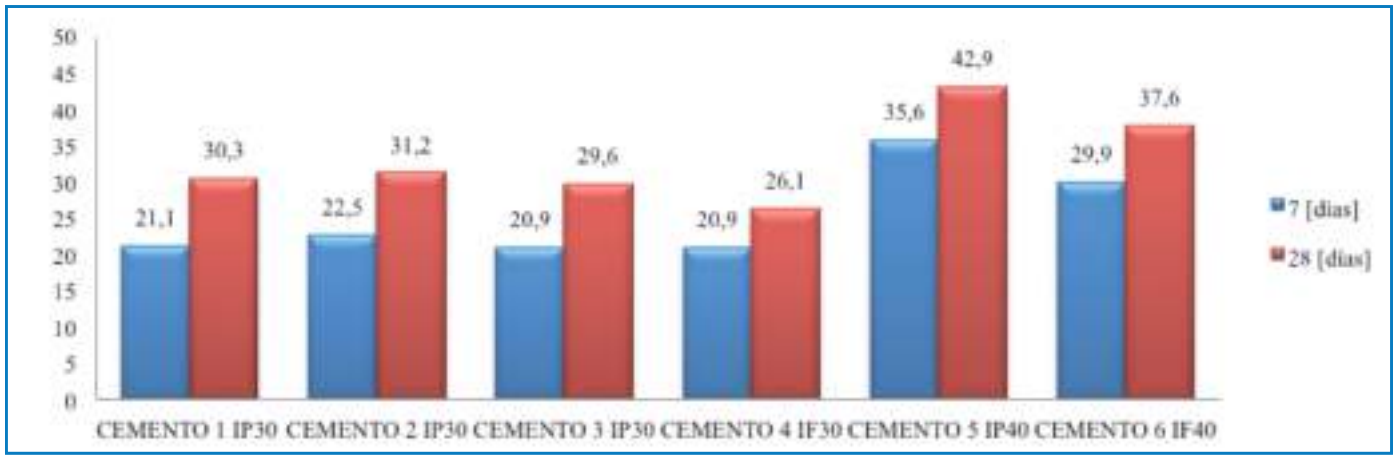


Figura 2. Resistencia a compresión de los cementos (cubos de 5x5x5 [cm^3])

3.2. HORMIGONES

Empleando una dosificación base de referencia (base de datos del Área de Hormigones - IEM) se prepararon hormigones con las 6 fuentes de cemento en estudio.

Luego de preparadas las revolturas, en gabinete se calculó la dosificación realmente empleada (DRE) (Cerruto 2015) de cada una de ellas (Ver Tabla 4).

NOTA: El cálculo de la DRE permite verificar que la sumatoria de volúmenes absolutos de los materiales introducidos en la hormigonera (agua, cemento, grava, arena y aire atrapado) corresponda a *1.000 [m^3]*.

3.2.1. HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

- El asentamiento fluctúa entre *6.0 [cm] y 13.0 [cm]* como se aprecia en la Tabla 5,
- El aire atrapado fluctúa entre *0.759 [%] y 2.674 [%]* como se aprecia en la Tabla 5,
- El peso unitario compactado del hormigón fresco fluctúa entre *2260 [kg/m^3] y 2314 [kg/m^3]* como se aprecia en la Tabla 5.

	CEMENTO 1 IP30	CEMENTO 2 IP30	CEMENTO 3 IP30	CEMENTO 4 IF30	CEMENTO 5 IP40	CEMENTO 6 IF40
Agua, [Kg/m^3]	204	204	203	207	208	207
Cemento, [Kg/m^3]	382	381	379	387	388	386
Grava, [Kg/m^3]	843	841	837	855	857	853
Arena, [Kg/m^3]	805	803	799	816	818	815
TOTAL, [Kg/m^3]	**2234**	**2229**	**2218**	**2265**	**2271**	**2261**

Tabla 4. *Dosificación Realmente Empleada (DRE) - Cantidad de materiales por 1.0 [m^3] de hormigón*

	CEMENTO 1 IP30	CEMENTO 2 IP30	CEMENTO 3 IP30	CEMENTO 4 IF30	CEMENTO 5 IP40	CEMENTO 6 IF40
Aire atrapado, [%]	1.824	2.061	2.674	0.910	0.759	1.189
Asentamiento, [cm]	6.5	8.0	7.0	13.0	6.0	12.0
PUHºfresco, [kg/m^3]	2275	2260	2260	2308	2314	2303

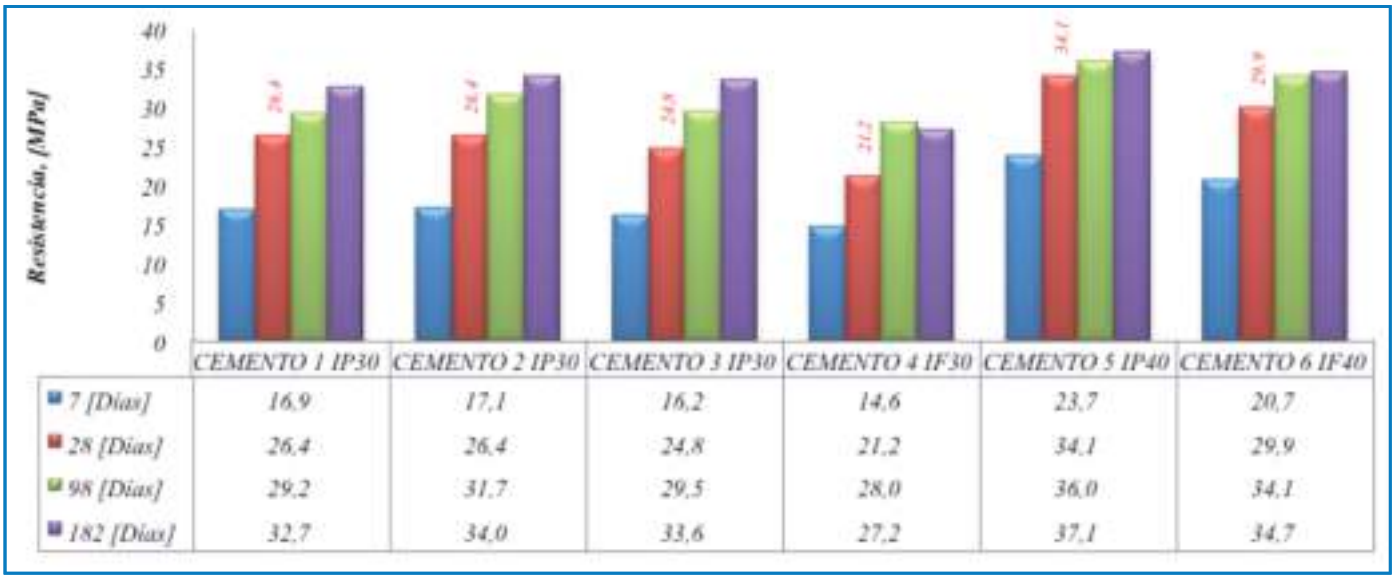
Tabla 5. *Propiedades en estado fresco - Hormigones*

3.2.2. HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

La evolución de la resistencia media a compresión obtenida por cemento se aprecia en la Figura 3.

En la Figura 4 se observan las curvas de comportamiento de la resistencia a compresión en función de la edad (curvas ajustadas mediante ecuaciones de proyección).

- Se ratifica que los cementos de categoría resistente alta ***(Tipo IP40 y Tipo IF40)*** generan resistencias a la compresión más altas, respecto a los cementos de categoría resistente media ***(Tipo IP30 y Tipo IP30).***



	CEMENTO 1 IP30	CEMENTO 2 IP30	CEMENTO 3 IP30	CEMENTO 4 IF30	CEMENTO 5 IP40	CEMENTO 6 IF40
7 [Días]	16,9	17,1	16,2	14,6	23,7	20,7
28 [Días]	26,4	26,4	24,8	21,2	34,1	29,9
98 [Días]	29,2	31,7	29,5	28,0	36,0	34,1
182 [Días]	32,7	34,0	33,6	27,2	37,1	34,7

