

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Mon
620.13
B197
2013



“Morteros de cemento compósito base cemento portland y pumicita pulverizada: optimización de la formulación por el Método Taguchi”

Trabajo de diploma que presenta:

Br. Lenin R. Baltodano Sánchez.

Para optar al Título de:

Ingeniero Químico

Tutor:

MSc. Léster Javier Espinoza Pérez

Managua, Nicaragua

Enero de 2013.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis hermanos y en especial a mis padres, **Angela Sánchez y Julio Baltodano**, por haberme regalado la existencia y su apoyo durante esta etapa de mi vida.

Con amor a mi novia **Liseth Chavarría Escobar**, por su cariño, amor y apoyo incondicional brindados desde que nos conocimos.

AGRADECIMIENTOS:

A Dios, por haberme regalado la paciencia, sabiduría, perseverancia, y fortalezas necesarias para iniciar y concluir esta etapa de la vida.

Agradezco especialmente a mi tutor, el MSc. Léster Javier Espinoza Pérez, por transmitirme parte de sus vastos conocimientos, por sus consejos, constancia y seguimiento durante el periodo de elaboración de este trabajo.

Agradezco al Ing. Luis González Gutiérrez (Coordinador del Proyecto Taishin Nicaragua), por su apoyo al brindarme muestras de materiales e información pertinente para la ejecución íntegra de este trabajo monográfico.

A la Dirección de Bienestar Estudiantil (DBE) de la UNI por el apoyo económico brindado.

Al Decano de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la UNI, el MEng. Leonardo Chavarría Carrión, por la gestión realizada para la facilitación del laboratorio donde realice los experimentos.

TABLA DE ABREVIATURAS

Abreviaturas	
Letras utilizadas	Nombre completo
A/L	Relación Agua/Ligante
AM	Arena Motastepe
Ar/L	Relación Arena/Ligante
ASTM	Association Standard Test Method
BE-1	Bloque Estructural tipo 1
CAUJ	Cuajachillo
CH	Hidróxido de Calcio (portlandita)
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CSH	Silicato de Calcio Hidratado
CV	Coeficiente de Variación
dB	Decibeles
EAH	Escoria de Alto Horno
Exp	Experimento
FIQ	Facultad de Ingeniería Química
H	Agua (H ₂ O).
IAP	Índice de Actividad Puzolánica
JICA	Japan International Cooperation Agency
M es M	Mayor es Mejor
MAL	Malpaisillo
MAT	Mateare
Mpa	Mega pascales
MTI	Ministerio de Transporte e Infraestructura
N es M	Nominal es Mejor
N es M al 30%	Nominal es Mejor al 30%
NMX	Normas Mexicanas
NTON	Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense
ONNCCE	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación
PP	Pumicita Pulverizada
PU	Peso Unitario
PUP	Peso Unitario Promedio
RMC	Resistencia Mecánica a la Compresión

S	Desviación Estándar
S/R	Relación Señal /Ruido
SS	Silicato de Sodio
SSS	Saturado Superficialmente Seco
Nomenclatura de Compuestos Químicos	
Símbolo químico	Nombre
SiO ₂	Sílice (Óxido de silicio)
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio
CO ₂	Dióxido de carbono
CaCO ₃	Carbonato de calcio
Na ₂ O	Óxido de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
C ₃ S ó (3CaO.SiO ₂)	Silicato tricálcico
C ₂ S ó (2CaO.SiO ₂)	Silicato dicálcico
C ₃ A ó (3CaO.Al ₂ O ₃)	Aluminato tricálcico
C ₄ AF ó (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃)	Ferrita aluminato tetracálcico
MgO	Óxido de magnesio
C [^] SH ₂ ó CaSO ₄ .2H ₂ O	Sulfato de calcio (yeso)
CaO	Óxido de calcio (Cal)
SO ₃	Óxido de azufre XI
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro III
MgO	Óxido de magnesio
K ₂ O	Óxido de potasio
TiO ₂	Óxido de titanio IV
MnO	Óxido de manganeso
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Calcio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sodio
SO ₄ ⁻²	Ion sulfato
Na ₂ SiO ₃	Silicato de Sodio
MgSO ₄	Sulfato de magnesio

Tabla de Contenido

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
TABLA DE ABREVIATURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
I. ANTECEDENTES	4
II. OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo general.....	6
2.2 Objetivos específicos	6
III. MARCO TEÓRICO	7
3.1 El Cemento	7
3.2 Cemento portland	7
3.2.1 Tipos de cementos	8
3.2.2 Propiedades del cemento	8
3.2.3 Función del yeso	9
3.2.4 Hidratación de los compuestos puros del cemento.....	9
3.2.5 Reacción de hidratación de los Silicatos de calcio.....	10
3.3 Materiales alternativos al cemento portland.....	10
3.3.1 Materiales puzolánicos: sustitución parcial del cemento.....	11
3.3.2 Mejoras de las propiedades del cemento al agregar puzolanas	12
3.3.3 Materiales de sustitución total del cemento: cementos alcalinos	13
3.4 Morteros.....	14
3.4.1 Curado del mortero	14
3.4.2 Agregados tradicionales del mortero	15
3.4.3 Propiedades de los morteros en estado plástico	16
3.4.4 Propiedades de los morteros en estado endurecido	16
3.4.5 Ataque por solución de sulfatos al concreto	18
3.4.6 Ataque por altas Temperaturas al concreto	19

3.5 Características Generales de los sólidos Amorfos.....	19
3.6 Piedra pómez o Pumicita	20
3.6.1 Piedra pómez o Pumicita como sustituto del cemento portland	21
3.7 Evaluación de la puzolanicidad.....	22
3.8 Diseño de Experimentos con el Método Taguchi.....	22
IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
4.1 Bancos de Pumicita seleccionados por el proyecto Taishin Nicaragua	25
4.2 Selección de los 3 bancos de Pumicita con mayor potencial para la presente investigación.	27
4.3 Acondicionamiento de la Pumicita (Pulverización del material).	30
4.4 Caracterización de la Arena proveniente del cerro Motastepe (AM).....	32
4.5 Diseño de Mezclas Compósitos.....	33
4.6 Cantidad de materiales a utilizar en mezclas compósitos.....	34
4.7 Mezclado de morteros de mezclas compósitos	36
4.8 Moldeado, Fraguado y Curado de Especímenes compósitos.....	37
4.9 Selección de mejores resultados de RMC	38
4.10 Elaboración de Geopolímeros de Pumicita Pulverizada	39
4.10.1 Elaboración de morteros 100% Pumicita Pulverizada con relación Na_2O /ligante de 6%.....	41
4.10.2 Elaboración de morteros 100% Pumicita Pulverizada con relación Na_2O /ligante de 12%.	42
4.11 Técnicas de Caracterización aplicadas a los morteros endurecidos selectos	42
V. RESULTADOS Y DISCUSION	45
5.1 Bancos de mayor potencial para la presente investigación	45
5.2 Determinación del contenido de sílice (SiO_2).....	47
5.3 Pulverización de la materia prima	47
5.4 Pruebas a la Arena proveniente del cerro Motastepe (AM)	49
5.4.1 Ensayo de Humedad	49
5.4.2 Gravedad Específica y % de Absorción.....	50
5.4.3 Granulometría de la AM	51
5.4.4 Impurezas orgánicas por colorimetría.....	53
5.5 Resultado de RMC de morteros de Cemento Compósito	53

5.6	Análisis Estadístico de datos de RMC a los 28 días de curado	57
5.7	Análisis de Datos de Peso Unitario de especímenes a los 28 días de curado	60
5.8	Factores y niveles de estudio y sus efectos en la RMC	62
5.9	Análisis Taguchi (Optimización de las Formulaciones)	66
5.9.1	Mayor es Mejor	66
5.9.2	Nominal es Mejor	69
5.10	Resultados de RMC de Geopolímeros 100% PP	71
5.11	RMC de morteros de Referencia (100% CPO) con mezclas selectas	75
5.12	Caracterización de morteros compósitos endurecidos con mezcla de niveles selectos	77
5.12.1	Valores optimizados de RMC	77
5.12.2	Índice de Actividad Puzolánica (IAP)	78
5.12.3	Absorción	78
5.12.4	Ataque Químico por solución de Sulfato de Magnesio	80
5.12.5	Ataque por Altas Temperaturas.	82
VI.	CONCLUSIONES	84
VII.	RECOMENDACIONES	86
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
IX.	ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del CPO	7
Tabla 2. Tipos de cemento	8
Tabla 3. Características generales de algunos materiales puzolánicos	12
Tabla 4. Composición química de la piedra pómez o Pumicita.....	22
Tabla 5. Bancos de materiales propuestos.....	25
Tabla 6. Resultados de pruebas físicas y químicas realizadas a 5 bancos de Pumicita ubicados en la zona del pacifico de Nicaragua.	26
Tabla 7. Peso Asignado a cada característica.....	27
Tabla 8. Matriz de calificación de los bancos de Pumicita.....	29
Tabla 9. Matriz de selección de los bancos de Pumicita	30
Tabla 10. Ensayos físicos en muestras de agregados finos	32
Tabla 11. Variables y Niveles a investigar	33
Tabla 12. Distribución del Diseño Experimental Taguchi $L_9 (3^4)$	34
Tabla 13. Propiedades y dimensiones de los cubos.....	34
Tabla 14. Cantidad de materiales para Experimento N° 1.....	36
Tabla 15. Diseño experimental para la sustitución total del CP.....	39
Tabla 16. Composición teórica del silicato de sodio (Na_2SiO_3).....	40
Tabla 17. Cantidad de Materiales para morteros 100% pómez	40
Tabla 18. % de Humedad de la Arena Motastepe	50
Tabla 19. Resultado de prueba de Gravedad específica y % Absorción de AM...	51
Tabla 20. Distribución Granulométrica de la AM.....	52
Tabla 21. Límites de especificación para la distribución granulometría de agregado ligero según ASTM C 136 – 06	52
Tabla 22. RMC promedio de Experimentos	54
Tabla 23. Experimentos con valores más altos de RMC y sus formulaciones.....	56
Tabla 24. Resultado de RMC a 28 días de curado e indicadores estadísticos.....	58
Tabla 25. Valores de Pesos Unitarios de especímenes de experimentos	61
Tabla 26. Relación S/R para RMC de compósitos.....	67
Tabla 27. Niveles Óptimos de las variables de estudio para Maximizar la RMC ..	68
Tabla 28. Relación S/R en dB calculada con la formula “Nominal es Mejor”	69
Tabla 29. Niveles Óptimos de las variables “Nominal es Mejor”	71
Tabla 30. Niveles Óptimos de las variables “Nominal es Mejor” al 30% de PP	71
Tabla 31. RMC de morteros 100% PP (Mpa)	71
Tabla 32. Datos del Peso Unitario de Especímenes de geopolímeros	74
Tabla 33. RMC de morteros de referencia (100% CPO)	76
Tabla 34. Valor de RMC promedio de tratamientos selectos.....	77
Tabla 35. IAP de tratamientos de compósitos con mezclas selectas	78
Tabla 36. RMC de experimentos en solución de Sulfato de Magnesio.....	80
Tabla 37. PUP de tratamientos antes y después de ataque por $MgSO_4$	81

Tabla 38. RMC promedio de especímenes con Ataque por altas temperaturas...83

Anexos

Tabla i. Promedios de S/R para cada factor en un analisis Taguchi “Mayor es Mejor” a 28 días de curado 91

Tabla ii. Promedios de S/R para cada factor en un analisis Taguchi “Nominal es Mejor” a 28 días de curado 92

Tabla iii. RMC de especímenes de morteros 100% con CPO a las diferentes edades de curado para mezcla “Nominal es Mejor” 93

Tabla iv. RMC de especímenes de morteros 100% con CPO a las diferentes edades de curado para mezcla “Mayor es Mejor” 94

Tabla v. RMC de especímenes elaborados 100% con PP al 6% de Na_2O respecto al ligante..... 95

Tabla vi. RMC de especímenes elaborados 100% con PP al 12% de Na_2O respecto al ligante 96

Tabla vii. RMC de morteros con ataque por Sulfato de Magensio 97

Tabla viii. RMC de morteros con ataque por Altas Temperaturas..... 98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Ordenamiento atómico de un cristal de SiO_2 (b) Estructura amorfa de SiO_2	20
Figura 2. Molino de bolas Marca SOILTEST.....	31
Figura 3. Cuerpos molidores del Molino de acero.....	31
Figura 4. Maquina Mezcladora.....	37
Figura 5. Rondas y secuencias de aplicación de golpes.....	38
Figura 6. Capas de especímenes de morteros compósitos	38
Figura 7. Maquina hidráulica para ensayo de RMC	43
Figura 8. Especímenes en solución de MgSO_4 al 5%.....	44
Figura 9. Material proveniente del banco de Mateare.	45
Figura 10. Material proveniente del banco de Cuajachillo.....	46
Figura 11. Material del banco de Malpaisillo	47
Figura 12. Pumicita Pulverizada.....	49
Figura 13. Gráfico de distribución Granulométrica de la AM	53
Figura 14. Gráficos de RMC promedio a los diferentes días de curado	55
Figura 15. Gráficos de valores individuales de RMC de cada Experimento	59
Figura 16. Gráficos de CV de cada experimento	60
Figura 17. Gráficos de valores individuales de PU de Especímenes	61
Figura 18. Banco de Materiales y su efecto en la RMC	63
Figura 19. Gráfico de % de sustitución de CPO por PP vs RMC	64
Figura 20. Gráfico de Relación en Peso de Arena/Ligante vs RMC.....	65
Figura 21. Gráfico de relación en peso Agua/Ligante vs RMC.....	66
Figura 22. Gráfico de Señal/Ruido vs niveles de estudio “Mayor es Mejor”	67
Figura 23. Gráfico de Señal/Ruido vs niveles de estudio “Nominal es Mejor”	70
Figura 24. Gráfica de promedios RMC de Geopolímeros	72
Figura 25. Gráfico de Coeficiente de Variación para los tratamientos.....	73
Figura 26. Gráfico de RMC promedio de morteros de referencia.....	76
Figura 27. Gráfico de % de Absorción de los tratamientos	79
Figura 28. Gráfico % de Absorción de solución de sulfato de tratamientos selectos	81

Anexos

Figura i. Moldes utilizados para elaborar los especímenes.....	99
Figura ii. Desmoldado de especímenes.....	99
Figura iii. Especimen después de ensayado la RMC (buena Resistencia).....	100
Figura iv. Especimen destruido después de ensayo RMC (poca Resistencia) ..	100
Figura v. Especímenes selectos antes de ataque por Altas Temperaturas	101
Figura vi. Especímenes selectos después del ataque por altas temperaturas junto a especímenes de referencia	101

Figura vii. Especímenes compósitos (más claros) y geo-polímeros al 12% de Na_2O (más oscuros).....	102
Figura vii. Geo-polímeros al 12% de Na_2O después de ensayo RMC	102

RESUMEN

La presente investigación se orientó a estudiar la viabilidad técnica de utilizar Pumicita Pulverizada (PP) como material sustituto parcial y total del Cemento Portland Ordinario (CPO) en la elaboración de morteros. De 5 bancos de Pumicita identificados como los más importantes del pacifico central de nuestro país, se seleccionaron 3 principales para la presente investigación mediante el método de selección cualitativo por puntos, resultando que los bancos de materiales de Malpaisillo, Cuajachillo y Mateare fueron los idóneos para ser objeto de estudio. Se valoró la sustitución parcial del CPO por PP de los bancos selectos y su efecto en la Resistencia Mecánica a la Compresión (RMC) en morteros endurecidos elaborados con formulaciones de mezclas correspondientes a un arreglo experimental Taguchi L_9 (3^4), se comparó la RMC a los 28 días de curado en ambiente seco con lo establecido en la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON) 12 – 008 – 09, de lo cual, resultó que los tratamientos Exp 8, Exp 6, Exp 1 y Exp 4 del arreglo, superaron el valor nominal de RMC = 13.65 Mpa establecido para bloques estructurales tipo BE – 1 de dicha norma.

La optimización de las formulaciones se computó con las formulas estándares “Mayor es Mejor” y “Nominal es Mejor” del método Taguchi. Se corroboraron los resultados del análisis mediante la elaboración de morteros con los niveles obtenidos de la aplicación de ambas fórmulas y elaborando un tercer tratamiento con los niveles de factores obtenidos con la Formula estándar “Nominal es Mejor” pero utilizando un % de sustitución del CPO por PP mayor, estos se caracterizaron mediante lectura de RMC, Índice de Actividad Puzolánica (IAP), % de absorción, ataque por solución de sulfato y por altas temperaturas, el tercer tratamiento presentó una buena actividad puzolánica, alcanzando RMC levemente mayores al “Nominal es Mejor”, el IAP para los 3 tratamientos fue arriba del 75%, lo que indicó que la reacción Puzolánica se llevó a cabo en todos ellos, señalando la presencia de Sílice amorfo.

El ataque por solución de sulfato no afectó significativamente la RMC de los especímenes de cada tratamiento optimizado, solamente el tercer tratamiento presentó pérdida de resistencia. Por otra parte el ataque por altas temperaturas afectó en gran medida la RMC de los tres tratamientos. Los cementos alcalinos o Geopolímeros (sustitución total del CPO), se activaron con silicato de sodio con un Módulo de sílice (Ms) de 2, se utilizó una relación en peso Na_2O /Ligante al 6 y 12% y material del banco Malpaisillo, necesitando este un ambiente alcalino agresivo para la disolución de su estructura vítrea, presentando el geopolímero elaborado con una relación Na_2O /Ligante de 12% una RMC aceptable, inclusive mayor a la RMC de cualquiera de los compósitos.

INTRODUCCIÓN

La crisis económica que vive Nicaragua, propiciada incuestionablemente por la inestabilidad laboral y las constantes alzas de los precios de los derivados del petróleo, no solo han encarecido los costos de los alimentos sino que han tenido también una gran repercusión en el incremento de los costos de materiales de construcción y con esto se ha exorbitado el costo de las viviendas, anexado a esto, la disminución del poder adquisitivo de viviendas de los nicaragüenses han provocado irremediablemente un enorme déficit habitacional en nuestro país.

La constante alza de los precios de los combustibles fósiles ha encarecido directamente el costo de la energía eléctrica lo que ocasiona también un incremento en el precio de todos los productos dependientes del uso de energía eléctrica para su fabricación, siendo partícipes de esta realidad los materiales para la construcción de viviendas y especialmente el cemento portland que es un material que demanda altas cantidades de energía para su proceso de elaboración (aproximadamente 4,000 kJ/kg cemento, 25 % pérdidas) [9].

Para paliar el alto déficit de viviendas mediante la disminución de los costos de producción del cemento pórtland, se hace necesario la presencia de nuevas fuentes de materia prima que se encuentren en abundancia, a un menor costo de adquisición y que demanden menos cantidades de energía para su proceso de transformación, es en este contexto que aparece la piedra pómez o Pumicita como un material alternativo en la sustitución parcial y total del cemento portland, encaminada a generar un cementante hidráulico de bajo costo de producción, presumiblemente debido a la alta disponibilidad de la materia prima.

Siendo la Pumicita un mineral que se encuentra en Nicaragua con un potencial de disponibilidad que previamente ha sido establecido en el orden de 5,000 millones de metros cúbicos [5], podría explotarse como un recurso alternativo para sustituir parcial o totalmente al cemento portland ordinario y ofrecer una alternativa de solución al déficit habitacional en el territorio.

Los departamentos de Managua, Masaya, Granada y León, son territorios en los que estudios anteriores, ubican los bancos de mayor potencial con material idóneo desde el punto de vista técnico, incluyendo la consideración de sus propiedades químicas [8], en Masaya y específicamente en su mercado municipal se comercializa a granel la piedra pómez para usos estéticos, sin embargo esto no constituye una actividad encaminada al aprovechamiento óptimo de este material mineral.

El uso más provechoso de la Pumicita a nivel nacional que se puede mencionar, es la utilización de ésta en la elaboración de bloques, a como sucede en el departamento de Masaya en donde existen algunas empresas que se dedican a fabricar bloques utilizando Pumicita como agregado en sustitución parcial de algunos agregados tradicionales. Sin embargo, sus formulaciones son empíricas y carecen de soporte técnico ante el Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI). Al analizar lo antes mencionado, se hace visible que el aprovechamiento masivo de este material mineral ha sido muy pobre, debido tentativamente a que existen pocos estudios realizados en este campo investigativo y además se carece de una sistematización de conocimientos adquiridos en los pocos estudios realizados y actualmente no han sido retomados.

Por lo anterior, este trabajo se encamina a investigar la factibilidad técnica de elaborar un cementante hidráulico a partir de la sustitución parcial y total del cemento portland ordinario con Pumicita finamente pulverizada y así proponer una mejor alternativa de aprovechamiento de este recurso mineral que se encuentra en grandes cantidades en el territorio nacional.

La sustitución del cemento portland se realizará hasta el grado más óptimo, grado en el cual los morteros elaborados con este cementante hidráulico cumplan con la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON 12 008-09), sin poner en conflicto la calidad de las construcciones, al contrario se obtendrán buenos resultados en las pruebas físicas y mecánicas de los morteros endurecidos, además al constituir la Pumicita un recurso mineral con una alta disponibilidad y a bajo costo de adquisición se espera reducir los costos en el área de la construcción en pro de minorar los precios de las viviendas y disminuir el déficit habitacional del país.

La piedra pómez, pumita o pumicita es una materia prima mineral de origen volcánico, en cuya composición química intervienen mayoritariamente la sílice y la alúmina, con porcentajes aproximados del orden de: 70% de SiO_2 y 13% de Al_2O_3 . La Pumicita es una roca con alta porosidad debido a que durante la erupción de un volcán la masa derretida de estos (magma) se enfría rápidamente, formando millones de celdas miniaturas de aire dentro de la roca, ligera (densidades entre 0,4 a 0,9 g/cm^3), friable, eficaz aislante térmico y con propiedades puzolánicas [25].

Se espera que este trabajo preliminar sea retomado y profundizado en pro de aportar al desarrollo de Nicaragua y de abrir el camino a este campo de investigación, que si bien muchos países lo adoptaron desde hace tiempo, Nicaragua aún está en el proceso de profundización, adopción y aplicación de este campo investigativo.

I. ANTECEDENTES

Los romanos dieron un paso importante al descubrir un cemento que fabricaban mezclando cenizas volcánicas con cal viva. En Puteoli, conocido hoy como Puzzuoli se encontraba un depósito de estas cenizas, de aquí que a este cemento se le llamase "cemento puzolánico".

En 1824, Joseph Aspdin, un constructor de Leeds en Inglaterra, daba el nombre de cemento portland y patentaba un material pulverulento que amasado con agua y con arena se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la isla de Portland. Probablemente, el material patentado por Aspdin era una caliza hidráulica debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción [14].

Actualmente el cemento portland es el material aglomerante más utilizado en las diversas construcciones, sin embargo se enfrenta a problemas de índole económico (altos costos de la energía eléctrica provocados por las alzas de los combustibles derivados del petróleo) y ecológico (grandes emanaciones de CO_2 producto de la calcinación de CaCO_3 durante el proceso de fabricación y del uso de combustibles fósiles), sumado a esto también se enfrenta a la latente posibilidad de agotamiento de las fuentes de materia prima, es en esta realidad que tienen cabida los materiales alternativos sustitutos parciales y/o totales del cemento portland ordinario, teniendo un impacto de grandes magnitudes, tanto que la química del cemento y los materiales alternativos a este, han constituido una ciencia de estudio sobre la cual diversas Instituciones y Universidades han profundizado.

Desde la aparición de la necesidad latente de nuevos materiales alternativos al cemento portland se han estudiado diversos materiales y tipos de cementos, dentro de estos los que han tenido más auge son los cementos activados alcalinamente (cementos alcalinos o geopolímeros) y los cementos tipo puzolánico, que para su elaboración se puede utilizar tanto puzolana natural (origen volcánico, caolín) o artificial (arcillas, pizarras, cenizas volantes, etc.).

En este campo de investigación es de relevante importancia mencionar los aportes realizados por el MSc. L. Espinoza y el Dr. I. Escalante, quienes se especializan en este campo y han realizado diversos estudios. En 2007 realizaron una investigación de Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del Cemento Portland Ordinario (CPO), en este trabajo se activó químicamente Escoria de Alto Horno (EAH) (subproducto no metálico obtenido de la fabricación de arrabio) con Na_2O a concentraciones de 4, 6 y 8%, fabricando probetas de CPO sustituido con EAH a

niveles de 30, 50, 70% y EAH al 100% activada con Na_2O al 8% en forma de silicato de sodio de módulo 2.

A los concretos elaborados se le realizaron pruebas de resistencia mecánica a la compresión y se compararon con concreto 100% CPO, obteniéndose como resultado que a medida que se incrementa el nivel de sustitución del CPO disminuye la resistencia a la compresión y en todos los casos de sustitución parcial ningún concreto presentó resistencia a la compresión mayor que las de concreto 100% CPO, siendo la sustitución no muy favorable, sin embargo el concreto con 100% de EAH activada con Na_2O al 8% presentó mayor resistencia a la compresión, incluso mayor que la que presentó el concreto 100% CPO, seguido de los concretos activados al 6 y 4%, lo que evidencia que a mayor concentración de Na_2O el ataque químico sobre la escoria es más intenso dando como resultado una mayor cantidad de productos de hidratación que densifica la matriz aumentando la resistencia mecánica [9] .

A nivel nacional no se cuenta con muchos estudios realizados en este campo de investigación, sin embargo la Universidad Nacional de Ingeniería y específicamente la Facultad de Ingeniería Química está impulsando temas concernientes a este campo, obteniendo como primeros avances los estudios realizados por X. Y. Mejía Cajina y C. F. Blanco Cruz [19], quienes compararon las propiedades físico-mecánicas de morteros utilizando vidrio de desecho como reemplazo parcial y total del cemento portland, en esta investigación utilizaron botellas de vidrio de desecho, 60% botellas de color verde, 35% de color blanco, 5% de color café que fueron finamente pulverizadas y luego activadas químicamente con NaOH a concentraciones de 4, 8 y 12% en peso con respecto al ligante.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica de elaborar un cementante hidráulico tipo puzolánico a partir de la sustitución parcial y total del cemento portland con Pumicita finamente pulverizada y mezclas de materiales optimizadas por el método de Taguchi.

2.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar tres bancos de Pumicita que resulten más viables técnicamente para el proceso de estudio de sustitución parcial y total del cemento portland.
2. Determinar la reactividad puzolánico de la Pumicita de los bancos seleccionados mediante el índice de actividad puzolánica.
3. Valorar la sustitución parcial del cemento portland con Pumicita pulverizada proveniente de los diferentes bancos, a niveles de sustitución de 10, 20 y 30% y su efecto en la resistencia mecánica a la compresión de los morteros a los 7, 14 y 28 días de curado.
4. Optimizar la formulación de mezclas de materiales, mediante el método de Taguchi.
5. Evaluar la sustitución total del cemento portland por Pumicita pulverizada activada alcalinamente con silicato de sodio al 6 y 12% y su efecto sobre las propiedades mecánicas de los morteros.
6. Comparar la resistencia mecánica a la compresión de los morteros con sustitución parcial y total del cemento portland ordinario por Pumicita pulverizada, con lo estipulado en la NTON 12 008-09.
7. Evaluar el efecto del ataque químico de sulfatos en la resistencia mecánica a compresión de morteros selectos con mezclas optimizadas.
8. Analizar la variación de las propiedades físicas de los morteros selectos frente a situaciones de temperaturas extremas.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 El Cemento

En ingeniería civil y construcción se denomina cemento a un aglutinante o aglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica capaz de fraguar y endurecer al reaccionar con el agua y adquiriendo por ello consistencia pétrea, el hormigón o concreto. Su uso está muy generalizado, siendo su principal función la de aglutinante [4].

