



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE GEOPOLÍMEROS
SINTETIZADOS A PARTIR DE PUZOLANA NATURAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MARCY ELIZABETH VALENZUELA HERRERA

**PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GERARDO DÍAZ RODENA
MIGUEL GONZALEZ TALEP**

**SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2013**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: MARCY VALENZUELA HERRERA
FECHA: 12/09/2013
PROF. GUÍA: Sr. FEDERICO DELFÍN A.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS A PARTIR DE PUZOLANA NATURAL

El objetivo del presente trabajo, es estudiar la factibilidad de uso de la puzolana natural existente en la Región Metropolitana como fuente de aluminosilicato en la síntesis de geopolímeros. En la actualidad existen estudios sobre uso de puzolanas naturales como fuentes de aluminosilicatos, lo que dada la amplia disponibilidad de este recurso natural en el país, lleva a investigar su uso como base para la obtención de geopolímeros.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizan ensayos con puzolana natural, cuyos resultados revelan que si es utilizada como fuente de aluminosilicato pura, no se logra activar. El bajo contenido de alúmina incide en las bajas resistencias de la puzolana, por lo que al agregar materiales con contenido de alúmina mayor se elevan las resistencias mecánicas. Para determinar si es factible su uso, se estudia entonces la incorporación de cantidades variables de otras fuentes de aluminosilicato tales como, ceniza volante y escorias de alto horno provenientes de Cemento Melón y Huachipato, con el fin de lograr la activación de la puzolana.

De acuerdo a los resultados, se deduce que la adición de escoria en proporción 25% en peso de la fuente total de aluminosilicato a activar, sería suficiente para alcanzar resistencias de 20 MPa y con la adición de ceniza volante se logran resultados similares pero con un contenido significativamente mayor (75% de adición). Si se requiere de una resistencia mayor, es necesario agregar una cantidad mayor de escoria (50% de la componente total fuente de aluminosilicato), en donde la resistencia se eleva a los 34 MPa, y finalmente, si es la escoria el material preponderante, con un 75%, se alcanzan resistencias del orden de los 55 MPa.

Por otra parte, mientras la composición de la escoria cumpla una razón $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3.0 o superior, sirve como fuente de aluminosilicato para poder sintetizar geopolímeros. Así lo demuestra el estudio presente, en donde se utilizan 2 tipos diferentes de escoria: escoria de alto horno proporcionada por Huachipato y por Cemento Melón, con las que se obtienen geopolímeros que a los 28 días de edad, alcanzan resistencias mecánicas a la compresión de 55 MPa.

Agradecimientos

A mi familia,

A mis amigos,

A mis profesores,

A IDIEM

Tabla de Contenido

Resumen	I
Agradecimientos	II
Índice de gráficos	VII
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	XII

Capítulo 1

Introducción.....	1
1.1. Aspectos Generales	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Organización	3

Capítulo 2

Antecedentes.....	5
2.1. Antecedentes generales	5
2.1.1. Geopolímeros	5
2.1.2. Proceso de Geopolimerización.....	6
2.1.3. Propiedades Físicas y Químicas.....	6
2.1.3.1. Comportamiento térmico.....	7
2.1.3.2. Contribución del Agua	7
2.1.3.3. Resistividad y Propiedades dieléctricas.....	8
2.1.4. Aplicaciones Generales.....	8
2.2. Fuentes de Aluminosilicatos	8

2.2.1. Ceniza Volante	8
2.2.2. Puzolana natural	9
2.2.3. Escoria de Alto Horno.....	10
2.3. Soluciones Alcalinas	10
2.3.1. Silicato de sodio	10
2.3.2. Hidróxido de sodio.....	13
Capítulo 3	
Planteamiento de la Investigación	14
3.1. Variables de Estudio	14
3.2. Fuentes de aluminosilicatos	15
3.2.1. Solución Alcalina.....	15
3.2.1.1. Hidróxido de sodio	15
3.2.1.2. Silicato de sodio	15
3.2.2. Agua.....	17
3.2.3. Áridos.....	17
3.2.4. Procesos	18
3.2.4.1. Proceso de Secado	18
3.2.4.2. Proceso de Molienda	18
3.2.4.3. Homogeneización de la Fuente de Aluminosilicato.....	19
3.2.4.4. Proceso de Elaboración de Geopolímeros	19
Capítulo 4	
Etapa Experimental.....	23
4.1. Dosificación	23
4.2. Mortero.....	25
4.2.1. Acondicionamiento.....	25
4.2.2. Mezcla.....	25

4.2.3. Compactación	26
4.3. Curado y Ensayos.....	26

Capítulo 5

Resultados.....	28
5.1. Influencia de las variables relacionadas con la composición de la solución alcalina y con el método de elaboración de los morteros geopoliméricos.	28
5.1.1. Influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla.	29
5.1.2. Influencia del contenido del Agua Extra en la Mezcla PCV2.	31
5.1.3. Influencia de la variación de Temperatura de Curado en Horno para mezcla PCV2.	33
5.1.4. Influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato	35
5.1.5. Influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.	37
5.1.6. Influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.	39
5.1.7. Influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.	42
5.2. Variación porcentual de ceniza volante y puzolana.....	45
5.3.1. Mortero en base a la mezcla de Puzolana y Ceniza Volante y solución alcalina 1.	47
5.3.2. Mortero en base a mezclas escoria de alto horno (Escoria 2) y puzolana, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	49
5.3.3. Comportamiento de morteros con diversas composiciones de Aluminosilicatos utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	52

Capítulo 6

Análisis de resultados	57
------------------------------	----

6.1. Variación Porcentual de ceniza volante y puzolana.....	57
6.2. Comportamiento mecánico de morteros geopoliméricos con diversas composiciones de fuentes de aluminosilicato.....	57
6.2.1. Mortero en base a la mezcla de Puzolana y Ceniza Volante y solución alcalina 1.	58
6.2.2. Mortero en base a mezclas escoria de alto horno (Escoria 2) y puzolana, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	58
6.2.3. Comportamiento de morteros con diversas composiciones de Aluminosilicatos utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	58
6.3. Influencia de las variables relacionadas con la composición de la solución alcalina y con el método de elaboración de los morteros geopoliméricos	61
6.3.1. Influencia de la Viscosidad de la Solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.	59
6.3.2. Influencia del contenido del agua extra en la Mezcla PCV2.	60
6.3.3. Influencia de la variación de Temperatura de Curado en Horno para mezcla PCV2.	60
6.3.4. Influencia de la variación en la razón Solución Alcalina/Fuente de Aluminosilicato.	61
6.3.5. Influencia de la Variación de Concentración Molar del activador serie PCV2.	61
6.3.6. Influencia de la variación de la razón Solución silicato de sodio a Solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.	61
6.3.7. Influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de Solución Alcalina/Fuente de Aluminosilicato.	62
7. Conclusiones y Comentarios Finales	63
8. Referencias Bibliográficas	65
9. ANEXOS	66

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Densidad para la influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.	30
Gráfico 2: Resistencias mecánicas en función de la viscosidad del silicato de sodio de la mezcla, curado en horno a 60°C por 24 horas, para mezcla PCV2.....	31
Gráfico 3: Densidad para serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.	32
Gráfico 4: Resistencia mecánica para la serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.....	33
Gráfico 5: Densidad de morteros de la serie temperatura de curado en horno.	34
Gráfico 6: Resistencia mecánica en función de la temperatura de curado (Mezcla PCV2).....	35
Gráfico 7: Densidad de morteros para series influencia de la variación en la razón solución.....	36
Gráfico 8: Resistencia mecánica para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato.	37
Gráfico 9: Densidad para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.....	38
Gráfico 10: Resistencia mecánica para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.....	39
Gráfico 11: Densidad para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.	41
Gráfico 12: Resistencia mecánica para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.	42
Gráfico 13: Densidad para curado en horno, a 3 días, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.	43
Gráfico 14: Resistencias mecánicas para curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.	44
Gráfico 15: Densidad para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.....	46
Gráfico 16: Resistencia mecánica para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.....	47
Gráfico 17: Densidad en función del período de curado al aire serie PCV2.	48
Gráfico 18: Resistencias mecánicas en función del tiempo de curado, para serie PCV2.	49
Gráfico 19: Resistencia a la compresión series PE ₂	51
Gráfico 20: Resistencia a la flexotracción series PE ₂	52
Gráfico 21: Densidad de morteros (probetas compactadas) las diversas fuentes de aluminosilicato en estudio.	54
Gráfico 22: Resistencias de mortero a la flexotracción para las diversas fuentes de aluminosilicato.	56
Gráfico 23: Resistencias a la compresión para diversas fuentes de aluminosilicato.	56

Índice de Tablas

Tabla 1:	Composición química de diversas fuentes de aluminosilicato.....	15
Tabla 2:	Propiedades Físicas de diversas fuentes de aluminosilicato.	15
Tabla 3:	Características de silicato de sodio tipo 1.	16
Tabla 4:	Características de silicato de sodio tipo 2.	16
Tabla 5:	Características de silicato de sodio tipo 3.	16
Tabla 6:	Diseño silicato viscosidad 900 cps.	17
Tabla 7:	Diseño de silicato viscosidad 700 cps.	17
Tabla 8:	Diseño de silicato viscosidad 400 cps.	17
Tabla 9:	Composición granulométrica de arena sílicea normalizada.	17
Tabla 10:	Caracterización del Molino de Bolas, Hardinge.	18
Tabla 11:	Dosificación tipo de la mezcla.	25
Tabla 12:	Parámetros constantes para ensayos influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.....	29
Tabla 13:	Densidad para la serie influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.	29
Tabla 14:	Resistencias mecánicas en función de la viscosidad del silicato de sodio de la mezcla, curado en horno a 60°C por 24 horas, para mezcla PCV2.....	30
Tabla 15:	Parámetros constantes para serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.	31
Tabla 16:	Densidades para serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2. ..	32
Tabla 17:	Resistencia mecánica para la serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2	33
Tabla 18:	Parámetros constantes para series influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.	34
Tabla 19:	Densidades de morteros de la serie influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.	34
Tabla 20:	Resistencia mecánica para series influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.	35
Tabla 21:	Parámetros constantes para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato	36
:Tabla 22:	Densidad de morteros para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato	36
Tabla 23:	Resistencia mecánica para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato.	37
Tabla 24:	Parámetros constantes para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.....	38
Tabla 25:	Densidad para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.	38

Tabla 26:	Resistencia mecánica para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.....	39
Tabla 27:	Razón Sol.silicato de sodio/Solución NaOH.....	40
Tabla 28:	Densidad para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.....	40
Tabla 29:	Resistencia mecánica para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.	41
Tabla 30:	Parámetros constantes para series influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.	42
Tabla 31:	Densidad de morteros para series influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.	43
Tabla 32:	Resistencia mecánica de morteros curados en horno, en función de Solución Alcalina/Fuente de Aluminosilicato.	44
Tabla 33:	Parámetros constantes para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.	45
Tabla 34:	Densidad para distintas mezclas ceniza volante/puzolana.	45
Tabla 35:	Resistencia mecánica para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.	46
Tabla 36:	Parámetros constantes para la serie de ensayos PCV2.....	47
Tabla 37:	Densidad en función del período de curado al aire Serie PCV2.	48
Tabla 38:	Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PCV2.....	48
Tabla 39:	Parámetros constantes para los morteros de las series PE ₂	49
Tabla 40:	Densidad en función del curado al aire, serie PE ₂ ²	50
Tabla 41:	Densidad en función del curado al aire, serie PE ₂ ³	50
Tabla 42:	Densidad en función del curado al aire, serie PE ₂ ⁴	50
Tabla 43:	Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PE ₂ ²	50
Tabla 44:	Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PE ₂ ³	51
Tabla 45:	Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PE ₂ ⁴	51
Tabla 46:	Parámetros constantes para la elaboración de las mezclas con diversas composiciones de Aluminosilicatos utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	52
Tabla 47:	Densidad de morteros para las series con puzolana pura.	53
Tabla 48:	Densidad de morteros para las series con ceniza volante pura.....	53
Tabla 49:	Densidades para las series con cenizavolante/puzolana=75/25.	53
Tabla 50:	Densidades para las series con escoria 1/puzolana=75/25.	53
Tabla 51:	Resistencia mecánica de morteros para puzolana pura.	54
Tabla 52:	Resistencia mecánica de morteros para ceniza volante pura.....	55
Tabla 53:	Resistencia mecánica de morteros para 75% ceniza volante y 25% puzolana.....	55
Tabla 54:	Resistencia mecánica de morteros para 75 de escoria 1 y 25% puzolana.	55
Tabla 55:	Resistencias de diversas fuentes de aluminosilicatos a 28 días.....	59
Tabla 56:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con viscosidad de la solución de silicato de sodio igual a 400 cps.	66