Figura 3. *Evolución de resistencia media a compresión - Hormigones*

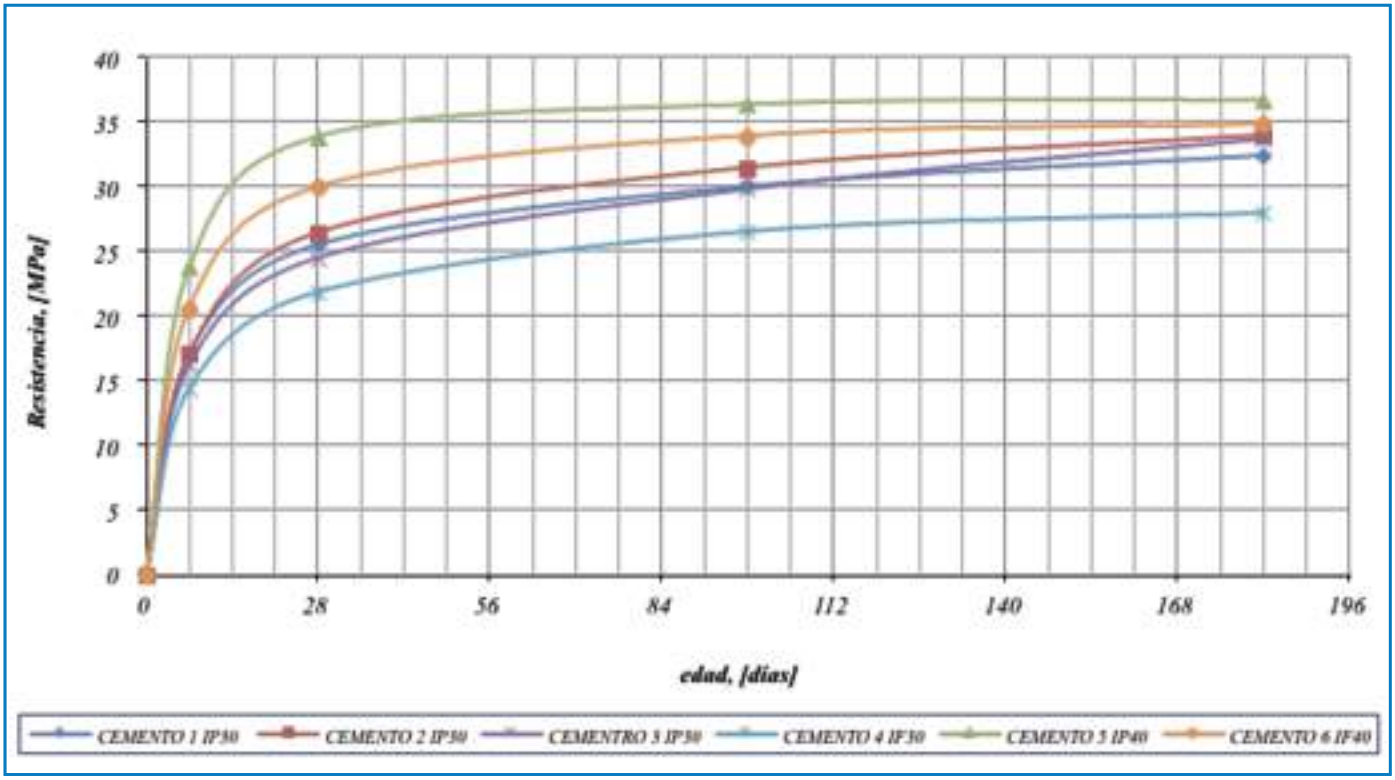
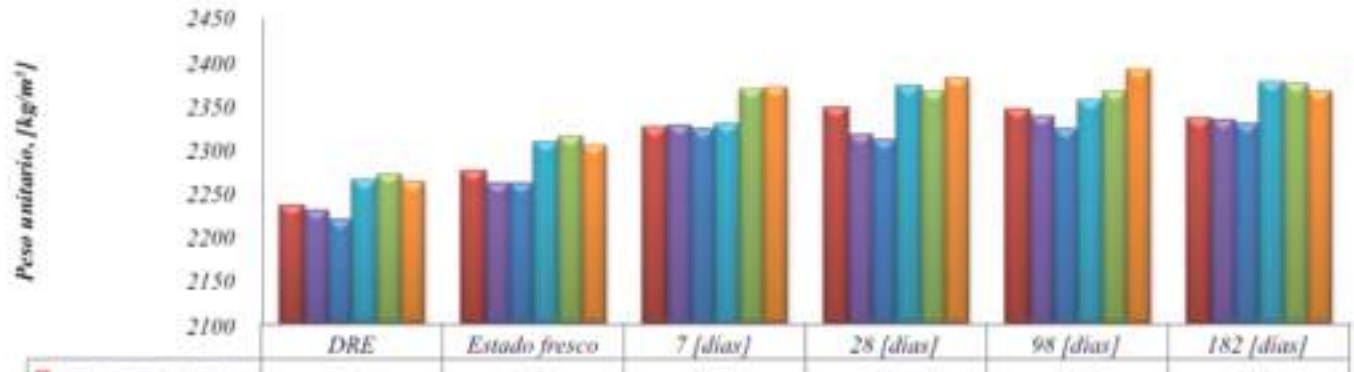


Figura 4. *Resistencia media a compresión de los Hormigones (curva ajustada)*



	DRE	Estado fresco	7 [días]	28 [días]	98 [días]	182 [días]
CEMENTO 1 IP30	2234	2275	2324	2346	2345	2334
CEMENTO 2 IP30	2229	2260	2326	2316	2336	2331
CEMENTO 3 IP30	2218	2260	2322	2309	2322	2328
CEMENTO 4 IF30	2265	2308	2328	2372	2355	2377
CEMENTO 5 IP40	2271	2314	2368	2365	2365	2374
CEMENTO 6 IF40	2261	2303	2370	2380	2391	2366

***Figura 5**. Evolución del peso unitario de los hormigones - Calculado (DRE), estados fresco y endurecido*

En la Figura 5 se aprecian los valores de peso unitario compactado del hormigón endurecido *(PUc)* y su evolución con la edad, en todo caso, corresponden a hormigones de densidad [3] normal. En la Figura 5 se incluyen valores de suma de materiales (DRE - Tabla 4) y peso unitario compactado en estado fresco (Tabla 5).

La Figura 6 muestra el rendimiento por consumo de cemento, es decir, la cantidad requerida de cemento en *[kg]* para obtener *1.0 [MPa]* de resistencia con el hormigón.

Ejemplo: Por cada porción de *15.3 [kg]* de cemento que se añade a la mezcla, en el hormigón se genera *1.0 [MPa]* de resistencia.

- Los cementos más eficientes son los de categoría resistente alta, que requieren menor consumo relativo respecto a aquellos de categoría resistente media.

También se aprecia el rendimiento por resistencia, es decir, la resistencia que debe generar el cemento en *[MPa]* para obtener *1.0 [MPa]* de resistencia en el hormigón.

- En general, la resistencia que adquiere un cemento es proporcional, a la que, se genera en el hormigón que se elabora con dicho cemento.

Ejemplo: Por cada fracción de *1.22 [MPa]* de resistencia que adquiere el cemento, en el hormigón se generan *1.0 [MPa]* de resistencia.

La Tabla 7 muestra la resistencia característica estimada ($f_{ck,est}$) lograda con los diferentes cementos, en general, casi todos los hormigones superan la resistencia prevista [4] (f_{ck} = *21.0 [MPa]*).

- La información mostrada en la Figura 6 y en la Tabla 6 le sirve al constructor para elegir adecuadamente el cemento que empleará en obra.

[3] Se consideran términos equivalentes a la Densidad y al Peso Unitario.

[4] Con cementos del ***Tipo IF***, el asentamiento obtenido fue muy alto, por tanto, las resistencias podrían ser más altas si las dosificaciones fuesen optimizadas. En los criterios de Aceptación/Rechazo el CBH 87 admite que un Hº con f_{ck} = 21.0 [MPa] presente una $f_{ck,est} \geq$ 18.9 [MPa] para aceptarlo, aunque, con penalizaciones.