3.2 Cemento portland

El cemento Portland contiene 4 compuestos químicos mayoritarios, los minerales de clínker, que son: C_3S ($3CaO.SiO_2$) = silicato tricálcico, C_2S ($2CaO.SiO_2$) = silicato dicálcico, C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) = aluminato tricálcico y C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) = ferrita aluminatotetracálcico (Esta fórmula es la composición promedio de una serie de soluciones sólidas entre C_6A_2F y C_6AF_2), junto con varios compuestos minoritarios, como MgO , cal libre y sulfatos de álcalis [13].

Al salir del horno, el clínker es enfriado y luego es molido junto con yeso ($CaSO_4.2H_2O$ o más abreviado $C\hat{S}H_2$), formándose así el cemento Portland. La cantidad de minerales principales en el clínker puede variar y por eso el cemento Portland puede tener distintas propiedades. Los minerales C_3S y C_2S constituyen, generalmente, el 75-80 % del peso del cemento Portland [13].

La Tabla 1 presenta una composición química promedio del Cemento Portland Ordinario.

Tabla 1. Composición química del CPO

Óxido	CPO (% peso/peso)
CaO	61.58
SiO ₂	22.31
Al ₂ O ₃	4.90
SO ₃	4.41
Fe ₂ O ₃	3.87
MgO	1.60
K ₂ O	1.34
TiO ₂	-
MnO	-

Fuente: Espinoza L. y Escalante I. [9]

3.2.1 Tipos de cementos

Se fabrican diferentes tipos de cemento portland para satisfacer los requerimientos físicos y químicos para aplicaciones específicas. Según las normas NMX-C-414-ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación) hay seis tipos básicos de cementos, los cuales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de cemento

Tipo	Denominación	Descripción
CPO	Cemento Portland Ordinario	Es el cemento producido a base de la molienda del Clinker portland y usualmente, sulfato de calcio.
CPP	Cemento Portland Puzolánico	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker portland, materiales puzolánicos y usualmente sulfato de calcio.
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker portland, escoria de alto horno y usualmente sulfato de calcio.
CPC	Cemento Portland Compuesto	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En este caso la caliza, puede ser el único componente.
CPS	Cemento Portland con humo de Sílice	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker portland, humo de sílice y usualmente sulfato de calcio.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno	Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Fuente: Méndez Mariano Roberto R. [20]

3.2.2 Propiedades del cemento

El silicato de calcio hidratado (CSH) es el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, fraguado, endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional principalmente dependen del gel del hidrato de silicato de calcio. Es la médula del concreto. La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO_2), en una proporción en peso sobre el orden de 3 a 2. Las

partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en microscopio electrónico de barrido.

En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el silicato de calcio hidratado y en las fases cristalinas. Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente y durable es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcla el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria, la relación mínima Agua – Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25 [11].

El calor que se produce cuando el concreto está en el proceso de fraguado es conocido como calor de hidratación. El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudara a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación. En zonas cálidas, el calor en estructuras masivas, tales como presas, puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de endurecer [11].

3.2.3 Función del yeso

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua, porque la velocidad determinará el tiempo de fraguado y de endurecimiento. El yeso, que es adicionado durante la molienda del clínker, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento Portland. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

3.2.4 Hidratación de los compuestos puros del cemento

Las reacciones químicas que describen la hidratación del cemento son muy complejas. Para poder entender los procesos químicos que determinan el fraguado del cemento, es necesario estudiar la hidratación de cada uno de los minerales de clínker por separado.

Esto supone que la hidratación de cada compuesto es un proceso independiente de los otros procesos que tienen lugar durante la hidratación del cemento. Esta es una suposición y no siempre es válida, ya que las reacciones entre los compuestos de hidratación pueden tener consecuencias importantes pero, por lo menos con respecto a la hidratación de los silicatos, la suposición es bastante representativa. Las características tratadas se refieren a la hidratación de un cemento mezclado con agua para simular las condiciones del hormigón [13].

3.2.5 Reacción de hidratación de los Silicatos de calcio

Los dos compuestos de silicato cálcico tienen casi el mismo proceso de hidratación. Sólo se distinguen por la cantidad de $\text{Ca(OH)}_2 = \text{CH}$ que se forma y por la cantidad de calor de hidratación (ΔH) liberado durante las reacciones.



El producto principal de la hidratación es un hidrato de silicato cálcico $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4$. La fórmula $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4$ sólo es una aproximación, porque la composición de este hidrato puede variar en un intervalo bien amplio. Es una materia no cristalina de composición variable (geliforme), que forma partículas muy pequeñas (menos de 1 micra en cualquier dimensión). La denominación C-S-H gel es el responsable de las propiedades mecánicas del concreto. Por el contrario, el hidróxido de calcio es una materia cristalina con una composición fija, que lixivia fácilmente en el agua, dejando poros en la microestructura [13].

3.3 Materiales alternativos al cemento portland

Los materiales alternativos tienen cabida como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento Portland. Parte de la generación de CO_2 viene de la des-carbonatación del CaCO_3 que representa alrededor del 80% de la materia prima (0.3 Kg CO_2 /Kg cemento). El uso de fuentes de CaO diferentes puede aliviar parcialmente tal situación. Por otro lado, es posible usar cenizas y escorias como materias primas; sin embargo el carácter adhesivo de los materiales alternativos es la propiedad más importante. Se puede definir un material adhesivo alternativo como aquel que tenga propiedades cementosas *per se* o latentes (que requieren ser potenciadas externamente), esto es, que pueda emplearse como sustituto parcial o total del cemento Portland.

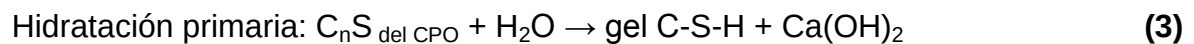
Los materiales alternativos se pueden clasificar en sintéticos o naturales, pero una clasificación más adecuada involucra su composición química y por ende el tipo de

productos de hidratación que forman. Se puede decir que existen materiales puzolánicos e hidráulicos [6].

3.3.1 Materiales puzolánicos: sustitución parcial del cemento

Las puzolanas son aquellos materiales de composición rica en SiO_2 , similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos. Ejemplos de éstos son la ceniza volcánica, la sílice condensada, algunos caolines, ceniza de cascarilla de arroz y desechos geotermales. Las propiedades de las puzolanas (incluso las naturales) varían considerablemente, dependiendo de su origen.

Las puzolanas, incorporadas dentro del CPP (Cemento Portland Puzolánico), tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria donde se combinan con el Ca(OH)_2 formado durante la hidratación de los compuestos sílico-calcáreos (C_3S y C_2S) denominada primaria (3), resultando compuestos C-S-H (sílico-calcáreos-hidratados o bien silicato de calcio hidratado):



El SiO_2 es aportado por la puzolana y el Ca(OH)_2 –hidróxido de calcio o portlandita- es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de Ca(OH)_2 [2].

La generación de más C-S-H y la eliminación del CH producido por el cemento explican el incremento en las propiedades mecánicas de cementos reemplazados. Los antiguos romanos mezclaban simplemente cal [Ca(OH)_2] con material volcánico y obtenían C-S-H como se plantea en la reacción anterior. Además de la composición química de las puzolanas, sus características físicas, como tamaño de partícula y morfología, influyen también considerablemente en las propiedades del cemento substituido. Los niveles de reemplazo de los materiales puzolánicos por cemento pueden llegar hasta un 30% [6].

Las puzolanas también pueden clasificarse según su origen en puzolanas naturales y puzolanas artificiales. Las Puzolanas Artificiales son generalmente subproductos industriales y materiales tratados térmicamente. La utilización de las puzolanas en el Cemento Portland, en términos generales, reducen el calor de hidratación por la reducción de la cantidad de cemento cuyas reacciones de fraguado son exotérmicas; esto implica una menor formación de capilares y por ende una mayor densidad y compacidad, a su vez necesita una menor utilización de agua para el curado de los elementos realizados con este tipo de mezclas [6].

La Tabla 3 presenta un resumen de las características de algunos materiales puzolánicos. Todos estos materiales pueden ser empleados como reemplazo parcial del cemento Pórtland y algunos como reemplazo total.

Tabla 3. Características generales de algunos materiales puzolánicos

	Procesamiento adicional requerido	Características	Origen
Sílice condensada	Aglomeración para su manejo	Partículas esféricas de tamaño $<1\mu\text{m}$ alta área superficial	Vapores condensados de la producción de carburo de silicio
Ceniza volcánica	Molienda	Reactividad variable , partículas de forma irregular	Emisiones volcánicas
Ceniza de cascarilla de arroz	Calcinación, se aprovecha el calor generado como combustible	Morfología irregular, tamaño muy fino, alta área superficial	Producción de grano de arroz
Sílice geotérmica	Lavado	Morfología irregular, tamaño submicrónico, alta área superficial	Incrustaciones en líneas de vapores geotermal (generación de electricidad)
Caolines	Tratamiento térmico hasta 800 °C	Tamaño de partícula fina, alta área superficial	Mineral
Ceniza volante		Partículas esféricas de tamaño variable similar o menor a las del cemento portland	Generadas por la combustión de carbón para la generación de electricidad

Fuente: Materiales alternativos al cemento portland, J. I. Escalante-García

3.3.2 Mejoras de las propiedades del cemento al agregar puzolanas

3.3.2.1 Menor calor de hidratación

La reacción durante el fraguado es más lenta que para el cemento portland común y permite la disipación de calor en mayor tiempo, efecto muy favorable para el hormigón en masa.

3.3.2.2 Mayor manejabilidad de mezclas frescas

La puzolana no absorbe agua, lo que implica mayor disponibilidad de agua para lubricar la mezcla, para una misma relación agua / cemento.

3.3.2.3 Resistencia moderada a la acción de los sulfatos

Las sales, como los sulfatos, que se emplean en el tratamiento de aguas potables, o las que vienen disueltas en aguas a tratarse, reaccionan con la cal libre de los hormigones de cemento portland común, produciendo su deterioro.

En el hormigón con Cemento Pozolánico, la cal libre está controlada por la presencia de la puzolana, eliminándose la posibilidad de una reacción perjudicial en él.

3.3.2.4 Impide la actividad alcali-silice

Algunos áridos tienen la posibilidad de reaccionar químicamente con los álcalis del cemento, provocando expansiones peligrosas que pueden dañar seriamente las estructuras. La puzolana neutraliza esa acción, eliminándola o haciéndola inocua.

3.3.2.5 Resistencia a agentes agresivos

El hormigón fabricado con Cemento Pozolánico, es más compacto e impermeable que el de Cemento Portland común, por tanto se impide y reduce el efecto dañino de agentes agresivos como: aguas salinas, suelos sulfatados, aguas servidas y desechos industriales [11].

3.3.2.6 Resistencia Mecánica a la compresión

Ya se explicó anteriormente el mecanismo de hidratación del Cemento Portland Pozolánico (CPP), por lo cual resulta evidente que el desarrollo de resistencia depende entre otros aspectos de la velocidad de hidratación de las partículas de clínker portland donde intervienen fundamentalmente su composición química, tamaño y del tipo, contenido y finura de la puzolana. Generalmente, el uso de CPP supone un desarrollo de resistencia más “lento” que el CPO debido a que la puzolana se hidrata en forma retardada respecto del clínker [2].

3.3.3 Materiales de sustitución total del cemento: cementos alcalinos

Los Materiales hidráulicos pueden considerarse como materiales sintéticos dado que son subproductos. En términos generales requieren de molienda y de activación antes de ser empleados como reemplazo del cemento Portland y generalmente se requiere un estado estructural amorfo (como los vidrios) esto es, con alta energía interna y por ende inestables termodinámicamente y muy reactivos químicamente.

Existen diversas formas de activación de las reacciones. Una opción es la activación mecánica, que es el incremento del área superficial hasta 4000 ó 5000 cm²/g; sin embargo, a valores muy altos se requiere más agua para obtener fluidez en los concretos, y en consecuencia la resistencia a la compresión se ve comprometida. La activación química es otra opción, en la que se induce la

disolución de la estructura amorfa mediante ataque con álcalis como NaOH, silicato de sodio (SS), Ca(OH)_2 , Na_2SO_4 o combinaciones). El mecanismo básico es el ataque alcalino de los OH^- sobre la estructura vítrea para disolverla, con la consecuente precipitación de productos cementosos tipo CSH o gel de sílice [10].

Las propiedades primordiales de interés para los usuarios de materiales de construcción son la resistencia mecánica y la durabilidad. Algunas ventajas que pueden explotarse del empleo de materiales cementosos constituidos parcial o totalmente por desechos o subproductos son los siguientes (con respecto de los materiales basados en Cemento Portland):

- Propiedades mecánicas similares o en muchos casos superiores.
- Durabilidad mejorada a ambientes químicos agresivos (p. ej., agua de mar, pisos en plantas químicas).
- Extensión de la capacidad de producción del cemento cuando se usan como reemplazo parcial (10-90%) sin requerir de procesamiento térmico adicional (ahorro de energía y menor contaminación).
- Reducción de la acumulación de desechos en tiraderos o rellenos [19].

3.4 Morteros

Los morteros son mezclas plásticas obtenidas con un aglomerante, arena y agua, que sirven para unir o fabricar las piedras o ladrillos que integran las obras de fábrica y para revestirlos con enlucidos o revocos.

Los morteros se denominan según sea el aglomerante. Así se tienen morteros de yeso, de cal o de cemento.

Los **morteros de cemento compósito** son aquéllos en los que intervienen dos aglomerantes, como por ejemplo, yeso y cal, cemento y cal, cemento y puzolana, etc. La mezcla de un aglomerante y agua se denomina pasta y se dice de consistencia normal cuando la cantidad de agua de amasado es igual a los huecos del aglomerante suelto; si es menor será seca y mayor fluida, llamándose lechada cuando se amasa con mucha agua.

3.4.1 Curado del mortero

El curado es la manutención de la temperatura y del contenido de humedad satisfactorios, por un periodo de tiempo que empieza inmediatamente después de la colocación (colado) y del acabado, para que se puedan desarrollar las propiedades deseadas en el concreto. Siempre se debe enfatizar la necesidad de curado pues tiene una fuerte influencia sobre las propiedades del concreto

endurecido, o sea, el curado adecuado hace que el concreto tenga mayor durabilidad, resistencia, impermeabilidad, resistencia a abrasión, estabilidad dimensional, resistencia a congelación-deshielo y a descongelantes. Las losas expuestas son especialmente sensibles al curado, pues se puede reducir significativamente el desarrollo de la resistencia mecánica y la resistencia a la congelación deshielo en su superficie, cuando el curado no es apropiado [22].

3.4.2 Agregados tradicionales del mortero

3.4.2.1 Agua de amasado

- ✓ Participa en las reacciones de hidratación del cemento.
- ✓ Confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para su puesta en obra.
- ✓ La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario.
- ✓ El agua en exceso se evapora y crea una serie de huecos en el hormigón, disminuyendo su resistencia.
- ✓ Un déficit de agua de amasado origina masas pocos trabajables y de difícil colocación en obra.
- ✓ Cada litro de agua de amasado añadido de más a un hormigón equivale a una disminución de 2 kg de cemento.

3.4.2.2 Agua de curado

Durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del hormigón, el agua de curado tiene por objeto:

- ✓ Evitar la desecación.
- ✓ Mejorar la hidratación del cemento
- ✓ Impedir una retracción prematura

3.4.2.3 Áridos

Los áridos se oponen a la retracción del hormigón.

Grava o árido grueso: fracción mayor de 5 mm

Arena o árido fino: fracción menor de 5 mm

Arena gruesa: 2-5 mm

Arena fina: 0.08-2 mm

Polvo o fino de la arena: < 0.08 mm

Desde el punto de vista de durabilidad en medios agresivos: deben preferirse los áridos de tipo silíceo (gravas y arenas de río o de cantera) y los que provienen de machaqueo de rocas volcánicas (basalto, andesita) o de calizas sólidas y densas. Las rocas sedimentarias (calizas, dolomitas) y las volcánicas sueltas (Pómez, toba) deben ser objeto de análisis. No deben emplearse áridos que provengan de calizas blandas, feldespatos, yesos, piritas o rocas porosas.

3.4.2.4 La arena

No es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena.

La **arena de mina** suele tener arcilla en exceso, por lo que es necesario lavarla enérgicamente.

Las **arenas de mar**, si son limpias, pueden emplearse en hormigón armado, previo lavado con agua dulce para eliminar la sal.

Las **arenas de machaqueo** de granitos, basaltos y rocas análogas son excelentes, con tal de que sean rocas sanas que no acusen un proceso de descomposición.

Las **arenas de procedencia caliza** son de calidad muy variable. Requieren más cantidad de agua de amasado que las silíceas [22].

3.4.3 Propiedades de los morteros en estado plástico

- *Manejabilidad:* Es una medida de la facilidad de manipulación de la mezcla, es decir, de la facilidad para dejarse manejar. La manejabilidad está relacionada con la consistencia de la mezcla en cuanto a blanda o seca, tal que como se encuentra en estado plástico; depende de la proporción de arena y cemento y de la forma, textura y módulo de finura de la arena. Para medir la manejabilidad del mortero se usa el ensayo de fluidez.
- *Retención de agua:* se refiere a la capacidad del mortero de mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado, por ejemplo un ladrillo.

Para mejorar la retención de agua se puede agregar cal, o aumentar el contenido de finos en la arena, o emplear aditivos plastificantes o incorporadores de aire.

La retención de agua influye en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, pues un mortero que no retenga el agua no permite la hidratación del cemento.

- *Velocidad de endurecimiento:* Los tiempos de fraguado final e inicial de un mortero están entre 2 y 24 horas; dependen de la composición de la mezcla y de las condiciones ambientales como el clima y humedad [23].

3.4.4 Propiedades de los morteros en estado endurecido

- *Retracción:* se debe principalmente a la retracción de la pasta de cemento y se ve aumentada cuando el mortero tiene altos contenidos de cemento. Para mejorar esta retracción y evitar agrietamientos es conveniente utilizar arenas con granos de textura rugosa, y tener en cuenta además que en

clima caliente y de muchos vientos, el agua tiende a evaporarse más rápidamente produciendo tensiones internas en el mortero, que se traducen en grietas visibles.

La retracción es proporcional al espesor de la capa, a la riqueza en cemento de la mezcla y a la mayor absorción de la pared sobre la que se vaya a aplicar.

- *Adherencia:* es la capacidad de absorber, tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero y una estructura, es decir a la capacidad de responder monolíticamente con las piezas que une ante solicitudes de carga. En el caso de la mampostería, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie sobre la que se va a colocar el mortero sea tan rugosa como sea posible y tenga una absorción adecuada, comparable con la del mortero.
- *Resistencia:* Si el mortero es utilizado como pega, debe proporcionar una unión resistente. Si el mortero va a ser utilizado para soportar cargas altas y sucesos, tal es el caso de la mampostería estructural, debe poseer una alta resistencia a la compresión.

Para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero; y que para un mismo contenido de cemento en un volumen determinado de mortero el más resistente y probablemente el más impermeable será aquel mortero que presente mayor densidad, o sea aquel que en la unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos.

El tamaño de los granos de la arena juega un papel importante en la resistencia del mortero; un mortero hecho con arena fina será menos denso que un mortero hecho con arena gruesa para un mismo contenido de cemento.

Por último el contenido de agua del mortero tiene influencia sobre su resistencia; los morteros secos dan mayor resistencia que los morteros húmedos, porque pueden ser más densamente compactados.

- *Durabilidad:* Al igual que en el concreto, la durabilidad se define como la resistencia que presenta el mortero ante agentes externos como: Baja temperatura, penetración de agua, desgaste por abrasión y agentes corrosivos. En general, se puede decir que morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad.

- *Apariencia:* La apariencia del mortero después de fraguado juega un importante papel en las mamposterías de ladrillo a la vista; para lograr una buena apariencia es necesario aplicar morteros de buena plasticidad [23].

3.4.5 Ataque por solución de sulfatos al concreto

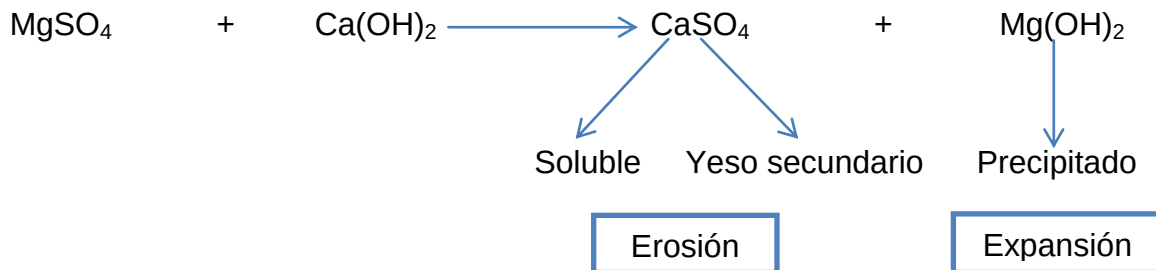
El concreto expuesto a soluciones de sulfatos puede ser atacado y sufrir deterioro en un grado que depende de los constituyentes del concreto, la calidad del concreto en el lugar, así como el tipo y la concentración del sulfato. Los sulfatos de magnesio y amonio son los más dañinos al concreto.

Hay dos reacciones químicas involucradas en el ataque de sulfatos al concreto.

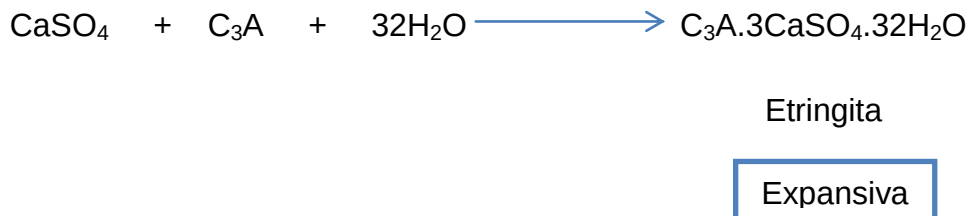
1. Reacción del sulfato con CH liberado durante la hidratación del cemento, formando sulfatos de calcio (yeso).
2. Reacción del sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado, formando sulfoaluminato de calcio (etringita expansiva).

Acción de Sulfatos

1. Sustitución del Ca^{+2} por Mg^{+2}



2. Acción del yeso secundario



Estas dos reacciones dan como resultado un incremento en el volumen de sólidos, causa de la expansión y descomposición de los concretos expuestos a soluciones de sulfatos, la presencia de otros iones en la solución del sulfato afecta la potencia del ataque. Un ejemplo típico es el agua de mar, que contiene sulfatos y cloruros. Generalmente, la presencia de iones cloruro altera la extensión y la naturaleza de

la reacción química, produciendo menor expansión en el concreto debido a los sulfatos en el agua de mar [15].

El ataque de sulfatos al concreto tiene lugar cuando la solución de sulfato penetra en el concreto y reacciona químicamente con sus constituyentes, principalmente con la matriz de cemento. Así pues, los factores que afectan la resistencia a sulfatos del concreto no son solamente aquellos que influyen en la reacción química con la matriz de cemento, sino también aquellos que influyen en la permeabilidad y la calidad total del concreto [19].

3.4.6 Ataque por altas Temperaturas al concreto

Es conocido que la mayoría de los agregados son estables por debajo de 500 °C, en el caso de los agregados no silíceos no sufren transformaciones ni reacciones de descomposición a temperaturas inferiores a los 600 °C. Por otra parte, la des carbonatación de los agregados calcáreos se produce entre los 600 y 900 °C. Los basaltos, en general, no muestran cambios de fase por debajo de los 800 °C.

Con respecto a las modificaciones que se producen en la pasta de cemento a medida que es expuesta a temperaturas crecientes se pueden indicar como puntos salientes la expulsión del agua evaporable (100 °C), el comienzo de la deshidratación del silicato de calcio hidratado (180 °C), la descomposición del hidróxido de calcio (500 °C) y la del silicato de calcio hidratado (que comienza alrededor de 700 °C).

En consecuencia las afectaciones producidas por las altas temperaturas son mucho más notorias cuando el hormigón supera los 500 °C; considerándose que para este nivel, los daños que se producen son prácticamente irreversibles.

La deshidratación y cambios de porosidad de la pasta de cemento y las deformaciones diferenciales o procesos de transformación de los agregados que genera la exposición a altas temperaturas afecta como era de esperar la resistencia y la deformabilidad [3].

3.5 Características Generales de los sólidos Amorfos

Los materiales en el estado sólido se clasifican en cristalinos, amorfos o semicristalinos. En los cristalinos, los átomos adoptan arreglos ordenados y repetitivos; formando estructuras tridimensionales periódicas; un ejemplo clásico son los metales y sus aleaciones. En los amorfos no existe ordenamiento periódico; el vidrio y algunos materiales plásticos como el poliestireno son los ejemplos más comunes. La Figura 1 (a) es una representación bidimensional de un sólido cristalino. La Figura 1 (b) representa el mismo sólido pero con estructura amorfa.

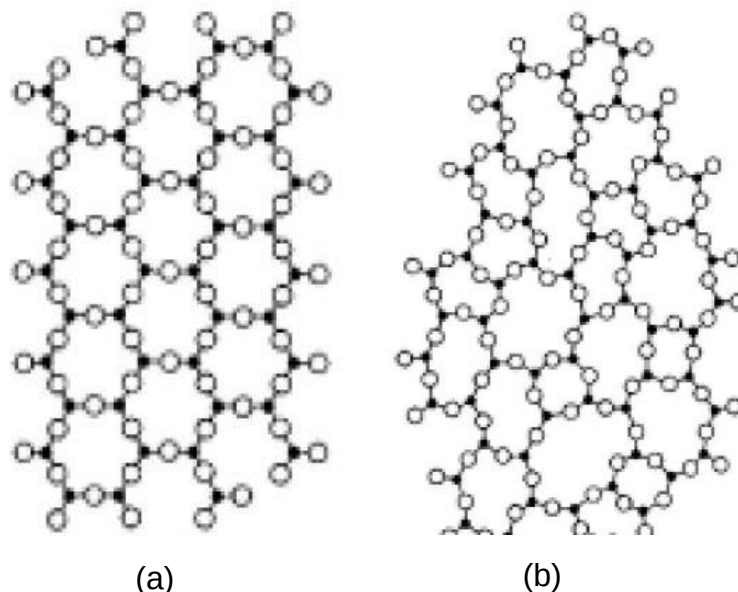


Figura 1. (a) Ordenamiento atómico de un cristal de SiO_2 (b) Estructura amorfa de SiO_2

El dióxido de silicio (SiO_2), presenta esta propiedad según como sea enfriado, cuando es enfriado lentamente forma el cuarzo (cristalino) y cuando es enfriado rápidamente, forma el vidrio (amorfo). Los semicristalinos presentan una parte amorfa y otra cristalina, materiales plásticos como el polietileno y el polipropileno son ejemplos típicos.

Desde el punto de vista estructural, los sólidos amorfos se clasifican según si están compuestos por redes tridimensionales no periódicas (vidrio), moléculas individuales de cadena larga (polímeros naturales y plásticos) u ordenaciones intermedias entre estos dos casos límite (cristales líquidos). La estructura amorfa carece de ordenamiento de largo alcance, es decir superior al tamaño de las moléculas o unidades repetitivas. Se asignó el término “amorfo” a esta estructura antes de que la Difracción de Rayos X mostrara que si existe un ordenamiento, pero es de corto alcance [26].

3.6 Piedra pómez o Pumicita

La piedra pómez es un material natural de origen volcánico producido por la liberación de gases durante la solidificación de la lava, puede exhibir propiedades básicas o ácidas dependiendo del contenido de SiO_2 y CaO/MgO . Químicamente tienen una composición de dióxido de sílice y trióxido de aluminio, entre otros componentes minoritarios.