Tabla 57:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con viscosidad de la solución de silicato de sodio igual a 700 cps.	66
Tabla 58:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con viscosidad de la solución de silicato de sodio igual a 900 cps.	66
Tabla 59:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con 30 g de contenido de agua extra en la mezcla PCV2.....	67
Tabla 60:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con 40 g de contenido de agua extra en la mezcla PCV2.....	67
Tabla 61:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con 50 g de contenido de agua extra en la mezcla PCV2.....	67
Tabla 62:	Densidad y resistencia mecánica de mortero a 40°C de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.	68
Tabla 63:	Densidad y resistencia mecánica de mortero a 60°C de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.	68
Tabla 64:	Densidad y resistencia mecánica de mortero a 80°C de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.	68
Tabla 65:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,4.	69
Tabla 66:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,45.	69
Tabla 67:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,5.	69
Tabla 68:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,55.	70
Tabla 69:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,6.	70
Tabla 70:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,65.	70
Tabla 71.:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 8 M del activador serie PCV2.	71
Tabla 72:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 10 M del activador serie PCV2.	71
Tabla 73:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 12 M del activador serie PCV2.	71
Tabla 74:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 14 M del activador serie PCV2.	72
Tabla 75:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 1,0.	72
Tabla 76:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 1,5.	72
Tabla 77:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 2,0.	73

Tabla 78:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 2,5.	73
Tabla 79:	Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 3,0.	73
Tabla 80:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,5 y 72 horas de curado en horno.	74
Tabla 81:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,55 y 72 horas de curado en horno.	74
Tabla 82:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,6 y 72 horas de curado en horno.	74
Tabla 83:	Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,65 y 72 horas de curado en horno.	75
Tabla 84:	Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV1.	75
Tabla 85:	Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV2.	75
Tabla 86:	Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV3.	76
Tabla 87:	Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV4.	76
Tabla 88:	Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV5.	76
Tabla 89:	Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 1 día.	77
Tabla 90:	Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 1 día.	77
Tabla 91:	Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 7 días.	77
Tabla 92:	Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 7 días.	78
Tabla 93:	Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 14 días.	78
Tabla 94:	Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 14 días.	78
Tabla 95:	Densidad y resistencia mecánica a 1 día, para mortero PE ₂ ² , activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	79
Tabla 96:	Densidad y resistencia mecánica a 1 día, para mortero PE ₂ ³ , activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	79
Tabla 97:	Densidad y resistencia mecánica a 1 día, para mortero PE ₂ ⁴ activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	79
Tabla 98:	Densidad y resistencia mecánica a 14 días, para mortero PE ₂ ² , activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	80
Tabla 99:	Densidad y resistencia mecánica a 14 días, para mortero PE ₂ ³ , activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	80
Tabla 100:	Densidad y resistencia mecánica a 14 días, para mortero PE ₂ ⁴ activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.	80

Tabla 101: Densidad y resistencia mecánica a 28 días, para mortero PE ₂ ² , activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.....	81
Tabla 102: Densidad y resistencia mecánica a 28 días, para mortero PE ₂ ³ , activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.....	81
Tabla 103: Densidad y resistencia mecánica a 28 días, para mortero PE ₂ ⁴ activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.....	81
Tabla 104: Densidad y resistencia mecánica a 1 día para puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	82
Tabla 105: Densidad y resistencia mecánica a 14 días para puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	82
Tabla 106: Densidad y resistencia mecánica a 28 días para puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	82
Tabla 107: Densidad y resistencia mecánica a 1 día para ceniza volante, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	83
Tabla 108: Densidad y resistencia mecánica a 14 días para ceniza volante, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	83
Tabla 109: Densidad y resistencia mecánica a 28 días para ceniza volante, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	83
Tabla 110: Densidad y resistencia mecánica a 1 día para ceniza volante y puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.....	84
Tabla 111: Densidad y resistencia mecánica a 14 días para ceniza volante y puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.....	84
Tabla 112: Densidad y resistencia mecánica a 28 días para ceniza volante y puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.....	84
Tabla 113: Densidad y resistencia mecánica a 1 día para escoria, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.....	85
Tabla 114: Densidad y resistencia mecánica a 14 días para escoria, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	85
Tabla 115: Densidad y resistencia mecánica a 28 días para escoria, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.	85

Índice de Figuras

Figura 1: Estructura geopolimérica.	6
Figura 2: Molino Hardinge	19
Figura 3: Campana extractora de gases – IDIEM.....	20
Figura 4: Balanza Digital RADWAG.....	20
Figura 5: Mezcladora Toni Technik.	21
Figura 6: Hornos	21
Figura 7: Equipo Toni Technik	22

Capítulo 1

Introducción

1.1. Aspectos Generales

En la actualidad, ha crecido el interés sobre el impacto del efecto invernadero en el planeta. El efecto invernadero consiste en una capa de gases presentes en la atmósfera, con la función principal de retener la radiación, y en consecuencia, mantener las temperaturas del planeta, las cuales bordean, en promedio, los 15°C. Sin embargo, existe otra emisión de gases, cuya presencia impacta de manera negativa. Tales gases corresponden en su mayoría a dióxido de carbono (CO₂) con un 55% de las emisiones, seguido por el metano (CH₄) con un 15% y los clorofluorocarbonos (CFC) con un 14%, en donde las emisiones de dióxido de carbono consideradas son aquéllas producto de la ignición de combustibles, y no las provenientes de reacciones químicas.

Producto de la emisión de gases, se estima que la tierra experimentará un aumento en las temperaturas, con valores que fluctúan entre los 1,9°C a 5,3°C. En los próximos años, también se experimentaría un aumento del nivel oceánico, el cual puede llegar a alcanzar los 20 cm e incluso 80 cm, provocando inundación de enormes zonas, causando así grandes cambios territoriales.

Se han tomado medidas para intentar disminuir las emisiones de CO₂. Alemania, por ejemplo, propuso disminuir las emisiones en un 25%, así como también la Comisión de Comunidades Europeas, en 1991, buscó limitar la emisión de este contaminante, adoptando medidas que involucren el uso de un nuevo plan de energía y de un impuesto a los combustibles. Sin embargo, este impuesto se aplica sobre la cantidad de energía y consumo de combustible y no a la cantidad real de emisiones.

En consecuencia, es necesario impulsar nuevas alternativas que integren dichos parámetros en su desarrollo, logrando obtener así materiales con un elevado rendimiento, bajos costos y un menor impacto ambiental. Esto podría involucrar a las industrias químicas, de hierro y de vidrio, promoviendo el uso de nuevas tecnologías que involucren materiales reciclables.

La producción de cemento Portland libera grandes cantidades de CO₂. El clinker, que resulta de la calcinación del carbonato de calcio y de un material silíceo, produce CO₂. La generación de una tonelada de cemento, lleva asociada la emisión de 0,55 Toneladas correspondientes a CO₂ químico, y el cual, junto con la combustión del carbón combustible, libera 0,4 Toneladas. Así, se dice que por 1 Tonelada de cemento se libera 1 Tonelada de dióxido de carbono. Producto de esto, se ha logrado obtener a nivel mundial emisiones entre el 5% y el 7% de la totalidad de emisiones de CO₂, sólo por la industria cementera.

Los cementos geopoliméricos buscan ser una alternativa que apunta a resolver dichas problemáticas. Para la confección de este tipo en particular de cemento, se requiere de una fuente de aluminosilicato, que debe poseer una elevada cantidad de silíce y alúmina, así como también de una solución alcalina, compuesta de una solución de hidróxido de sodio y de una solución de silicato de sodio. Dentro de los aluminosilicatos que se pueden utilizar como fuente, se encuentran las puzolanas naturales, la ceniza volante, las escorias producidas en las industrias metalúrgicas, metakaolin, entre otros.

Dentro de los principales beneficios de los geopolímeros, destacan la utilización de menor cantidad de materias primas en base a calcio, así como las bajas temperaturas para su fabricación (750°C), cuyas temperaturas son menores a aquellas que se alcanzan con los cementos Portland (1400°C). Como consecuencia, las emisiones de CO₂ disminuyen entre un 80% a un 90% para los cementos geopoliméricos manufacturados en comparación con el actual cemento Portland.

A lo largo de Chile, se puede extraer puzolana natural, que se utiliza en la actualidad para la producción de cemento Portland Puzolánico. La escoria granulada de alto horno, también se produce en grandes cantidades así como también la ceniza volante. Por lo tanto, estas fuentes de aluminosilicato representan posibles materias primas que pueden servir en la fabricación de geopolímeros.

Para desarrollar este Trabajo de Título, se dividió el estudio en cuatro etapas: estudio de literatura, obtención fuentes de aluminosilicato, tratamiento de materiales, es decir, secado y molienda, y finalmente ensayos. Esta última etapa consta de la búsqueda de dosificaciones óptimas para lograr el cemento geopolimérico, a partir de las fuentes mencionadas anteriormente, variando parámetros tales como: cantidad de solución alcalina en la mezcla, composición de material fuente aluminosilicato, concentración molar de solución hidróxido de sodio, cantidad de solución hidróxido de sodio, temperatura de curado en horno y viscosidad de la solución de silicato de sodio, entre otros.

La puzolana utilizada corresponde al yacimiento explotado por Cemento Melón, localizado en Pudahuel. La ceniza volante proviene de la división Ventanas de AES Gener y las escorias corresponden a escorias de alto horno de Huachipato y Cemento Melón.

El presente Trabajo de Título, corresponde a la continuación del “Estudio de Factibilidad de Obtención de Hormigones Geopoliméricos a partir de Desechos Minerales”, desarrollado como memoria de título por el alumno Pedro Díaz Sossa.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Obtener dosificaciones óptimas para geopolímeros sintetizados en base a puzolana natural disponible en el país.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Para fabricar un geopolímero, es necesario determinar los parámetros que influyen sobre las propiedades de estos, afectando así la moldeabilidad, trabajabilidad y resistencias mecánicas. Dichas variables de carácter empírico, afectan directamente las dosificaciones teniendo que satisfacer las propiedades básicas antes señaladas. De acuerdo a esto, se determinan los parámetros de mayor influencia que controlan las propiedades de los geopolímeros.
- Se busca la composición óptima de mezcla de cada una de las fuentes de aluminosilicato en estudio. Para ello, los parámetros encontrados en el punto anterior seleccionado como relevantes se varían, y se deja constante el porcentaje total de árido.
- Se utiliza la dosificación óptima del estudio anterior de Pedro Díaz “Estudio de Factibilidad de Obtención de Hormigones Geopoliméricos a partir de Desechos Minerales”, para poder realizar una comparación con el resto de los materiales aluminosilíceos considerados en el presente estudio.
- Se determinan resistencias mecánicas: Resistencia a la flexotracción y Resistencia a la compresión, de acuerdo a la Norma *NCh 158.Of67 “Cementos-Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”* a cada uno de los parámetros seleccionados como relevantes para la determinación del geopolímero.

1.3. Organización

Este Trabajo de Título, consta de los siguientes seis capítulos:

Introducción: Descripción de objetivos y motivación que llevan a desarrollar esta investigación.

Antecedentes generales: Recopilación de información general sobre geopolímeros.

Planteamiento de la Investigación: Descripción de las distintas series de ensayos y programas de ensayos.

Etapa Experimental: Descripción de materiales, métodos de elaboración y ensayo de las mezclas contempladas en el estudio, además de las condiciones en que se realiza. Se divide en estudios previos y en etapa experimental.

Resultados: Presentación de tablas y gráficos obtenidos en la etapa experimental.

Análisis y Conclusiones: Se realizan análisis de los resultados y conclusiones del estudio.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Antecedentes Generales

2.1.1. Geopolímeros

En la actualidad, es necesaria la búsqueda de materiales que sean sustentables. Con el paso de los años, países tales como China e India, han incrementado la fabricación de cemento, y la tendencia en el resto de los países en desarrollo parece ser la misma. La fabricación de cemento Portland libera CO_2 , la que impacta directamente en el efecto invernadero y en el calentamiento global: la producción de 1 tonelada de cemento genera 1 tonelada de CO_2 . Surge, por tanto, la necesidad de fabricar cementos donde la liberación de CO_2 sea menor. Mezclas geopoliméricas pueden convertirse en una alternativa al hormigón de cemento por sus características de material sustentable.

Los geopolímeros, corresponden a una clase de polímeros inorgánicos formados por reacciones químicas entre una fuente de aluminosilicato (puzolanas naturales, ceniza volante, escorias de alto horno en estado vítreo, entre otros) y una solución alcalina. A través del curado en horno, o curado en aire, los materiales resultantes de estas reacciones presentan una estructura amorfa tridimensional. La solución activadora consiste generalmente en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y de una solución de silicato de sodio (Na_2SiO_3). La fuente de aluminosilicato, por lo general, se encuentra molida y presenta un tamaño de partícula dentro del rango de los 1 a los 30 micrones, además de tener una proporción significativa de SiO_2 y Al_2O_3 contenidos en fases amorfas.

Dentro de las propiedades que presentan los materiales geopoliméricos se encuentra su resistencia al ataque de sulfatos, bajos niveles de agrietamiento, resistencia a ciclo hielo-deshielo, resistencia al ataque químico, capacidad para estabilización e inmovilización de algunos metales tóxicos pesados en la producción de hormigones especiales, altas resistencias tempranas, entre otros. Todas estas características, hacen que los geopolímeros representen una potencial alternativa al hormigón de cemento, más aún, por su comportamiento a largo plazo y bajo condiciones agresivas como las mencionadas.