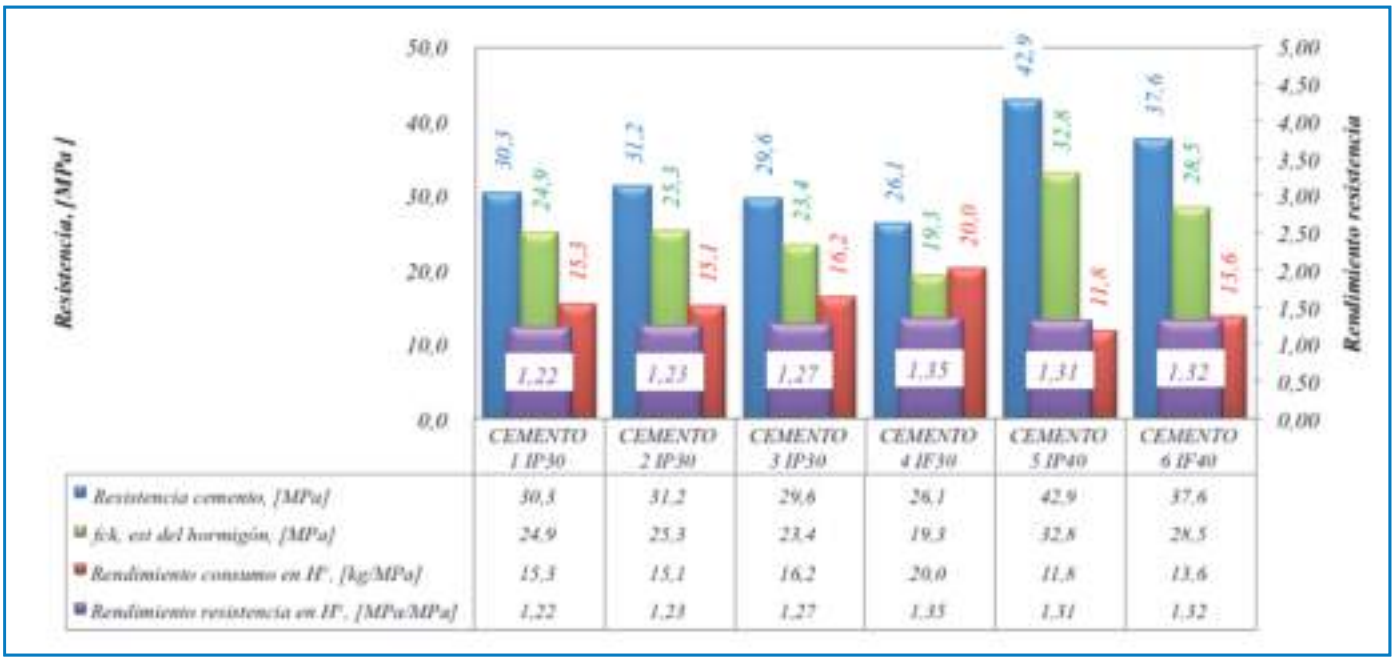


Figura 6. *Resistencia de cada cemento, hormigón y rendimientos por consumo y resistencia*

	CEMENTO 1 IP30	CEMENTO 2 IP30	CEMENTO 3 IP30	CEMENTO 4 IF30	CEMENTO 5 IP40	CEMENTO 6 IF40
fck,est, *[MPa]*	24.9	25.3	23.4	19.3	32.8	28.5

Tabla 6. *Resistencia característica estimada - Cálculo estadístico - Hormigones*

En gestiones pasadas ocurrió en nuestro medio, que ocasionalmente se descartaba el empleo de un cemento del ***Tipo IP40*** porque la bolsa costaba ***Bs 1.0*** más que la del ***Tipo IP30***, sin embargo, debe considerarse, que para un volumen dado, con el cemento del ***Tipo IP40*** se requiere menos cantidad de bolsas (por su rendimiento), lo cual podría generar enormes beneficios técnico-económicos en los proyectos constructivos.

Ejemplo: En la Tabla 2 se aprecia que la diferencia de costos entre una bolsa de cemento del ***Tipo IF40*** y otra del ***Tipo IF30*** es de *Bs 2.0*, sin embargo, en la Figura 6 se evidencia que con el ***Tipo IF30*** por cada *20.0 [kg]* y con el ***Tipo IF40*** por cada *13.6 [kg]* se obtiene un incremento de *1.0 [MPa]* de resistencia a compresión en el hormigón, además, con el ***Tipo IF40*** se obtuvo *47 [%]* de resistencia a compresión adicional respecto al ***Tipo IF30*** *(28.5 [MPa]* y *19.3 [MPa]* respectivamente para un consumo de cemento equivalente *C = 386 [kg/m^3])* $\longrightarrow$ con r evolturas de p rueba podría determinarse que con el ***Tipo IF40*** el ahorro de cemento quizás sea superior a *1 [bolsa/m^3]*.

- En esta investigación no se realizó ninguna optimización por tipo de estructura o tipo de cemento.

4. CONCLUSIONES

La investigación logró cumplir exitosamente todos los objetivos planteados.

- Todas las fuentes de cemento cumplen el requisito de resistencia a *7 [días]*,
- Solo los cementos *CEMENTO 1 IP30, CEMENTO 2 IP30 y CEMENTO 5 IP40* cumplen el requisito de resistencia a compresión a *28 [días]*,
- Cementos del ***Tipo IF*** requieren menos agua que los del ***Tipo IP*** para obtener un asentamiento equivalente en el hormigón,

- En Hormigones de densidad normal en estado fresco y estado endurecido, el peso unitario se modifica con la edad,

- Resistencia media a compresión y Resistencia característica estimada a *28 [días]* variable en función a la fuente: Mejores comportamientos con cementos que satisfacen el requisito de resistencia a 28 [días], así como, con cementos de categoría resistente alta.

- Las dosificaciones realmente empleadas (DRE) reflejan los valores verdaderos con los cuales se obtuvieron las propiedades en estado endurecido. La relación a/c permaneció constante *a/c = 0.535.*

- En el caso de los hormigones que presentan asentamientos muy altos, esos cementos requieren menos agua, por tanto, de realizarse una optimización del agua, la resistencia se incrementaría.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso prudente de la información presentada en esta investigación.

- Como se pudo verificar, existe relación directa entre la resistencia a compresión del cemento y del hormigón, por tanto, se recomienda efectuar el control de calidad del cemento previo a su utilización en la preparación de hormigones,

- Las características del cemento deben evaluarse periódicamente, esto incluye la verificación del peso de cada partida de cemento (muestreo aleatorio).

- El costo unitario de la bolsa de cemento, no debe ser el único parámetro para elegir determinada fuente para su empleo en obra; debe evaluarse la eficiencia como parámetro fundamental,

- Las dosificaciones de hormigones deben establecerse y/o optimizarse para cada fuente de cemento, no es recomendable cambiar abruptamente de fuente de cemento sin previa verificación con revolturas de prueba,

- Cuando en obra se cambia la procedencia de un cemento, es sumamente recomendable realizar previamente revolturas de prueba,

- Las dosificaciones presentadas no deben ser aplicadas directamente en condiciones de obra. El constructor debe solicitar expresamente dosificaciones para cada caso en particular.

6 AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con recursos del Instituto de Ensayo de Materiales. Se pondera la participación de los técnicos de laboratorio de las Áreas participantes.

7. REFERENCIAS

[1] IEM. 2019 "Propiedades físico - mecánicas de hormigones preparados con 6 fuentes de cemento disponibles en nuestro medio", La Paz, UMSA.

[2] IEM. 2019 "Resistencia a compresión de los cementos comercializados en la ciudad de La Paz: CEMENTO 1 Estándar, CEMENTO 2, CEMENTO 3, CEMENTO 7 IP-30, CEMENTO 5 IF-30, CEMENTO 6 IF-40, fabricados en la gestión 2018". La Paz, UMSA.

[3] CERRUTO F. 2015. "Introducción al diseño de mezclas de hormigón", 7ª Edición, La Paz.

[4] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 2009 - ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009), United States.

[5] IBNORCA (1986) - CBH-87 Norma Boliviana de Hormigón Armado.

ANALISIS DE RESIDUO DE ESCORIA DE ESTAÑO PARA OBTENER CEMENTOS CON ADICION

Angel Ramos Maita
aramos@umsa.bo

RESUMEN:

Uno de los principales problemas es la generación de residuos que presentan aspectos ambientales a nivel mundial, siendo una necesidad de conocimientos para mejorar el ciclo de producción y ver el destino de estos residuos como una alternativa de reciclaje y la reutilización. La generación de residuos de escoria de estaño por parte de la industria metalúrgica Vinto Oruro - Bolivia crean un impacto ambiental, encontrándose una alternativa para su utilización moliendo estos residuos enfriados al agua y ambiente hasta una fineza mayor al 80% del Tamiz N° 325 según la norma ASTM C-430, verificando que si cumplen con el Índice de Actividad Resistente "IAR" mayor al 75% a los 28 días, para luego obtener cementos con adiciones hidráulicas en diferentes porcentajes de 10, 20 y 30% al Cemento Portland Normal I-40 y Portland Puzolánico IP-40, elaborando morteros según la Norma NB-470, NB-473. Determinando la resistencia del cemento a los 3, 7, 28, 56, 84, 112 y 140 días superando al cemento de comparación Portland Puzolánico Estándar IP-30 del mercado local La Paz - Bolivia.

Palabras clave: Residuo de escoria estaño, fineza, molienda, cemento portland puzolánico, cemento portland normal, actividad, resistencia a compresión.

ABSTRACT:

One of the main problems is the generation of waste that have global environmental issues, with a need for knowledge to improve production cycle and see the destination of waste as an alternative to recycling and reuse. The generation of waste tin slag from the metallurgical industry Vinto Oruro - Bolivia create an environmental impact, finding an alternative use for grinding the waste water and cooled to ambient to greater than 80% fineness Sieve No. 325 according to the ASTM C - 430, verifying that they comply with the strength activity index increased to 75% at 28 days "IAR" and then get hydraulic cements with additions in different percentages of 10, 20 and 30% Portland Cement I Normal -40 and Portland pozzolanic IP-40, producing mortars according to the NB - 470, NB - 473 standard. Determining the strength of the cement at 3, 7, 28, 56, 84, 112 and 140 days compared beating Portland pozolanico cement Standard IP-30 from the local market La Paz - Bolivia.