Su dureza es de 5/6 Mohs. Aunque de dureza media, debido a su alta friabilidad el poder abrasivo es muy bajo, produciendo un efecto muy suave sobre la superficie.

Sus poros cerrados le confieren una baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es muy ligero.

3.6.1 Piedra pómez o Pumicita como sustituto del cemento portland

La Pumicita es uno de los materiales naturales principalmente usados en mezclas de concreto para lograr propiedades de aislamiento térmico. La estructura porosa de la pómez y la ausencia de estructura cristalina sólida le da al agregado excelentes cualidades para absorber el sonido y aislar el calor. Agregar Pumicita disminuye la densidad y la conductividad térmica del concreto hasta en 40% y 46% respectivamente. La conductividad térmica y la densidad del concreto con agregado de piedra pómez incrementan con la dosis de cemento [24].

La evaluación de la actividad puzolánica es esencial para evaluar al material como una puzolana. De acuerdo con ASTM C 618, las puzolanas naturales que vayan a utilizarse como aditivo mineral en el cemento portland deben cumplir con ciertos requerimientos físicos y químicos. Por ejemplo, los aditivos minerales clase N deben cumplir con un mínimo de 70 por ciento en peso, en la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$; en el caso de las puzolanas naturales, contienen entre 55,8 y 88,5 por ciento. Este requerimiento químico es arbitrario para el propósito de tener una relación directa con las propiedades del material. La importancia del contenido ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) es subrayado por el hecho de que las fases vítreas activas generalmente son más ricas en contenido de sílice y alúmina [21].

Las puzolanas naturales Nicaragüenses muestran un contenido de sílice bastante considerable, estudios anteriores orientados a la caracterización de los bancos de pómez más prometedores de nuestro país, proyectan que el contenido de SiO_2 tuvo un promedio de 69.04 para 5 bancos muestreados en las diferentes ciudades [8].

A continuación se presenta la Tabla 4 con la composición química de la piedra pómez de la India, datos que se consideran un buen promedio ya que el contenido de sílice que se encontró en muestras de pómez tomadas de bancos de este país (Nicaragua) es bastante similar al que se presenta en esta tabla.

Tabla 4. Composición química de la piedra pómez o Pumicita

Composición química (%)	
SiO ₂	71.10
Al ₂ O ₃	13.50
Fe ₂ O ₃	1.68
CaO	1.14
MgO	0.40
Na ₂ O	3.40
K ₂ O	4.05
SO ₃	-
CaO (%) libre	-

Fuente: Indian Journal of Engineering & Materials Sciences [24]

3.7 Evaluación de la puzolanicidad

Varios métodos han sido aplicados para evaluar las puzolanas los cuales contemplan puntos de vistas químicos, físicos y mecánicos, y establecen evaluaciones cualitativas y cuantitativas. Todos estos métodos se basan en la reacción del material puzolánico en sistemas hidróxido de calcio-puzolana.

Hay gran desacuerdo acerca de cómo evaluar las propiedades de una puzolana, debido a que el mecanismo y la cinética de las reacciones puzolánicas son complejas. No han sido caracterizados con la profundidad requerida, desconociéndose, muchas veces, la esencia del proceso de reacción y las características intrínsecas de los materiales puzolánicos. Los métodos de evaluación puzolánica en sistemas hidróxido de calcio-puzolana, se basan en la determinación de la velocidad de consumo del Ca(OH)₂ como medida del avance de la reacción, y pueden ser clasificados como métodos indirectos y directos.

Los métodos indirectos, basados en el uso de una técnica conductimétrica, son aquellos que permiten monitorizar el consumo del Ca(OH)₂ sobre la base de la medición de la conductividad eléctrica de la solución puzolana- Ca(OH)₂ a medida que transcurre la reacción. Otros métodos indirectos se basan en el comportamiento de la resistencia a la compresión a medida que ocurre la reacción. Por su parte, los métodos directos se basan en la medida de la cantidad del Ca(OH)₂ que ha reaccionado con el material puzolánico que se evalúa en un momento dado [12].

3.8 Diseño de Experimentos con el Método Taguchi

En los experimentos donde el número de factores y sus niveles son pocos, es factible el uso del diseño experimental factorial. Sin embargo, para investigaciones con un gran número de experimentos, el método Taguchi ofrece una alternativa. El

Dr. Taguchi desarrolló una serie de arreglos particulares a los que denominó arreglos ortogonales:

$$L_a(B)^C \quad (5)$$

Donde: a representa el número de tratamientos a realizar, B representa el nivel al que se tomará cada factor y C es el número de factores a analizar.

La parte fundamental del método Taguchi es la optimización de los productos o procesos a fin de asegurar alta calidad y bajo costo. El principal concepto de Taguchi que debe ser discutido es el de factor de ruido. Los factores de ruido son vistos como la causa de variabilidad en rendimiento, incluyendo por qué los productos fallan. Un factor de ruido es cualquiera que causa que la característica de un proceso o producto se desvíe de su valor objetivo. Con el método Taguchi, la variación de la respuesta es examinada utilizando una relación Señal/Ruido (S/R) apropiada. Esta relación S/R deriva de la función cuadrática de pérdida y es expresada en la escala de decibele (dB). Existen tres ecuaciones para el cálculo de la relación S/R.

Menor es mejor: Se utiliza cuando el objetivo es minimizar la respuesta.

$$S/R = -10 \log \left[\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (6)$$

Mayor es mejor: Se utiliza cuando el objetivo es maximizar la respuesta.

$$S/R = -10 \log \left[\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (7)$$

Nominal es mejor: Se utiliza cuando se desea centrar la respuesta en un valor nominal.

$$S/R = -10 \log \left[\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_0)^2 \right] \quad (8)$$

Dónde: n : número de repeticiones para una combinación experimental, Y_i : lectura del i -ésimo experimento y Y_0 : valor nominal deseado.

El uso de $\log$ pretende hacer la respuesta más lineal y se multiplica por 10 para obtener decibele (dB). El análisis de los resultados se puede efectuar mediante una serie de gráficas. La importancia de cada factor se determina según la pendiente de cada gráfica. Entre más vertical se encuentre la gráfica, mayor será el efecto de este factor. Las condiciones óptimas de cada factor también se determinan a partir de las gráficas. Mientras más robusto es un producto o

proceso, más fuerte es la señal que emite contra cualquier ruido externo que trate de inhibir la fuerza de la señal.

Al igual que el análisis de la relación señal/ruido (S/R), el análisis de los valores promedio del parámetro de respuesta del proceso también indica los mismos niveles óptimos para cada factor [7, 27].

IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Bancos de Pumicita seleccionados por el proyecto Taishin Nicaragua

Los departamentos de Managua, Masaya, Granada y León, son territorios en los que estudios anteriores ubican los bancos de mayor potencial, con material idóneo desde el punto de vista técnico, incluyendo la consideración de sus propiedades químicas [8]. Investigadores del proyecto TAISHIN UNI-JICA han identificado y seleccionado 5 bancos como posibles fuentes de materia prima (Pumicita) para ser utilizada como agregado ligero en la fabricación de unidades de bloques estructurales, estos bancos fueron seleccionados tomando como prerrequisitos esenciales la cantidad de material disponible y la accesibilidad. En la Tabla 5 se presentan los 5 bancos identificados con su respectiva ubicación.

Tabla 5. Bancos de materiales propuestos

Nombre del Banco de Materiales	Localización
Cuajachillo	En el municipio de Ciudad Sandino
Las Flores	Comarca Las Flores, al Nor-Este de la Ciudad de Masaya
Mateare	Mateare 800 metros al sur
Comarca Los Castros	Los Brasiles 2 km al norte
Malpaisillo	Ciudad Malpaisillo 10 Km al norte

Fuente: Proyecto TAISHIN UNI-JICA

Una vez identificados estos 5 bancos de materiales los investigadores del proyecto TAISHIN UNI-JICA realizaron pruebas tanto físicas como químicas al material proveniente de cada banco, respetando las diferentes metodologías prescritas principalmente en las normas internacionales ASTM (American Society of Testing and Materials), pruebas preliminares realizadas para seleccionar los bancos con las características físicas y químicas idóneas para utilizar este material como agregado ligero fino en sustitución de Arena proveniente del cerro Motastepe para la fabricación de bloques estructurales.

Siendo estos los bancos con mayor potencial para ser usados como materia prima, y debido a la accesibilidad que se presentó en la adquisición tanto del material de cada banco como de los resultados de las pruebas físicas y químicas preliminares, se tomaron como objeto de estudio para la presente investigación estos 5 bancos de materiales, utilizando los resultados de las pruebas para la selección de 3 bancos idóneos para su estudio en la sustitución parcial y total del Cemento Portland Ordinario (CPO), esto en pro de disminuir el tiempo de realización de esta investigación.

La Tabla 6 presenta los resultados de las pruebas físicas y químicas preliminares realizadas al material proveniente de cada uno de los 5 bancos identificados y seleccionados por el comité de investigadores del proyecto TAISHIN UNI-JICA.

Tabla 6. Resultados de pruebas físicas y químicas realizadas a 5 bancos de Pumicita ubicados en la zona del pacifico de Nicaragua.

Banco de Material		"Las Flores"	"Malpaisillo"	"Los Castros"	"Cuajachillo"	"Mateare"	Laboratorio UNI
Sobre Tamaño (%)		35	18	50	8	16	FTC
Tamiz N°							FTC
% Que pasa El Tamiz	N°4	100	100	100	100	100	FTC
	N°8	68	92	57	88	74	FTC
	N°16	43	80	25	69	45	FTC
	N°30	17	63	10	40	20	FTC
	N°50	4	48	3	12	4	FTC
	N°100	1	30	2	2	2	FTC
	N°200	0	18	1	1	2	FTC
PVSS (Kg/m³)		656	760	630	644	647	FTC
PVSC (Kg/m³)		724	919	711	734	713	FTC
Ge Corr		1.476	1.411	1.277	1.358	1.354	FTC
Ge SSS		1.687	1.496	1.550	1.486	1.637	FTC
Ge Apar		1.887	1.587	1.768	1.563	1.61	FTC
Absorción (%)		15.7	7.11	22.02	9.58	10.88	FTC
Colorimetría		1	1	2	1	1	FTC
Contenido de Sílice (%)		70.82	71.36	65.57	69.96	67.51	FIQ

Fuente: Proyecto TAISHIN UNI-JICA.

Dónde: PVSS = Peso Volumétrico Seco Suelto, PVSC = Peso Volumétrico Seco Compactado, Ge Corr = Gravedad específica Corriente, Ge SSS = Gravedad específica en condición Saturado Superficialmente Seca y Ge Apar = Gravedad específica Aparente.

4.2 Selección de los 3 bancos de Pumicita con mayor potencial para la presente investigación.

Para la selección de los 3 bancos de materiales con las características físicas y químicas idóneas para ser utilizados como posibles fuentes de materia prima para la sustitución parcial y total del CPO en la fabricación de morteros para bloques, se utilizó el *método de selección cualitativo por puntos* que consiste en asignar valores cuantitativos a una serie de factores que se consideren relevantes para la selección, esto conduce a una comparación cuantitativa de diferentes bancos de materiales.

El método permite ponderar factores de preferencia para el investigador al tomar la decisión, siendo esta una de las principales desventajas de este método. Se puede aplicar el siguiente procedimiento para jerarquizar los factores cualitativos:

1. Desarrollar una lista de factores relevantes.
2. Asignar un peso a cada factor para indicar su importancia relativa (los pesos deben sumar 1), y el peso asignado dependerá exclusivamente del criterio del investigador.
3. Asignar una escala común a cada factor (por ejemplo, de 0 a 10) y elegir cualquier mínimo.
4. Calificar a cada sitio potencial de acuerdo con la escala designada y multiplicar la calificación por el peso.
5. Sumar la puntuación de cada sitio y elegir el de máxima puntuación [1].

Se utilizaron los resultados de 5 pruebas preliminares, considerándolas como las más relevantes para el desarrollo de esta investigación, la Tabla 7 presenta las pruebas utilizadas para la selección de los 3 bancos y el respectivo peso asignado, estableciendo el mayor peso a la característica de mayor importancia.

Tabla 7. Peso Asignado a cada característica

Características de estudio	Peso asignado
% Absorción	0.30
Granulometría	0.25
Exceso de finos % (material que pasa por la malla # 100)	0.20
Exceso de sobretamaño % (material que queda retenido en la malla # 4)	0.15
Contenido de Impurezas Orgánicas	0.10
Suma	1.00

Las consideraciones utilizadas para la asignación de peso a cada característica fueron las siguientes:

1. Se trabajó con el material en bruto, es decir, no se pasó por ninguna malla ASTM (ni por la malla 4 que separa el sobretamaño, ni por la malla 100 que separa el exceso de finos). Entonces, resultaron más convenientes aquellos bancos de materiales que tuvieran menor contenido de sobretamaño, pues sería más fácil de pulverizar. Por lo anterior también convenían aquellos bancos con mayor exceso de finos, y que además su granulometría no fuera la adecuada para usarse como agregado ligero en la elaboración de morteros, así también se está proponiendo un uso alternativo al material proveniente de este banco.
2. Con respecto al % de absorción de agua, eran más convenientes aquellos bancos de materiales con mayor % de absorción, pues, a mayor % de absorción, mayor cantidad de poros en su estructura y esto facilita el proceso de molienda. También se ofrece otra alternativa de uso, ya que como agregado ligero no es tan conveniente un alto % de absorción, debido a que puede disminuir la resistencia a la compresión.
3. El contenido de impurezas orgánicas es importante, pero en este caso no se le asignó tanto peso, pues todos los bancos cumplían con las especificaciones de las ASTM.

Se elaboró la matriz de selección con los 5 bancos de materiales y las características elegidas, utilizando una calificación en la escala del 1 al 10 [1], asignando el valor máximo al banco con la característica más idónea para el estudio que se realizó. Por ejemplo, para la característica: % Absorción, Los Castros presentó un % de Absorción de 22.02, siendo este el mayor valor, y tal como ya se mencionó anteriormente, ésta constituye una característica importante ya que el banco con mayor % de Absorción (mayor contenido de poros en su estructura) será más fácil de pulverizar, por lo tanto se decidió asignar una calificación de 9 a la característica de este banco.

Por otro lado, el material que presentó la menor absorción fue el proveniente del banco de Malpaisillo con un valor de % Absorción de 7.11, por lo que se le asignó una calificación de 3. Como otro factor importante para la selección, se encontró el sobretamaño %. El material del banco Los Castros, presentó un valor de sobretamaño del 50%, es decir que aproximadamente la mitad del material quedó retenido en la malla # 4, siendo este el valor de sobretamaño más grande en comparación con los otros 4 bancos, evidentemente haciendo más largo el tiempo

de molienda de este material, por lo que se asignó una calificación de 2 a este banco.

Contrario a esto, el material del banco Cuajachillo poseía la menor cantidad de sobretamaño % siendo esto benéfico para disminuir el tiempo de molienda y costo energético, el valor de sobretamaño fue del 8% por lo cual se le asignó una calificación de 10, siguiendo esta lógica se asignó la calificación a las restantes características. Aquí puede apreciarse la desventaja del método, ya que la calificación asignada depende del criterio y experiencia del investigador.

La Tabla 8 contiene los nombres de los bancos de materiales con las calificaciones asignadas según la importancia de la característica y el resultado de las pruebas preliminares.

Tabla 8. Matriz de calificación de los bancos de Pumicita

Característica	Peso Asignado	Las Flores	Malpaisillo	Los Castros	Cuajachillo	Mateare
		Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.
% Absorción	0.30	7	3	9	4	5
Granulometría	0.25	4	8	3	6	5
Exceso de finos (%)	0.20	2	9	3	3	3
Sobretamaño (%)	0.15	4	7	2	10	7
Contenido de Impurezas Orgánicas	0.10	5	5	2	5	5
Suma	1					

La Tabla 9 presenta la calificación ponderada de cada banco, la cual se obtuvo al multiplicar el peso asignado a cada característica por la calificación de cada banco, por ejemplo: para el banco Las Flores, en la fila de % Absorción la calificación ponderada fue: $0.3 * 7 = 2.1$.

Tabla 9. Matriz de selección de los Bancos de Pumicita

	Las Flores	Malpaisillo	Los Castros	Cuajachillo	Mateare
Característica	Calificación Pond.	Calificación Pond.	Calificación Pond.	Calificación Pond.	Calificación Pond.
% Absorción	2.1	0.9	2.7	1.2	1.5
Granulometría	1	2	0.75	1.5	1.25
Exceso de finos (%)	0.4	1.8	0.6	0.6	0.6
Sobretamaño (%)	0.6	1.05	0.3	1.5	1.05
Contenido de Impurezas Orgánicas	0.5	0.5	0.2	0.5	0.5
suma	4.6	6.25	4.55	5.3	4.9

4.3 Acondicionamiento de la Pumicita (Pulverización del material).

Para el proceso de molienda del material proveniente de cada banco, se utilizó un molino de bolas marca Soiltest fabricado de acero al igual que los cuerpos moledores de éste (ver Figura 2 y Figura 3), no se encontró literatura que exprese explícitamente una relación óptima en peso de bolas/material a introducir en el molino para el proceso de pulverización de la Pumicita, no obstante basado en trabajos anteriores y específicamente para la molienda de botellas de vidrio de desecho (un material más duro que la Pumicita), se encontró que una relación en peso bolas/material de 10:1 es una excelente relación, además se pudo inferir que el tiempo de molienda de un material específico va en detrimento con el aumento de la relación bolas/material [19]. Por lo anterior, para el proceso de molienda de la Pumicita se utilizó una relación en peso bolas/material de 10:1.



Figura 2. Molino de bolas Marca SOILTEST.



Figura 3. Cuerpos moledores del Molino de acero

Para el proceso de molienda se requiere que la muestra se encuentre seca, ya que la presencia de humedad en el material provoca que éste se adhiera a las paredes del molino o incluso a las bolas (cuerpos moledores), haciendo difícil la recolección del material una vez se halla pulverizado, por este motivo se tomó una cantidad considerable de material de cada banco seleccionado y se colocó en charolas metálicas, posteriormente se introdujeron a un horno durante un periodo de 24 horas a una temperatura de 110 °C, temperatura y tiempo considerables para que se evapore la mayor cantidad de humedad presente en el material.

Pasada las 24 horas de secado, se sacaron las charolas del horno y se dejaron enfriar hasta la temperatura ambiente, se pesaron las bolas y el material y se introdujeron en el molino con una relación en peso bolas/material 10:1, el molino estaba programado para trabajar continuamente realizando un ciclo de 400 vueltas a una velocidad de 33 vueltas por minuto, equivaliendo un ciclo de molienda de 400 vueltas, a un tiempo aproximadamente de 12.12 min, pasado este tiempo el molino se apagaba, por lo que se debía accionar nuevamente.

Apegándose a la forma de trabajo del molino, se procedió a exponer el material con mayor granulometría (el que requiere más tiempo de molienda) a diferentes números de ciclos de trabajo, hasta que la muestra alcanzará una finura semejante a la del CPO, lo cual ocurre cuando aproximadamente el 80% de la muestra pulverizada pasa por un tamiz estándar de 325 (45 μ m) [19], por lo que se extraía el material cada vez que terminaba un ciclo de molienda y se hacía pasar por el tamiz.

Una vez se cumpliera el tiempo para que el material del banco con una mayor granulometría alcanzará una finura semejante a la del CPO, se fijaría este tiempo (número de ciclos) de molienda como el tiempo idóneo para pulverizar las muestras de materiales de los otros dos bancos hasta la finura del cemento.

4.4 Caracterización de la Arena proveniente del cerro Motastepe (AM)

Se caracterizó la AM antes de ser utilizada como agregado fino en la elaboración de los morteros de cemento compuesto y de cemento alcalino, realizando solamente las pruebas que se consideraron importantes para el análisis y discusión de resultados, pruebas realizadas siguiendo las metodologías planteadas en las normas internacionales ASTM.

Tabla 10. Ensayo físicos en muestra de agregados finos

Ensayo	Designación
Contenido de humedad de los agregados.	ASTM C 566 – 84
Gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino (Arena).	ASTM C 128 – 07a
Análisis granulométrico de agregados finos.	ASTM C 136 – 06
Impurezas orgánicas en agregados finos para concretos.	ASTM C 40 – 04

La tabla anterior presenta los nombres de las pruebas realizadas a la AM y la designación ASTM utilizada para cada ensayo.

4.5 Diseño de Mezclas Compósitos

Se utilizaron 3 niveles de estudio tanto para la variable relación en peso Arena/Ligante, Agua/Ligante y porcentaje de sustitución del CPO por Pumicita Pulverizada (PP), se consideraron los 3 bancos de materiales selectos como niveles de estudio ya que el material proveniente de cada banco posee un diferente contenido de sílice, teniendo repercusión en la Resistencia Mecánica a la Compresión (RMC) de los morteros endurecidos, sin embargo, esto es relativo, ya que el sílice presente en los bancos puede ser de naturaleza cristalina o amorfa, siendo solamente el sílice amorfo reactivo en ambientes químicos alcalinos.

La Tabla 11 presenta los niveles y variables de estudio para la sustitución parcial del CPO por PP, donde MAT es la nomenclatura utilizada para representar el banco de materiales de Mateare, CUAJ para Cuajachillo y MAL para Malpaisillo.

Tabla 11. Variables y Niveles a investigar

Variables o factores				
	Banco de Materiales	Pumicita (% peso)	Relación peso/peso Arena/Ligante	Relación peso/peso Agua/Ligante
Factor designado	A	B	C	D
Nivel 1	MAT	10	3:1	0.400:1
Nivel 2	CUAJ	20	4:1	0.425:1
Nivel 3	MAL	30	5:1	0.450:1

Producto de este diseño experimental se puede observar que se poseen 4 factores o variables a 3 niveles de estudio, si se realizará un diseño de experimento factorial se trataría del tipo 3^4 lo que corresponde a 81 experimentos, los cuales de realizarse demandarían altos costos económicos y largos tiempos de elaboración, sin embargo esta situación no fue considerada ya que para la realización del diseño de experimentos se utilizó la técnica conocido como método de Taguchi que se basa en la utilización de arreglos ortogonales que indican cuáles y cuántos experimentos se deben realizar para un número de variables y de niveles determinado. Así, para cuatro variables a tres niveles cada una, el arreglo ortogonal que puede utilizarse es un $L_9 (3^4)$ [10].

La Tabla 12 presenta la distribución de los tratamientos resultados de una corrida en el software Minitab 15 utilizando un diseño de experimentos de Taguchi.

Tabla 12. Distribución del Diseño Experimental Taguchi $L_9 (3^4)$

Exp. N°	Banco de Materiales	Pumicita (% en Peso)	Relación peso/peso Arena/Ligante	Relación Peso/peso Agua/Ligante
1	MAT	10	3:1	0.400:1
2	MAT	20	4:1	0.425:1
3	MAT	30	5:1	0.450:1
4	CUAJ	10	4:1	0.450:1
5	CUAJ	20	5:1	0.400:1
6	CUAJ	30	3:1	0.425:1
7	MAL	10	5:1	0.425:1
8	MAL	20	3:1	0.450:1
9	MAL	30	4:1	0.400:1

En la tabla anterior, cada una de las 9 filas representa un experimento que debe realizarse a fin de obtener la combinación de factores y niveles que resulten en una mayor Resistencia Mecánica a la Compresión.

4.6 Cantidad de materiales a utilizar en mezclas compósitos

La cantidad de materiales que se mezclaron en cada tratamiento se determinaron para una masa total de 4 kg de mezcla, esto con el objetivo de elaborar 12 cubos sin que faltara mezcla, para lo cual se tomó en cuenta un pequeño porcentaje de masa de mezcla en exceso. A continuación se presentan las dimensiones y otras propiedades de utilidad de los cubos.

Tabla 13. Propiedades y dimensiones de los cubos

Dimensiones y Propiedades de un cubo	Valores
Alto (cm)	5
Volumen (cm ³)	125
Densidad Promedio de pasta endurecida (g/cm ³)	2.2
Masa Promedio de cubo endurecido (g)	275

La masa promedio de un cubo endurecido se determinó multiplicando la densidad promedio de la pasta endurecida por el volumen de un cubo, la masa de un cubo se multiplicó por la cantidad de cubos que se iban a elaborar, esto para obtener una masa total de mezcla, que aproximadamente fue de 4 kg, en este caso se elaboraron 12 cubos a fin de monitorear la RMC a los 7, 14 y 28 días de curado y

con esto el avance de la reacción del compósito, por las pérdidas de mezcla ya sea debido a que se queda adherida en las paredes de la maquina mezcladora u otra causa, se dispuso masa en exceso equivalente a 2 cubos más, masa ya considerada en los 4 kg de mezcla.

A continuación, tomando como ejemplo el experimento N° 1, se presenta la metodología de cálculo empleada para determinar la cantidad de materiales que se mezclaron en cada experimento, este tratamiento considera las siguientes relaciones:

Exp. N°	Banco de Materiales	Pumicita (% en Peso)	Relación peso/peso Arena/Ligante	Relación Peso/peso Agua/Ligante
1	MAT	10	3:1	0.40:1

Matemáticamente las relaciones son:

$$W = N + M + Z \quad (9)$$

$$X = 0.10 * M \quad (10)$$

$$Y = M - X \quad (11)$$

$$N = 3 * M \quad (12)$$

$$Z = 0.40 * M \quad (13)$$

Donde

W: masa total de mezcla = 4 kg

M: masa de Cemento Compósito o Ligante

N: masa de Arena Motastepe

Z: masa de Agua

X: masa de Pumicita Pulverizada

Y: masa de Cemento Portland Ordinario

Sustituyendo (12) y (13) en (9)

$$4 \text{ kg} = 3 * M + M + 0.40 * M$$

Resolviendo

$$4 \text{ kg} = 4.40 * M$$

$$M = 4 \text{ kg} / 4.40$$

$$M = 0.90909 \text{ kg} \sim 0.910 \text{ kg} = 910 \text{ g}$$

Resolviendo las otras ecuaciones se obtiene

$$X = 0.10 * 0.910 \text{ kg} = 0.091 \text{ kg} = 91 \text{ g}$$

$$N = 3 \times 0.910 \text{ kg} = 2.73 \text{ kg}$$

$$Y = 0.910 \text{ kg} - 0.091 \text{ kg} = 0.819 \text{ kg} = 819 \text{ g}$$

$$Z = 0.40 \times 0.910 \text{ kg} = 0.364 \text{ kg} = 364 \text{ g} = 364 \text{ ml}$$

La Tabla 14 contiene el consolidado de la cantidad de materiales calculada mediante la metodología anteriormente descrita y aplicada al experimento de la fila 1 del diseño experimental Taguchi.

Tabla 14. Cantidad de materiales para Experimento N° 1

Materiales		Masa en kg
Arena Motastepe		2.73
Cemento Compósito	Pumicita Pulverizada proveniente del banco Mateare	0.091
	Cemento Portland Ordinario	0.819
Agua		0.364
Suma		4

4.7 Mezclado de morteros de mezclas compósitos

Se elaboraron los morteros utilizando como base el procedimiento descrito en la norma ASTM C 109/ C 109M – 08, sin embargo por el motivo de que los morteros eran de cemento compósito se modificó un poco el procedimiento al momento de agregar el ligante a la mezcla. El CPO utilizado para la elaboración de todos los experimentos fue cemento marca *Canal* fabricado por la compañía CEMEX de Nicaragua.