2.1.2. Proceso de Geopolimerización

El proceso de geopolimerización involucra la formación a partir de una fuente de aluminosilicato y de una solución alcalina de monómeros inorgánicos en solución, que térmicamente son activados para polimerizar y formar el sólido polimérico. El proceso de geopolimerización consta de etapas que se encuentran relacionadas entre sí. Durante el mezclado inicial de los materiales reactantes, la solución alcalina disuelve los compuestos de silicio y aluminio de las fases amorfas de la fuente de aluminosilicato utilizada. En la solución ya formada, los monómeros de silicio e hidróxidos de aluminio se encadenan como resultado de una reacción de condensación, donde se adjuntan iones hidroxilos para luego formar un oxígeno unido a las moléculas, y moléculas de agua libre:

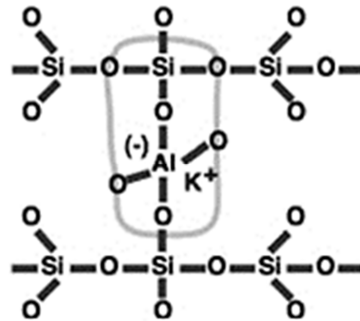


Figura 1: Estructura geopolimérica.

Esta estructura se repite formando cadenas, dando origen a una estructura 3-D denominada geopolímero, que corresponde a un sólido rígido.

2.1.3. Propiedades Físicas y Químicas

Dentro de las propiedades químicas de los geopolímeros, destacan la alta resistencia al ataque de ácidos y sulfatos, así como su resistencia al fuego.

De acuerdo a estudios de Davidovits (2011), se tienen las siguientes propiedades físicas para los geopolímeros:

- Agrietamiento durante el fraguado menor al 0,05%.
- Módulo de Young mayor a 2 GPa.
- Elevada resistencia temprana después de 24 horas.
- Conductividad al calor: 0.2 a 0.4 [W/m°C]
- Calor específico: 0.7 a 1.0 [J/kg°C]
- Conductividad eléctrica: depende fuertemente de la humedad.

2.1.3.1. Comportamiento térmico

Durante el desarrollo de la geopolimerización existe una liberación de agua debido al calentamiento que debe ser sometido. El agua que se libera, se puede clasificar en tres tipos: agua agregada físicamente, agua combinada químicamente y grupos OH hidroxilos.

Dentro de la estructura tridimensional existe una retención parcial de agua producto de la reacción generada durante la policondensación.

El proceso de secado en horno involucra evaporación del agua. Si la temperatura dentro de este, es superior a los 100°C, la muestra de geopolímero sufrirá una deshidratación y una deshidroxilación, lo que provocará una pérdida de peso que fluctúa entre el 1 y el 5% que inducirá la formación de grietas producto de la contracción correspondiente.

Estudios llevados a cabo por Davidovits (1988), muestran a través de resultados de análisis termo-gravimétrico diferencial la existencia de fases exotérmicas y endotérmica así como la identificación de las pérdidas de peso a causa de las altas temperaturas. Las fases exotérmicas se encuentran presente bajo los 100°C y sobre los 300°C, y la fase endotérmica entre los 100 y los 300°C. Se dice que la fase endotérmica es producto de la evaporación del agua químicamente elaborada. Por otro lado, si la temperatura oscila entre los 20 y los 100°C, la pérdida será producto del agua físicamente agregada, entre los 100°C y los 300°C debido al agua producida químicamente y sobre los 300°C debido a la deshidroxilación de los grupos OH y la subsecuente policondensación dentro del enlace siloxo Si – O – Si.

Por otra parte, si la temperatura excede los 100°C, se pueden alcanzar contracciones del 50% y 80% a los 250°C y 400°C respectivamente. Por lo tanto, temperaturas bajo los 100°C garantizan bajos niveles de contracción y una liberación de más del 70% del agua físicamente dispuesta sin tener daños en resistencia y niveles bajos de agrietamiento.

2.1.3.2. Contribución del Agua

En la elaboración de pasta geopolimérica, es necesario agregar agua adicional para lograr fluidizar la mezcla y hacerla trabajable. La adición de agua extra actúa como un elemento lubricante y no debiese, por tanto, participar en la reacción, liberándose totalmente sobre los 100°C. De acuerdo a los estudios basados en Okada et al. (2009) y Davidovits (2011) señalan que el exceso de agua en la síntesis no se incluye dentro de la estructura geopolimérica.

2.1.3.3. Resistividad y propiedades dieléctricas

De acuerdo a estudios de Davidovits en colaboración con el fabricante de equipos eléctricos y la Universidad ETH en Zurich (Forster, 1994), se señala que la presencia de cationes Na, K y Ca asociados con la porosidad y la absorción de humedad no favorece las propiedades conductoras de los geopolímeros. Sin embargo, es debido a sus propiedades térmicas que pueden ser utilizados en ciertas condiciones extremas, por ejemplo, en ambientes secos y húmedos, o bien, para el caso de geopolímeros en contacto con elementos eléctricos. Se tiene que la resistividad eléctrica específica decrece con la re absorción de humedad en geopolímeros post calor a 300°C. Se ha observado que después de ese tratamiento de calor, la re absorción de humedad es pequeña, y aun así, a pesar de ser pequeña la resistividad eléctrica específica se debilita de 10^{12} a 10^{19} Ohm-cm. Estos ensayos son realizados a una temperatura promedio de 25°C y a una humedad del 90%.

2.1.4. Aplicaciones Generales

Según los estudios de Davidovits (2011), la razón atómica Si:Al de la fuente de aluminosilicato a activar, determina las propiedades y las aplicaciones en los diversos campos. Por ejemplo, si se tiene una razón baja Si: Al, se tiene una red muy rígida. Se obtiene lo siguiente:

- Si la razón es Si: Al = 1:1, se tendrán aplicaciones en cerámicas, protección al fuego y ladrillos.
- Si la razón es Si:Al = 2:1, encapsulación de residuos tóxicos y radioactivos.
- Si la razón es Si: Al = 3:1, materiales de sello para aplicaciones industriales en el rango de temperatura de 200°C a 600°C.
- Valores entre $20:1 < \text{Si:Al} < 35:1$, son resistentes al fuego y al calor.

Las propiedades físicas se encuentran relacionadas directamente con la razón $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Una razón por debajo de 3:1, resulta una estructura tridimensional rígida, adecuada para uso en concreto o cemento. Si esta razón se encuentra sobre el valor 3, la estructura se vuelve menos rígida y más flexible, tal como un polímero. En caso que los valores sean mucho mayores, sobre los 35:1, se tendrán cadenas 2D, las cuales son más adecuadas para la fabricación de sellantes o adhesivos, o como una resina impregnante para la formación de compuestos de fibra materiales.

2.2. Fuentes de Aluminosilicatos

2.2.1. Ceniza Volante

Comúnmente se hace uso del término ceniza volante para poder describir cualquier partícula fina que precipite y quede atrapada en los filtros electroestáticos de gases generados de la quema de

combustibles sólidos en hornos industriales. El uso de ceniza volante como fuente de aluminosilicato para formación de geopolímeros, es una potencial materia prima, pues contiene fases de sílice y alúmina en mayor cantidad. Su uso en el Cemento Portland no se limita a sus características puzolánicas y propiedades reológicas, sino que también reduce la reacción agregado-álcali, debido a su rápida reacción con los álcalis presentes en el cemento.

Producción

La ceniza volante se produce en la combustión de carbón finamente molido inyectado a alta velocidad, con una corriente de aire caliente dentro del horno en plantas termoeléctricas. A la entrada de la caldera, donde las temperaturas bordean los 1500°C, el carbón en suspensión es quemado instantáneamente. El material restante presente en el carbón, tales como pizarras y arcillas, que consisten principalmente de sílice, alúmina y óxidos de hierro, son transportados a través de chimeneas y fundidos en suspensión. Deben ser removidos antes de que los gases sean descargados a la atmósfera. A este material, se le conoce como ceniza volante. La ceniza volante es removida de la chimenea mediante varios métodos, comúnmente extraídos mediante precipitadores electrostáticos (Davidovits , 2011).

La ceniza volante es dividida por lo general en 2 categorías distintas: clase F y clase C.

Clase F

Ceniza volante baja en calcio

Este tipo de ceniza presenta menos de un 10% de contenido de CaO. Usualmente producida a partir de la combustión de antracita y carbones bituminosos.

Clase C

Ceniza Volante alta en calcio

El contenido de CaO es mayor que el 10%. Usualmente producida a partir de la combustión de carbón sub-bituminosos y lignita.

2.2.2. Puzolana natural

La puzolana natural, corresponde a un material alumino-silíceo, que comúnmente es utilizado como adición en la elaboración de cemento Portland Puzolánico. Se prefieren siempre puzolanas cuyo contenido de sílice, alúmina y fierro sean mayores al 70%. Dentro de las puzolanas naturales se encuentran las cenizas y los depósitos consolidados en estratos de suelos o rocas, en las que el constituyente silíceo contiene ópalo.

En Chile, particularmente en la Región Metropolitana, existe un gran manto puzolánico, especialmente en las comunas de Lampa y Pudahuel, cuya extensión llega hasta la costa. El origen de este material se le asociaba los volcanes Tupungato y San José, sin embargo, dada la extensión y distribución del material, se le atribuye al volcán Diamante.

Usos

Dentro de los usos de las puzolanas naturales destacan:

- Filtro natural de líquidos por su elevada porosidad.
- Fabricación de hormigones de baja densidad.
- Abrasivo. Usado en algunos detergentes abrasivos.
- Adición en cementos.

2.2.3. Escoria de alto horno

La escoria de alto horno, es consecuencia de la reducción del mineral de hierro en los altos hornos, por lo que corresponde a un desecho industrial el cual, sino se maneja adecuadamente contamina el ambiente. Sus elementos químicos son similares a los del clinker, pero en proporciones diferentes, de acuerdo a los componentes ingresados al horno. Cuando la escoria es enfriada bruscamente a la salida del crisol, se congelan los compuestos principales formados a esa temperatura, por lo que la estructura se vitrifica y con esto puede ser utilizado para diversos fines, como material químicamente reactivo.

Existen efectos nocivos que llaman a hacer uso de la escoria, por ejemplo, evitar la acumulación y contaminación. Es aquí entonces donde los geopolímeros resultan ser una alternativa para darle uso a este tipo de residuo industrial.

2.3. Soluciones Alcalinas

2.3.1. Silicato de sodio

El silicato de sodio, vidrio soluble o también conocido como waterglass corresponde a una sustancia inorgánica compuesta primordialmente de óxido de silíceo (SiO_2) y óxido de sodio (Na_2O).

En general, los componentes principales en la elaboración de los silicatos de sodio corresponden a la sílice, carbonatos alcalinos, álcalis hidróxidos y agua, siendo la sílice el material primordial.

Dentro de los álcalis carbonatos se encuentran el carbonato de sodio y el carbonato de potasio. Los álcalis hidróxidos pueden ser hidróxido de sodio o bien hidróxido de potasio. Los silicatos solubles de sodio corresponden a polímeros de silicato. Si el grado de polimerización es mayor, será mayor entonces la proporción de oxígeno compartida entre el tetraedro SiO_4^{2-} y se tendrá una razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ menor. Esta razón se encuentra expresada usualmente en peso y es la encargada de determinar las propiedades físicas y químicas del silicato.

Proceso de Producción

Para obtener los silicatos de sodio, existen dos maneras posibles. Una de ellas, es mediante la disolución del material amorfo, utilizando agua y presión en un contenedor y la otra es disolviendo hidrotérmicamente el material silicio en la respectiva solución álcali de hidróxido.

Se va a describir el primer método que es el más común.

La producción de silicato de sodio, consta por lo general de las siguientes etapas:

Primera etapa:

En esta etapa, se funden el cuarzo (arena sílica de alta pureza) junto con el carbonato de sodio, de acuerdo a la siguiente expresión:



Donde,

Na_2CO_3 : carbonato de sodio

SiO_2 : sílica, dióxido de sodio, cuarzo

Na_2SiO_3 : waterglass

CO_2 : dióxido de carbono

Esta es producida por fusión en horno a temperaturas que se encuentran entre los 1100°C a 1200°C . El horno puede ser a petróleo, a gas o eléctrico.

El producto resultante de esta reacción, corresponde a un material amorfo, que se conoce usualmente como cullet.

Segunda etapa:

Aquí es donde se produce el silicato final. Para esto, se mezclan en un reactor el cullet, junto con el agua y vapor, para así disolver el material. Finalmente, se almacenan en contenedores.

Tercera etapa:

Esta etapa se da cuando es necesario obtener propiedades específicas, y por ende, es necesario modificar la razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. Para conseguir esto, se agrega NaOH (hidróxido de sodio) al silicato de sodio soluble.

Se suelen filtrar las soluciones para lograr un producto con las características requeridas, removiendo así cualquier agente residual o turbiedad en la mezcla.

Propiedades

Para caracterizar un silicato de sodio, se deben conocer sus propiedades físicas tales como su densidad, razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ y viscosidad.