Keywords: Tin slag residue, fineness, grinding, Portland puzolanico cement, normal Portland cement, activity, compression resistance.

1. INTRODUCCION

La utilización de las adiciones al Clinker en los cementos puede obedecer aislada o conjuntamente a tres razones principales de orden diverso: tecnológico, económico y ecológico (en realidad, mixto en los dos últimos casos).

De orden tecnológico, por cuanto que los cementos con adiciones - hablando en general- carecen de algunas de las insuficiencias o deficiencias de los cementos portland ordinarios en determinados aspectos, aportando en cambio otras ventajas y siendo por ello más recomendables que los propios cementos portland para multitud de usos específicos bien definidos (por ejemplo, los cementos con puzolana en presas y los siderúrgicos en obras marítimas). No es cuestión de desarrollar aquí y ahora este aspecto del tema, por otra parte tratado con detalle por el que expone, en diversas ocasiones.

De orden ecológico, ya que la utilización de escorias siderúrgicas y de cenizas volantes de centrales

termoeléctricas supone la supresión o reducción de las correspondientes escombreras.

Y de orden económico, puesto que dicha utilización, por una parte, aprovecha subproductos desechados que aún contienen masa y energía potencial recuperables y de menor costo; y, por otra parte, por cuanto que ahorra materias primas y energía térmica para la fabricación del clinker, habida cuenta de cada vez menor disponibilidad de aquellas al menos de las consideradas hasta ahora como más idóneas y explotables, y del costo energético cada vez mayor.

Queda, pues, justificado como único medio fácil y viable, y con más amplias perspectivas para reducir el costo de la fabricación del cemento, la utilización de ADICIONES. Primero, porque esta solución incide sobre el capítulo más costoso de la producción del cemento: el horno; y, segundo, porque además está técnicamente justificada también, por lo ya indicado intencionadamente antes, y suficientemente sancionada de forma positiva por la práctica de muchos años en muchos países.

En la actualidad los residuos representan un problema ambiental y existe la necesidad de buscar una opción para su reutilización y la disposición adecuada de residuos no aptos para el uso, como una posible alternativa a la degradación ambiental.

La industria metalúrgica ferrosa y no ferrosa es uno de los sectores que genera volúmenes importantes de residuos sólidos en sus diferentes etapas para la obtención de metales y fabricación de aleaciones. La reutilización de estos residuos sólidos denominados escorias, principalmente las generadas por la industria siderúrgica, han encontrado su aplicación dentro de la industria, construcción y la elaboración del hormigón utilizando como agregado. Que nos permite preservar el medio ambiente, ya que se reduce el vertido de escorias que ocupan extensas áreas y son objeto de degradación de las mismas.

La minería en Bolivia, hasta hace un tiempo atrás representó casi todo el valor de la producción en base a la explotación de plata, hierro y estaño. Se desarrollo una economía predominantemente minera en el proceso de excavación. Al interior de una mina no solo se extrae metal puro, pues es mezclada con otras sustancias por ejemplo el estaño, es llevado hasta la planta procesadora de Vinto donde después de un largo proceso de producción salen los lingotes de estaño y paralelo a ello la Escoria

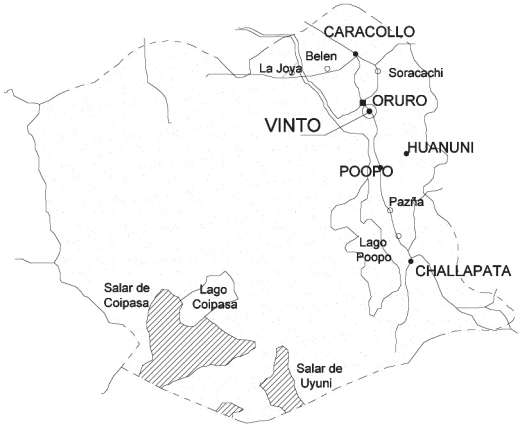


***Figura** 1. Ubicación Vinto*

La Empresa Metalúrgica Vinto se encuentra a 5 km de la ciudad de Oruro por la carretera Oruro - Potosí se fundó en la década de los años 70; ha generado escorias que alcanzan una cantidad de 212,170 m^3 las cuales cubren un área aproximada de 7,7 hectáreas y desde entonces se va trabajando en el proceso de fundido de este metal debido a su gran capacidad productiva a lo largo de los años logró producir miles de toneladas de estaño y paralelamente residuos de escoria, material que se va almacenando año tras año sin ninguna utilidad.

Para poder reutilizar este material se requiere realizar una previa caracterización de sus características químicas y físicas para evaluar su potencial acción como residuos contaminantes, y así considerar su utilización como agregado en la elaboración de hormigones encontrando así una alternativa a su disposición final la cual sería el reciclaje de estas escorias. En el curso de los últimos 20 años, tratando siempre de controlar la contaminación ambiental, se está investigando el uso de materiales desechados como la utilización de los Residuos de Escoria de Estaño de fundición.

En nuestro medio se realiza la preparación de mezclas de hormigón, en el área de la construcción sin conocimiento del verdadero estado y potencialidades de los materiales, siendo uno de los verdaderos problemas el desconocimiento de la reactividad de

los componentes activos del agregado utilizado con los álcalis del cemento.

Las características mineralógicas de un agregado cobran importancia en el deterioro prematuro o a largo plazo de una estructura de hormigón, debido a la probabilidad de contener minerales reactivos con los álcalis del cemento. En el caso de los residuos de escoria de estaño este material se considera material no reactivo frente a la reacción Álcali - Agregado de 0,009% menor al 0.1 % según normas.

Entonces aquí surge la necesidad de realizar una línea de investigaciones para poder utilizar estos residuos de escoria de estaño como agregado y adición al cemento portland normal.

La escoria es un residuo impuro formado fundamentalmente por calcio, hierro, aluminio y silicato de magnesio que aparece en el proceso de fundido del estaño. Material con una compleja estructura química, incluyendo óxidos de metal, material refractario y otros materiales que se forman durante el proceso piro-metalúrgico debido a una serie de reacciones químicas que se efectúan entre los minerales concentrados y materiales fundentes dentro del horno.

Las escorias son de distinta procedencia como ser: escorias provenientes de los procesos siderúrgicos o metalurgia ferrosa, como la metalurgia del hierro y el acero, y los procesos metalúrgicos No ferrosos, como el del cobre, estaño, manganeso, plomo y otros. Estos diferentes tipos de escoria tienen composición química y estructura física variable que depende del tipo de horno, el proceso, la clase de materia prima utilizada y el método de enfriamiento.

La reacción álcali-agregado es un fenómeno cuyo conocimiento data de 1940, cuando Thomas E. Stanton publicó una primera descripción y explicación, según la cual la reacción entre determinados componentes del agregado y los hidróxidos alcalinos en el cemento provocaban expansiones y fisuras en algunas estructuras de hormigón.

La expansión provocada por esta reacción ha sido detectada en diversos países y aparecen en las zonas húmedas del hormigón provocado por el agua, siendo las estructuras deterioradas de los más variados tipos, sobretodo puentes, carreteras presas y muelles.

En Latinoamérica, se han registrado casos puntuales de reacciones álcali-agregado en Brasil, Argentina y Chile. En Bolivia no se conocen casos de estructuras deterioradas por esta reacción, pero se tiene información acerca de los yacimientos de agregados tanto de la ciudad de La Paz y El Alto son potencialmente reactivos, pero gracias a los cementos con adición de puzolana estos inhiben esta reacción.

Los estudios sobre la inhibición de la reacción álcali agregado por la incorporación de adiciones minerales y aditivos químicos, son extensos y variados. Las adiciones minerales como las cenizas volantes, humo de sílice, cenizas de cáscara de arroz, puzolanas naturales y las adiciones químicas como las sales de litio, sulfato de cobre, polvo de aluminio entre otros, son capaces de reducir significativamente la reacción álcali-agregado. Estas reducciones en la expansión pueden llegar incluso hasta un 97%, la cual estará en función del tipo y la cantidad de adición a utilizarse.

Estas investigaciones se realizaron en países extranjeros, donde se usaron adiciones minerales y agregados propios de estos países. Por lo que se hace necesario llevar a cabo investigaciones en nuestro país para conocer el grado de efectividad de nuestras adiciones minerales (puzolanas naturales) en la inhibición de la reacción álcali -agregado.