Para garantizar que la AM no absorbiera agua destinada para la hidratación del CPO al momento de elaborar el mortero, se monitoreo día de por medio la Humedad de la AM y la cantidad de agua necesaria para que ésta llegara a la condición de Saturado Superficialmente Seco (SSS, condición en la cual la arena está saturada de agua pero superficialmente sin humedad), se anexaba a la cantidad de agua de mezcla a utilizar en el tratamientos según correspondiera la relación Agua/Ligante.

A continuación se describe el procedimiento empleado para obtener el compósito: Se pesaban los materiales en correspondencia a las relaciones que respondieran al diseño de experimento del método de Taguchi, la Arena Motastepe ya pesada, se colocaba en la olla de la maquina mezcladora (ver Figura 4), se accionaba esta última en velocidad baja ($140 \pm 5 \text{ rpm}$), y se saturaba de agua la arena motastepe, el compósito se formaba agregando la mitad del total del CPO, el total de la masa de la PP y finalmente el restante de masa de CPO que correspondieran a las

cantidades de cada experimento. Los remanentes pasos para obtener el mortero compósito se realizaron respetando la norma internacional ASTM mencionada anteriormente.



Figura 4. Maquina Mezcladora

4.8 Moldeado, Fraguado y Curado de Especímenes compósitos

Los especímenes se elaboraron en moldes cúbicos de 2 plg (5 cm) por lado siguiendo la metodología prescrita en la norma ASTM C 109/C 109M – 08, no obstante el número de golpes para compactar el espécimen se aumentó, lo cual fue debido a que la trabajabilidad de la mezcla de los diferentes experimentos variaba y en muchas ocasiones se necesitaba más rondas de golpes que los propuestos en la norma ASTM para que no quedara material visiblemente suelto.

Cada espécimen cubico se elaboró en tres capas, la primera capa se obtuvo llenando inicialmente el molde hasta la mitad de la profundidad (1 plg), y se procedía a aplicarle 6 rondas de 8 golpes cada una, golpes aplicados con un pisón tamper y alternando la forma de golpeo (ver Figura 5), debido a la compactación, la capa de mortero se reducía hasta aproximadamente 0.8 plg (2 cm), la segunda capa se obtenía de la misma manera que se obtenía la primera capa (aplicando 6 rondas de 8 golpes cada ronda), la tercera capa al ser la más delgada (0.4 plg aproximadamente) se obtuvo enrasando el molde y dando 2 rondas de 8 golpes

cada una, enrasando de mezcla nuevamente el molde y aplicando otras 2 rondas de golpes más.

En total el espécimen se obtuvo con 3 capas, dos capas de 6 rondas de 8 golpes cada una y una capa de 4 rondas de 8 golpes también, golpes que se procuraron aplicar aproximadamente con la misma fuerza (intensidad).

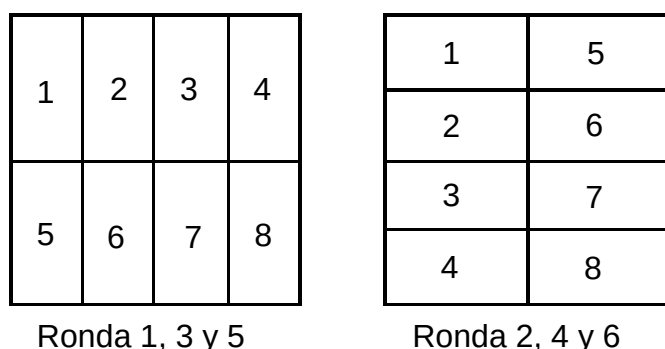


Figura 5. Rondas y secuencias de aplicación de golpes

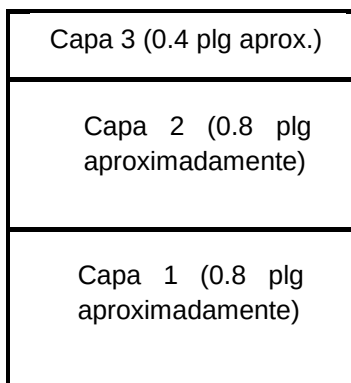


Figura 6. Capas de especímenes de morteros compósitos

Después de la elaboración, los especímenes se dejaron fraguar en los moldes durante 24 horas y luego se dejaron curar en seco con el objetivo de evitar que de curar los especímenes en húmedo, se lixiviara de estos el Ca(OH)_2 producto de la reacción de hidratación del CPO y este ya no pudiera reaccionar con el SiO_2 de la PP, provocando que no se llevará a cabo la reacción puzolánica, los especímenes se curaron en seco hasta por 28 días, edad a la que se ensayó y se registró la máxima RMC alcanzada por estos, ensayo realizado siguiendo la metodología prescrita también en la norma internacional ASTM C 109/C 109M – 08.

4.9 Selección de mejores resultados de RMC

Las relaciones en peso Arena/Ligante, Agua/Ligante, % de sustitución del CPO por PP y banco de materiales que resultaron ser mejores en cuanto a presentar

las mayores RMC, se computaron mediante la aplicación de la fórmula estándar “Mayor es Mejor” del método de Taguchi, formula que exhibe los valores de las variables de entrada de un proceso que brindan los valores más altos de las variables respuestas (salida), también se computaron las mejores relaciones que brinden valores de RMC iguales al valor Nominal de 13.65 Mpa señalados en la NTON 12 008 – 09, lo cual se realizó utilizando la formula estándar “Nominal es Mejor”.

Se corroboraron estos resultados mediante la elaboración de morteros que combinaran estas relaciones, morteros una vez endurecidos se caracterizaron mediante pruebas de RMC, Índice de Actividad Puzolánica (IAP), ataque por altas temperaturas y ataque químico por solución de sulfato.

4.10 Elaboración de Geopolímeros de Pumicita Pulverizada

Se realizaron pruebas preliminares para evaluar la posibilidad de utilizar Pumicita Pulverizada como un ligante tipo alcalino que pueda sustituir totalmente al CPO en la fabricación de morteros para bloques, se elaboraron dos tratamientos con PP activada alcalinamente con una solución de silicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$), respetando las formulaciones que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 15. Diseño experimental para la sustitución total del CPO

Mortero N°	Relación de Óxido de sodio/ Ligante	Relación peso/peso Arena/Ligante	Relación peso/peso Agua/Ligante
1	6%	4:1	0.40:1
2	12%	4:1	0.40:1

La PP que se utilizó para los tratamientos fue la proveniente del banco de materiales que mediante el análisis de Taguchi con la aplicación de la formula estándar “Mayor es Mejor” resultó brindar las mayores RMC (Malpaisillo).

Se decidió utilizar relaciones de óxido de sodio (Na_2O) altas para obtener buenos resultados de Resistencia Mecánica a la Compresión de los morteros [7], el silicato de sodio utilizado en estos tratamientos contenía un módulo de sílice de 2 (Relación en peso $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2$), a esto no se le realizó ninguna disolución, por lo que se utilizó la solución madre de silicato de sodio a como provenía de fábrica, a continuación se presenta la Tabla 16 conteniendo la composición del silicato de sodio.

Tabla 16. Composición teórica del silicato de sodio (Na_2SiO_3)

Componentes	Composición en peso (%)
Na_2O	14
SiO_2	28
H_2O	58

Fuente: Proveedor TRANSMERQUIM S.A. de Nicaragua

La Tabla 17 presenta la cantidad de materiales que se agregaron para elaborar 4 kg de mezcla de mortero, y debido a que las relaciones en peso de Arena/Ligante y de Agua/Ligante no cambian, simplemente varia la relación de óxido de sodio (Na_2O) con respecto al ligante, la tabla con la cantidad de materiales corresponde a la elaboración de las dos mezclas.

Tabla 17. Cantidad de Materiales para morteros 100% pómez

Componentes	Masa en Kg
Arena Motastepe	2.963
Pumicita Pulverizada	0.741
Agua	0.296
Total	4

La cantidad de materiales que se presenta en la tabla se obtuvo utilizando la metodología descrita en acápite anteriores y al igual que para la elaboración de los morteros compósitos, se consideró la pérdida de humedad de la Arena Motastepe con el paso del tiempo, por lo que se agregó la cantidad faltante de agua para saturar la arena, con el objetivo de que esta última no absorbiera agua destinada para la reacción de Polimerización. Al momento de realizar el mortero, la humedad de la arena era del 0.33% y le faltaba el 3.65% de agua (valor obtenido del ensayo de gravedad específica y % de absorción del agregado fino) para llegar a la condición de SSS.

Cantidad de agua para saturar la arena: $(3.65\%/100) \cdot (\text{cantidad de arena})$ **(14)**

Cantidad de agua para saturar la arena: $(0.0365) \cdot (2,963 \text{ g}) = 108 \text{ g}$

Debido a que la densidad del agua es 1 g/cm^3 , la cantidad de agua para saturar la arena será de 108 cm^3 o 108 ml, contabilizando un volumen total de agua a agregar de 404 ml.

Cantidad de silicato de sodio (SS) a utilizar:

C. de SS. = $(R. \text{Na}_2\text{O}/\text{ligante}) \cdot (\text{Cnt. De ligante}) / (\text{Comp. de Na}_2\text{O en SS.})$ **(15)**

Dónde:

C. de SS. = cantidad de silicato de sodio

R. Na₂O/ligante = relación en peso de óxido de sodio con respecto al ligante

Comp. de Na₂O en SS. = composición en peso de óxido de sodio en el silicato.

Cnt. de ligante = cantidad de ligante (PP)

Para una relación de óxido de sodio/ligante de 6%

$$\mathbf{C. \textit{de SS.} = ((0.06) \cdot (741 \text{ g})) / 0.14 = 317.46 \text{ g}}$$

Para una relación de óxido de sodio/ligante de 12%

$$\mathbf{C. \textit{de SS.} = ((0.12) \cdot (741 \text{ g})) / 0.14 = 635.14 \text{ g}}$$

Cantidad de agua que agrega el silicato de sodio a la mezcla de mortero.

Ya que el silicato de sodio posee cierta cantidad de agua (58%), se calculó el volumen total de agua que se adicionó a la mezcla al momento de agregar la solución alcalina activadora.

$$\mathbf{Cantidad \textit{de agua por el SS.} = (C. \textit{de SS.}) \cdot (\% \textit{de comp. de H}_2\text{O en el SS})} \quad \mathbf{(16)}$$

Para una relación de óxido de sodio/ligante de 6%

$$\mathbf{Cantidad \textit{de agua por el SS.} = (317.46 \text{ g}) \cdot (0.58) = 184 \text{ g} = 184 \text{ ml}}$$

Para una relación de óxido de sodio: ligante de 12%

$$\mathbf{Cantidad \textit{de agua por el SS.} = (635.14 \text{ g}) \cdot (0.58) = 368 \text{ g} = 368 \text{ ml}}$$

Como se puede observar, la cantidad de agua que agrega el silicato de sodio en cada uno de los tratamientos es bastante considerable, esta cantidad de agua fue restada a la cantidad de agua que se le agregaría a cada mortero (404 ml) y posteriormente solo se agregó la cantidad obtenida de la resta, es decir se agregaron solamente 220 ml y 36 ml de agua para los tratamientos con una relación de 6% y 12% de Na₂O con respecto al ligante respectivamente, conocida la cantidad de materiales a utilizar se procedió a la elaboración del mortero.

4.10.1 Elaboración de morteros 100% Pumicita Pulverizada con relación Na₂O/ligante de 6%.

Se pesaron los materiales (Arena Motastepe (AM), Pumicita Pulverizada y Silicato de Sodio), en una balanza analítica con precisión de dos decimales.

Se cargó una charola metálica con la PP, seguidamente se agregó paulatinamente la cantidad de SS correspondiente a este tratamiento, se procedió a mezclar manualmente utilizando cucharas de albañilería hasta obtener una pasta plástica homogéneo, el mezclado duro aproximadamente 7 minutos haciendo movimientos de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

Se cargó la olla de la maquina mezcladora con la cantidad de AM correspondiente, se agregó el volumen de agua necesario para llevar la AM hasta la condición de SSS (108 ml), en un tiempo aproximadamente de 30 s se agregó la pasta plástica de PP con SS, con el objetivo de que ésta se distribuyera homogéneamente en la AM, los pasos remanentes para obtener el mortero, se realizaron respetando la ASTM C 109/C 109M – 08.

Obtenida la mezcla, se elaboraron los cubos siguiendo el mismo procedimiento utilizado para los morteros de cemento compósito ya descrito en uno de los acápites anteriores.

4.10.2 Elaboración de morteros 100% Pumicita Pulverizada con relación Na_2O / ligante de 12%.

Al igual que el mortero elaborado con una relación de óxido de sodio/ligante de 6%, El silicato de sodio se adicionó en porciones pequeñas hasta completar la cantidad total, después de agregado aproximadamente unos 450 g del SS, la pasta se estaba gelificando haciéndola inmanejable y tomando un estado un poco duro, por lo que se decidió dejar de agregar el SS a la PP y proceder a elaborar el mortero en la mezcladora. Este Fenómeno es conocido en la literatura como fraguado Flash.

Se agregó manualmente la pasta a la olla conteniendo la AM previamente humedecida, pero a diferencia del mortero con 6% de Na_2O respecto al ligante la maquina mezcladora se encontraba apagada, acto seguido se accionó la maquina mezcladora y se agregó la cantidad de SS liquido restante, dejando mezclar por un periodo de 4 min en la segunda velocidad de la máquina.

4.11 Técnicas de Caracterización aplicadas a los morteros endurecidos selectos

- ✓ Resistencia mecánica a la compresión

Se realizó el ensayo de resistencia mecánica a la compresión utilizando la metodología prescrita en la norma internacional ASTM designación C 109/C 109M – 08, el ensayo se llevó a cabo en una maquina hidráulica ELE International (ACCU-TEK™ 250 Digital Series) ver Figura 7.



Figura 7. Maquina hidráulica para ensayo de RMC

✓ Resistencia al ataque por sulfatos

Cuatro especímenes de cada mortero elaborado con las relaciones en peso Arena/Ligante, Agua/Ligante, % de sustitución del CPO por PP y el banco de materiales que presentaron las mejores RMC (relaciones obtenidas por el método de Taguchi), se sumergieron en solución de sulfato de magnesio (MgSO_4) al 5 % en un volumen de solución igual a 4 veces el volumen de los cubos, los especímenes después de elaborados se curaron en seco durante 28 días y luego se sumergieron en la solución de sulfato por otros 28 días más, cambiando la solución cada semana.

La resistencia de los morteros al ataque por sulfatos se determinó por comparación de la resistencia a la compresión de los especímenes expuestos a los sulfatos con la resistencia a la compresión de los especímenes de control.

$$\text{Pérdida de resistencia a \%} = \frac{R_1 - R_2}{R_1} * 100 \quad (17)$$

Donde R_1 es el promedio de la resistencia a la compresión de 4 cubos curados por 4 semanas en condiciones ambientales (en seco), R_2 es el promedio de la resistencia a la compresión de 4 cubos inmersos en solución de sulfatos al 5% por 4 semanas.

La Figura 8 presenta una fotografía los especímenes sumergidos en solución de sulfato de magnesio (MgSO_4).



Figura 8. Especímenes en solución de MgSO_4 al 5%

✓ Resistencia al ataque por altas Temperaturas

Los mejores especímenes (elaborados con relaciones de materiales selectas) se sometieron a condiciones de temperaturas extremas, los especímenes después de curados en seco durante un periodo de tiempo de 28 días, se introdujeron por 2 h en una mufla a una temperatura de 900 °C, posteriormente se midió la RMC que presentaban y estas se compararon con la RMC de testigo curados en seco también por 28 días y elaborados con la misma mezcla de mortero, investigando así la resistencia al ataque por fuego de los morteros en términos de resistencia residual relativa.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Bancos de mayor potencial para la presente investigación

Mediante el método de selección cualitativo por puntos se obtuvieron los 3 bancos con el mayor potencial de utilización para la realización de la presente investigación, la Tabla 9 (mostrada anteriormente) presenta los resultados del método, las casillas con los nombres de los bancos de materiales que resultaron ser idóneos se presentan resaltadas y corresponden a aquellos cuya suma de calificación ponderada reflejaron ser las 3 mayores, siendo los bancos:

1. Malpaisillo
2. Cuajachillo
3. Mateare

La Figura 9 presenta una fotografía del material proveniente del banco de Mateare, el cual presenta muchas partículas de un color oscuro (negro) mezcladas con unas pocas partículas de color amarillo y con partículas de color grises (mayoría), este material presenta un tamaño de partículas un poco mayor que los otros 2 bancos, por lo cual es mediante la molienda del material de este banco que se definió el tiempo de molienda para que esta y las otras muestras alcanzaran una finura aproximada a la del CPO.

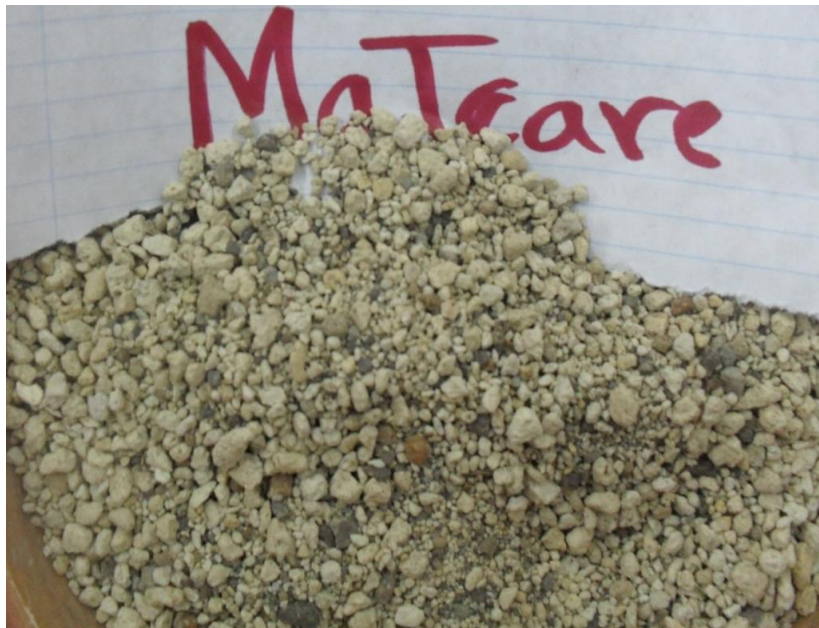


Figura 9. Material proveniente del banco de Mateare.

La Figura 10 muestra una fotografía del material del banco de Cuajachillo. Este material presenta partículas un poco más fina que la del material del banco de Mateare, además no presenta muchas partículas oscuras pero si de color amarillo.



Figura 10. Material proveniente del banco de Cuajachillo

La Figura 11 exhibe una fotografía de una muestra del material proveniente del banco de Malpaisillo, contrario a los otros 2 bancos de materiales, el material de Malpaisillo presentó un tamaño de partícula más pequeño, hay presencia de grumos de material (partículas grandes) pero esto es producto seguramente de la humedad absorbida por el material durante su almacenamiento a la intemperie, pues estas formaciones presentan poca dureza y son destruidos manualmente con facilidad, este material no presenta partículas oscuras ni de color café tal y como los otros 2 bancos.

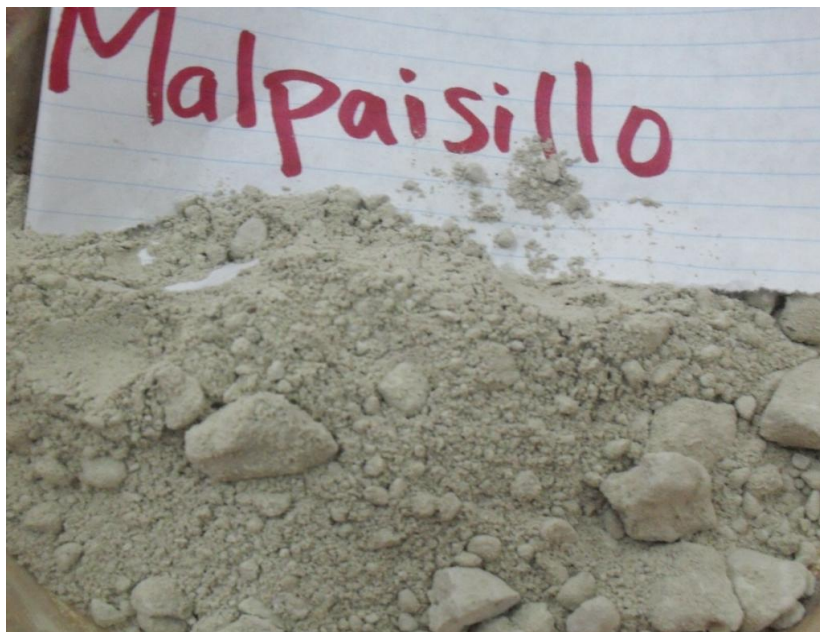


Figura 11. Material del banco de Malpaisillo

5.2 Determinación del contenido de sílice (SiO_2)

La Tabla 6 presenta los resultados de la prueba de contenido de sílice realizada por la FIQ (miembro del comité de investigadores del proyecto TAISHIN UNI-JICA) a los bancos de materiales, resultados que indican que de los 3 bancos seleccionados para la presente investigación, Malpaisillo es el banco con el mayor contenido de sílice con un valor total de 71.36%, seguido de Cuajachillo con un 69.96% y por último el banco de materiales de Mateare con un 67.51% de contenido de sílice.

El contenido de sílice (SiO_2) no pudo ser verificado, este parámetro se realizó mediante un método de *Gravimetría de Precipitación*, sin embargo por la ausencia de papel filtro cero cenizas (cuantitativo Whatman 42) en el laboratorio de química general de la FIQ, se utilizó papel filtro cualitativo pero el experimento fue fallido ya que el papel dejaba cenizas en la muestra y no se pudo conocer el peso exacto de sílice en las muestras.

5.3 Pulverización de la materia prima

Inicialmente se tomó una cantidad de material proveniente del banco de Mateare y se introdujo al molino de bolas con una relación en peso bolas/material de 10:1, cada 12.12 min de molienda (1 ciclo de 400 vueltas) se sustraían muestras de material pulverizado y se hacían pasar por la malla # 200 (tamaño de abertura de 75 μm), después de 3 ciclos de molienda (aproximadamente 36.36 min) pasó por la malla solamente el 65 % del material, completado 4 ciclos de molienda (48.48

min) nuevamente pasó el 65% por la malla # 200, por lo anterior se dejó de pulverizar la muestra y se analizaron las posibles causas.

El material que fue retenido en la malla # 200 presentó un color oscuro (semejante al de la Arena proveniente del cerro Motastepe), también presentó un tamaño de partícula bastante grande, pues este no pasaba ni por la malla # 100 (tamaño de abertura 150 μm), inicialmente se pensó que podían ser impurezas provenientes del molino o de los cuerpos moledores ya que el material retenido se adhería a un imán, sin embargo tal y como se comentó anteriormente se pudo observar que el material en bruto proveniente del banco presentaba partículas oscuras, por lo que existía la posibilidad de que el material que no pasó por la malla # 200 fuera producto de estas partículas oscuras presentes en el material en bruto.

Se decidió cargar el molino nuevamente con más material de Mateare y después de 4 ciclos de molienda, nuevamente solo pasó el 65 % del material pulverizado por la malla # 200 y el material retenido volvió a presentar las mismas características que el de la anterior molienda, se descartó que este material retenido fuera producto de impurezas del molino o de sus cuerpos moledores ya que para esta molienda, el molino estaba más limpio y sin embargo el material que no pasaba la malla 200 se presentó en igual cantidad que en la anterior molienda, conociendo que este material grueso después de la molienda, provenía de las partículas negras que presentaba el material bruto y por sus propiedades magnéticas, se conjeturó que se trataba de *Magnetita*, un mineral de hierro, que al igual que la pómez es de origen magmático o metamórfico, constituido por Fe_3O_4 que debe su fuerte magnetismo a un fenómeno de ferrimagnetismo [16]. Este factor (contenido de Magnetita) no fue considerado en el método cualitativo por puntos, siendo esto otra desventaja.

Se pulverizó material de Cuajachillo, y después de 4 ciclos de molienda solamente el 70% del material pasó por la malla # 200, por su parte el material retenido en esta malla también presentó características similares al material de Mateare retenido en esa misma malla, y debido a que este material presentaba características de un metal, sería difícil reducir su tamaño hasta que este pasara por la malla # 200, además esto incurriría en muchos gastos energéticos, inclusive para lograr que al menos una fracción de este material pasara por esa malla # 200. En cambio del material proveniente del banco de Malpaisillo después de 4 ciclos de molienda pasó el 80 % por la malla # 200 tal y como se esperaba, ya que este era el banco de materiales con menor granulometría.

Por lo anterior se decidió fijar como 4 ciclos de molienda (48.48 min) el tiempo necesario para pulverizar el material proveniente de los 3 bancos y utilizarlo en la

sustitución parcial y total del CPO. La Figura 12 exhibe una fotografía del material pulverizado proveniente de cada uno de los 3 bancos seleccionados para la realización de esta investigación, el material de Malpaisillo presenta un color más claro que el de los otros 2 bancos, presumiblemente producto del menor contenido de magnetita.



Figura 12. Pumicita Pulverizada

5.4 Pruebas a la Arena proveniente del cerro Motastepe (AM)

Las pruebas se realizaron en correspondencia a las metodologías establecidas en las normas internacionales ASTM, las designaciones se muestran en el acápite del desarrollo experimental de este trabajo (Tabla 10).

5.4.1 Ensayo de Humedad

La Tabla 18 presenta los resultados obtenidos del ensayo de Humedad a la Arena proveniente del cerro Motastepe realizada 2 días después de obtenida de una Ferretería donde se almacenaba a la intemperie.

Tabla 18. % de Humedad de la Arena Motastepe

Ensayo #	1	2	3
Designación de recipiente	A - 17	A - 21	A - 22
Peso de Recipiente (g)	47.4	41	41.1
Recipiente + muestra húmeda (g)	248.2	245.6	241.9
Peso de muestra húmeda (g)	200.8	204.6	200.8
Recipiente + muestra seca (g)	239.8	237.2	233.6
Peso de muestra seca (g)	192.4	196.2	192.5
% Humedad	4.37	4.28	4.31
% de Humedad Promedio	4.32		

El % de Humedad fue computado mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{\text{Peso de muestra húmeda} - \text{Peso de muestra seca}}{\text{Peso de muestra seca}} * 100 \quad (18)$$

5.4.2 Gravedad Específica y % de Absorción

La Tabla 19 presenta el resultado de la prueba de Gravedad Especifica y % de Absorción, a continuación se presentan las fórmulas utilizadas para calcular los valores de ambas propiedades físicas.

$$\text{Gravedad Especifica (GE)} = \frac{A}{v - w} \quad (19)$$

Dónde A = Peso de la muestra seca

v = Capacidad del Frasco

w = Agua Añadida

$$\text{Absorción \%} = \frac{\text{Peso de arena en condicion SSS} - A}{A} * 100 \quad (20)$$

Tabla 19. Resultado de prueba de Gravedad específica y % Absorción de AM

Ensayo #	1	2
Peso del Frasco Seco y Limpio (g)	186.3	186.85
Peso de la Arena en condición de SSS (g)	500	500
Capacidad de Frasco (ml)	500	500
Peso del Frasco + Arena + Agua (g)	994	997.6
Agua Añadida (g)	307.7	310.75
Peso de recipiente (g)	177	169.9
Peso de recipiente + arena seca (g)	657.36	650.5
Peso de Arena Seca (g)	480.36	480.6
% de Absorción	4.09	4.04
% de Absorción Promedio	4.06	
Gravedad Especifica de la Muestra (g/cm³)	2.50	2.54
Gravedad Especifica Promedio (g/cm³)	2.52	

Se puede observar que la Arena al momento de ser obtenida de la ferretería se encontraba con un grado de humedad bastante óptimo para ser utilizada como agregado fino en la elaboración de los morteros, ya que el % de humedad que esta presentaba era bastante similar al % de Absorción de la arena para llegar a la condición de SSS, evitando así que la arena en el mortero sustrajera agua destinada a la reacción de hidratación del CPO.