Densidad

La densidad, corresponderá a la concentración o contenido total de sólidos dentro de la solución, a una razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ dada. Será, por lo tanto, una función de la temperatura, siendo inversamente proporcional a dicha variable y de la concentración presente en dicha solución; a mayor concentración, se tendrá una mayor densidad. Se suele medir en grados Baumé y se realiza a temperatura estándar de 20°C.

Proporción $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$

Esta variable se puede expresar como por la razón de peso o razón molar.

Viscosidad

La viscosidad corresponde a la oposición de un fluido a deformarse bajo escurrimiento laminar. Siendo esto así, la viscosidad de un silicato, es una función de la temperatura, la concentración, la razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ y su densidad. La viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura. Un aumento de ésta, conlleva directamente a una disminución del valor de la viscosidad. Si la razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ aumenta, la viscosidad aumenta, hasta llegar a un punto en que el material se encontrará en estado semisólido.

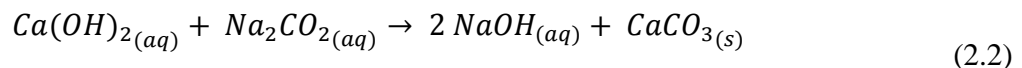
Los silicatos de sodio son ampliamente utilizados en distintos rubros, por ejemplo: industria del jabón, detergentes, adhesivos, morteros refractarios, cerámicas, cementos especiales, textil, tratamiento de agua, pinturas y pigmentos, destintado de papel, industria de fundición, industria del petróleo, construcción y obras civiles, minería, entre otros.

2.3.2. Hidróxido de sodio

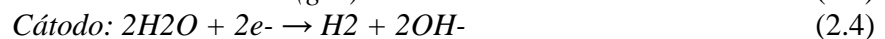
También conocido como soda cáustica, es una sustancia manufacturada y muy corrosiva. Es un sólido blanco cristalino, sin olor e higroscópico. Al contacto con el agua, o bien con un ácido, produce una reacción exotérmica.

Proceso de fabricación

Generalmente, se fabrica por el método de caustificación, lo que quiere decir, que se junta un compuesto de sodio con otro hidróxido:



También se puede fabricar mediante electrólisis de una solución acuosa de salmuera o cloruro sódico.



Al ir avanzando la electrólisis, se pierden junto con ella cloruros, que al ser sustituidos por iones hidróxido, y combinados con cationes de sodio presentes en la disolución forman el hidróxido sódico.

Capítulo 3

Planteamiento de la Investigación

En este trabajo de título, se busca obtener hormigón geopolimérico a partir de puzolana natural como fuente de aluminosilicato. Para ello, se hacen mezclas de puzolana pura, la que por su menor reactividad, hace necesario mezclarla con otras fuentes de aluminosilicato que aporten la alúmina faltante, tales como ceniza volante y escorias de alto horno.

Las variables de dosificación que afectan de mayor forma al geopolímero son mezclas experimentalmente en el Laboratorio de Aglomerantes de IDIEM. Para el ensayo correspondiente, se varía el parámetro en estudio dejando el resto de las variables constante.

3.1. Variables de estudio

Para la fabricación de geopolímeros, es necesario utilizar una fuente de aluminosilicato con altos contenidos de sílice y alúmina, además de una solución alcalina activadora. De acuerdo a estudios, la razón entre sílice y alúmina del material a utilizar como materia prima en la obtención de geopolímero, debe ser aproximadamente 2,0. La solución activadora está constituida por una combinación de solución de hidróxido de sodio y solución de silicato de sodio. La solución hidróxido de sodio es elaborada en laboratorio. Se agregan pellets de NaOH en agua destilada de acuerdo a la concentración molar correspondiente y a través de agitación se desioniza la solución. La solución silicato de sodio, es suministrada por Austral Chemicals, de acuerdo a los requisitos de viscosidad solicitados para este estudio.

Para llevar a cabo las distintas mezclas, se hace uso de mezcladora, balanza electrónica, hornos para curado, máquinas de ensayos de resistencias mecánicas, sala seca para curado al aire y se moldean probetas en moldes RILEM (4x4x16cm). Posteriormente, las probetas se mantienen en hornos de curado (60-100°C) y finalmente, se efectúan los ensayos mecánicos en prensas estándar de laboratorio. Todos estos dispuestos en el Laboratorio de Aglomerantes ubicados en IDIEM.

3.2. Fuentes de aluminosilicatos

Se presenta a continuación la composición química y los ensayos físicos asociados a cada una de las fuentes de aluminosilicatos en estudio:

Tabla 1: Composición química de diversas fuentes de aluminosilicato.

Fuente de Aluminosilicato	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Ceniza Volante División Ventanas de AES Gener	55,10	26,50	4,40	8,50
Puzolana Pudahuel	69,57	13,10	2,74	1,69
Escoria de alto horno Cemento Melón	32,54	16,40	41,22	0,56
Escoria de alto horno Huachipato, Concepción	34,40	14,10	35,5	1,50

Tabla 2: Propiedades físicas de diversas fuentes de aluminosilicato.

Fuente de Aluminosilicato	Superficie Específica (cm ² /g)	Peso Específico (g/ml)
Ceniza Volante División Ventanas de AES Gener	2100	2,23
Puzolana Pudahuel	4450	2,40
Escoria de alto horno Cemento Melón	2066	2,86
Escoria de alto horno Huachipato, Concepción	1799	2,91

La finura alcanzada en las diversas fuentes de aluminosilicato es producto de tratamiento con molino.

3.2.1. Solución alcalina

Se preparan soluciones alcalinas en base a hidróxido de sodio y silicato de sodio en proporciones 1/1.5 y 1/2.0. La molaridad de la solución de hidróxido de sodio 14M se mantiene constante.

3.2.1.1. Hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio proviene directamente del comercio y viene en forma de pellets.

3.2.1.2. Silicato de sodio

Para el presente trabajo de título, se utilizan diversos silicatos de sodio, los cuales difieren entre sí en su composición:

Tipo 1

Tabla 3: Características de silicato de sodio tipo 1.

Parámetro	Determinación
Alcalinidad (%Na ₂ O)	14,7
Sílice Soluble (%SiO ₂)	29,5
Razón SiO ₂ /Na ₂ O	2,01
Viscosidad Brookfield 20°C (cps)	900
pH	12,7

Tipo 2

Tabla 4: Características de silicato de sodio tipo 2.

Parámetro	Determinación
Alcalinidad (%Na ₂ O)	14,33
Sílice Soluble (%SiO ₂)	29,95
Razón SiO ₂ /Na ₂ O	2,09
Viscosidad Brookfield 20°C (cps)	410
pH	50,59

Tipo 3

Tabla 5: Características de silicato de sodio tipo 3.

Parámetro	Determinación
Alcalinidad (%Na ₂ O)	14,6
Sílice Soluble (%SiO ₂)	30,64
Razón SiO ₂ /Na ₂ O	2,10
Viscosidad Brookfield 20°C (cps)	640
pH	51,45

Este material es suministrado por la empresa Austral Chemicals, y es especialmente diseñado para cumplir con las características requeridas en el diseño de las mezclas determinado de acuerdo a la bibliografía revisada:

Tabla 6. Diseño silicato de sodio viscosidad 900 cps.

Parámetro	Determinación
Razón SiO ₂ /Na ₂ O	2,10
Viscosidad Brookfield 20°C (cps)	900

Tabla 7. Diseño de silicato de sodio viscosidad 700 cps.

Parámetro	Determinación
Razón SiO ₂ /Na ₂ O	2,10
Viscosidad Brookfield 20°C (cps)	700

Tabla 8. Diseño de silicato de sodio viscosidad 400 cps.

Parámetro	Determinación
Razón SiO ₂ /Na ₂ O	2,10
Viscosidad Brookfield 20°C (cps)	400

3.2.2. Agua

Se utiliza agua para la obtención de las soluciones de hidróxido de sodio y silicato de sodio involucrados en el proceso de geopolimerización.

La solución de hidróxido de sodio se preparó con agua destilada suministrada por laboratorio.

3.2.3. Áridos

Los áridos utilizados en la confección de morteros, corresponden a arena silícea normalizada, la que cumple con las especificaciones de la norma NCh 158, donde se establece que la composición granulométrica de la arena será tal que su tamizado se encuentre comprendido dentro de los valores señalados en Tabla 9:

Tabla 9: Composición granulométrica de arena silícea normalizada.

Abertura real [mm]	Retenido acumulado [%]
0,074	98 ± 2
0,149	88 ± 5
0,500	67 ± 5
1,000	33 ± 5
1,680	5 ± 5
2,000	0

En el presente estudio, el porcentaje en peso del árido a utilizar en las diversas mezclas se mantiene constante e igual a un 70%.

3.2.4. Procesos

3.2.4.1. Proceso de secado

El proceso de secado de las materias primas (puzolana, escoria de alto horno y ceniza volante) es llevado a cabo en horno en las instalaciones de IDIEM en planta Cerrillos. En él, se disponen bandejas con el material a secar, tratando de abarcar la mayor área posible y así, obtener el secado deseado de la muestra. Este se deja actuar durante 24 horas a aproximadamente 105°C para extraer el agua, donde luego es puesto a temperatura ambiente para que se enfríe y se almacene para su posterior procesamiento.

3.2.4.2. Proceso de molienda

El proceso de molienda (puzolana) se lleva a cabo en IDIEM de Cerrillos. Para ello, se realiza una curva de finura, de manera de obtener la superficie específica requerida. La molienda se desarrolla en el molino de bolas, HARDINGE y en el molino de capacidad máxima 5 kg.

La primera se carga con bolas de acero, de acuerdo a la granulometría siguiente:

Tabla 10: Caracterización del Molino de Bolas, Hardinge.

<u>Bolas</u>	<u>Peso [g]</u>	<u>Peso Total [kg]</u>	<u>Diámetros [mm]</u>
Bolas Chicas	61,7	67,49	25
Bolas Medianas	210,4	52,30	38
Bolas Grandes	505,3	39,91	50

Y es distinta a la máquina comúnmente utilizada de molienda de laboratorio con capacidad de 5 kg.

Su funcionamiento consta básicamente de la colocación de cargas de unos 25 kg por molienda. A cada carga se le hace un análisis de finura, para poder determinar cuántos minutos en el molino se requiere para obtener la superficie específica deseada. Luego de conseguida, se realiza lo mismo para las otras cargas y con ello se obtiene porciones de material con una molienda similar. Finalmente, al término del proceso, se procede a homogeneizar el material obtenido, cuya finura representa el valor final.



Figura 2: Molino Hardinge

El mismo procedimiento se utiliza para la operación de la máquina de 5 kg de capacidad.

3.2.4.3. Homogeneización de la fuente de aluminosilicato

La homogeneización se ejecuta para cada una de las fuentes utilizadas para obtener un material homogéneo que sea representativo a toda la mezcla.

3.2.4.4. Proceso de elaboración de geopolímeros

La elaboración de morteros geopoliméricos, se desarrolla por etapas, las que son descritas a continuación. Todos los procesos son desarrollados en el Laboratorio de Aglomerantes, IDIEM.

Previo a la elaboración del geopolímero se elabora la solución de hidróxido de sodio bajo campana, ya que la reacción producida es del tipo exotérmica y desprende gases tóxicos.

La solución alcalina de hidróxido de sodio se obtiene disolviendo mediante agitación los pellets de hidróxido de sodio en agua destilada durante 60 segundos, bajo campana, y se deja enfriar.

Equipos de Laboratorio:

A continuación se describen los equipos utilizados durante la experiencia:

a) Campana extractora:



Figura 3: Campana extractora de gases – IDIEM

b) Balanza de precisión

La balanza utilizada es RADWAG, 600g de capacidad y de 0,1 g de precisión.



Figura 4: Balanza Digital RADWAG

c) Mezclador de morteros

Para la mezcla, se utiliza la mezcladora Toni Technik:



Figura 5: Mezcladora Toni Technik.

d) Hornos

Para el curado en horno, se utilizan hornos ventilados a temperatura de 60°C:



Figura 6: Hornos

e) Ensayos de resistencia mecánica

Para obtener las resistencias, se hace uso de equipo Toni Technik para ensayo de probetas a flexotracción y compresión, en viguetas de 4x4x16 cm.



Figura 7: Equipo Toni Technik

Capítulo 4

Etapa Experimental

4.1. Dosificación

La dosificación de todas las mezclas estudiadas se realiza de la siguiente manera, teniendo como referencia el estudio anterior de Pedro Díaz:

1. Se supone una densidad del mortero polimérico de $2100 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (4.1)

2. En todos los morteros se utiliza un 70% de árido en peso lo que corresponde a:

$$\text{Áridos} = 70\% \cdot 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1470 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.2)$$

3. Se tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Solución Alcalina} + \text{Fuente de Aluminosilicato} + \text{Árido} = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.3)$$

Por lo que,

$$\text{Solución Alcalina} + \text{Fuente de Aluminosilicato} = 630 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.4)$$

4. A modo de ejemplo, se deja como parámetro fijo la razón solución alcalina a fuente de aluminosilicato e igual a 0,6:

$$\frac{\text{Solución Alcalina}}{\text{Fuente de Aluminosilicato}} = 0,6 \quad (4.5)$$

De 4.4 se obtiene:

$$\text{Fuente de Aluminosilicato: } 393,75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.6)$$

$$\text{Solución Alcalina: } 236,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.7)$$

El agua extra no va incorporada en los cálculos.