2 .DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describen las características de los materiales empleados y los equipos utilizados para los diferentes ensayos que realizamos durante la investigación. Seguidamente se presentará el programa experimental que se ha seguido con el fin de estudiar la viabilidad técnica del empleo de adición de los residuos de estaño en diferentes porcentajes a los cementos portland normal y portland puzolánico para compararlo con el cemento Estándar IP-30 con adición de puzolana del mercado local. La investigación se ha dividido en tres fases, unas revolturas de prueba, molienda y la adición de residuos de escoria de estaño para someterlos a compresión a diferente edad.

2.1. MATERIALES Y METODOS DE INVESTIGACION.

2.1.1 RESIDUO DE ESCORIA DE ESTAÑO ENFRIADO AL AGUA "EA".

Residuo que, al dejar el horno, pasa por un contenedor donde se inyecta agua depositándolos en recipientes obteniendo su forma vítrea de diferentes diámetros menores a 5 mm. Con módulo de fineza de 4.01 (arena gruesa).

Figura 2 .*Residuo de escoria enfriada al agua "EA"*

2.1.2 RESIDUO DE ESCORIA ENFRIADO AL AMBIENTE "EM".

Este residuo es vertido en recipientes y lanzadas a pozos. De esta forma el cristalizado debido a un enfriamiento lento. Después de enfriarse se procede al chancado obteniendo una granulometría variable de tamaño máximo nominal 3/4" .

Figura 3. Residuo de escoria enfriada al ambiente "EM"

2.1.3. CEMENTO PORTLAND NORMA TIPO I-40.

Es una mezcla intima entre Clinker y yeso en proporciones de 95% y 5% respectivamente obteniendo a través de una molienda fina en conjunto, para el desarrollo de la investigación, la Fábrica de Sociedad Boliviana de Cemento. SOBOCE S.A. nos proporcionó en vista que a nivel nacional las fábricas cementeras ya no producen este tipo de cemento, hoy en día solo producen cementos con adición de puzolana.

2.1.4. CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP-30 (CEMENTO VIACHA ESTÁNDAR).

Se define como una mezcla íntima y uniforme entre Clinker, yeso y puzolana, en proporciones de 70%, 5% y 25% respectivamente a través de una molienda fina en conjunto el cual será nuestro parámetro de comparación.

2.1.5. CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP-40 (CEMENTO VIACHA ESPECIAL).

Es una mezcla íntima y uniforme entre Clinker, yeso y puzolana, en proporciones de 85%, 5% y 10% respectivamente a través de una molienda fina en conjunto. A diferencia de los cementos tradicionales, cuenta con una gran ventaja, sus propiedades adicionales permiten obtener características especiales en los morteros y hormigones.

2.1.6. ARENA DE OTTAWA.

Arena natural con un contenido mínimo del 98% de Sílice, que nos permite elaborar morteros para determinar la resistencia de los cementos. Esta arena se importar desde Estados Unidos que viene en sacos de 50 (lb).

Figura 4. Arena de ottawa

2.1.6. MOLIENDA DE LA ESCORIA.

Esta molienda se la realizo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y Materiales "IIMM" y el Instituto de Ensayo de Materiales "IEM". Para la molienda de la escoria se realizó la toma de muestra llevándolo al lavado y posterior secado, luego se introdujo en el molino que contiene esferas de acero de diferentes diámetros ocupando un tercio del molino, la molienda se lo realizo durante 12 hrs. Cada hora se obtuvo una muestra de aproximadamente de 5 g. Para luego analizar como aumenta su fineza.

Figura 5. *Molienda del residuo de escoria de estaño*

2.1.7. DETERMINACIÓN DE LA FINEZA MEDIANTE EL TAMIZ N° 325

La fineza es de mucha importancia para la hidratación, para este ensayo utilizamos la norma ASTM C-430, que consiste en pesar 1.00 g de muestra colocándolo en el Tamiz Nº 325, mojándolo con agua destilada para luego llevarle a un chorro de agua con una presión de 10 +/- 0.5 PSI, durante un minuto pasado este tiempo se enjuaga con agua destilada. Secar el tamiz en un calentador para luego registrar el residuo pesando.

Figura 6. *Fineza del residuo de estaño*

2.1.8. ÍNDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE "IAR "

Según la norma ASTM C-109. El cemento Portland utilizado para el ensayo IAR, deberá cumplir con los requerimientos de la especificación ASTM C-150. En la mezcla de ensayo, se sustituye 20% de la masa de cemento usado en la mezcla de control. Preparándose tres revolturas según la norma ASTM C-595.

Figura 7. Determinación de la fluidez

2.1.9. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Según su clase o categoría resistente, cada cemento debe alcanzar las resistencias a compresión mayor a lo indicada. El mortero consiste en una mezcla de cemento, arena normalizada y agua. La mezcla se efectúa en una amasadora normalizada introduce en moldes de acero de dos pulgadas de lado se compacta y se lleva al cuarto de curado. El ensayo cumple con la norma descrita en la Norma Boliviana NB 470 y la NB 473 que tiene por objeto establecer el método para determinar la fluidez del mortero para cementos con adición al cemento portland normal.

Figura 8. *Resistencia a compresión del cemento*

3. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.

Presentación y análisis de los resultados obtenidos en la investigación:

3.1. MOLIENDA DE LOS MATERIALES

- En la Tabla 1. se observa la molienda de los materiales, determinándose para cada hora de molienda su finura mediante el Tamiz N° 325, obteniendo una fineza del 80,4%, 74,9%, 81,1% y 93% respectivamente para un tiempo de molienda de 12 hrs.

- Los cementos producidos en nuestro País, tienen una fineza mayor al 93%.

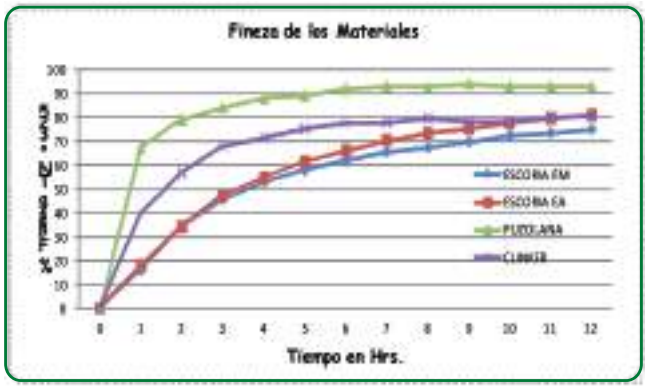


Figura 9. *Molienda de residuos de escoria de estaño*

3.2. ÍNDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE "IAR"

Para obtener cementos con adición se debe analizar el "Índice de Actividad Resistente "IAR" del material que va adicionarse. Según la Norma ASTM C-595, el IAR debe ser > al 75 %.

Como se observa en la Tabla 4.2, la escoria enfriada al agua "EA" tiene un IAR de 94% a los 28 días y una fineza del 81,1%, para 12 hrs de molienda, mientras para la "EM" tiene IAR del 77 %, con una fineza del 74,9% ambas escorias cumplen con la norma mayor al 75%. Para este análisis realizamos

con el cemento Especial IP 40 que contiene adición de puzolana

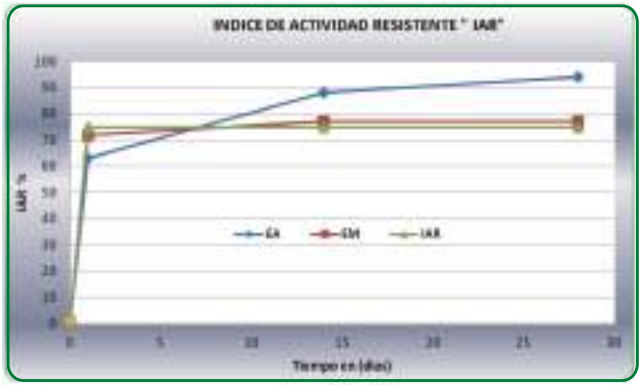


Figura 10. *"IAR" de residuos de escoria de estaño*

3.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON ADICIÓN

Tabla 1. Resistencia con diferentes % de adición de "EA"

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA DE CEMENTOS TIPO: I-40, IP-30, IEA-30 (kg/cm2)

TABLA Nº 1

DÍAS	SOBOCE I-40 a/c=0,485	I-40 CON FLUIDEZ	ESTANDAR IP-30	CEMENTO TIPO IEA-30		
				30%EA	20%EA	10%EA
DÍAS	140	140	IP-30	EA30%	EA20%	EA10%
0	0	0	0	0	0	0
3	255	281	179	124	178	178
7	383	320	192	200	264	258
28	418	376	265	302	355	338
56	457	427	335	372	396	359
84	499	426	354	394	399	436
112	472	373	359	417	420	383
140	461	428	370	427	457	419