5.4.3 Granulometría de la AM

En la Tabla 20 se presenta el resultado del análisis granulométrico de la Arena proveniente del cerro Motastepe, en la fila correspondiente al tamiz # 4, el porcentaje retenido tiene un valor de 0 porque la arena para utilizarse como agregado fino en morteros debe pasarse por esta malla para retener y descartar el exceso de material grueso o impurezas. El análisis fue realizado a 500 g de muestra representativa de todo el material, muestra extraída mediante el método de cuarteo descrito en la norma ASTM C 128–07a utilizada como referencia para realizar este ensayo. La AM presentó un sobretamaño promedio de 4.52%, computado de 4 muestras seleccionadas mediante el método de cuarteo.

Tabla 20. Distribución Granulométrica de la AM

Tamiz	Pesos de Mallas (g)	Pesos de Mallas + Arena (g)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Ac.	% Que Pasa
3/8"						
No. 4			0	0	0	100
No. 8	453.7	475.6	21.9	4.38	4.38	95.62
No. 16	449.3	565.8	116.5	23.3	27.68	72.32
No. 30	420.8	598.7	177.9	35.58	63.26	36.74
No. 50	374.7	487.3	112.6	22.52	85.78	14.22
No. 100	357.8	393	35.2	7.04	92.82	7.18
No. 200	427.5	436.1	8.6	1.72	94.54	5.46
Fondo	331	331.5	27.3	5.46	100	0
Suma			500	100		

La Tabla 21 contiene los límites de especificación (límite superior y límite inferior) que la ASTM C 136 – 06 ha dispuesto en cuanto al porcentaje de material que debe pasar por cada una de las mallas mencionadas para considerar un material como apto para ser utilizado como un agregado fino en la elaboración de morteros o concreto.

Tabla 21. Límites de especificación para la distribución granulométrica de agregado ligero según ASTM C 136 – 06

Tamiz	Tamaño de Apertura (mm)	Especificación		
		% Que Pasa	Límite Superior (LS)	Límite Inferior (LI)
3/8"	9.5	100		
No. 4	4.75	95-100	100	95
No. 8	2.36	80-100	100	85
No. 16	1.18	50-85	85	50
No. 30	0.600	25-60	60	25
No. 50	0.300	10-30	30	10
No. 100	0.150	2-10	10	2
No. 200	0.075	0-2	2	0

En la Figura 13 se presenta el gráfico de distribución granulométrica de la Arena proveniente del cerro Motastepe, se observa que la Arena proveniente del cerro Motastepe según los límites establecidos por las normas internacionales ASTM,

presentó una distribución de tamaño aceptable para ser utilizada como un agregado fino en la elaboración de los morteros, solamente en la malla # 200 la cantidad de material que pasó por esta, excede el límite máximo establecido por la norma, el resto de masa de material que pasó por las otras mallas se encuentran en los límites permisibles.

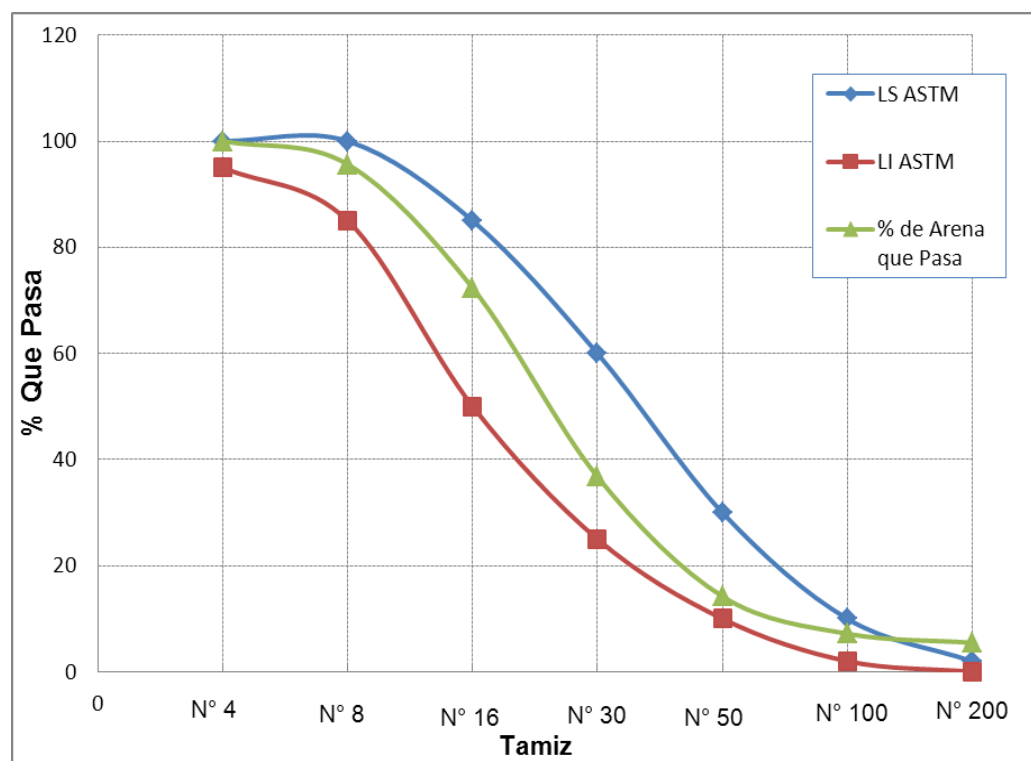


Figura 13. Gráfico de distribución Granulométrica de la AM

5.4.4 Impurezas orgánicas por colorimetría

La solución de NaOH al 3% donde estuvo sumergida la Arena Motastepe durante 24 horas, presentó una coloración amarillo claro, al compararlo con el patrón de colores este fue de 1, el color permisible para aceptar el material como agregado fino es el ámbar [19], el cual ocupa el lugar 3 en el patrón de colores, por lo anterior se consideró que la arena proveniente del cerro motastepe no contenía muchas impurezas orgánicas que imposibilitaran o influyeran en la reacción de hidratación del CPO o en la reacción de puzolanicidad.

5.5 Resultado de RMC de morteros de Cemento Compósito

En la Tabla 22 se presentan los resultados de la RMC promedio a las diferentes edades de curado ensayadas a cada uno de los experimentos presentados en la tabla de distribución experimental Taguchi, el promedio fue calculado de 4 valores

de RMC ensayados a la misma cantidad de cubos de un mismo experimento. Dentro de paréntesis se encuentra la Desviación Estándar de los datos con los cuales fueron calculados los promedios de RMC a las diferentes edades de curado.

Tabla 22. RMC promedio de Experimentos

RMC promedio en Mpa a diferentes días de curado			
Experimento #	7 días	14 días	28 días
1	14.30 (2.15)	14.31 (2.10)	17.74 (4.38)
2	6.50 (2.00)	4.99 (1.52)	7.34 (1.65)
3	3.99 (3.11)	3.41 (1.13)	4.00 (1.36)
4	14.90 (1.02)	13.09 (1.97)	14.97 (1.28)
5	1.30 (0.93)	2.53 (0.02)	6.42 (1.99)
6	17.28 (1.49)	18.05 (1.07)	18.51 (1.91)
7	5.90 (1.57)	5.75 (1.06)	6.90 (2.97)
8	20.31 (2.84)	18.60 (1.47)	21.41 (2.18)
9	10.23 (2.80)	9.93 (2.25)	12.38 (1.74)

En la Figura 14 se exhibe un gráfico de RMC promedio en Mpa vs días de curado en seco, la línea horizontal (color rojo) que atraviesa el gráfico, se ha trazado para indicar los 13.65 Mpa de RMC para bloques estructurales tipo BE-1 especificado por la NTON 12 008-09 y lograr distinguir aquellos experimentos cuyas RMC sobrepasaron el valor especificado.

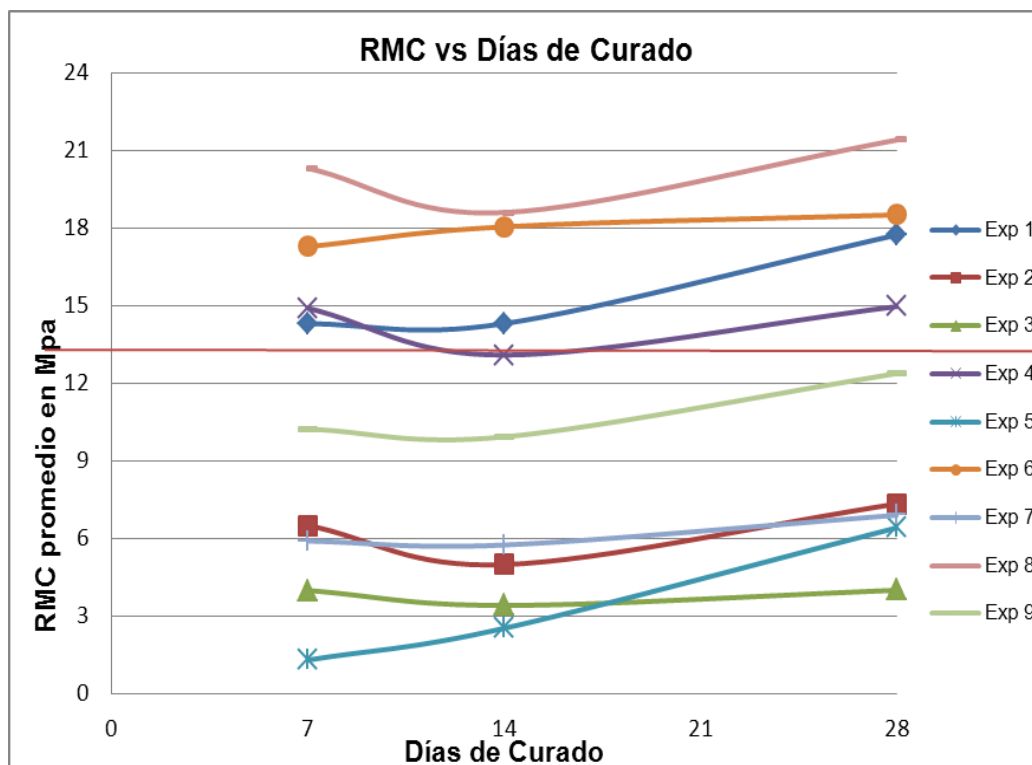


Figura 14. Gráficos de RMC promedio a los diferentes días de curado

Puede observarse de la Figura 14, que 4 de los 9 experimentos sobrepasan los 13.65 Mpa fácilmente, incluso a la temprana edad de 7 días de curado, los 4 experimentos corresponden al Exp 8, Exp 6, Exp 1 y el Exp 4 con valores de RMC de 21.41, 18.51, 17.74 y 14.97 Mpa respectivamente, este último (Exp 4) describe un comportamiento de rápida reacción, la RMC que desarrolla a los 28 días de curado es apenas levemente mayor que la desarrollada por este mismo a la temprana edad de 7 días, en cambio el Exp 6 describe un comportamiento más lineal, la RMC en función de los días de curado aumenta aunque lentamente de una manera lineal con una pendiente pequeña.

Los experimentos Exp 9, Exp 2, Exp 7, Exp 5 y Exp 3 no lograron sobrepasar el valor de RMC en la NTON 12 008 – 09, ni siquiera a los 28 días de curado, el Exp 5 presentó un buen comportamiento referido al avance de la reacción; es decir la gráfica de la RMC para éste experimento en función de los días de curado mostró un comportamiento lineal con una pendiente de 0.24 (mayor pendiente con respecto a los otros 8 comportamientos), a pesar de presentar la menor RMC a la temprana edad de 7 días, logró llegar 3.9 Mpa arriba del Exp 3 a la edad de 28 días de curado.

La Tabla 23 presenta los resultados más altos de RMC obtenidos por los experimentos y su respectiva formulación, además contiene la formulación y la RMC obtenidos de un mortero de referencia elaborado 100% con CPO.

Tabla 23. Experimentos con valores más altos de RMC y sus formulaciones

Experimento	Mortero de Referencia	Exp 8	Exp 6	Exp 1	Exp 4
RMC a 28 días (Mpa)	26.30	21.41	18.51	17.74	14.97
Banco de Material	-	MAL	CUAJ	MAT	CUAJ
% PP utilizado	-	20	30	10	10
Arena/Ligante	3:1	3:1	3:1	3:1	4:1
Agua/Ligante	0.45:1	0.45:1	0.425:1	0.40:1	0.45:1

El mortero de referencia logró desarrollar una RMC de 26.30 Mpa, opuesto a esto el Exp 8 elaborado con las mismas relaciones Arena/Ligante y Agua/Ligante, pero con un 20% de sustitución del CPO mostró una RMC de 21.41 Mpa, el % de sustitución del CPO por PP equivale a elaborar el mortero de referencia con un 80% de CPO utilizado en éste, lo que representaría presumiblemente la obtención del 80% de la resistencia en el mortero de referencia actual, por tanto se infiere una nueva RMC del mortero de referencia igual a $0.8 * RMC = 0.8 * 26.30 = 21.04$ Mpa; al igual que el Exp 8, el Exp 6 (obviando que la relación Agua/Ligante es ligeramente menor) presenta como variante principal el % de sustitución del CPO en comparación al mortero de referencia.

Siguiendo la lógica planteada anteriormente se esperaría una nueva RMC en el mortero de referencia igual al 70%, entonces $RMC\ nueva = 0.7 * 26.30 = 18.41$ Mpa. Estos dos experimentos (Exp 8 y 6) han presentado resistencias ligeramente mayores que las inferidas si teóricamente solo reaccionara el CPO que contienen, lo que lleva a la conclusión de que la reacción puzolánica se está llevando a cabo pero de una manera muy lenta, dicha reacción a esperado que el mayor % de la reacción de hidratación del CPO se lleve a cabo y brinde como subproducto de reacción el $Ca(OH)_2$ (de pocas propiedades mecánicas) para que reaccione con la sílice amorfa de la PP, formando así el producto de reacción C-S-H ($xCaO-SiO_2-H_2O$) con buenas propiedades mecánicas.

Lo anterior manifiesta que sería recomendable esperar más tiempo de curado de los especímenes para observar un aporte significativo de la reacción puzolánica a la RMC de los morteros endurecidos.

Por otra parte el Exp 1 se desvía completamente de estos valores, él % de sustitución del CPO por PP es apenas del 10%, por lo que se esperaría una resistencia semejante a la del Exp 8, sin embargo este valor de RMC puede atribuirse a varios factores, uno de ellos es que la relación Agua/Ligante para este experimento es menor que la del Exp 8, además se está utilizando material del banco de Mateare el cual contiene un alto % en peso de material grueso (presumiblemente magnetita) y seguramente poca sílice amorfa, lo que puede estar dificultando la reacción puzolánica.

El Exp 4 ya no puede compararse con este mortero de referencia pues la relación Arena/Ligante es mayor que la del mortero de referencia; sin embargo, por la baja RMC en comparación con los otros 3 mejores experimentos, es posible que la reacción puzolánica este escasamente por iniciar.

5.6 Análisis Estadístico de datos de RMC a los 28 días de curado

La Tabla 24 presenta las lecturas de la RMC en Mpa realizada a 4 especímenes de cada experimento a la edad de 28 días de curado, también se presenta el promedio de la RMC de cada experimento, su respectiva Desviación estándar (S) y el Coeficiente de Variación (CV), indicadores calculados con las siguientes ecuaciones:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (21)$$

Donde; S = desviación estándar

x_i = valor observado (lectura)

$\bar{x}$ = media de datos

n = número de observaciones

$$CV = \left(\frac{S}{\bar{x}} \right) * 100 \quad (22)$$

Donde; CV = Coeficiente de Variación en %

Tabla 24. Resultado de RMC a 28 días de curado e indicadores estadísticos

RMC de morteros a los 28 días de curado (Mpa)							
Experi- mento #	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	S	CV
1	15.50	12.81	20.22	22.44	17.74	4.38	24.70
2	8.60	7.52	8.29	4.96	7.34	1.65	22.47
3	2.60	4.24	3.38	5.77	4.00	1.60	34.00
4	16.20	14.08	13.67	15.93	14.97	1.28	8.55
5	3.72	7.98	7.84	6.12	6.42	1.99	30.94
6	16.98	16.74	20.12	20.22	18.51	1.91	10.34
7	4.60	5.38	6.40	11.22	6.90	2.97	43.10
8	18.70	20.72	22.53	23.68	21.41	2.18	10.17
9	9.95	14.07	12.69	12.82	12.38	1.74	14.03

Seguidamente en la Figura 15 se muestra una gráfica de los valores individuales de las lecturas de RMC a los 28 días de curado de cada uno de los experimentos, un círculo con un signo + en el centro representa la media de los valores individuales, en la figura se observa que la máxima dispersión de los datos pertenece al Exp 1, siendo este el experimento con el mayor valor de Desviación Estándar (4.38), por otro lado el Exp 4 es el que presenta la menor dispersión con una desviación estándar de 1.28, lo que lleva a la conclusión de que este experimento es el que muestra lecturas de RMC más confiables, respondiendo esto a una correcta y homogénea aplicación de la metodología de elaboración de especímenes (descrita anteriormente) y a la realización de un correcto ensayo de RMC de dichos especímenes.

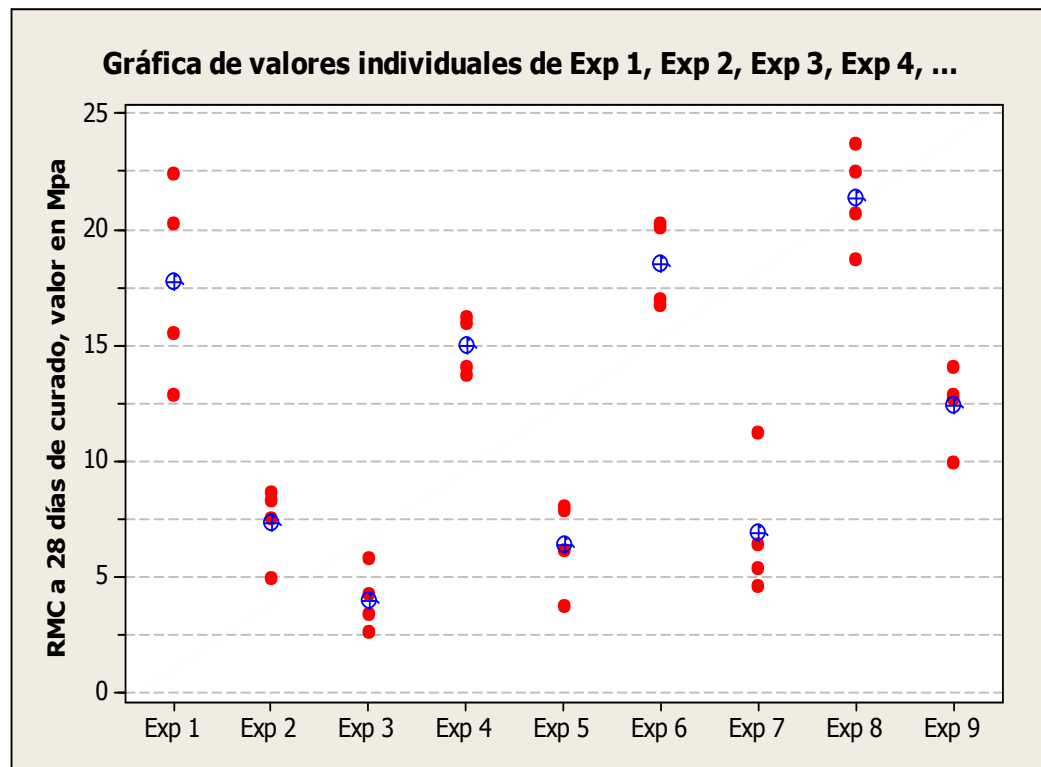


Figura 15. Gráficos de valores individuales de RMC de cada Experimento

No obstante de saber que el Exp 1 fue el que presentó la mayor desviación estándar no se puede indicar que este tiene una mayor desviación de las lecturas de RMC con respecto la media de sus datos, ya que por ejemplo no es lo mismo una desviación estándar de 4.28 para un promedio de 17.74 (Exp 1) que para un promedio de 6.9 (Exp 7), respondiendo a esta situación se ha utilizado como un indicador más eficaz el Coeficiente de Variación (CV) el cual es una medida relativa de dispersión que expresa a la desviación estándar como un porcentaje de la media [17].

La Figura 16 presenta las gráficas del CV de cada uno de los experimentos, el Exp 7 es el que posee el mayor CV a pesar de poseer una Desviación Estándar (S) menor que la del Exp 1 el cual ocupa el cuarto lugar en orden descendente de valor de CV y el mayor valor de S, esto corresponde a que tal y como se mencionó anteriormente no es lo mismo que el Exp 1 posea una $S = 4.38$ para un promedio de 17.74 que el Exp 7 que posee una $S = 2.97$ para un promedio de RMC apenas de 6.90 Mpa.

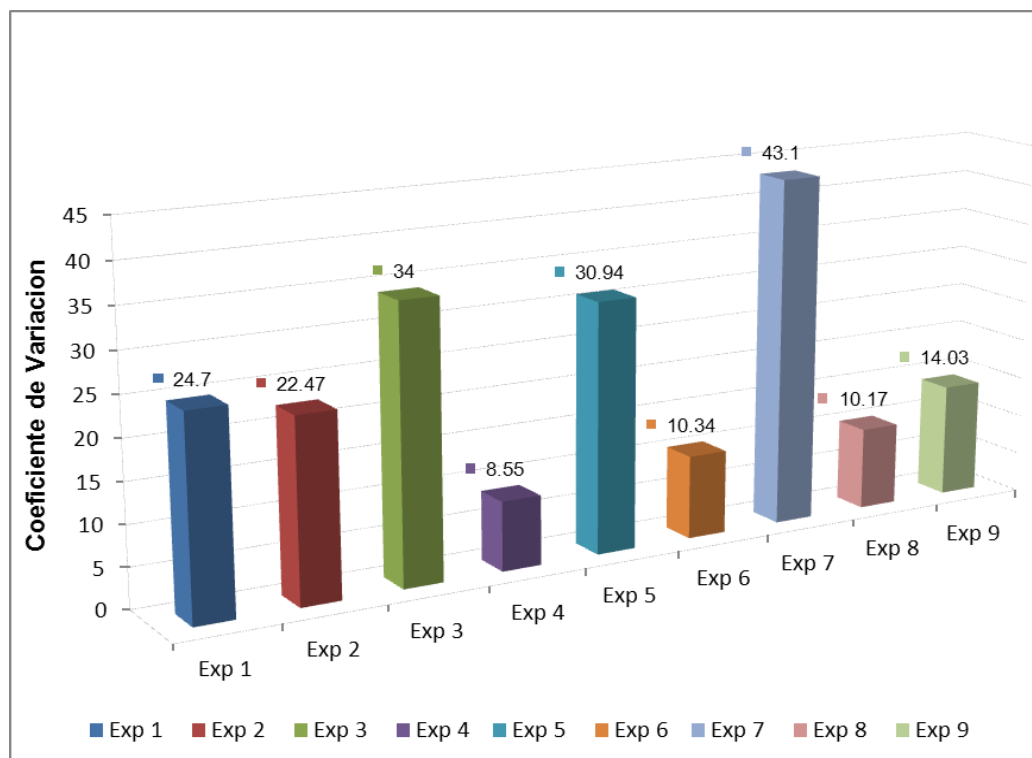


Figura 16. Gráficos de CV de cada experimento

En consecuencia se concluye que el Exp 7 es el que presentó una mayor variabilidad en la lectura de RMC de 4 especímenes, las lecturas de RMC de los 4 especímenes de este experimento se desvían en un 43.1% de su media, por otro lado el Exp 4 con la aplicación de este indicador confirmó ser el experimento con la menor variación de los datos de RMC con respecto a su media (CV = 8.55) y por ende el más confiable en cuanto a valores de datos observados.

5.7 Análisis de Datos de Peso Unitario de especímenes a los 28 días de curado

La Tabla 25 presenta los valores de Pesos Unitarios (PU) de cada uno de los especímenes correspondientes a las lecturas de RMC de cada experimento, también la tabla contiene la media, la Desviación Estándar (S) y el Coeficiente de Variación (CV) de los datos.

Tabla 25. Valores de Pesos Unitarios de especímenes de experimentos

Peso Unitario de especímenes (g)							
Experimento #	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	S	CV
1	273.00	283.00	267.00	260.00	270.75	9.74	3.60
2	253.60	247.70	255.40	242.60	249.83	5.83	2.33
3	238.92	240.48	235.40	246.73	240.38	4.74	1.97
4	275.52	267.15	269.70	267.29	269.92	3.92	1.45
5	238.95	248.30	247.26	250.87	246.35	5.16	2.09
6	277.46	278.11	273.94	281.70	277.80	3.18	1.14
7	238.53	239.87	244.42	255.04	244.47	7.49	3.06
8	277.94	278.19	281.82	282.99	280.24	2.55	0.91
9	253.06	259.65	259.89	261.34	258.49	3.69	1.43

La Figura 17 presenta gráficos con los valores individuales de los PU de 4 especímenes ensayados por cada experimento, en cada grupo de datos, un círculo con el signo + en el centro representa la media.

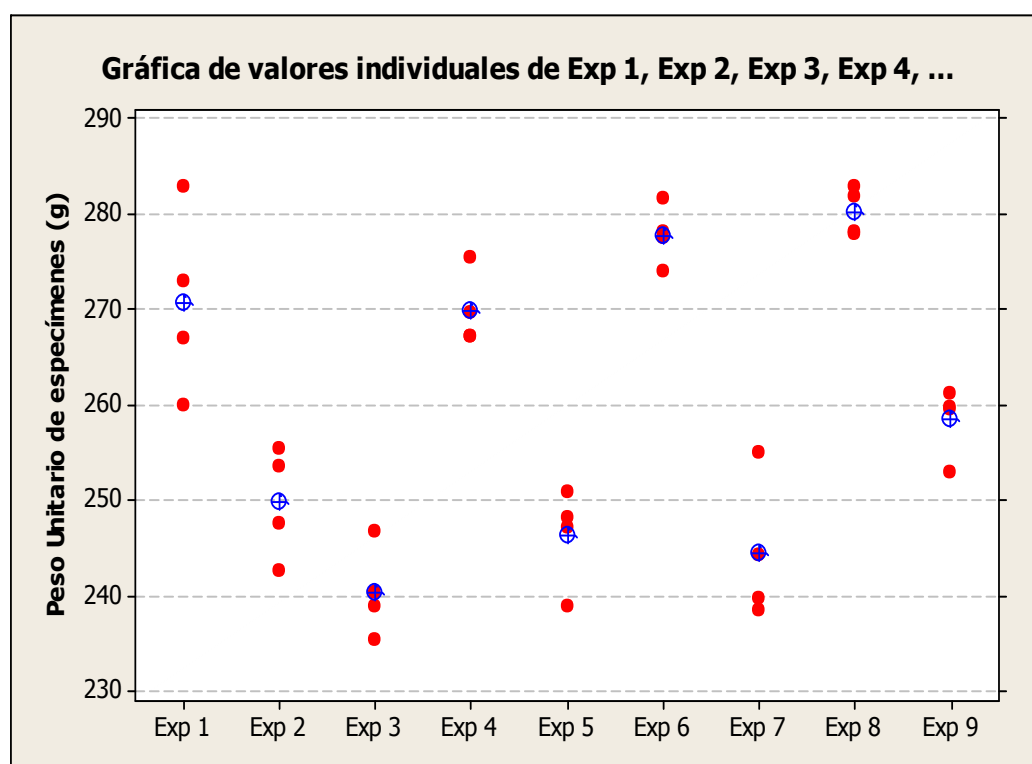


Figura 17. Gráficos de valores individuales de PU de Especímenes

El máximo valor de PU pertenece al Exp 8 con un Peso Unitario Promedio (PUP) de 280.24 g, siendo este el experimento que alcanzó el valor promedio de RMC más alto, además en la Figura 17 sus datos de PU aparecen más agrupados, tendiendo a un valor central por tanto es el que posee el menor valor de S equivalente a 2.55, la máxima densidad (PU/volumen del espécimen) que presentan los especímenes de este experimento (Exp 8) responde a que es el tratamiento elaborado con la menor relación en peso de Arena/Ligante y la mayor relación Agua/Ligante de entre los niveles de estudio de la presente investigación (ver Tabla 12), lo que provocó que en el espécimen hubiera más pasta (Cemento más agua) para cerrar los poros residuales de la distribución de las partículas de arena en el cubo, haciéndolo más denso y al poseer todos los especímenes de los experimentos el mismo volumen, provoca que los cubos del Exp 8 sean los más pesados.