5. Composición de la solución alcalina.

Si se deja fija la razón entre solución silicato de sodio/solución hidróxido de sodio, de acuerdo al valor recomendado, se tiene:

$$\frac{\text{Solución silicato de sodio}}{\text{Solución hidróxido de sodio}} = 2,0 \quad (4.8)$$

Y como del punto anterior se tiene que,

$$\text{Solución alcalina: } 236,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La solución de hidróxido de sodio correspondiente es $78,75 \text{ kg/m}^3$ y la solución de silicato de sodio es $157,5 \text{ kg/m}^3$.

Tabla 11: Dosificación tipo de la mezcla.

Compuesto de la mezcla	Kg/m^3
Fuente de aluminosilicato	393,75
Solución NaOH	78,75
Solución Na_2SiO_3	157,50
Arena Normal	1.470

4.2. Mortero

El mortero se elabora tomando en cuenta las siguientes proporciones en peso:

- Fuente de aluminosilicato más solución alcalina: treinta por ciento (30%).
- Contenido de árido (arena normal seca): setenta por ciento (70%).
- Adicionalmente, se agrega al mortero agua extra para mejorar la trabajabilidad, según se especifica más adelante.

4.2.1. Acondicionamiento

La cámara seca está dispuesta de manera tal que se tenga una humedad relativa HR de $50 \pm 2\%$ y una temperatura de $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2.2. Mezcla

- Se pesan los componentes del mortero conforme a la dosificación calculada reducida para diez litros de mortero geopolimérico.
- Los aluminosilicatos son mezclados con la solución hidróxido de sodio durante tres minutos.
- Se adiciona la solución de silicato de sodio y se mezcla por 60 segundos.
- Se agrega 40 g de agua extra, correspondiente al 10% aproximadamente del aluminosilicato seco, y se mezclan durante cuatro minutos.
- Finalmente, se agrega 1470 g de arena normalizada (70% de la mezcla de geopolímero) y se mezcla durante cuatro minutos.

Tiempo total de mezclado: 12 minutos

4.2.3. Compactación

- El molde, 3 viguetas de 4x4x16, cm es recubierto con papel film en todas las superficies de contacto, previamente aceitado. Esto para permitir el desmolde, ya que el geopolímero tiene un gran poder de adherencia con el acero.
- Se coloca en tres capas, una primera capa, de aproximadamente un tercio de la altura del molde, nivelando el material con espátula.
- Se compacta haciendo uso de un pisón estándar, dando veinte golpes por capa.
- Se coloca una segunda capa, se nivela con espátula y se compacta igual que en el caso anterior.
- Se coloca una última capa, de la misma manera, teniendo cuidado que la altura del mortero sobrepase la altura del molde.
- Se apisona mediante veinte golpes y se enrasa con regla metálica.
- Se etiquetan las probetas para su posterior identificación.

4.3. Curado y Ensayos

Durante el curado en horno, se coloca una capa de papel film en la parte superior para evitar la evaporación de agua.

Las probetas se desmoldan luego de 24 horas en horno a 60°C, y se dejan enfriar durante una hora para su posterior ensayo o traslado a la cámara seca.

Al momento del ensayo, las probetas se limpian y pesan.

Los ensayos a flexotracción y compresión son realizados de acuerdo a la Norma Chilena Oficial NCh 158.Of67 “Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”.

Cálculo de Resistencia

Para el cálculo de resistencia se usan las siguientes fórmulas (Probetas RILEM):

- **Cálculo de resistencia a la flexotracción:**

$$Resistencia_{Flexotracción} := \frac{\sum_{i=1}^3 R_i}{3} \cdot 2,34 \quad (4.15)$$

- **Cálculo de resistencia a la compresión:**

$$Resistencia_{Compresión} := \frac{\sum_{i=1}^6 R_i}{6} \cdot 0,625 \quad (4.16)$$

Capítulo 5

Resultados

A continuación se presentan los experimentos realizados los que se dividen en dos etapas: estudios previos y estudio experimental. Durante los estudios previos se realizan ensayos sobre la influencia de los distintos parámetros que intervienen en el proceso de obtención de los geopolímeros, tales como viscosidad de la solución de silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla, contenido de agua extra en la mezcla final de geopolímero, variación de temperatura de curado en horno, variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato, variación de concentraciones molares del activador, razón solución silicato de sodio/solución hidróxido de sodio en la solución alcalina y variable tiempo de curado en horno para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato. En el estudio experimental, se busca la factibilidad del uso de puzolana natural como fuente de aluminosilicato a través de diversas adiciones de ceniza volante y escorias de alto horno.

El parámetro de medición en los diversos ensayos corresponde a la resistencia mecánica.

Se presentan los resultados, tablas y gráficos correspondientes a las distintas series consideradas en el estudio, indicando las densidades y resistencias mecánicas obtenidas, para las diferentes condiciones de curado contempladas. Para determinar la densidad de cada probeta, se divide la masa obtenida de la balanza digital y se divide por el volumen de la probeta. Las probetas utilizadas tienen una sección transversal de 4cm x 4cm, y un largo de 16 cm.

Estudios Previos

5.1. Influencia de las variables relacionadas con la composición de la solución alcalina y con el método de elaboración de los morteros geopoliméricos.

Los ensayos siguientes determinan los parámetros de mayor influencia que controlan las propiedades de las mezclas geopoliméricas.

5.1.1. Influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla.

Para la mezcla 75% ceniza volante y 25% puzolana, desde ahora mezcla PCV2, se estudia la influencia de la viscosidad de la solución de silicato de sodio en el comportamiento del mortero. Con este fin, se hace uso de tres tipos de silicato de sodio que presentan similar composición química pero diversas viscosidades. El curado de las probetas se hace en horno a 60°C durante las primeras 24 horas, desmoldando las probetas, y dejando en reposo por una hora para ensayar una vez alcanzada la temperatura ambiente.

Se mide densidad y resistencias a la flexotracción y compresión después de un curado en horno de 1 día.

Las denominaciones V400, V700 y V900 representan los diversos tipos de silicatos de sodio para viscosidades de 400, 700 y 900 cps respectivamente.

Tabla 12: Parámetros constantes para ensayos influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.

Sol.Alcalina/F.Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Activador [NaOH]
0,5	1,5	14M

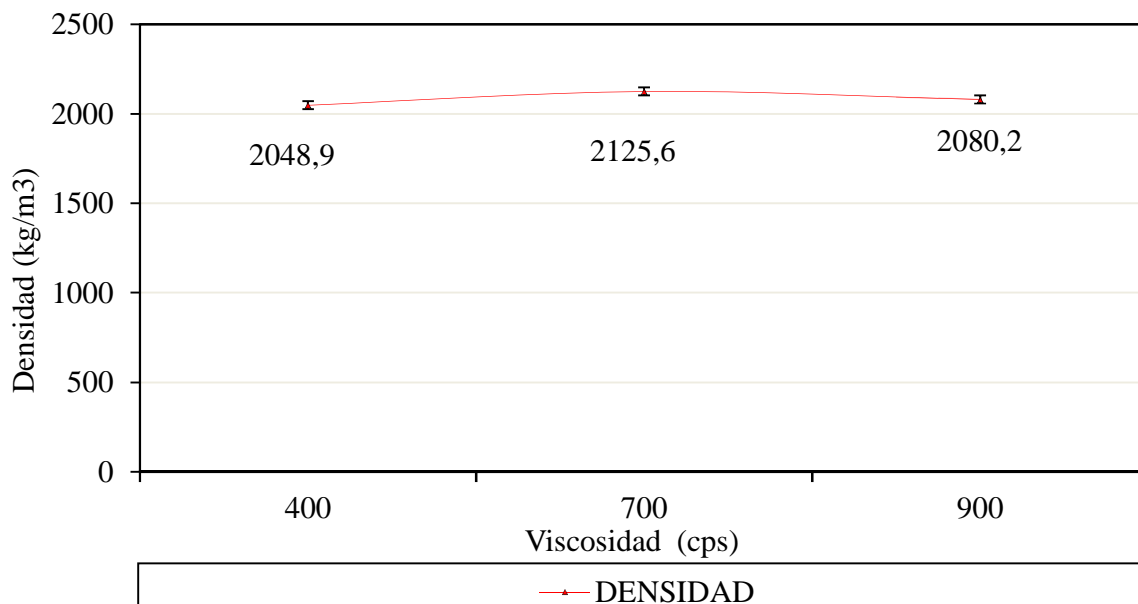
a) Densidad de mortero.

Se muestra a continuación los valores y los gráficos obtenidos:

Tabla 13: Densidad para la serie influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.

Serie Viscosidad	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
V400	524,5	2048,9
V700	544,2	2125,6
V900	532,5	2080,2

Gráfico 1: Densidad para la influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.



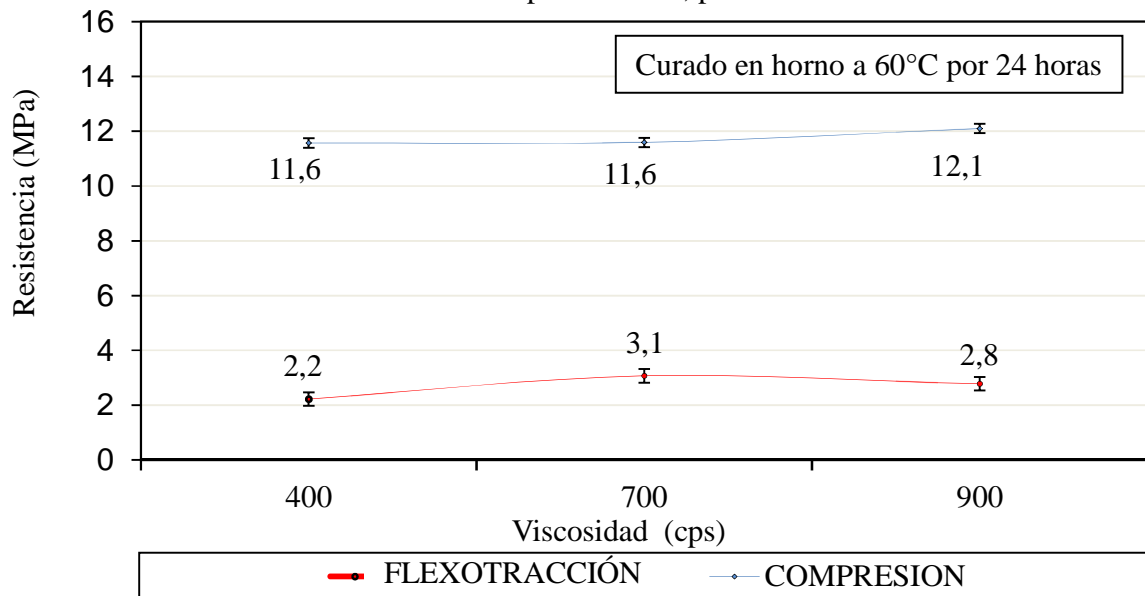
b) Resistencia mecánica.

Las resistencias a flexotracción y compresión, junto con sus gráficos correspondientes son los siguientes:

Tabla 14: Resistencias mecánicas en función de la viscosidad del silicato de sodio de la mezcla, curado en horno a 60°C por 24 horas, para mezcla PCV2.

Serie	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
V400	2,2	11,6
V700	3,1	11,6
V900	2,8	12,1

Gráfico 2: Resistencias mecánicas en función de la viscosidad del silicato de sodio de la mezcla, curado en horno a 60°C por 24 horas, para mezcla PCV2.



5.1.2. Influencia del contenido del Agua Extra en la Mezcla PCV2.

Para una mezcla 75% ceniza volante y 25% de puzolana, se determina la cantidad de agua extra necesaria para obtener la trabajabilidad de la mezcla. El curado en horno se realiza durante 24 horas y luego de una hora previo desmolde se ensaya. Se determinan las densidades y las resistencias a flexotracción y compresión.

Se fabrican 3 morteros similares PCV2, donde el parámetro que varía corresponde a la cantidad de agua extra. Las expresiones W30, W40 y W50 identifican a los morteros con distintos contenidos de agua extra cuyas cantidades de agua extra equivalen a 30, 40 y 50 g respectivamente.

Tabla 15: Parámetros constantes para serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.