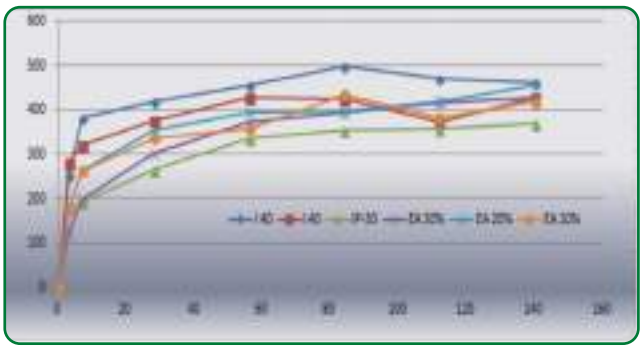


Figura 11. *Resistencia de escoria de estaño "EA"*

Tabla 2. Resistencia con diferentes % de adición de "EM"

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA DE CEMENTOS TIPO: I-40, IP-30, IEM-30 (kg/cm2)

TABLA Nº 2

DÍAS	SOBOCE I-40 a/c=0,485	I-40 CON FLUIDEZ	ESTANDAR IP-30	CEMENTO TIPO IEM-30		
				30%EM	20%EM	10%EM
DÍAS	140	140	IP-30	EM30%	EM20%	EM10%
0	0	0	0	0	0	0
3	255	281	179	141	212	257
7	383	320	192	198	236	275
28	418	376	265	289	323	331
56	457	427	335	348	347	353
84	499	426	354	359	374	386
112	472	373	359	367	355	388
140	461	428	370	371	396	388

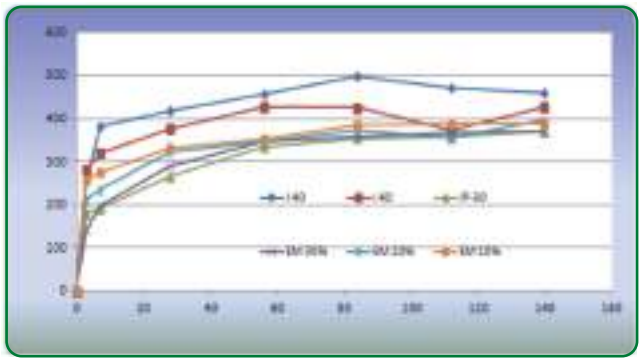


Figura 12. *Resistencia de escoria de estaño "EM"*

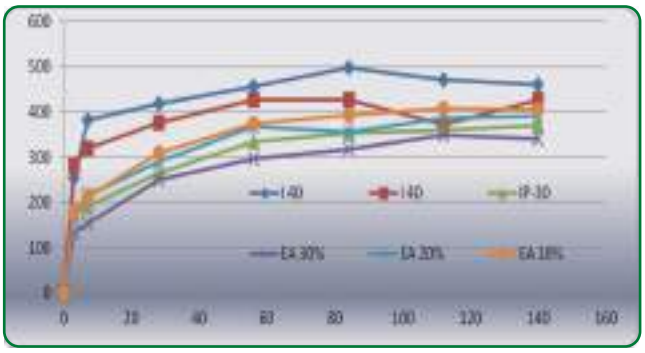


Figura 13. *Resistencia con adición de residuo "EA" con Cemento Especial IP-40*

4. CONCLUSIONES

- Dentro los objetivos planteados para el desarrollo de la investigación, previamente se verifico si los residuos de escoria de estaño enfriado al ambiente "EM" y enfriado al agua "EA" son reactivos a la reacción álcali agregado según la norma NBRI

596-94, analizado estos materiales y verificándose estos residuos no son reactivos a los álcalis del cemento, seguidamente se realizó la molienda de los residuos para determinar el tiempo y la fineza, para luego determinar el "Índice de Actividad Resistente - IAR" cumpliendo según la Norma ASTM C-595, verificándose que estos materiales si podemos utilizarlo como adición en un 10,20, y 30% al cemento TIPO I-40, de procedencia de la Fábrica de Cementos Viacha Sociedad Boliviana de Cemento S.A. SOBOCE. para obtener cementos con adición de residuo de escoria de estaño TIPO IEA - 30 y TIPO IEM-30, con adición de "EA", "EM" respectivamente. Nuestro patrón de comparación será el cemento Estándar TIPO IP-30 con adición de puzolana que se tiene en el mercado La Paz - Bolivia.

- Los residuos de escoria "EA" tiene un tamaño máximo de 4,75 (mm), requiere menor tiempo de molienda para llegar a una fineza > al 80%, mientras que la escoria EM tiene un tamaño máximo de 19 mm, donde requiere mayor tiempo de molienda para llegar a una fineza del 74,9%, Determinándose un tiempo de 12 hrs, de molienda de los residuos de escoria EA y EM.

  - Analizando la composición química de los residuos de escoria estos presentan propiedades cementantes como el calcio, silicio, aluminio y fierro en porcentajes menores que ayudan a mejorar sus propiedades durante su hidratación, asimismo estos residuos no presentan Reacción Álcali Agregado con los álcalis del cemento, siendo favorable para utilizar como adición en el proceso de fabricación del cemento.

  - Con la colaboración de la Fábrica de cementos Viacha durante las primeras revolturas de prueba en la investigación se dosifico los materiales de Clinker, Yeso y Escoria introduciendo al molino no teniendo buenos resultados debido a que durante el tiempo de molienda el material se apelmazaba en las esferas de acero no pudiendo llegar a la fineza de investigación debido a la variación y humedad en el interior del molino.

  - Si deseamos mejorar la resistencia en los cementos con adición debemos obtener una fineza mayor al 90% o igual a la fineza del cemento.

  - Según la Normas ASTM C-595 el valor mínimo de índice de actividad resistente "IAR" debe ser mayor al 75%. Verificándose que ambos residuos de escoria de estaño pueden utilizarse como adición al cemento TIPO I-40.

- Analizado los resultados de la investigación, la adición más recomendable es del 30% para la escorias enfriada con chorro de agua "EA", obteniendo un cemento TIPO IEA-30, que cumple con las especificaciones mayor o igual a 30 MPa. A los 28 días, superando al cemento Estándar IP-30, que no cumple con las especificaciones.

- El cemento TIPO IEM-30, con adición del 30% de escoria "EM" si bien supera en resistencia al cemento Estándar IP-30 con adición de puzolana, pero no cumple con la especificación a los 28 días obteniendo una resistencia menor a 30 MPa,

- Sin embargo, se puede mejorar los resultados del cemento TIPO IEM-30, utilizando estos residuos de "EM", mejorando su finura superior o igual al del cemento que se encuentran mayor al 93%.

- El incremento de resistencia de los cementos con adición TIPO IEA-30, TIPO IEM-30 con adición de residuo de escoria de estaño se debe a que estos residuos en su composición química contienen los principales óxidos del cemento en porcentajes menores que aportan en la reacción química.

- Para los cementos con adición de puzolana Estándar TIPO IP-30 la resistencia de control deberá realizarse a los 56 días, es a esta edad que cumple con la especificación. mientras para los cementos TIPO IEA - 30, TIPO IEM-30, cumple con las especificaciones de resistencia a la edad de 28 días.

- Con una adición del 10% del residuo de escoria EA, al cemento Especial IP-40, cumple con las especificaciones a la edad de 28 días.

- Desde el punto de vista Ambiental los Residuos de Escoria de Estaño enfriados al EM y EA que cuenta la Empresa Metalúrgica de Vinto, son clasificadas como No Reactivas, Inertes y No Tóxicas, por tanto, se puede considerar como materiales reciclables y utilizables en una línea de

investigaciones, utilizando como adición o como agregado en el hormigón, asfaltos y carreteras.

5. RECOMENDACIONES

- Para mejorar la resistencia de los cementos con adición de residuos de escoria de estaño se debe mejorar la molienda relación peso de esferas respecto a la cantidad de material a moler, otra forma de tener un material más fino es que después de moler sumergirlo en agua y recuperar la lava por sedimentación para luego secarlo al horno.

- El IAR podemos mejorar si utilizamos cemento portland normal que generaría mayor porcentaje de hidróxido de calcio que sería aprovechada por los residuos de escoria. Para la investigación utilizamos el cemento Especial IP-40, que ya tiene adición de puzolana. Debido a que no contamos en el mercado Nacional el cemento portland normal TIPO I-40.

- Durante el proceso de fabricación del cemento se debe realizar un control de los álcalis del cemento.

- Se debe investigar hormigones con la adición de residuos de escoria de estaño cómo se comportan a los ensayos de carbonatación y corrosión del acero.

- Si adicionamos los residuos de EA y EM, durante el proceso de fabricación del cemento, los resultados serían más favorables aumentando su resistencia, con una adición máxima del 30%, lo que no ocurre con el cemento Estándar TIPO IP-30, que tiene una adición de puzolana del 25%.

6. RERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- **[1] Instituto Boliviano de Normalización y Calidad** IBNORCA septiembre 1995

- **[2] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Port- land Cement.** ASTM C150-86

- **[3] IV Conglomerantes Hidráulicos.** 3ra Edición Madrid Soria F. Estudio de Materiales. 1963.

- **[4] Effect of alkalis in Portland cement on the Durability of Concrete. Appendix to the report of Committee C-1 on Cement, Proceedings,** ASTM, Vol. 43, 1943, p. 203.
  BLANKS, R. F., Notes on the:

- **[5] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Port- land Cement.** ASTM C 595-86

- **[6] Hormigón, 5ta. Edición, Edita Serv**. Publicaciones del Colegio de Ingenieros Caminos, Canales y Puertos, España MANUEL FERNANDEZ CANOVAS. Enero 199

- **[7] "Comportamiento de Cementos de Uso General Frente a la reacción Álcalis Sílice (RAS)"**. Hugo Daniel Anaya, Luís Enrique Leiva, Nélida del Valle Castría,

- **[8] Guía Introductora a la Durabilidad en el Concreto.** Ing. Manuel Gonzales de la Gotera S.

- **[9] "Hormigones Normales con Agregados de Escoria de Fundición"** Humberto Weimar Rodríguez, Genaro Velásquez Cantuta, - Tesis diciembre 2009.

EVALUACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE UN SUELO

Gricel Alcira Portillo Miranda (1)
gricelp@gmail.com

José Tavares Araruna Junior (2)
araruna@puc-rio.br

René Fernando Salgueiro Bustillos (1)
jaresal@yahoo.com

(1) Instituto de Ensayo de Materiales, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés
(2) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Pontifica Universidad Católica de Rio de Janeiro

RESUMEN:

En el presente trabajo se pretende mostrar la importancia de realizar la evaluación de la erodabilidad de un suelo ante procesos erosivos. Se presenta la evaluación de la erodabilidad de una muestra de suelo clasificado por el sistema unificado de suelos como una arena limosa. Fue realizada una caracterización completa del suelo, considerando la caracterización geotécnica, mineralógica y la determinación de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, para posteriormente presentar de evaluación de erodabilidad de un suelo a través de ensayos de desagregación, tracción indirecta y microscopia de barredura electrónica.

Palabras clave: *Erosión, erodabilidad, desagregación*

ABSTRACT:

It is intended to show the importance of evaluating the erodibility of a soil before erosive processes. The evaluation of the erodibility of a soil sample classified by the unified soil system as a silty sand is presented. A complete characterization was performed, considering the geotechnical and mineralogical characterization and the determination of the exchange capacity of the soil. The evaluation of the erodibility of a soil through disaggregation tests, indirect traction and scanning electron microscopy.

Keywords: *Erosión, erodibility, disaggregatión*

1. INTRODUCCIÓN

Los riesgos de erosión dependen tanto de las condiciones naturales c omo del uso del suelo. En condiciones naturales los factores dependen del clima, topografía, cobertura vegetal y características químicas del suelo. Respecto al uso del suelo, podemos considerar que actividades humanas pueden contribuir en la erosión del suelo (Araujo et al., 2009).

La erosión puede presentarse, formando pequeños canales en la superficie del terreno siendo estos fácilmente recuperados o llegar a formar grandes cárcavas donde flujos de agua subterránea pueden influencia erosionando internamente el suelo. (Guerra et al.,2003).

En el suelo puede ocurrir también una deterioración química, que se refiere a la perdida de nutrientes o de materia orgánica, según Li et al. (2013), parte de estos nutrientes pueden ser perdidos en procesos erosivos principalmente en lluvias intensas.

Procesos geológicos y antrópicos pueden contribuir en la erosión del suelo, entre los procesos antrópicos podemos mencionar actividades de minería, actividades agrícolas y obras de construcción civil en general, que contribuyen a la degradación de áreas modificando las características originales del suelo. La erosión geológica puede producirse por agua, viento y hielo sobre la superficie terrestre correspondiendo a un proceso natural (Guerra et al., 2003; Guerra & Jorge,2013).

Los mecanismos de erosión consideran tres procesos fundamentales: desagregación, transporte y disposición de las partículas de suelo (Araujo et al., 2009):

a) La desagregación ocurre debido al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie de suelo sin cobertura vegetal. La cobertura del suelo puede haber sido retirada para diferentes actividades, como actividades mineras o ganaderas reduciendo la infiltración de agua y el escurrimiento superficial.

b) Posteriormente a la desagregación de las partículas, ocurre el transporte por el escurrimiento del agua que no llegó a infiltrar en el suelo, dependiendo de la intensidad el arrastre de partículas puede ocurrir superficialmente en el terreno o provocar pequeños canales típicos de erosión superficial o incluso con el tiempo ampliar su tamaño, pudiendo también convertirse en cárcavas con la contribución de agua subterránea

c) El proceso de disposición consiste en el almacenamiento del suelo erosionado en ríos, lagos, represas, que provoca diversos impactos ambientales.

Según Fragassi (2001) la erodabilidad de un suelo es una característica relacionada con la desagradación y el transporte de la partícula de suelo. Veiga (1988) indica que la erodabilidad representa mayor o menor susceptibilidad del suelo a erosionarse. Por otra parte, Vargas (1977), Fácio (1991) y Santos (1997) afirman que los suelos con mayor erodabilidad son aquellos que en su granulometría presentan mayor cantidad de arena fina y/o limo y poca cantidad de arcilla. Quian et al. (2002) presenta una relación de erodabilidad de un suelo en función de su clasificación conforme se muestra en la tabla 1.

Mas erodible En orden descendiente		Menos erodible En orden descendiente
Limo		Arcilla poco plástica
Arena limosa		Arcilla de alta plasticidad
Arena mal graduada	>>	Grava limosa
Arena bien graduada		Grava mal graduada
Arena arcillosa		Grava bien graduada

Tabla 1. *Escala de erodabilidad en suelos según el sistema unificado de clasificación de suelos (adaptado de Quian et al 2002).*

En el presente trabajo se presentan los resultados de evaluación de erodabilidad de un suelo a través de ensayos de desagregación, tracción indirecta y microscopia de barredura electrónica.

2. METODOLOGÍA

Para la evaluación de erodabilidad de la muestra de suelo se realizó el ensayo de desagregación, dicho ensayo es una modificación del ensayo crumb test (USBR 54000-89) que se realiza a partir de la inmersión de muestras de suelo en agua(Fonseca, 1981; Bastos,1999).

Según Ferreira, *apud* Bastos (1999) la aplicación de ensayo de desagregación para fines geotécnicos fue idealizado por la Ing. Anna Margarida Fonseca al estudiar suelos en la construcción de Brasilia. Bastos (1999) también menciona que en el proyecto de investigación IPR/COPPE/TRAFECON(1975-1978) este ensayo fue usado como criterio cualitativo en la investigación de suelos en taludes de carreteras.

Autores como Ferreira (1981), Santos (1997), Araújo (2000) y Ramidan (2003) afirman que, como indicador de la erodabilidad de suelos, el ensayo de desagregación puede ser considerado bastante representativo, encontrando buena correlación con situaciones ocurridas en campo.

El ensayo de resistencia a tracción indirecta viene siendo utilizado también para evaluar la erodabilidad del suelo. Este ensayo es normalizado por la ASTM D 3967-95a. Inicialmente este ensayo fue desarrollado para evaluar la resistencia del concreto, siendo más tarde utilizado para rocas y suelos cimentados o compactados (Clough et al., 1981; Maciel, 1991; Dass et al., 1993; Araújo, 2000).

Dentro de la evaluación de la erodabilidad podemos incluir la microscopía, ya que mediante observación se puede relacionar la forma de las partículas y la disposición de estas, en el presente trabajo se utilizó un microscopio electrónico de barredura de marca Hitachi, modelo TM 3000 acoplado a un EDS (espectrómetro por dispersión de energía) de marca Oxford modelo SwiftEDS+.

Por otra parte, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es un parámetro que interfiere en la erodabilidad de un suelo, esta puede ser determinada empleando la técnica de azul de metileno establecida por Casanova (1986), que está basada en la norma ASTM C 837-84. El método emplea 1 gramo de suelo que pasa por el tamiz N°40. En seguida es adicionada una solución tampón (50ml) para mantener el pH neutro. La solución es mantenida en agitación (se coloca 1 mL agitando por 1 minuto).