El Exp 3 fue el que presentó los menores valores de PU con un valor de PUP = 240.38 g, siendo este el experimento que exhibió el menor valor promedio de RMC, este experimento fue elaborado con la mayor relación en peso de Arena/Ligante lo que incitó que hubiera menos pasta para cerrar los poros en el espécimen haciéndolo menos denso. En general la Figura 15 y la Figura 17 tienen el mismo comportamiento lo que hace inferir que la RMC va en detrimento con la disminución del PU.

El Exp 1 posee la mayor dispersión de los datos de PU con una $S = 9.74$, lo que supone que los golpes con el pisón tamper no fueron aplicados con la misma intensidad al momento de elaborar los especímenes, por otro lado el Exp 8 que presentó la S menor = 2.55 exhibe la aplicación pertinente de la metodología y la intensidad de los golpes en la elaboración de los cubos (especímenes).

5.8 Factores y niveles de estudio y sus efectos en la RMC

La Figura 18 contiene el gráfico de la influencia del material proveniente de los diferentes bancos en la RMC promedio, la cual fue calculada de la RMC de los experimentos que contenían el material proveniente de cada banco.

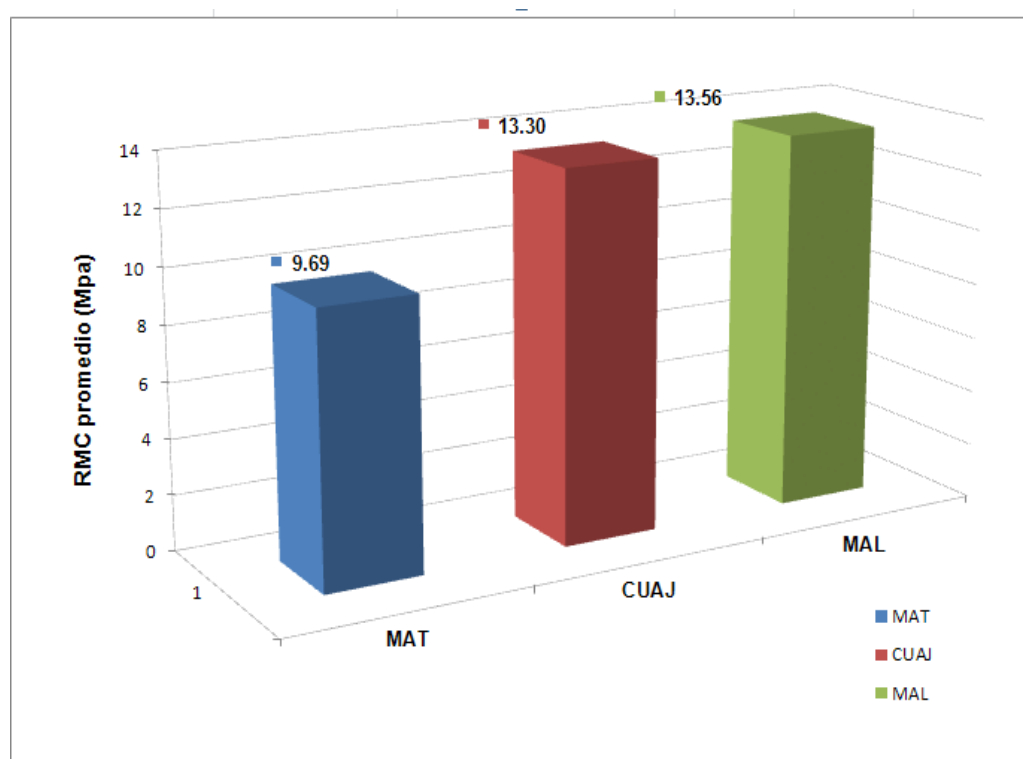


Figura 18. Banco de Materiales y su efecto en la RMC

Los mejores resultados en cuanto al valor promedio de RMC de los especímenes elaborados con morteros de cementos compósitos fueron alcanzados cuando se utilizó material proveniente del banco de Malpaisillo (MAL) con un valor promedio de RMC = 13.56 Mpa, seguido de los especímenes elaborados con material de Cuajachillo (CUAJ) con un valor promedio de RMC = 13.30 Mpa, como se puede apreciar no existe mucha diferencia en cuanto a la RMC promedio al utilizar material proveniente ya sea del banco de Malpaisillo o de Cuajachillo.

Mateare presentó un menor desempeño en cuanto al desarrollo de resistencia, con un valor promedio de RMC = 9.69 Mpa para los especímenes elaborados con este compósito, lo cual fue provocado por la cantidad de “magnetita” presente en este material lo que disminuyó la actividad puzolánica; empero de no haber realizado la prueba de contenido de SiO_2 amorfo (reactivo) del material de cada banco, ya que se necesita de la técnica avanzada de *Difracción de Rayos X* (técnica no disponible en la UNI), estos resultados dan cabida a la conclusión de que el contenido de Sílice (SiO_2) ensayado por los investigadores de la FIQ a cada uno de los bancos de materiales mediante *Gravimetría de precipitación*, no está muy distante del valor real y este contenido de sílice del material de cada banco ha tenido influencia directa en la variación de la RMC obtenida en los diferentes tratamientos.

La RMC promedio para los especímenes elaborados con el material de cada uno de los bancos se presentó en orden descendente, igual al orden descendente del contenido de sílice de cada banco, es decir MAL, CUAJ y MAT con contenidos de Sílice de 71.36, 69.96 y 67.51 % y RMC promedio de 13.56, 13.30 y 9.69 Mpa respectivamente.

En la Figura 19 se exhibe un gráfico del % de sustitución del CPO por PP y la influencia que esta variable y sus niveles de utilización han logrado en la RMC, la RMC con la que se han graficado los niveles de sustitución del CPO corresponden a una RMC promedio calculada de los tratamientos con los diferentes niveles de sustitución del CPO.

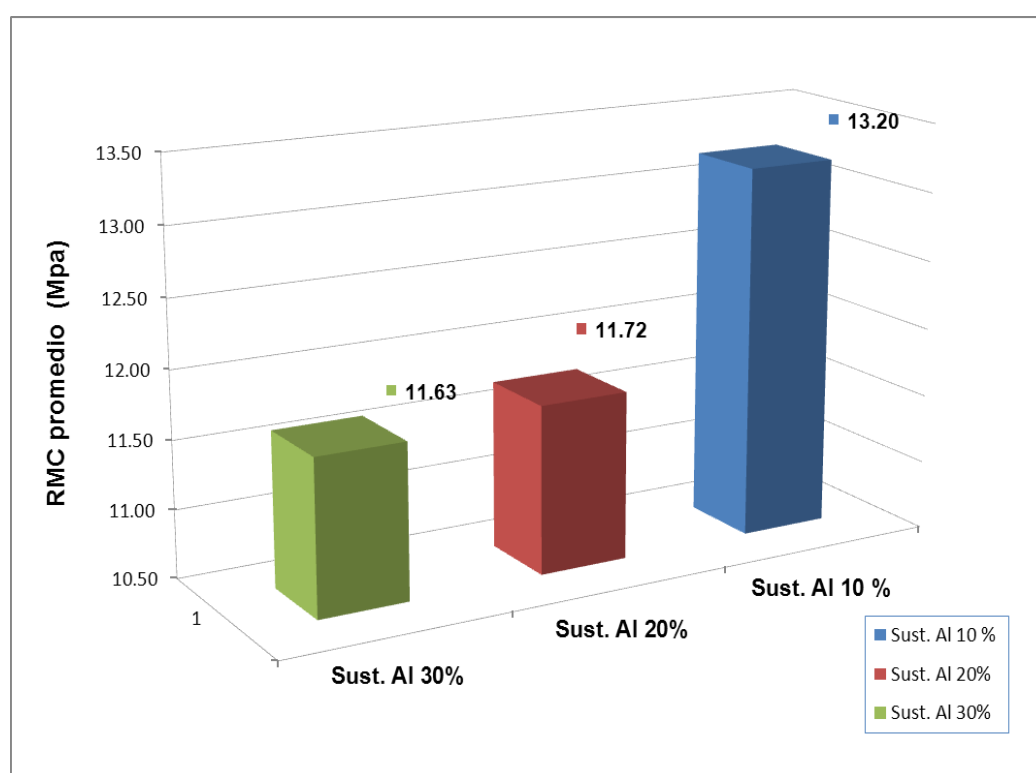


Figura 19. Gráfico de % de sustitución de CPO por PP vs RMC

El nivel de sustitución que mejores resultados brindó referido a desarrollo de propiedades mecánicas fue el de 10%, con un valor de RMC promedio = 13.20 Mpa, sin embargo los otros 2 niveles de sustitución no se alejaron mucho de este máximo valor, resultando el % de sustitución de 20 y 30% con valores promedio de RMC de 11.72 y 11.63 respectivamente, dando cabida a la posible utilización de estos niveles de sustitución como aceptables en la fabricación de morteros de cementos compósitos sin comprometer en gran medida la RMC del mortero endurecido, siempre y cuando se fabriquen con el mejor banco de materiales encontrado.

La Figura 20 contiene la gráfica de los niveles de utilización de la relación en peso de Arena/Ligante (Ar/L) vs la RMC promedio calculada de la RMC de los tratamientos que contienen los diferentes niveles.

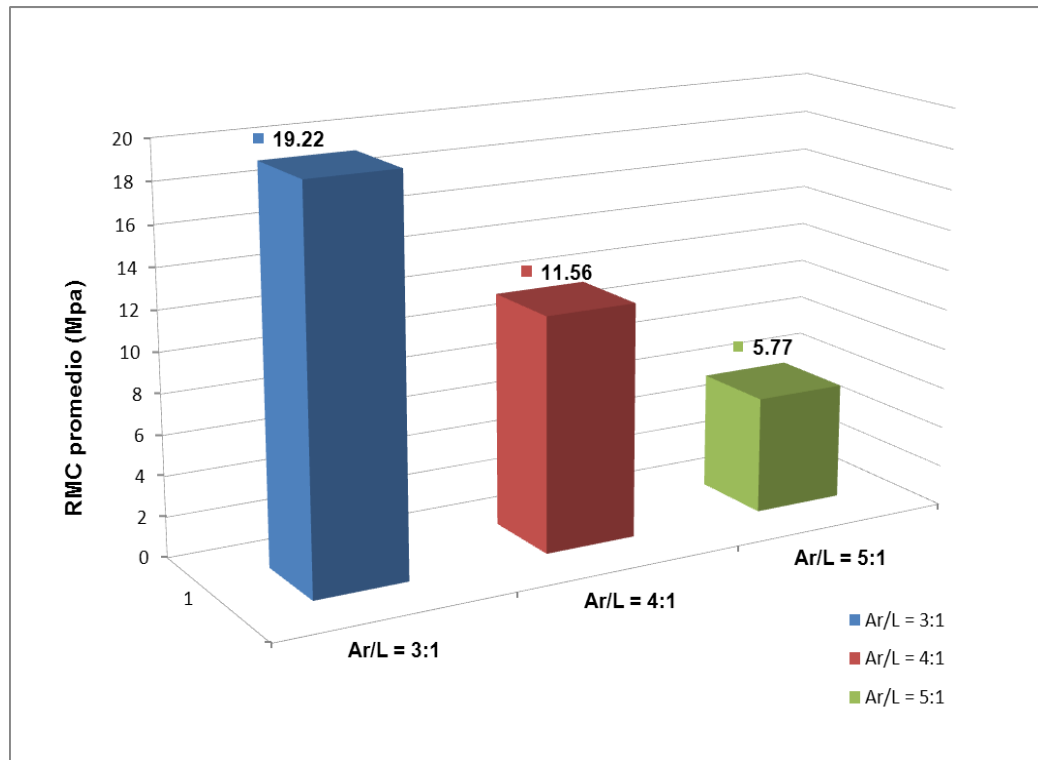


Figura 20. Gráfico de Relación en Peso de Arena/Ligante vs RMC

Los mejores resultados fueron obtenidos cuando se utilizó una relación en peso $Ar/L = 3:1$ con valores de RMC promedio de 19.22 Mpa, superando en una cantidad de 13.45 Mpa a los especímenes elaborados con una relación $Ar/L = 5:1$ (menor desempeño), evidenciando un comportamiento en detrimento de la RMC con el aumento de la relación en peso Ar/L , debiéndose esto a que la arena actúa solamente como material inerte o de relleno dentro de la matriz del compuesto.

La Figura 21 muestra un gráfico de la relación Agua/Ligante (A/L) vs la RMC promedio de los diferentes especímenes que fueron elaborados con las diferentes relaciones A/L.

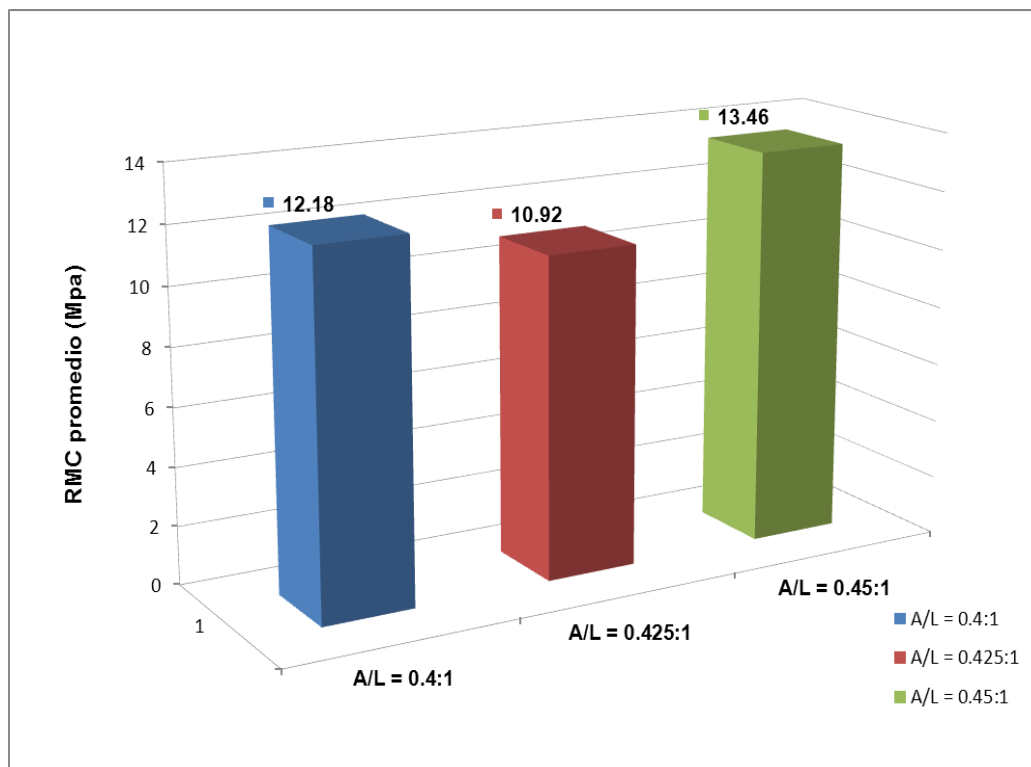


Figura 21. Gráfico de relación en peso Agua/Ligante vs RMC

La relación A/L, al menos en el rango estudiado en la presente investigación, no ejerció mucha influencia en la RMC, hay suficiente agua para que se lleve a cabo la reacción de hidratación del CPO sin que se observen cambios notorios en la RMC por efecto del agua de masado, pues en la figura anterior se puede observar como los valores de RMC promedio se encuentran muy cercanos para las tres relaciones de A/L.

5.9 Análisis Taguchi (Optimización de las Formulaciones)

Se realizó el análisis de Taguchi a los resultados de RMC de los experimentos elaborados con cemento compósito, se optimizaron las formulaciones de mezclas para morteros mediante las fórmulas estándares del método Taguchi “Mayor es mejor” y “Nominal es Mejor”. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

5.9.1 Mayor es Mejor

La Tabla 26 presenta las lecturas de RMC en Mpa para los experimentos de cemento compósitos y la relación Señal/Ruido (S/R) en decibelios (dB) computada con la fórmula estándar Taguchi “Mayor es Mejor” (ver ecuación 7) ya que en este caso se va a maximizar la variable de salida RMC y analizar el efecto de las variables de entrada o factores de estudio utilizados en la presente investigación.

Tabla 26. Relación S/R para RMC de compósitos

RMC en Mpa a los 28 días de curado						
Experimento #	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Promedio	Relación S/R (dB)
1	15.50	12.81	20.22	22.44	17.74	24.35
2	8.60	7.52	8.29	4.96	7.34	16.66
3	2.60	4.24	3.38	5.77	4.00	10.96
4	16.20	14.08	13.67	15.93	14.97	23.43
5	3.72	7.98	7.84	6.12	6.42	14.85
6	16.98	16.74	20.12	20.22	18.51	25.24
7	4.60	5.38	6.40	11.22	6.90	15.44
8	18.70	20.72	22.53	23.68	21.41	26.51
9	9.95	14.07	12.69	12.82	12.38	21.63

La Figura 22 presenta las gráficas de los diferentes niveles de estudio de los factores utilizados vs la relación S/R promedio en dB, calculada de los tratamientos con los diferentes niveles de sustitución. En la gráfica de Banco de materiales vs S/R el numero 1 representa MAT, 2 a CUAJ y 3 a MAL.

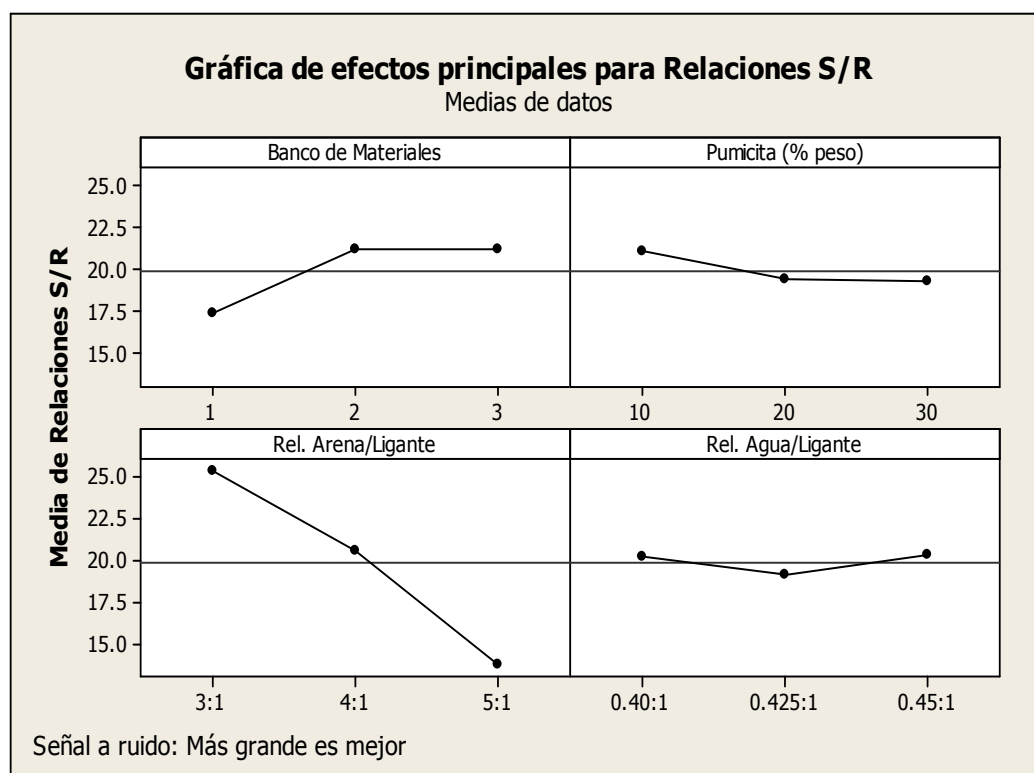


Figura 22. Gráfico de Señal/Ruido vs niveles de estudio “Mayor es Mejor”

De la Figura 22, la gráfica con una mayor pendiente (más vertical) aunque negativa es la Relación Arena/Ligante, siendo esta variable la que más influencia tiene en la RMC, ya que entre más vertical se encuentre la gráfica, mayor será el efecto de este factor en la variable salida [22], por otro lado tal y como ya se discutió anteriormente, la relación Agua/Ligante no tiene una influencia significativa sobre la RMC de los experimentos, la señal que emite esta variable se mantiene casi constante al menos para los niveles de estudio utilizados en la presente investigación.

La variable que también presenta influencia significativa en la variación de la RMC, pero menor que la relación Arena/Ligante, es la variable Banco de Materiales, la gráfica de S/R de esta variable presentó una mayor pendiente que la de Pumicita (% de sustitución en peso); así mismo es notorio que la señal que se emite cuando se utilizó el banco 1 (Mateare, (MAT)), es menor que para los Bancos CUAJ y MAL, 2 y 3 respectivamente, los cuales emiten una señal muy similar en magnitud, superando apenas por 0.02 dB la señal de MAL a la Señal de CUAJ.

Finalmente el nivel de cada variable que presenta la señal más robusta (mayor en magnitud) se considera como el nivel óptimo, en este caso para maximizar el valor de la Variable respuesta (máxima RMC para este estudio).

La Tabla 27 presenta los niveles óptimos tomados de las señales más robustas en dB que se emiten para cada uno de los factores de la Figura 22.

Tabla 27. Niveles Óptimos de las variables de estudio para Maximizar la RMC

Variables o Factores	Banco de Materiales	Pumicita (% en Peso)	Relación peso/peso Arena/Ligante	Relación Peso/peso Agua/Ligante
Nivel Óptimo	MAL	10	3:1	0.45:1

La influencia en la RMC que se percibe al utilizar el material de MAL y de CUAJ es muy similar, sin embargo tal y como ya se mencionó, la señal promedio de MAL superó en 0.02 dB la señal del material de CUAJ, por lo cual se utilizó el material de MAL como el material óptimo para la maximización de la RMC, similarmente los niveles de la relación Agua/Ligante de 0.40:1 y 0.45:1 emiten una señal promedio semejante en magnitud, no obstante el nivel de 0.45:1 supera levemente a la relación 0.40:1, apenas por 0.02 dB, por lo cual del factor Relación Agua/Ligante se utilizó como nivel óptimo la relación 0.45:1.

5.9.2 Nominal es Mejor

En la Tabla 28 se presentan los valores de la relación S/R en decibeles (dB) calculada mediante la fórmula estándar “Nominal es Mejor” para las RMC de los diferentes tratamientos compósitos. El valor nominal que se quiere obtener en este caso es el valor de RMC de 13.65 Mpa prescrito en la NTON 12 008 – 09 para bloques estructurales tipo BE-1, por tanto en la Ecuación (8), $Y_o = 13.65$.

Tabla 28. Relación S/R en dB calculada con la formula “Nominal es Mejor”

Experimento #	Relación S/R (dB)
1	-14.93
2	-16.21
3	-19.76
4	-4.73
5	-17.43
6	-14.22
7	-17.18
8	-18.05
9	-5.88

La Figura 23 muestra las gráficas de los niveles de sustitución utilizadas para los factores de estudio vs la relación promedio S/R en dB, dicha relación se ha calculado del promedio de los tratamientos conteniendo los mismos niveles utilizados por cada variable o factor.

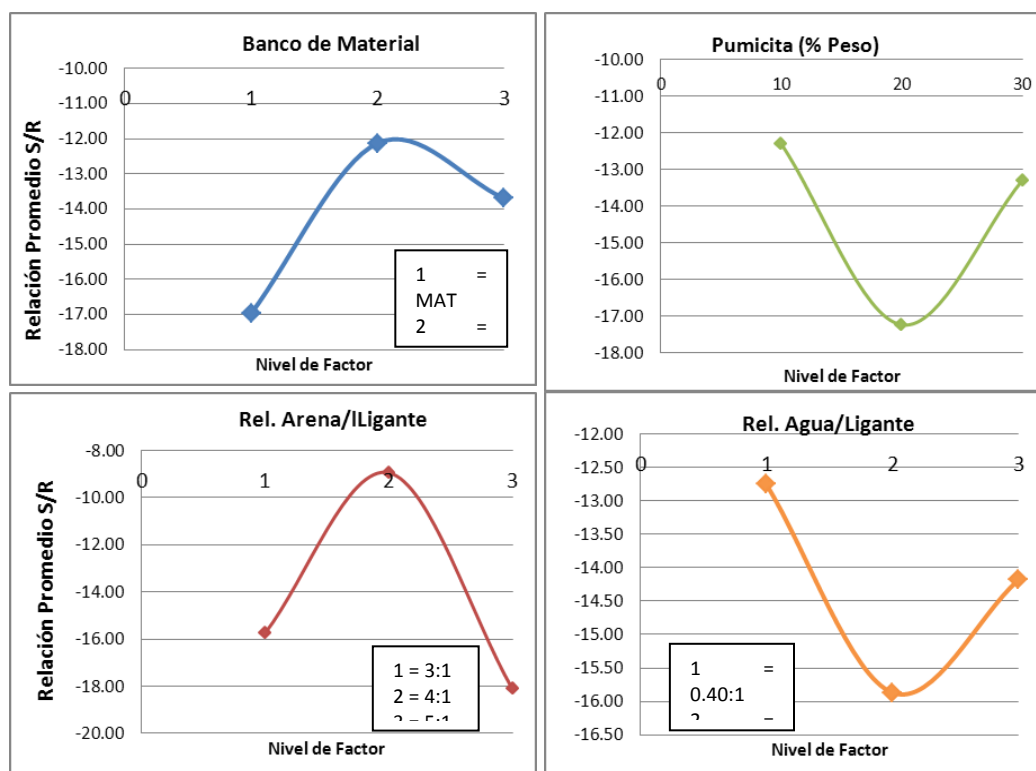


Figura 23. Gráfico de Señal/Ruido vs niveles de estudio “Nominal es Mejor”

En la gráfica anterior, de la variable Pumicita (% Peso) vs S/R, el nivel que alcanzó la señal más robusta (mayor en magnitud) fue cuando se utilizó un % de sustitución del 10%, sin embargo para un nivel de 30% la señal que se emitió fue apenas 1 dB menor que para cuando se utilizó un nivel de sustitución del 10%. Por lo cual, a pesar de saber que el mejor nivel de sustitución del CPO por PP para alcanzar valores de RMC en los morteros endurecidos iguales o mayores que 13.65 Mpa es 10%, adrede se elaboró también un nuevo mortero con los niveles de las variables que resultaron del análisis Taguchi “Nominal es Mejor”, pero utilizando un nivel de sustitución del CPO por PP del 30%.