Sol.Alcalina/F.Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Activador [NaOH]
0,5	1,50	14M

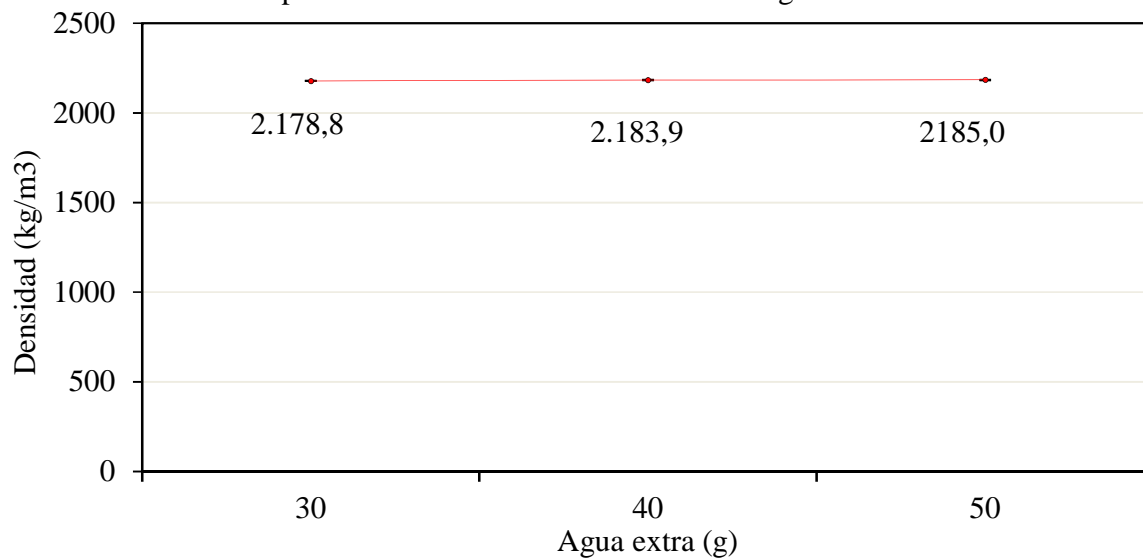
a) Densidad de mortero.

En la tabla 16 y gráfico 3 se presentan los valores de densidad para las series de morteros correspondientes a la variable contenido de agua extra:

Tabla 16: Densidades para serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.

Serie Contenido de agua extra	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
W30	1,1	2178,8
W40	1,3	2183,9
W50	1,2	2185,0

Gráfico 3: Densidad para serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.



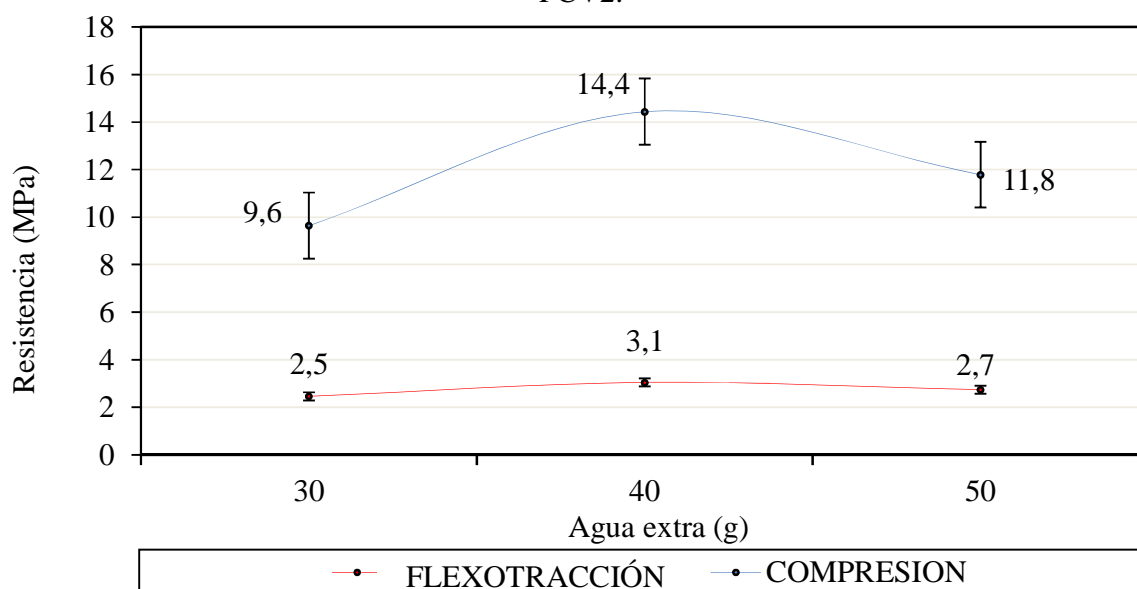
b) Resistencia mecánica.

En la Tabla N°17 y Gráfico N°4 se presentan los valores de resistencia mecánica de la series de ensayos variando el contenido de agua extra en la mezcla.

Tabla 17: Resistencia mecánica para la serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2

Serie	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
W30	2,5	9,6
W40	3,1	14,4
W50	2,7	11,8

Gráfico 4: Resistencia mecánica para la serie influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.



5.1.3. Influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Para la mezcla 75% ceniza volante y 25% de puzolana, se determina la influencia de la temperatura de curado en horno sobre la resistencia del mortero de geopolímero, a la edad de 1 día. Para ello, se confeccionan 3 morteros iguales, los cuales son curados a temperaturas de 40, 60 y 80°C durante 24 horas, y ensayados una hora después de ser desmoldados.

Tabla 18: Parámetros constantes para series influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Sol.Alcalina/F.Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Activador [NaOH]
0,5	1,50	14M

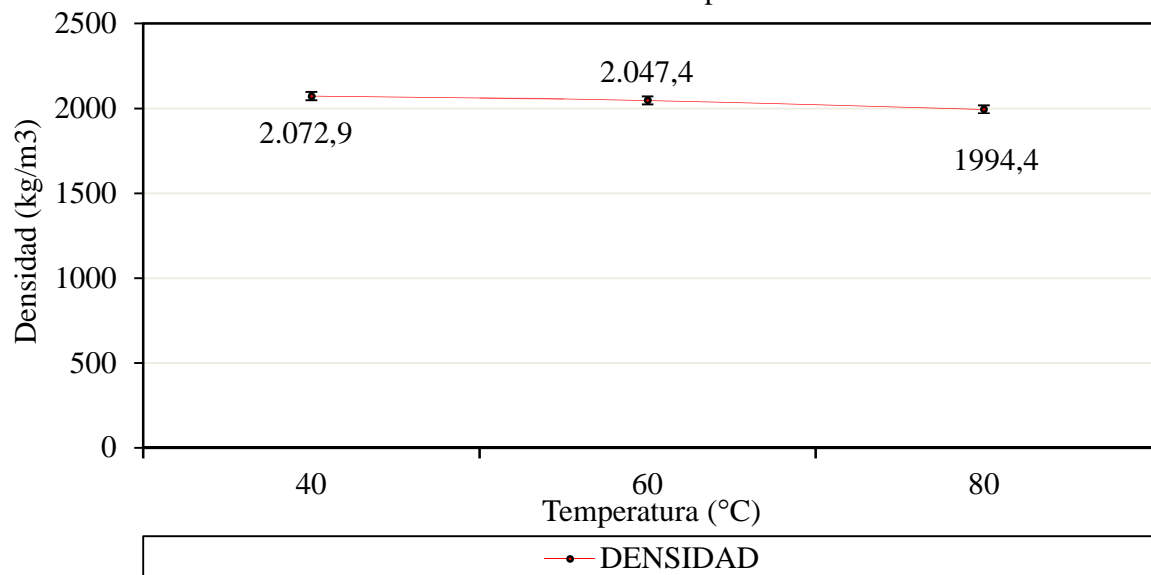
a) Densidad de mortero.

En la tabla N°19 se muestran los valores de las densidades en función de la temperatura de curado en horno y se acompaña el gráfico N°5 correspondiente:

Tabla 19: Densidades de morteros de la serie influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Serie Temperatura de curado	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
T40	530,7	2072,9
T60	524,1	2047,4
T80	510,6	1994,4

Gráfico 5: Densidad de morteros de la serie temperatura de curado en horno.



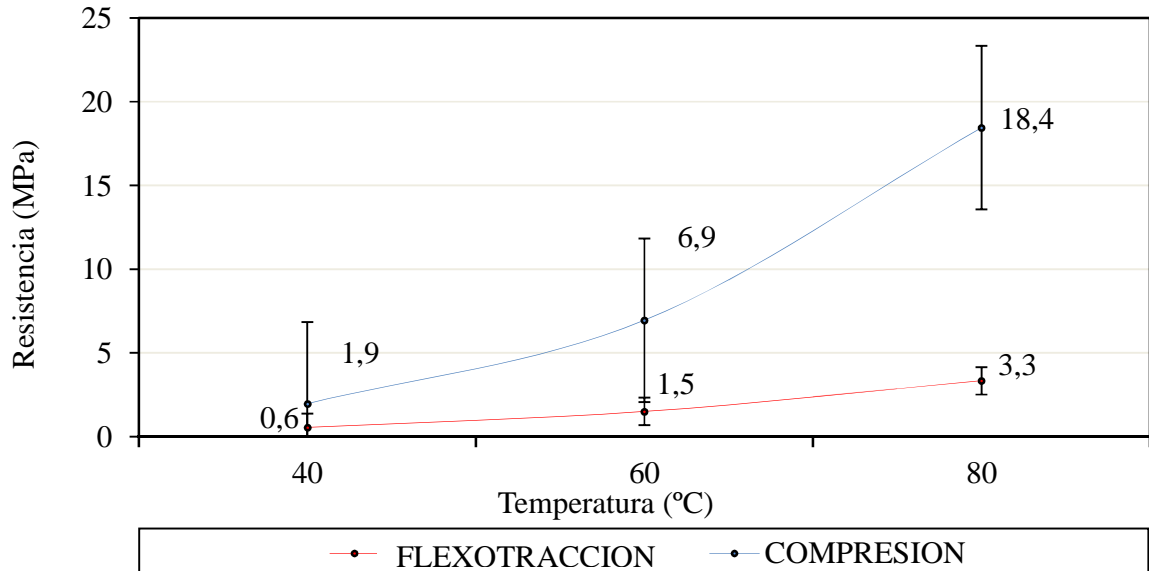
b) Resistencia mecánica.

Se muestran los resultados de las resistencias a flexotracción y compresión, junto a su gráfico:

Tabla 20: Resistencia mecánica para series influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Serie	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
T40	0,6	1,9
T60	1,5	6,9
T80	3,3	18,4

Gráfico 6: Resistencia mecánica en función de la temperatura de curado (Mezcla PCV2).



5.1.4. Influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato, mezcla PCV2.

Para una mezcla 75% ceniza volante y 25% de puzolana, se determina la influencia de la razón solución alcalina y fuente de aluminosilicato a la edad de 1 día de la fabricación de la mezcla. Se fabrican 6 morteros cuyo único parámetro variable es el correspondiente a la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato. Dichas razones corresponden a los valores 0,4 – 0,45 – 0,5 – 0,55 – 0,6 y 0,65. Las probetas son curadas en horno durante 24 horas y a una temperatura constante de 60°C. Las muestras son ensayadas por lo tanto a 1 día de su elaboración, dejando una hora de exposición al aire para enfriar.

Tabla 21: Parámetros constantes para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato

Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Activador [NaOH]
1,50	14M

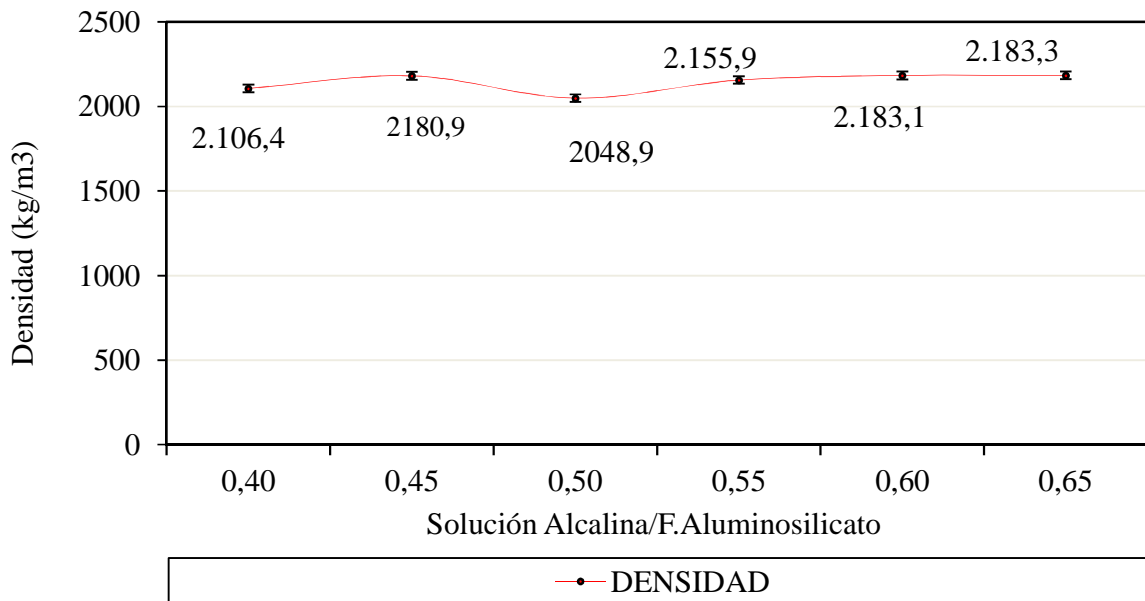
a) Densidad de mortero.