Después de homogeneizar se colecta un poco de la solución y se deja gotear en un papel filtro Whatman N° 40 verificando la formación de una aureola. Se repite el procedimiento hasta formar una aureola de color azul claro alrededor de la gota y a partir del volumen de azul de metileno gastado es calculado el valor de capacidad de intercambio catiónico del suelo según la ecuación 1.

$$CIC = \frac{C \times v}{W} \times 100 \qquad \text{ec (1)}$$

C: es la concentración de azul de metileno (1meq/ L)
v :es el volumen gastado (L) y
W: es el peso seco de la muestra (g)

3. RESULTADOS

La caracterización geotécnica del suelo utilizado nos muestra que la composición granulometría del suelo utilizado fue grava en 13,6%, arena gruesa 10.6%, arena media 12.4%, arena fina 25%, limo 28.5% y arcilla 9.9%. El material no tuvo límite plástico y el límite liquido fue 32%, siendo el contenido de materia orgánica 0.31% y l el peso específico de las partículas Gs es igual a 2.68. Siendo el suelo clasificado a través de la clasificación unificada de suelos como arena limosa. En la caracterización mineralógica fue posible observar la presencia de quartzo (Q), Feldespato (Ft), Caolinita (Ct) , Ilita proveniente de la descomposición de la mica(I/M) y oxido de hierro (FeO_3). En la Figura 1 se observa el difractograma del material pasante del tamiz 200.

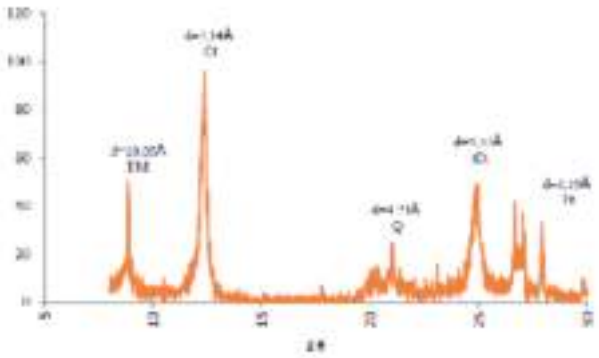


Figura 1. *Difractograma del material pasante del tamiz 200.*

La Figura 2 presenta una imagen del material ampliada 1500 veces. Se verifica una disposición caótica de las partículas laminares con un aspecto frágil debido al bajo porcentaje de elementos de agregan las partículas del suelo. Es posible evidenciar la presencia de Ilita/Mica entre las partículas laminares.

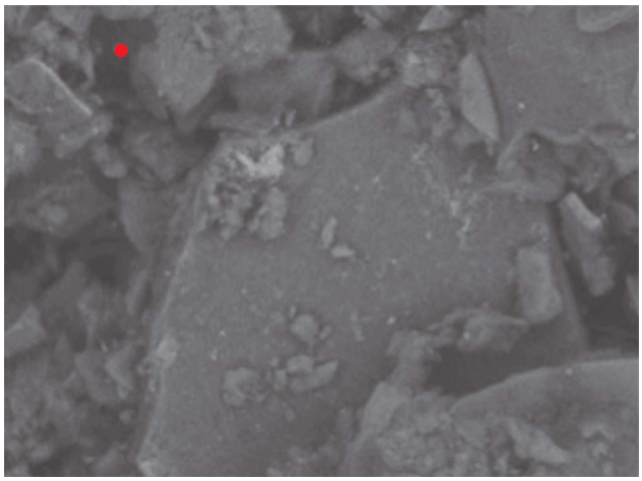


Figura 2. *Imagen del material con microscopio electrónico de barredura con aumento de 1500X*

Fue determinada también la capacidad de intercambio catiónico del suelo, teniendo como resultado 0.7 cmol/kg, valor considerado bajo pudiendo ello estar relacionado con la baja cantidad de partículas de arcilla en el suelo y la elevada erodabilidad del mismo.

Para la evaluación de erodabilidad, los cuerpos de prueba fueron reconstituidos en laboratorio intentando obtener el peso específico determinado en campo considerando un peso específico de 16.68 KN/m^3 y

una humedad de 23%. El resultado del ensayo de desagregación muestra que los cuerpos de prueba cúbicos de 5 cm de arista, parcialmente sumergidos en agua hasta la mitad de la altura, después de 7 minutos quedan totalmente desagregados, esto puede deberse al bajo contenido de partículas de arcilla en el suelo y bajo contenido de materia orgánica, características que contribuyen con la mayor erodabilidad del suelo.

Considerando que la resistencia a tracción de suelos se basa en los enlaces entre las partículas, el valor de esta resistencia nos proporciona un indicio de la erodabilidad. El resultado obtenido fue 2.5 KPa, que es considerado un valor bajo comparado con Araujo (2000) que realizó también el ensayo con el mismo fin y la diferencia de los resultados puede deberse a que este autor realizó el ensayo con material arcilloso y mantuvo su estructura preservada.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Cuando se tiene problemas erosivos en el terreno, es importante realizar una caracterización completa del suelo, considerando la caracterización geotécnica convencional, la caracterización mineralógica y la capacidad de intercambio catiónico. En el ejemplo presentado fue realizada además la observación microscópica que permite evidenciar la disposición de las partículas laminares típicas del suelo areno limoso. La evaluación de la erodabilidad fue realizada de forma cualitativa por el ensayo de desagregación y el ensayo de tracción indirecta observando la elevada erodabilidad del suelo que coincide con las características del mismo. Por otra parte, para realizar una evaluación cuantitativa de la erosión es recomendable realizar el ensayo Inderbitzen de manera que a través de estos resultados se pueda proponer alguna solución que pretenda disminuir los procesos erosivos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **ARAUJO, G.H.S.** ; ALMEIDA J.R.; GUERRA A.J.T. Gestão ambiental de áreas degradadas. 4ta edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

[2] **ARAUJO R.C.** Estudo da erodibilidade de solos da formação barreiras/RJ. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia. Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.

[3] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS.** ASTM D3967-95a, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, Pensilvania . United States, 2010, p3.

[4] **CASANOVA, F. J.** O ensaio de azul de metileno na caracterização de solos lateríticos. Reunião anual de pavimentação. Anais. Associação Brasileira de Pavimentação, Salvador, v. 2, n. 21, p. 279-286, 1986.

[5] **BASTOS,** C.A.B.; Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Porto Alegre/RS, 298p. Tese de doutorado. PPGEC/UFRGS, 1999.

[6] **CLOUGH, G. W.;** SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. Cemented sands under static loading . Jornal Geotechnical Engineering., v. 107, p. 799.817

[7] **BASTOS,** C.A.B.; Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Porto Alegre/RS, 298p. Tese de doutorado. PPGEC/UFRGS, 1999.

[8] **DASS, R.N.;** YEN, S.C.; PURL, V.K.; DAS, B.M.; WRIGHT M.A. Tensile Stress- Strain Behavior of Lightly Cemented Sand. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol.30, No.7, p. 711-714, 1993.

[9] **FÁCIO, J. A.** Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília - DF. 1991.

[10] **FRAGASSI,** P.F.M., Estudo da Erodibilidade dos solos Residuais de Gnaisse da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG). Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 2001.

[11] FERREIRA, C.S.M. Erosão- Investigações de Campo e de Laboratório Desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2o Simpósio Sobre Controle de Erosão, São Paulo, SP., 1981.

[12] GUERRA, A.J.T.; DA SILVA, A.S.; BOTELHO,R.G.M. Erosao e Conservação dos solos. Conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil 2010.

[13] GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. Organizadores. Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas. São Paulo. Oficina de Textos . 2013

[14] LI, M. ; MCFALLS J.; YI, Y. Comparing Erosion Control Products' Performance Results from Field and Large-Scale Laboratory Testing . Indian Geotechnical Society v.43(4), p 382-387. 2013.

[15] MACIEL, I. C. Q. Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gnaisse facoidal. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio, R. J., 182 pp, 1991.

[16] PORTILLO, M.G.A. Avaliação da Efetividade da Adição de Substância Húmica na Redução da Erodibilidade de um Material de Desmonte Oriundo da Mineração de Pedra Miracema. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil -PUC-Rio, R. J., 183 pp, 2015.

[17] QIAN, X.; KOERNER, R.M. AND GRAY, D.H. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Prentice-Hall Inc., New Jersey, p. 717, 2002.

[18] RAMIDAN, M.A.S Estudo de um Processo de Voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara - GO Dissertação de mestrado .Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

[19] VEIGA, M. da. Erodibilidade em Entressulcos e Algumas Propriedades Físicas, Químicas e Mineralógicas de Solos do Rio Grande do Sul, em Laboratório. Dissertação de Mestrado, UFRG, Porto Alegre, 116 p., 1988.

[20] SANTOS, R. M. M. Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF, 1997.

[21] VARGAS, Milton. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, Ed.Universidade de São Paulo, 1977.

Chiuxña Uta

CASA VERDE

Revista del Instituto
de Ensayo de Materiales
INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
Nº 13