Lo anterior se realizó para analizar el comportamiento de la RMC frente a la combinación de los nuevos niveles obtenidos, además si el mortero elaborado con esta formulación presenta buenas propiedades mecánicas, se cumple que la sustitución del CPO por PP hasta un nivel del 30% no compromete la calidad de los morteros elaborados con estos compósitos, lo cual es objeto de demostración de este trabajo investigativo.

La Tabla 29 contiene los niveles de las variables que se necesitan para alcanzar un valor nominal de RMC = 13.65 Mpa.

Tabla 29. Niveles Óptimos de las variables “Nominal es Mejor”

Variables o Factores	Banco de Materiales	Pumicita (% en Peso)	Relación peso/peso Arena/Ligante	Relación Peso/peso Agua/Ligante
Nivel Óptimo	CUAJ	10	4:1	0.40:1

Resultado del análisis Taguchi, utilizar los niveles de las variables plasmadas en la Tabla 29, constituyen una formulación suficiente para obtener morteros endurecidos que alcancen un valor nominal de RMC = 13.65 Mpa.

La Tabla 30 contiene la formulación utilizada para la elaboración de un mortero con mezclas “Nominal es Mejor” pero con un nivel de sustitución del CPO por PP de 30%.

Tabla 30. Niveles Óptimos de las variables “Nominal es Mejor” al 30% de PP

Variables o Factores	Banco de Materiales	Pumicita (% en Peso)	Relación peso/peso Arena/Ligante	Relación Peso/peso Agua/Ligante
Nivel Óptimo	CUAJ	30	4:1	0.40:1

5.10 Resultados de RMC de Geopolímeros 100% PP

La Tabla 31 presenta los valores promedios de RMC en Mpa obtenidos de 4 especímenes de los morteros curados en seco y elaborados con las formulaciones correspondientes a los dos tratamientos propuestos en la Tabla 15 y con PP proveniente del banco de Malpaisillo (MAL), dentro de paréntesis se muestran las desviaciones estándares de cada promedio.

Tabla 31. RMC de morteros 100% PP (Mpa)

Experimento	RMC a los diferentes días de curado (Mpa)		
	7 días	14 días	28 días
6% de Na₂O	2.92 (0.67)	3.32 (0.57)	3.51 (1.55)
12% de Na₂O	6.18 (0.26)	13.31 (1.57)	22.80 (3.07)

La mayor desviación estándar se presentó a los 28 días de curado para ambos experimentos, siendo mayor la desviación estándar para el experimento con relación Na₂O/Ligante del 12%.

A continuación la Figura 24 presenta la gráfica de la RMC promedio de los morteros de Geopolímeros a los diferentes días de curado.

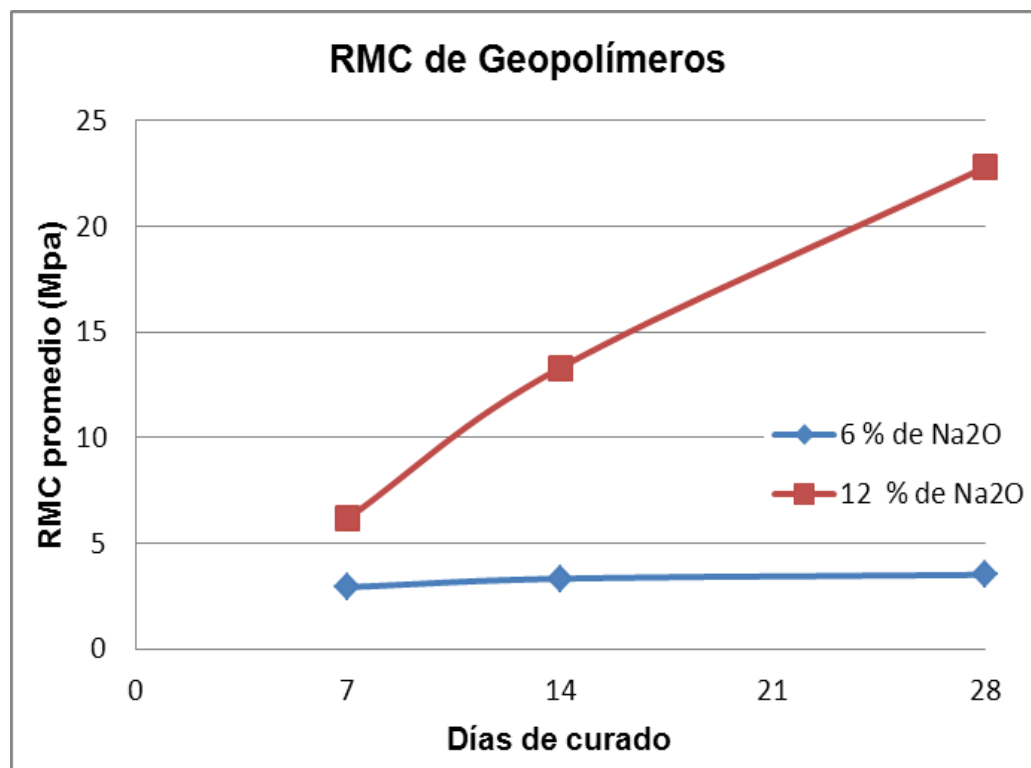


Figura 24. Gráfica de promedios RMC de Geopolímeros

El mortero elaborado con una relación del 12% de Na₂O con respecto al ligante mostró RMC mucho mayores que la del mortero elaborado al 6%, incluso la RMC alcanzada por el experimento al 12% a la temprana edad de 7 días de curado superó la RMC alcanzada por el experimento al 6% a los 28 días.

El experimento al 6% de Na₂O presentó poca reactividad, la gráfica de RMC promedio vs días de curados mostró un comportamiento casi constante, la RMC a los 28 días de curado apenas superó por 0.59 Mpa la RMC a los 7 días, siendo el máximo valor de RMC alcanzado por este experimento de 3.51 Mpa. La activación alcalina fue muy pobre para este experimento, la estructura vítrea de la Pumicita no pudo disolverse en gran medida para favorecer la formación de productos de reacción con propiedades mecánicas tales como C-S-H y gel de Sílice (SiOH⁻), lo cual fue producto del medio poco alcalino.

El anterior resultado haría pensar que el material proveniente del banco de Malpaisillo contiene poca sílice amorfa, sin embargo la RMC lograda por el mortero elaborado con una relación de Na₂O/Ligante de 12% fue de 22.80 Mpa, superando incluso la RMC máxima alcanzada por los tratamientos elaborados con

cemento compósitos (Exp 8 = RMC máxima = 21.41 Mpa) y el mortero de referencia “Nominal es Mejor” elaborado 100% con CPO, lo que lleva a la conclusión de que el material del banco de Malpaisillo, si posee sílice amorfa, sin embargo para poder disolver esta estructura vítrea se necesita de un medio alcalino bastante agresivo, no obstante la cantidad de Silicato de Sodio utilizado fue alta y considerando que este reactivo es muy costoso, es considerable la opción de utilizar otro tipo de activador alcalino o una combinación más económica.

Por otro lado se debe considerar que posiblemente el tamaño de partícula (finura) de la Pumicita Pulverizada aún era muy grande presentando poca área de contacto para la reacción de geopolimerización, desfavoreciendo la disolución de la estructura vítrea de la PP.

La Figura 25 muestra la gráfica de los Coeficientes de Variación (CV) obtenido para los dos tratamientos de morteros de Geopolímeros con los datos de RMC a los 28 días de curado.

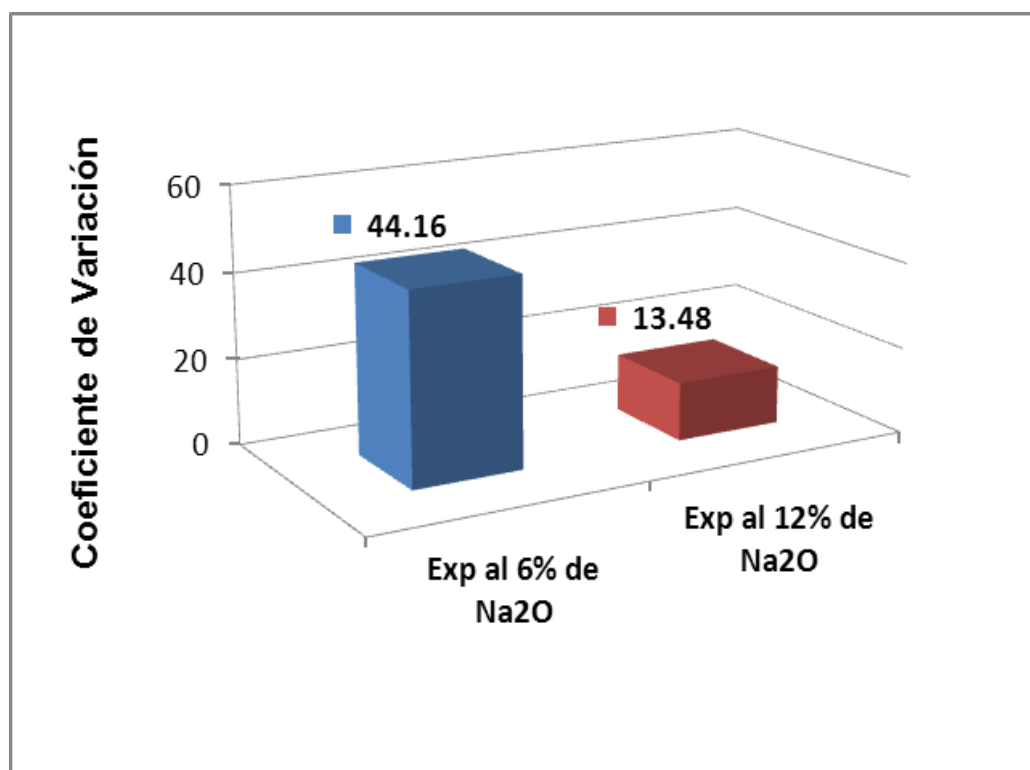


Figura 25. Gráfico de Coeficiente de Variación para los tratamientos

Opuesto a que el tratamiento con una relación Na₂O/Ligante de 12% presentó una mayor desviación estándar, mostró un CV menor, las lecturas de este valor se

desvían en un 13.48% de la media de estos datos, por otro lado las lecturas del tratamiento al 6% presentaron un CV = 44.16% equivaliendo a que las lecturas de RMC a los 28 días de curado se desvían en un 44.16% del valor promedio de estos datos, concluyendo que los valores de RMC para el tratamiento al 12% de Na₂O fueron los más confiables.

A pesar de no existir una reacción puzolánica en los Geopolímeros, ya que se produce una reacción de polimerización, se computo el Índice de Actividad Puzolánica (IAP) como un indicador de la actividad de la PP para datos de RMC a los 28 días de curado utilizando la siguiente ecuación:

$$IAP = \left(\frac{R_1}{R_o} \right) * 100 \quad (23)$$

Donde R_o es la RMC del mortero de control elaborado con las mismas relaciones y R₁ es la RMC del mortero con puzolana [18].

Estos morteros de Geopolímeros están elaborados con las relaciones Agua/Ligante y Arena/Ligante iguales a las del mortero de referencia (control) elaborado 100% con CPO con mezclas “Nominal es Mejor”, por lo cual R_o = 18.59 Mpa. El tratamiento al 12% de Na₂O, presentó un IAP bastante bueno (122.24%) lo cual indica que este experimento sobrepasó la RMC de un mortero elaborado con las mismas relaciones de mezcla de materiales pero elaborado 100% con CPO, hasta en un 22.24% más.

A continuación la Tabla 32 contiene los valores promedios del peso unitario (g), la Desviación Estándar de los datos (S) y el CV para los dos tratamientos.

Tabla 32. Datos del Peso Unitario de Especímenes de geopolímeros

Lectura	Peso Unitario (g)	
	6% de Na₂O	12% de Na₂O
1	254.46	286.82
2	263.99	287.56
3	270.95	290.77
4	264.03	286.65
Promedio	263.36	287.95
S	6.77	1.92
CV	2.57	0.67

El tratamiento al 6% de Na₂O presentó una S mayor que el de 12%, y presentó el Peso Unitario (PU) promedio menor, este parámetro no tuvo mucha influencia en

la RMC, pues el PU al 6% no es muy distante al PU del tratamiento al 12% no obstante la diferencia de la RMC entre ambos tratamientos fue muy grande.

El CV para el tratamiento al 12% resultó ser el menor, con un valor apenas del 0.67%, equivaliendo a que los valores de PU tomados de cuatro especímenes de este mortero, se desviaron del promedio de estas lecturas en apenas un 0.67%, lo que lleva a concluir que la metodología de elaboración de estos especímenes se realizó perfectamente y que las lecturas de PU son más confiables en el experimento al 12% de Na_2O /Ligante, a la vez que son los especímenes más compactos.

5.11 RMC de morteros de Referencia (100% CPO) con mezclas selectas

Con el objetivo de comparar la RMC obtenida por los morteros de cemento compósito selectos y los geopolímeros con formulación según correspondiera a las mezclas óptimas resultado del análisis de Taguchi, se elaboraron morteros de referencia utilizando como ligante solamente CPO marca *Canal* (morteros 100% CPO), estos morteros se elaboraron respetando las relaciones Arena/Ligante y Agua/Ligante que se obtuvieron mediante el análisis de Taguchi y la respectiva aplicación de las formulas estándares de “Mayor es Mejor” y “Nominal es Mejor”.

En total se elaboraron 12 especímenes de cada mortero correspondiente a las formulaciones “Nominal es Mejor” y “Mayor es Mejor” para totalizar 24 cubos (o especímenes), esto con el propósito de monitorear el desarrollo de la resistencia a la compresión de los morteros con el paso del tiempo y con esto el grado de avance de la reacción de hidratación del CPO en función del tiempo, por lo cual se ensayó la RMC a los 7, 14 y 28 días de curado en seco (al igual que los compósitos) utilizando 4 especímenes por cada ensayo.

La Tabla 33 contiene el valor promedio de RMC de los morteros elaborados 100% con CPO y relaciones de agregados obtenidos de la aplicación de las formulas estándares de Taguchi “Mayor es Mejor” y “Nominal es Mejor”, los promedios fueron calculados de cuatro lecturas de RMC para cada día de curado, el curado también se realizó en seco a fin de que estos morteros de referencias se encontraran en las mismas condiciones que los morteros compósitos con mezclas optimizadas. La S se encuentra dentro de paréntesis.

Tabla 33. RMC de morteros de referencia (100% CPO)

RMC a los diferentes días de curado (Mpa)			
Experimento	7 días	14 días	28 días
Mayor es Mejor	22.71 (3.11)	24.07 (2.68)	26.30 (3.66)
Nominal es Mejor	16.74 (1.67)	18.53 (2.90)	18.59 (3.14)

La mayor S se presentó a los 28 días de curado para ambos experimentos, la RMC máxima promedio la logró el experimento elaborado con niveles de los factores iguales a los de “Mayor es Mejor” en morteros de cemento compósitos, logrando una RMC promedio que supera la RMC de los morteros de cementos compósitos, incluso sobrepasa el valor de RMC logrado por el mortero de geopolímero elaborado 100% con PP al 12% de Na_2O .

La Figura 26 muestra el gráfico de la RMC de los morteros de referencia y su comportamiento en función de los días de curado en seco.

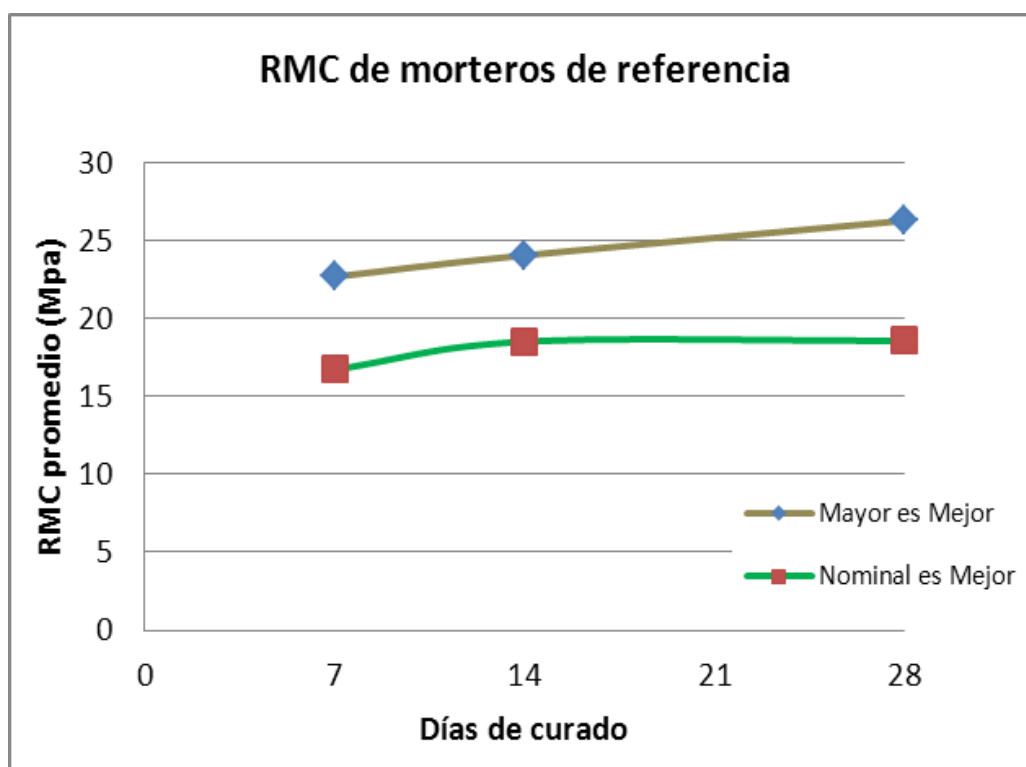


Figura 26. Gráfico de RMC promedio de morteros de referencia

De la Figura 26, el comportamiento que exhibe la RMC promedio de los dos morteros de referencias vs días de curado, es muy similar, ambos varían linealmente aunque con una pendiente muy pequeña, en ambos casos la RMC a

los 28 días de curado es apenas un poco mayor que la desarrollada a los 7 días de curado, lo que es suficiente para concluir que la reacción de hidratación del CPO es rápida y a la temprana edad de 7 días de curado, en promedio se ha llevado a cabo el 88% de la reacción que se alcanza a los 28 días de curado.

5.12 Caracterización de morteros compósitos endurecidos con mezcla de niveles selectos

Se elaboraron los morteros con los niveles de cada variable selectos por el método de Taguchi para “Mayor es Mejor” (ver Tabla 27), “Nominal es Mejor” (ver Tabla 29) y “Nominal es Mejor al 30%” (ver Tabla 30).

5.12.1 Valores optimizados de RMC

La Tabla 34 presenta los valores de RMC promedio a los 28 días de curado de los diferentes tratamientos producto del análisis de Taguchi y las formulas estándares de este método, la RMC promedio fue calcula de 4 lecturas de RMC realizadas a la misma cantidad de especímenes.

Tabla 34. Valor de RMC promedio de tratamientos selectos

Tratamiento	RMC promedio a 28 días (Mpa)	S	CV	PU promedio(g)
Mayor es Mejor	24.70	3.08	12.45	287.29
Nominal es Mejor	15.70	2.54	16.16	273.47
Nominal es Mejor al 30%	15.85	3.85	24.31	270.65

La RMC que experimentó el tratamiento “Mayor es Mejor” fue mayor que la obtenida por el experimento de cemento compuesto Exp 8, RMC = 21.41 Mpa (mayor RMC de todos los compósitos), lo cual ya fue discutido anteriormente. Los otros 2 tratamientos obtuvieron una RMC similar en magnitud, los especímenes elaborados para estos 2 tratamientos superaron inclusive el valor nominal esperado de 13.65 Mpa, el comportamiento más destacable fue el del tratamiento “Nominal es Mejor al 30%”, pues este superó por 0.15 Mpa al “Nominal es Mejor” aun cuando este último poseía un % de sustitución del CPO por PP apenas del 10%. Este comportamiento ya había sido previsto en el análisis “Nominal es Mejor” de la Figura 23.

Al observar los Pesos Unitarios de ambos tratamientos, es notorio que el PPU del tratamiento “Nominal es Mejor” es 2.82 g mayor que el “Nominal es Mejor al 30%” y sin embargo la RMC de este fue ligeramente mayor, lo anterior nos lleva a concluir que el PU no tuvo influencia preponderante en el valor de RMC, que la

reacción puzolánica se está llevando a cabo y que efectivamente una sustitución del CPO hasta un nivel del 30% por PP, no pone en conflicto el desarrollo de las propiedades mecánicas de un mortero compuesto elaborado con esta relación de sustitución de CPO por PP.

No obstante de la conclusión realizada, ninguno de los morteros compósitos de estos tratamientos pudo superar el valor promedio de RMC obtenido por los morteros de referencia elaborados 100% con CPO, el tratamiento que más cerca estuvo de alcanzar la RMC del mortero de referencia fue el “Mayor es Mejor”, con una RMC menor apenas por 1.6 Mpa del mortero de referencia elaborado con relaciones Agua/Ligante y Arena/Ligante también “Mayor es Mejor”.

5.12.2 Índice de Actividad Puzolánica (IAP)

Este fue calculado con la ecuación 23, la siguiente tabla contiene los IAP de cada uno de los tratamientos de morteros de cementos compósitos calculado con datos de RMC a los 28 días de curado.

Tabla 35. IAP de tratamientos de compósitos con mezclas selectas

Tratamiento	IAP %
Mayor es Mejor	93.91
Nominal es Mejor	84.45
Nominal es Mejor al 30%	85.26

Para calcular el IAP del tratamiento “Mayor es Mejor” se utilizó el valor de $R_o = 26.30$ Mpa obtenido por el mortero de referencia elaborado con mezclas también Mayor es Mejor pero con 100% CPO, y para “Nominal es Mejor” se utilizó $R_o = 18.59$ Mpa.

El tratamiento “Mayor es Mejor” obtuvo el mayor IAP, seguido de “Nominal es Mejor” y por ultimo “Nominal es Mejor al 30%”, sin embargo los tres tratamientos presentaron altos IAP, pudiéndose observar que en las tres formulaciones optimizadas se está llevando a cabo la reacción puzolánica entre la portlandita producto de la hidratación del CPO y la sílice de la pumicita, ya que todos los IAP superan el 75% a los 28 días de curado.

5.12.3 Absorción

La Figura 27 exhibe un gráfico del % de absorción de los especímenes de los tratamientos de Cementos compósitos con mezclas selectas por el método de Taguchi.

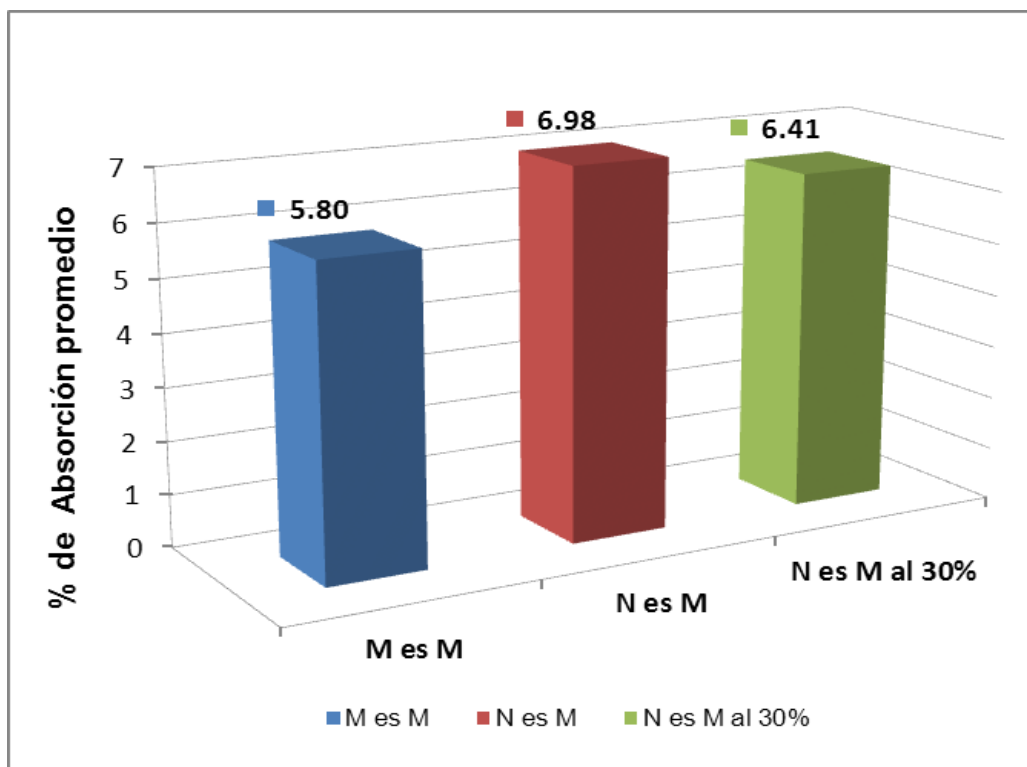


Figura 27. Gráfico de % de Absorción de los tratamientos

Después de 28 días de curado en seco, se pesaron los especímenes y luego se dejaban saturando en agua durante 24 horas, se pesaban nuevamente y se computaba el % de absorción mediante la fórmula:

$$\% \text{ de Absorción} = \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1} \right) * 100 \quad (24)$$

Donde P_1 es el peso del espécimen antes de ser saturado y P_2 es el peso del espécimen saturado con agua por 24 h.

El tratamiento “Mayor es Mejor” mostró menor porosidad en su estructura, pues los especímenes de este tratamiento obtuvieron el menor % de Absorción (5.80%), lo que pone en evidencia que una menor relación de Arena/Ligante en un mortero, aumenta la densidad del espécimen, el Ligante cierra los poros de la matriz del cubo, los hace más densos y ponen resistencia a la pérdida o a la ganancia (infiltración) de humedad (agua) en la matriz del espécimen, este resultado estuvo en concordancia con el PU de los especímenes.

Los otros 2 tratamientos mostraron absorciones similares, “Nominal es Mejor” presentó una estructura más porosa (% de Absorción de 6.98%), sin embargo este dato no fue muy diferente al mostrado por el tratamiento “Nominal es Mejor al

30%” (6.41%), este mayor % de absorción de estos dos tratamientos fue producto que estos poseían un menor PU que los del tratamiento “Mayor es Mejor” y por ende una mayor cantidad de poros en su estructura.

5.12.4 Ataque Químico por solución de Sulfato de Magnesio

La Tabla 36 contiene los valores de RMC promedios para los diferentes tratamientos con mezclas selectas y sumergidos en solución de Sulfato de Magnesio (uno de los sulfatos más agresivos contra el concreto) durante 28 días, contiene también la S y el CV de estos promedios, y se presentan asimismo los valores promedios de RMC de los morteros de referencias curados a 28 días en seco.

Tabla 36. RMC de experimentos en solución de Sulfato de Magnesio

Tratamiento	RMC promedio (Mpa) a 28 días			
	Sin ataque por sulfato	En solución de Sulfato	S	CV
Mayor es Mejor	24.70	29.45	3.36	11.40
Nominal es Mejor	15.70	17.28	4.03	23.31
Nominal es Mejor al 30%	15.85	14.28	2.64	18.47

Antes de sumergir los especímenes en la Solución de Sulfato de Magnesio, se curaron en seco durante 28 días al igual que los morteros compósitos de referencia utilizados para comparar la RMC de los especímenes sumergidos en la solución de sulfato.

Solamente el tratamiento “Nominal es Mejor al 30%” después de sumergido en solución de Sulfato de Magnesio (MgSO_4) durante 28 días, presentó una RMC menor que el espécimen de control, por lo cual la pérdida de resistencia solamente se computó para este tratamiento utilizando la ecuación 17, sin embargo este valor resultó ser pequeño, siendo estos morteros bastante resistentes a la acción de los sulfatos. La pérdida de resistencia para este tratamiento (“Nominal es Mejor al 30%”) fue apenas de 11%.