En la tabla N°22 y gráfico N°7 se muestran los valores de densidad de los morteros correspondientes a esta serie registrados:

Tabla 22: Densidad de morteros para series influencia de la variación en la razón solución alcalina (SA)/fuente de aluminosilicato(FA).

Serie SA/FA	Solución Alcalina/F.Aluminosilicato	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
M1	0,40	539,2	2106,4
M2	0,45	558,3	2180,9
M3	0,50	524,5	2048,9
M4	0,55	551,9	2155,9
M5	0,60	558,9	2183,1
M6	0,65	558,9	2183,3

Gráfico 7: Densidad de morteros para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato.



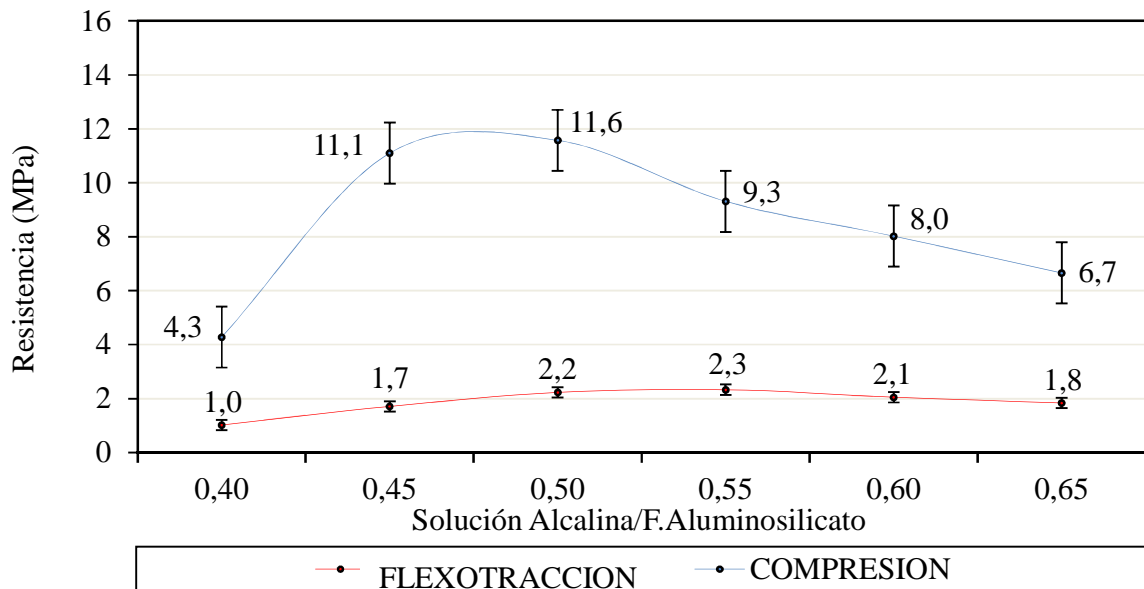
b) Resistencia mecánica.

Se muestran los valores de resistencia registrados y su respectivo gráfico:

Tabla 23: Resistencia mecánica para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato.

Serie SA/FA	Sol. Alcalina/F.Aluminosilicato	RF (MPa)	RC (MPa)
M1	0,40	1,0	4,3
M2	0,45	1,7	11,1
M3	0,50	2,2	11,6
M4	0,55	2,3	9,3
M5	0,60	2,1	8,0
M6	0,65	1,8	6,7

Gráfico 8: Resistencia mecánica para series influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato.



5.1.5. Influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.

Para una mezcla 75% ceniza volante y 25% de puzolana, se estudia la influencia de la concentración molar del activador en las propiedades del geopolímero. Para ello se ensayan morteros, variando la solución alcalina en cuanto a la concentración molar de la solución

hidróxido de sodio, con valores de 8, 10, 12 y 14 [M]. Son curados en horno durante 24 horas y luego ensayados una hora después del desmolde.

Tabla 24: Parámetros constantes para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.

Sol.Alcalina/F.Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH
0,5	1,50

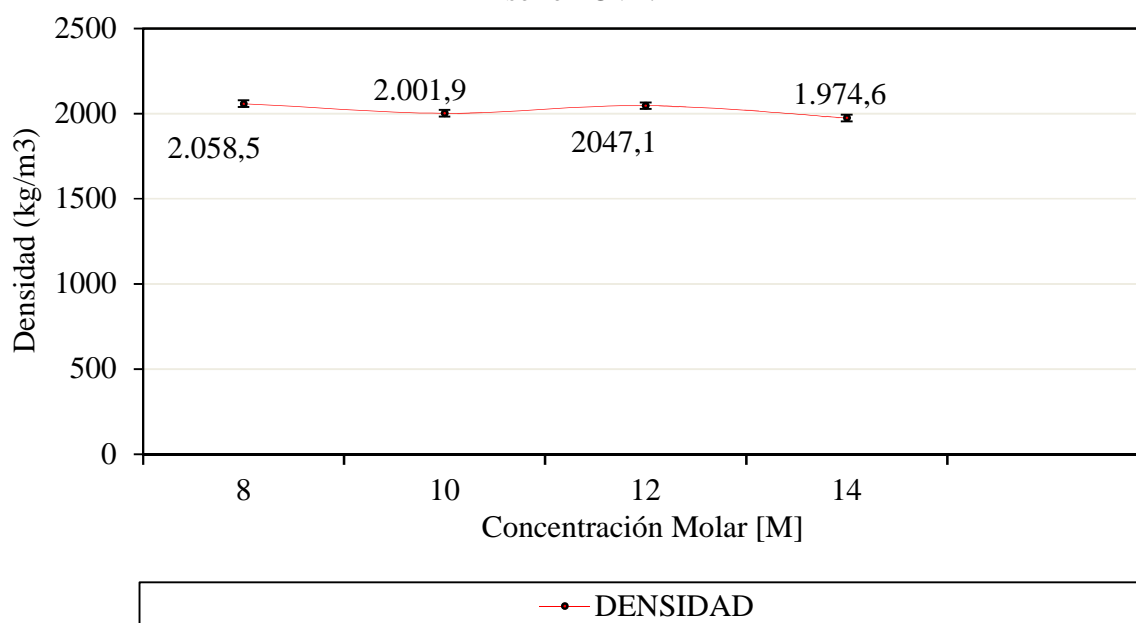
a) Densidad de mortero.

En tabla 25 y gráfico 9 se muestran los resultados de las densidades obtenidas para los morteros de la serie concentración molar del activador:

Tabla 25: Densidad para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.

Serie NaOH	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
M8	526,9	2058,5
M10	512,5	2001,9
M12	524,1	2047,1
M14	505,5	1974,6

Gráfico 9: Densidad para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.



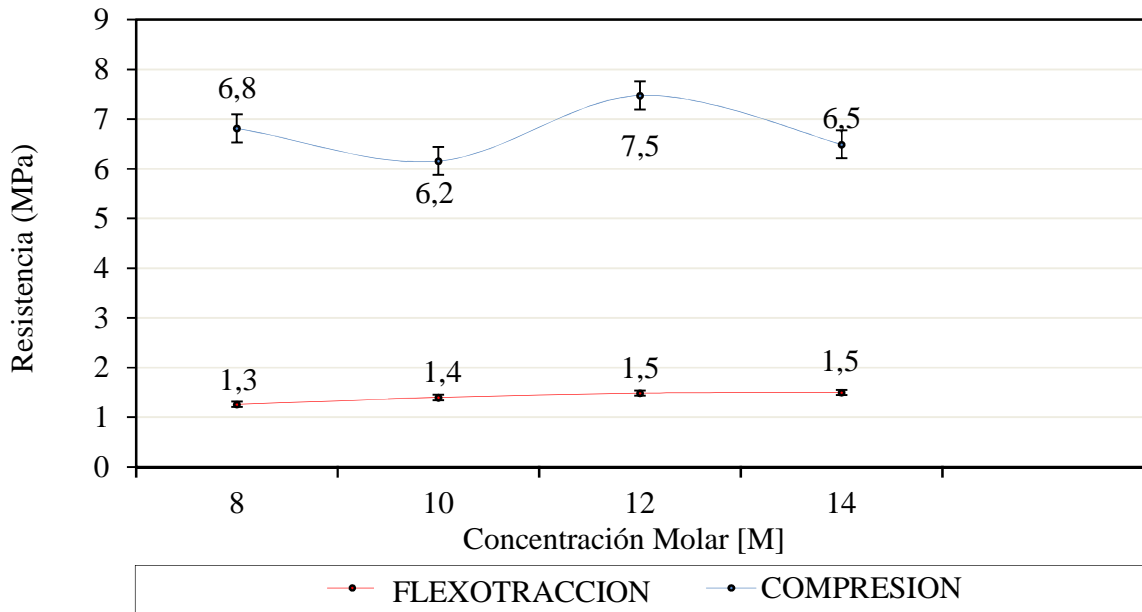
b) Resistencia mecánica.

A continuación, en la Tabla N°26 y Gráfico N°10 se muestran los resultados de las resistencias flexotracción y compresión de los morteros correspondientes a la serie concentración molar del activador:

Tabla 26: Resistencia mecánica para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.

Molaridad Solución	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
M8	1,3	6,8
M10	1,4	6,2
M12	1,5	7,5
M14	1,5	6,5

Gráfico 10: Resistencia mecánica para series influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.



5.1.6. Influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina, para mezcla PCV2.

Para una mezcla 75% ceniza volante y 25% de puzolana, se estudia la influencia de la variable composición de la solución alcalina. Se varía la razón silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en los morteros. Las razones que se utilizarán serán: 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 y 3,0. Para ello se

fabrican 5 morteros, los cuales varían sólo en las razones antes mencionadas y son curados en horno durante 24 horas, a una temperatura constante de 60°C y luego ensayados a 1 día, una hora después del desmolde.

Tabla 27: Razón Sol.silicato de sodio/Solución NaOH.

Series	Sol.silicato de sodio/Solución NaOH
Composición de Solución Alcalina	
R1	1,0
R2	1,5
R3	2,0
R4	2,5
R5	3,0

Se considera como constante la concentración molar del activador, equivalente a 14 M.

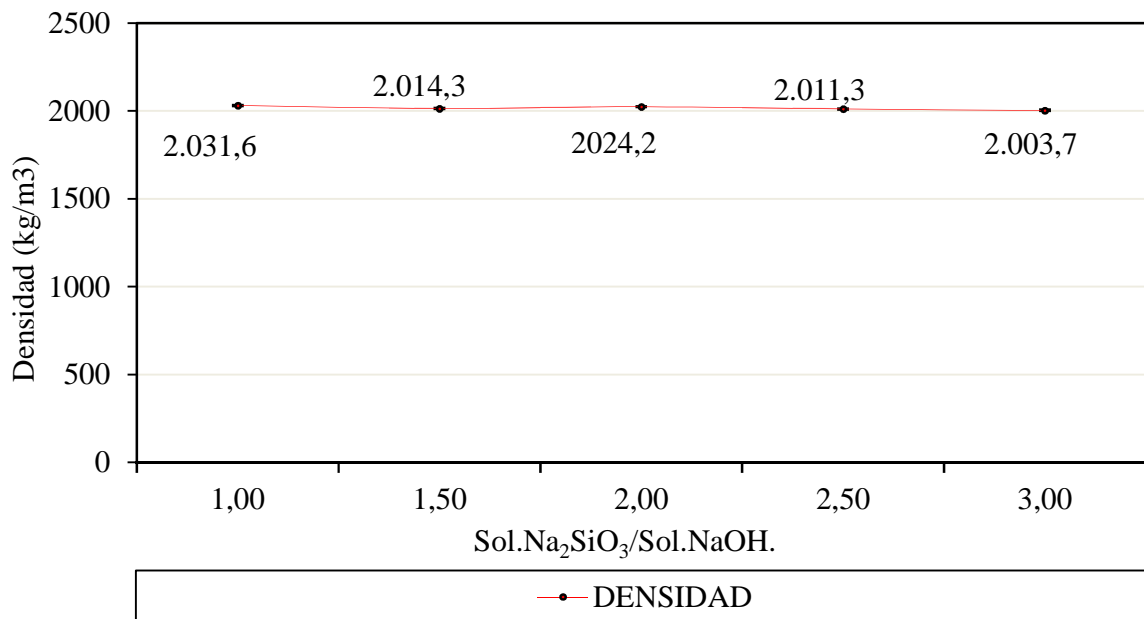
a) Densidad de mortero.

A continuación, en la tabla 28 y gráfico 11, se muestran los resultados de las densidades de los morteros con las distintas soluciones alcalinas:

Tabla 28: Densidad para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.

Serie	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
Composición Solución Alcalina		
R1	520,1	2031,6
R2	515,7	2014,3
R3	518,2	2024,2
R4	514,9	2011,3
R5	512,9	2003,7

Gráfico 11: Densidad para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.