Los otros dos experimentos obtuvieron RMC mayores que los especímenes de control; logrando el tratamiento “Mayor es Mejor” sobrepasar inclusive la RMC a los 28 días de curado de los morteros elaborados con las mismas relaciones de materiales pero 100% con CPO. Es de importancia mencionar que durante la exposición de los especímenes a la solución de Sulfato, estos aumentaron su peso, presentando cierto % de absorción.

La Tabla 37 contiene los valores de los Pesos Unitarios Promedios (PUP) de los tratamientos antes y después de ser sumergidos en solución de $MgSO_4$, también contiene el % de Absorción promedio y la desviación estándar de los datos de PU de los especímenes después de pasar 28 días sumergidos en solución de sulfato.

Tabla 37. PUP de tratamientos antes y después de ataque por $MgSO_4$.

Tratamiento	PUP de especímenes			
	Antes de sumergidos (g)	Después de sumergidos (g)	% Absorción Promedio	S (de PU después de sumergido)
Mayor es Mejor	284.57	306.64	7.76	6.77
Nominal es Mejor	268.47	288.1	7.31	9.09
Nominal es Mejor al 30%	266.43	293.8	10.27	10.34

La Figura 28 muestra la gráfica del % de Absorción promedio de los cubos de cada tratamiento, estos valores de absorción son mayores que los mostrados anteriormente (acápite de Absorción) puesto que este % de Absorción ha sido estudiado después de pasar los especímenes durante 28 días sumergidos en solución.

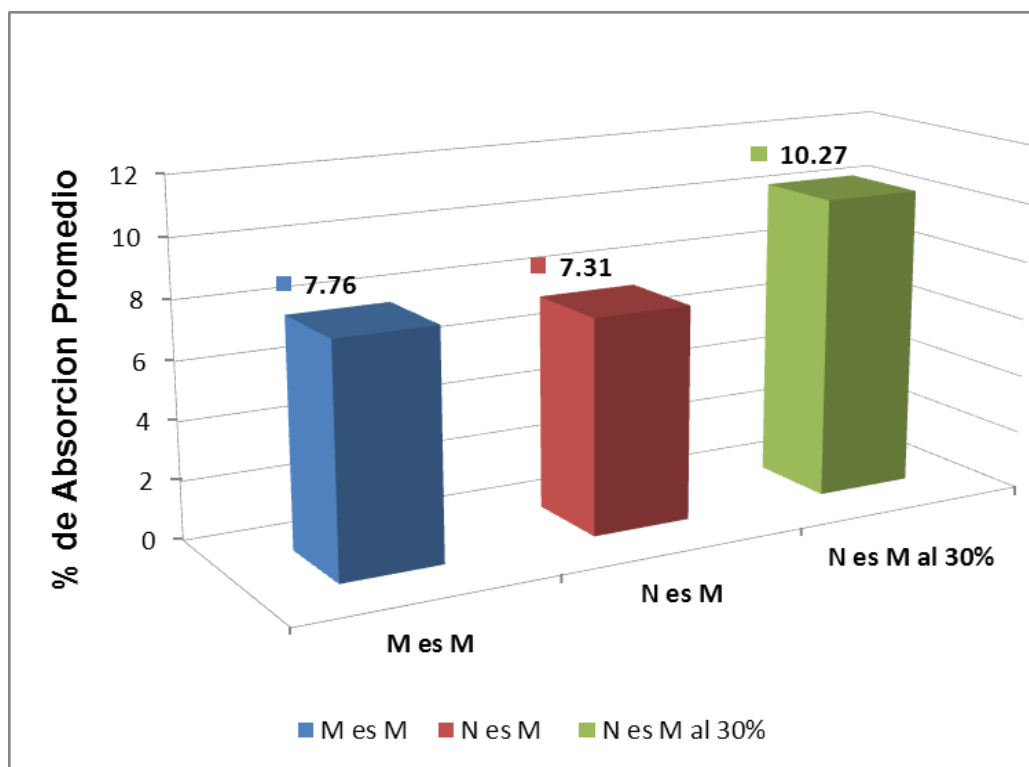


Figura 28. Gráfico % de Absorción de solución de sulfato de tratamientos selectos

Los tratamientos Nominal es Mejor (N es M) y Mayor es Mejor (M es M) exhiben un % de absorción casi igual, sin embargo aparentemente los especímenes de M es M, tuvieron aunque levemente una mayor absorción que los N es M, siendo que el mortero M es M fue elaborado con una relación de Arena/Ligante menor, al haber más ligante que cierre los poros de la matriz, deberían ser los más compactos y por tanto presentar la menor absorción, por lo que este comportamiento se asocia simplemente a una pequeña variabilidad de la toma de datos de PU, pues la Desviación Estándar (S) para el PU de los especímenes N es M fue mayor que la S para M es M.

De lo antes planteado se puede concluir que los especímenes del tratamiento “Nominal es Mejor al 30%” fueron los únicos que resultaron ser más sensibles al ataque químico por solución de MgSO_4 , debido a que presentaron una mayor absorción de esta solución (10.27%) causó que esta se introdujera en la mayor cantidad de poros existentes y pudiera reaccionar en mayor grado con la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ subproducto de la hidratación del CPO) que aún no había reaccionado con el SiO_2 amorfo de la PP, produciendo la expansión y la pérdida de resistencia de los especímenes.

Por otra parte el menor % de Absorción de los especímenes de M es M y N es M no permitió que la solución de sulfato se introdujera en gran cantidad en la matriz de los cubos, reduciendo así la actividad de esta solución con la portlandita, y permitiendo que en el centro del cubo se produjera una zona de reacción entre esta portlandita y el SiO_2 amorfo de la PP originando la reacción puzolánica, lo cual explica la mayor RMC de estos especímenes en comparación con los de control, logrando incluso el tratamiento M es M poseer una mayor RMC que un mortero elaborado 100% con CPO. Además la mayor edad de estos especímenes permitió vislumbrar la influencia de la reacción de Puzolánica en la RMC y consolidando la conclusión anteriormente realizado sobre la existencia de sílice amorfo en la PP de estos bancos de materiales.

5.12.5 Ataque por Altas Temperaturas.

La Tabla 38 contiene las RMC promedios de los morteros de referencia y la RMC de los diferentes tratamientos después de expuestos durante 2 horas a una temperatura de 900 °C. La pérdida de resistencia que se presenta fue calculada con la ecuación 17, donde R_2 fue la RMC promedio presentada por los especímenes después de expuestos a altas temperaturas.

Una vez curado en seco los especímenes por 28 días, se ensayó el ataque por altas temperatura y seguidamente el ensayo de RMC. La RMC promedio de los tres tratamientos converge en una RMC después del ataque muy similar.

Tabla 38. RMC promedio de especímenes con Ataque por altas temperaturas

Tratamiento	RMC Promedio a 28 días de curado (Mpa)		
	Referencia a 28 días.	Después de ataque por fuego	Perdida de resistencia %
Mayor es Mejor	24.70 (3.08)	6.43 (0.29)	73.97
Nominal es Mejor	15.70 (2.54)	6.17 (2.77)	60.70
Nominal es Mejor al 30%	15.85 (3.85)	5.19 (1.48)	67.26

El tratamiento M es M presentó una mayor pérdida de Resistencia (73.97%) en general el ataque fue muy agresivo para los tres compósitos (entre el 60 y 74%), debido a las reacciones deletéreas que se presentan en la pasta de cemento hidratada a temperaturas iguales o superiores a los 600 °C.

La reacción puzolánica no tuvo mucha influencia en los resultados de RMC promedios después de la exposición de los especímenes de los diferentes tratamientos a la temperatura de 900 °C, lo cual se debió a que a los 28 días de curado la reacción puzolánica apenas estaba iniciando, también se puede observar tal y como ya se mencionó con anterioridad, que la RMC promedio de los tres tratamientos después del ataque fue muy similar, esto a pesar de que uno de los tratamientos fue elaborado con un porcentaje de sustitución del CPO por PP del 30% (experimento que presentó la menor RMC después del ataque).

VI. CONCLUSIONES

Los morteros endurecidos elaborados con cemento compósito y geopolímeros, presentaron buenas propiedades mecánicas, mostrando buena reactividad las muestras de Pumicita Utilizadas, evidenciando la presencia de sílice amorfa en la composición química de estos materiales y logrando así viabilidad técnica al elaborar un cementante a partir de la sustitución parcial y total del CPO por PP.

- ✓ Los 3 bancos con el mayor potencial de utilización desde el punto de vista técnico y sus propiedades físicas para ser utilizados como sustitutos parciales o totales del CPO, fueron Malpaisillo, Cuajachillo y Mateare, sobresaliendo Malpaisillo y Cuajachillo.
- ✓ La presencia de partículas duras (presumiblemente magnetita) en el material, impidió que las muestras alcanzaran en su totalidad una finura semejante a la del CPO, siendo más pronunciado el contenido de “magnetita” para el banco de Mateare.
- ✓ La sustitución parcial en peso del CPO por PP a niveles de 10, 20 y 30% no tuvo una influencia tan significativa en la RMC a los 28 días de curado en seco en morteros compósitos endurecidos, a esta edad la reacción puzolánica se encontró en sus albores, el IAP calculado para los morteros de mezclas selectas fueron mayores al 75% lo que verificó que la reacción puzolánica se estaba llevando a cabo, sin embargo se necesita más días de curado para observar los beneficios de esta reacción en la RMC.
- ✓ Para los factores banco de materiales, % de sustitución en peso del CPO por PP, relación en peso Arena/Ligante y relación en peso Agua/Ligante, los niveles: Malpaisillo, 10%, 3:1 y 0.45:1 respectivamente, convergieron en la mezcla óptima para alcanzar valores de RMC máximos. Por otro lado los niveles Cuajachillo, 10%, 4:1 y 0.40:1 para los mismos factores respectivamente, resultaron ser la mezcla óptima para obtener una RMC igual o ligeramente mayor al valor nominal propuesto en la NTON 12 – 008 – 09 para bloque estructurales tipo BE – 1, otro compósito “Nominal es Mejor” pero con un % de sustitución del CPO por PP del 30% obtuvo una RMC similar a la del tratamiento “Nominal es Mejor” al 10% de sustitución.
- ✓ El material proveniente del banco Malpaisillo requirió de condiciones alcalinas agresivas para disolver su estructura vítrea (amorfa) y lograr la activación en la formación de geopolímeros, una relación en peso Na_2O /Ligante del 12% fue necesaria para obtener valores aceptables de RMC.

- ✓ Mediante la NTON 12 – 008 – 09, los compósitos Exp 8, Exp 6, Exp 1, Exp 4 y el geopolímero elaborado al 12% de Na_2O con respecto al ligante, se pueden clasificar como morteros con mezclas perfectas para elaborar bloques estructurales tipo BE – 1 utilizados para los sistemas constructivos de mampostería confinada y reforzada.
- ✓ El ataque químico por solución de sulfato no afectó en gran medida a los especímenes compósitos elaborados con mezclas de materiales selectas por el método Taguchi.
- ✓ Las altas temperaturas afectaron en un alto grado a los tres tratamientos compósitos elaborados con las mezclas selectas, “Mayor es Mejor” fue el mortero que experimentó levemente una mayor destrucción por las altas temperaturas.

VII. RECOMENDACIONES

Para la realización de futuras investigaciones sobre esta área de investigación es recomendable:

1. De ser posible, caracterizar la composición química de la Pumicita, gestionando anticipadamente la instrumentación especializada para este ensayo.
2. En la activación alcalina de la Pumicita para la reacción de geopolimerización, utilizar un activador alcalino diferente del silicato de sodio o combinación de activadores. Se puede realizar un diseño de experimentos más amplio que el utilizado en esta investigación para la activación alcalina de la Pumicita Pulverizada.
3. Ensayar la RMC a morteros endurecidos de cementos compósitos a edades superiores a los 28 días de curado, permitiendo observar con mayor seguridad el aporte de la reacción puzolánica a la RMC desarrollada.
4. Para fines más amplios se recomienda realizar un análisis económico de la factibilidad de utilizar Pumicita Pulverizada en la sustitución parcial y total del CPO en la elaboración de morteros para bloques u otros materiales para la construcción.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Baca-Urbina Gabriel. (2010). Evaluación de Proyectos. Mc Graw Hill. 6ta edición. México. ISBN: 13: 978-607-15-0260-5.
- [2]. Becker Edgardo A. Cemento pórtland puzolánico características y recomendaciones de uso. Loma negra.
- [3]. Di Maio, A., Ferreyra Hirschi, E., Giaccio, G., Zerbino, R. Hormigones Expuestos a Altas Temperaturas: Evaluación de la Permeabilidad y otras Propiedades Físicas.
<<http://biblio.unicen.edu.ar/download/sam99/indice/trabajos/titu123.pdf>>
- [4]. El Cemento
<<http://www.lemona.biz/EL%20CEMENTO-3/el%20cemento%20wikipedia.pdf>>.
- [5]. El Potencial Minero de los Minerales Industriales (Los No Metálicos) de Nicaragua.
- [6]. Escalante-José Iván. (2002). Materiales alternativos al cemento portland Avance y perspectiva. Vol. 21. Unidad de Saltillo. Cinvestav, México.
- [7]. Espinoza-Pérez Lester J. (Agosto del 2010). Cementos compósitos base escoria de alto horno y vidrio reciclado; activación mecanoquímica del vidrio en soluciones alcalinas. Instituto Politécnico Nacional IPN, Tesis de Maestría. Ramos Arizpe, Coahuila, México.
- [8]. Espinoza-Pérez Lester J., Blanco-Rodríguez Marvin, Reyes-Ramírez Maurilio. (Julio de 2011). Evaluación del sistema constructivo de mampostería confinada con unidades de bloques de arena pómez para viviendas de interés social. Managua, Nicaragua.
- [9]. Espinoza-Pérez Lester J., Escalante-García J. I. (Mayo de 2007). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Pórtland ordinario. Revista científica Nexo. Vol. 21. Managua, Nicaragua.
- [10]. Espinoza-Pérez Lester J., Escalante-García J. I. (Noviembre de 2011). Morteros a base de vidrio de desecho/escoria de alto horno; activación mecano química del vidrio en soluciones alcalina. Revista científica Nexo. Vol. 24. Managua, Nicaragua.
- [11]. Fuentes-Bayne Xavier Enrique. (2008). Modelamiento de la respuesta mecánica del cemento puzolánico mediante la adición de zeolita tipo I y curado al aire. Guayaquil, Ecuador.

- [12]. Geología, Caracterización y Aplicaciones de las rocas Zeolíticas del complejo volcánico de cabo de gata (Almería).
- [13]. Hidratación del cemento portland.
<<http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>>.
- [14]. Historia del cemento
<<http://www.lemona.biz/EL%20CEMENTO1/historia%20del%20CEMENTO.pdf>>
- [15]. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (imcyc). (octubre de 2006). Cemento y concreto resistente a los sulfatos.
- [16]. Magnetita<<http://www.dxmaps.com/geo/magnetita.html>>
- [17]. Marconi Liliana, D. Amelio Adriana. Medidas de tendencia Central y de Variabilidad.
<<http://www.deie.mendoza.gov.ar/aem/material/teoria/MEDIDAS%20DE%20TENDENCIA%20CENTRAL%20Y%20DE%20VARIABILIDAD.pdf>>
- [18]. Martínez-Reyes Jacobo, Montes-García Pedro. (Diciembre de 2007). Reactividad Puzolánica de una arcilla regional. CIIDIR Unidad Oaxaca, IPN. Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.
- [19]. Mejía-Cajina X., Blanco-Cruz C. (Julio de 2011). Estudio comparativo de las propiedades físico-mecánicas de morteros utilizando vidrio de desecho como reemplazo parcial y total del cemento portland. Managua, Nicaragua.
- [20]. Méndez-Mariano Roberto R. (Junio de 2008). Determinación de la Reactividad Puzolánica de adiciones minerales de Origen Natural con el Cemento Portland. Santa Cruz Xoxocotlán Oxaca, Mexico.
- [21]. Morteros más resistentes a los sulfatos.
<<http://www.imcyc.com/revista/1999/agosto/morteros1.htm>>
- [22]. Morteros, Cátedra de Ingeniería Rural. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. <www.ingenieriaRural.com>
- [23]. Morteros. <http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/17/9589322824_Parte5.pdf>
- [24]. Nurhayat Degirmenci, Arin Yilmaz. (2010). Use de pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. Vol. 18. Engineering and Architecture Faculty, Baikesir University. Cagis Campus, Turkey.
- [25]. Piedra pómez. 2009
<<http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/actual/PPOMEZ%2009.pdf>>

[26]. Reyes-Melo Martin-E., Hinojosa-Rivera Moisés. (Octubre-Diciembre del 2000). Estructura de Sólidos Amorfos. Vol III N° 9. Ingenierías.

[27]. Reyes-Aguilar Primitivo. (Febrero de 2008). Diseños de Experimentos de Taguchi.

<[http://es.scribd.com/doc/94685371/Curso-Dise-o Experimentos#outer_page_56](http://es.scribd.com/doc/94685371/Curso-Dise-o-Experimentos#outer_page_56)>

ANEXOS

Tabla i. Promedios de S/R para cada factor en un análisis Taguchi “Mayor es Mejor” a 28 días de curado

Promedio de la relación S/R							
Banco de materiales		Pumicita		Rel. Arena/Ligante		Rel. Agua/Ligante	
Nivel	relación S/R	Nivel	relación S/R	Nivel	relación S/R	Nivel	relación S/R
MAT	24.35	10	24.35	3:1	24.35	0.40:1	24.35
MAT	16.66	10	23.43	3:1	25.24	0.40:1	14.85
MAT	10.96	10	15.44	3:1	26.51	0.40:1	21.63
Promedio	17.32	Promedio	21.08	Promedio	25.37	Promedio	20.28
CUAJ	23.43	20	16.66	4:1	16.66	0.425:1	16.66
CUAJ	14.85	20	14.85	4:1	23.43	0.425:1	25.24
CUAJ	25.24	20	26.51	4:1	21.63	0.425:1	15.44
Promedio	21.18	Promedio	19.34	Promedio	20.58	Promedio	19.12
MAL	15.44	30	10.96	5:1	10.96	0.45:1	10.96
MAL	26.51	30	25.24	5:1	14.85	0.45:1	23.43
MAL	21.63	30	21.63	5:1	15.44	0.45:1	26.51
Promedio	21.20	Promedio	19.28	Promedio	13.75	Promedio	20.30

Tabla ii. Promedios de S/R para cada factor en un análisis Taguchi “Nominal es Mejor” a 28 días de curado

Promedio de la Relación S/N							
Banco de materiales		Pumicita		Rel. Arena/Ligante		Rel. Agua/Ligante	
Nivel	S/N relación	Nivel	S/N relación	Nivel	S/N relación	Nivel	S/N relación
MAT	-14.93	10	-14.93	3:1	-14.93	0.40:1	-14.93
MAT	-16.21	10	-4.73	3:1	-14.22	0.40:1	-17.43
MAT	-19.76	10	-17.18	3:1	-18.05	0.40:1	-5.88
Promedio	-16.97	Promedio	-12.28	Promedio	-15.73	Promedio	-12.75
CUAJ	-4.73	20	-16.21	4:1	-16.21	0.425:1	-16.21
CUAJ	-17.43	20	-17.43	4:1	-4.73	0.425:1	-14.22
CUAJ	-14.22	20	-18.05	4:1	-5.88	0.425:1	-17.18
Promedio	-12.12	Promedio	-17.23	Promedio	-8.94	Promedio	-15.87
MAL	-17.18	30	-19.76	5:1	-19.76	0.45:1	-19.76
MAL	-18.05	30	-14.22	5:1	-17.43	0.45:1	-4.73
MAL	-5.88	30	-5.88	5:1	-17.18	0.45:1	-18.05
Promedio	-13.70	Promedio	-13.28	Promedio	-18.12	Promedio	-14.18

Tabla iii. RMC de especímenes de morteros 100% con CPO a las diferentes edades de curado para mezcla “Nominal es Mejor”.

RMC a los 7 días de curado				
# De Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	9,130	2,282.50	15.74	-
2	10,140	2,535.00	17.48	-
3	10,850	2,712.50	18.70	-
4	8,720	2,180.00	15.03	-
Promedio			16.74	-
RMC a los 14 días de curado				
# De Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso unitario
1	11,010	2,752.50	18.98	277.66
2	12,270	3,067.50	21.15	280.76
3	8,350	2,087.50	14.39	265.56
4	11,360	2,840.00	19.58	281.69
Promedio			18.53	276.42
RMC a los 28 días de curado				
# De Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	11,900	2,975.00	20.51	282.27
2	12,560	3,140.00	21.65	281.61
3	10,180	2,545.00	17.55	274.37
4	8,500	2,125.00	14.65	266.84
Promedio			18.59	276.27

NOTA: los valores en PSI (Lbf/PIg²) se obtuvieron al dividir la carga aplicada (lectura en Lbf) entre el área neta del espécimen (2PIg*2PIg).

Tabla iv. RMC de especímenes de morteros 100% con CPO a las diferentes edades de curado para mezcla “Mayor es Mejor”.

RMC a los 7 días de curado				
# De Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	12,360	3,090.00	21.31	283.9
2	13,880	3,470.00	23.93	286.52
3	15,310	3,827.50	26.39	292.81
4	11,160	2,790.00	19.24	293.38
Promedio			22.71	289.15
RMC a los 14 días de curado				
# De Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso unitario
1	13,470	3,367.50	23.22	281.76
2	12,600	3,150.00	21.72	290.91
3	16,200	4,050.00	27.92	288.81
4	13,590	3,397.50	23.43	291.61
Promedio			24.07	288.27
RMC a los 28 días de curado				
# De Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	15,290	3,822.50	26.36	287.45
2	15,730	3,932.50	27.11	284.09
3	17,580	4,395.00	30.30	287.86
4	12,440	3,110.00	21.44	281.84
Promedio			26.30	285.31

Tabla v. RMC de especímenes elaborados 100% con PP al 6% de Na₂O respecto al ligante.

RMC a los 7 días de curado				
Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	1,980	495.00	3.41	268.16
2	1,870	467.50	3.22	275.74
3	1,120	280.00	1.93	267.10
4	1,810	452.50	3.12	264.24
Promedio			2.92	268.81
RMC a los 14 días de curado				
Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso unitario
1	1,520	380.00	2.62	258.54
2	2,050	512.50	3.53	259.01
3	1,830	457.50	3.15	262.36
4	2,300	575.00	3.96	264.58
Promedio			3.32	261.12
RMC a los 28 días de curado				
Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	1,240	310.00	2.14	254.46
2	1,370	342.50	2.36	263.99
3	3,140	785.00	5.41	270.95
4	2,400	600.00	4.14	264.03
Promedio			3.51	263.36

Tabla vi. RMC de especímenes elaborados 100% con PP al 12% de Na₂O respecto al ligante.

RMC a los 7 días de curado				
Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	3,500	875.00	6.03	295.9
2	3,430	857.50	5.91	293.53
3	3,760	940.00	6.48	290.71
4	3,660	915.00	6.31	298.25
Promedio			6.18	294.60
RMC a los 14 días de curado				
Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso unitario
1	6,560	1,640.00	11.31	293.57
2	8,630	2,157.50	14.88	287.18
3	7,470	1,867.50	12.88	289.48
4	8,220	2,055.00	14.17	293.33
Promedio			13.31	290.89
RMC a los 28 días de curado				
Espécimen	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/PI ²)	Mpa	Peso Unitario
1	11,310	2,827.50	19.50	286.82
2	13,860	3,465.00	23.89	287.56
3	15,390	3,847.50	26.53	290.77
4	12,340	3,085.00	21.27	286.65
Promedio			22.80	287.95

Tabla vii. RMC de morteros con ataque por Sulfato de Magnesio

Especímenes de mezcla Mayor es Mejor

Especímen n	Antes de ataque de Sulfato	Después de ataque	RMC a los 28 días de curado		
	Peso Unitario (g)	Peso Unitario (g)	Lectura (Lbf)	Lbf/Plg ²	Mpa
1	288.40	307.42	16,140	4,035.00	27.82
2	281.17	297.07	14,930	3,732.50	25.74
3	285.25	309.17	17,900	4,475.00	30.86
4	283.45	312.88	19,360	4,840.00	33.37
Promedio	284.57	306.64			29.45

Especímenes de mezcla Nominal es Mejor

Especímen n	Antes de ataque de Sulfato	Después de ataque	RMC a los 28 días de curado		
	Peso Unitario (g)	Peso Unitario	Lectura (Lbf)	Lbf/Plg ²	Mpa
1	257.60	277.25	7,680	1,920.00	13.24
2	282.48	298.67	13,050	3,262.50	22.49
3	263.09	291.26	10,560	2,640.00	18.20
4	270.71	285.22	8,820	2,205.00	15.20
Promedio	268.47	288.10			17.28

Especímenes de mezcla Nominal es Mejor al 30 %

Especímen n	Antes de ataque de Sulfato	Después de ataque	RMC a los 28 días de curado		
	Peso Unitario (g)	Peso Unitario (g)	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/Pl ²)	Mpa
1	261.72	308.70	10,530	2,632.50	18.15
2	285.36	291.20	7,180	1,795.00	12.38
3	260.90	284.80	7,950	1,987.50	13.70
4	257.74	290.50	7,480	1,870.00	12.89
Promedio	266.43	293.80			14.28

Tabla viii. RMC de morteros con ataque por Altas Temperaturas

Especímenes de mezcla Mayor es Mejor

Especímen	Antes de T de 900 °C	Después de T de 900 °C	RMC a los 28 días de curado		
	Peso Unitario (g)	Peso Unitario (g)	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/Pl ²)	Mpa
1	284.40	258.71	3,580	895.00	6.17
2	283.20	252.59	3,620	905.00	6.24
3	278.60	261.35	3,950	987.50	6.81
4	288.10	261.16	3,770	942.50	6.50
Promedio	283.58	258.45			6.43

Especímenes de mezcla Nominal es Mejor

Especímen	Antes de T de 900 °C	Después de T de 900 °C	RMC a los 28 días de curado		
	Peso Unitario (g)	Peso Unitario (g)	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/Pl ²)	Mpa
1	267.30	263.95	5,420	1,355.00	9.34
2	282.40	241.81	2,430	607.50	4.19
3	255.00	230.34	2,050	512.50	3.53
4	283.60	259.70	4,410	1,102.50	7.60
Promedio	272.08	248.95			6.17

Especímenes de mezcla Nominal es Mejor al 30 %

Especímen	Antes de T de 900 °C	Después de T de 900 °C	RMC a los 28 días de curado		
	Peso Unitario (g)	Peso Unitario (g)	Lectura (Lbf)	PSI (Lbf/Pl ²)	Mpa
1	274.00	234.49	2,400	600.00	4.14
2	271.80	256.50	3,960	990.00	6.83
3	254.70	252.33	3,500	875.00	6.03
4	251.20	238.88	2,180	545.00	3.76
Promedio	262.93	245.55			5.19



Figura i. Moldes utilizados para elaborar los especímenes



Figura ii. Desmoldado de especímenes



Figura iii. Espécimen después de ensayado la RMC (buena resistencia)



Figura iv. Espécimen destruido después de ensayo RMC (Poca resistencia)



Figura v. Especímenes selectos antes del ataque por altas temperaturas



Figura vi. Especímenes selectos después del ataque por altas temperaturas junto a especímenes de referencia.



Figura vii. Especímenes compósitos (más claros) y geo-polímeros al 12% de Na_2O (más oscuros)



Figura viii. Geo-polímeros al 12% de Na_2O después de ensayo RMC