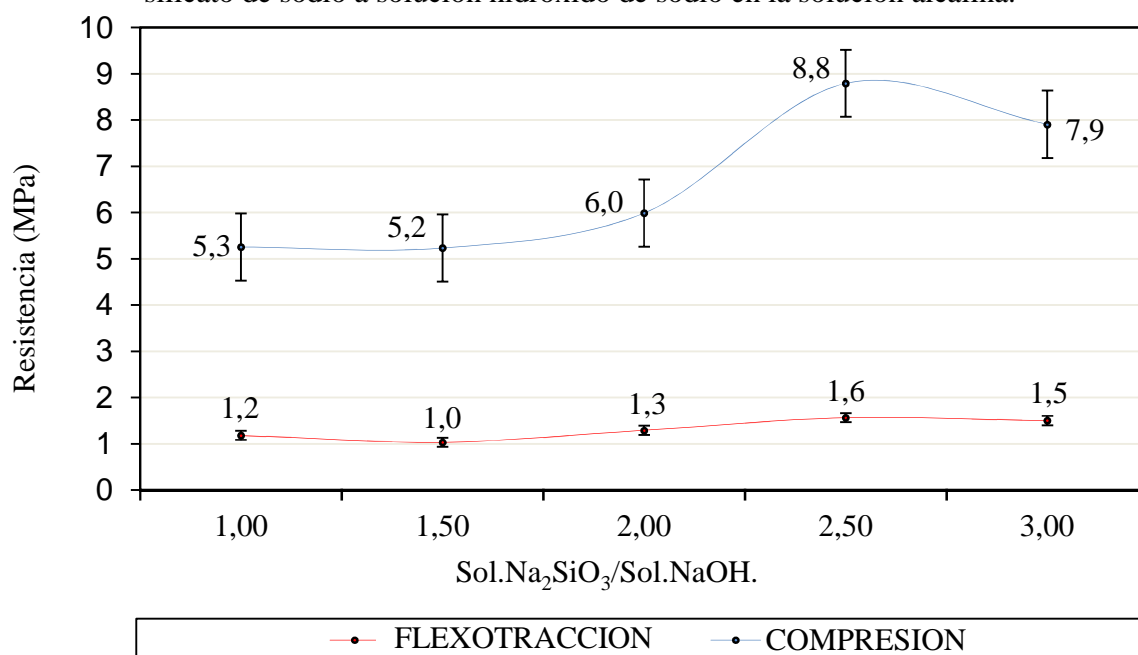
b) Resistencia mecánica.

A continuación, en la tabla 29 y gráfico 12, se muestran los resultados de las resistencias a flexotracción y compresión de los morteros en función de la composición de la solución alcalina y su gráfico respectivo:

Tabla 29: Resistencia mecánica para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.

Serie	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
R1	1,2	5,3
R2	1,0	5,2
R3	1,3	6,0
R4	1,6	8,8
R5	1,5	7,9

Gráfico 12: Resistencia mecánica para series influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.



5.1.7. Influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato, mezcla PCV2.

Para una mezcla 75% ceniza volante y 25% de puzolana, se determina como influye el tiempo de curado en horno. Se fabrican 4 morteros, los cuales varían solo en la razón solución alcalina y fuente de aluminosilicato. Son curados en horno durante un período de 72 horas y a una temperatura constante de 60°C. Luego de esto, se dejan enfriar por una hora antes del ensayo

Tabla 30: Parámetros constantes para series influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.

Sol. Na ₂ SiO ₃ /Sol. NaOH	Activador [NaOH]
1,50	14M

Tiempo de curado en Horno: 3 días

a) Densidad de mortero.

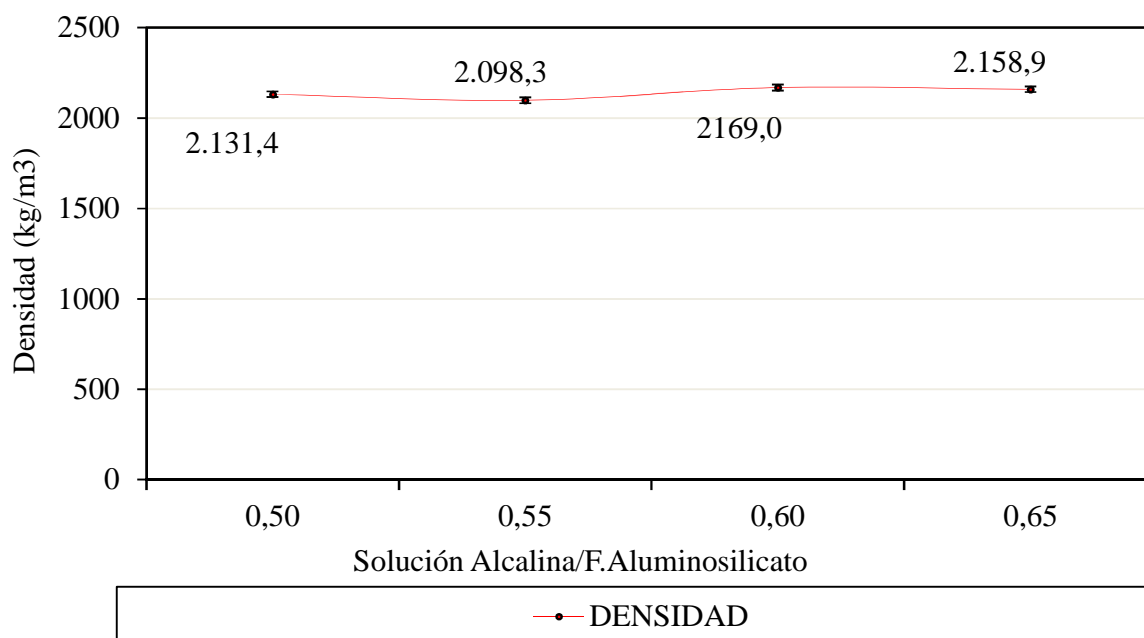
A continuación, en tabla 31 y gráfico 13 se presentan los valores registrados de densidad para los distintos morteros:

Tabla 31: Densidad de morteros para series influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.

Serie Tiempo de Curado en Horno	Solución Alcalina/F. Aluminosilicato	Masa mortero(g)	Densidad mortero (kg/m ³)
M1	0,50	545,6	2131,4
M2	0,55	537,2	2098,3
M3	0,60	555,3	2169,0
M4	0,65	552,7	2158,9

Tiempo de curado en Horno: 3 días

Gráfico 13: Densidad para curado en horno, a 3 días, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.



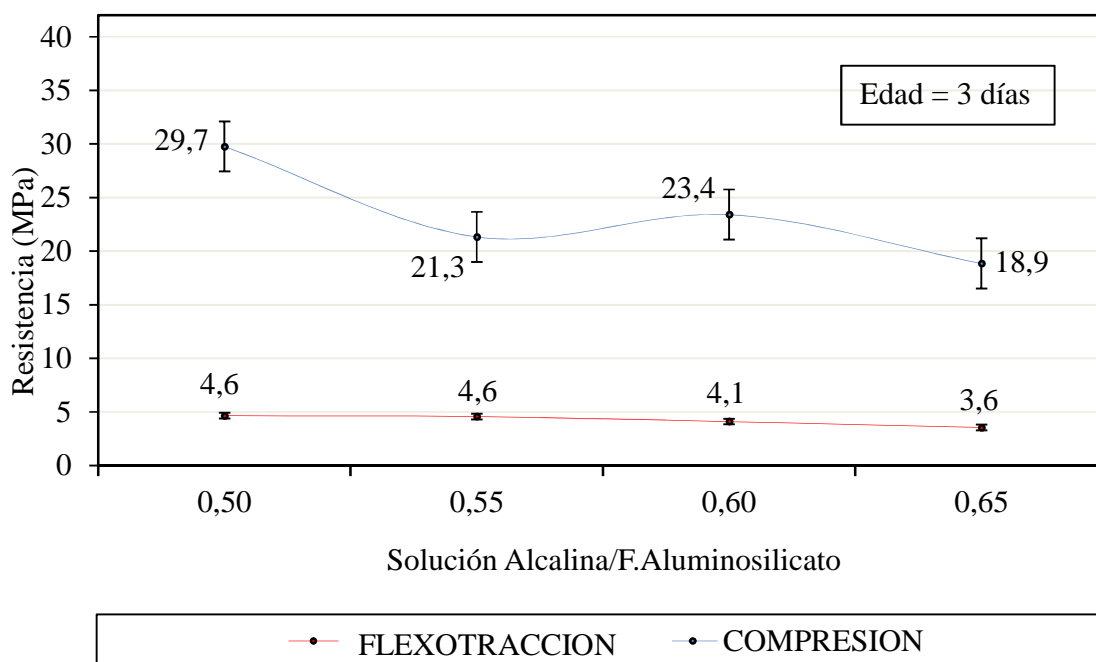
b) Resistencia mecánica.

Los valores registrados de resistencia a la compresión (RC) y flexotracción (RF), junto con su respectivo gráfico se muestran a continuación:

Tabla 32: Resistencia mecánica de morteros curados en horno, en función de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.

Serie Tiempo de Curado en Horno	SA/FA	RF (kg/m ³)	RC (kg/m ³)
M1	0,50	4,6	29,7
M2	0,55	4,6	21,3
M3	0,60	4,1	23,4
M4	0,65	3,6	18,9

Gráfico 14: Resistencias mecánicas para curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.



Estudio Experimental

A continuación, se estudia el porcentaje de ceniza volante necesario para elevar las resistencias mecánicas de la puzolana. Posteriormente se estudia la adición de ceniza volante y escorias de alto horno con el fin de aumentar las resistencias mecánicas.

5.2. Variación porcentual de ceniza volante y puzolana

Se realizan 15 mezclas con el fin de encontrar aquella combinación de puzolana/ceniza que logre niveles de resistencias adecuadas. Para ello, se adiciona la ceniza a la puzolana en porcentajes de 25%, 50% y 75% en peso. Los morteros son curados en horno durante las primeras 24 horas, a una temperatura de 60°C, y luego de ser desmoldados, son pesados y ensayados previa hora de enfriamiento por exposición al aire.

Tabla 33: Parámetros constantes para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.

Sol.Alcalina/F.Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Molaridad NaOH
0,6	1,5	14M

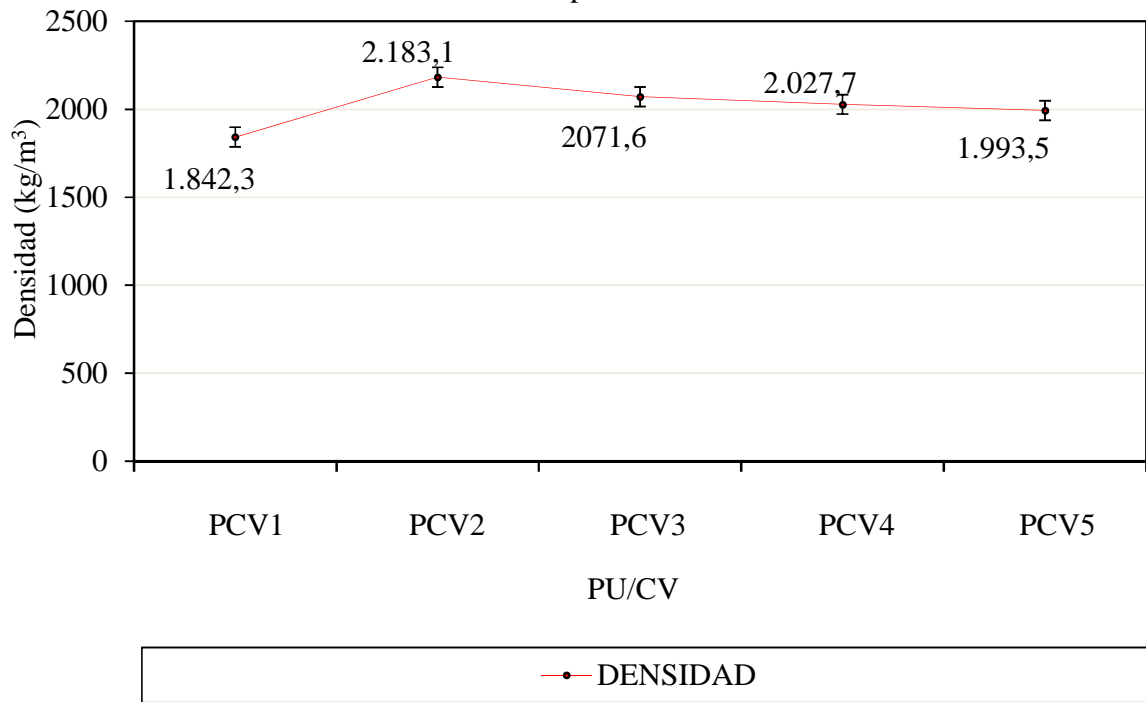
a) Densidad de mortero.

Las densidades obtenidas para las distintas mezclas elaboradas compactadas mediante apisonado se presentan en la tabla 34 y gráfico 15:

Tabla 34: Densidad para distintas mezclas ceniza volante/puzolana.

Serie Mezcla	Composición	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
PCV1	CV: 100% - PU:0%	471,6	1842,3
PCV2	CV: 75% - PU:25%	558,9	2183,1
PCV3	CV: 50% - PU:50%	530,3	2071,6
PCV4	CV: 25% - PU:75%	519,1	2027,7
PCV5	CV: 0% - PU:100%	510,3	1993,5

Gráfico 15: Densidad para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.

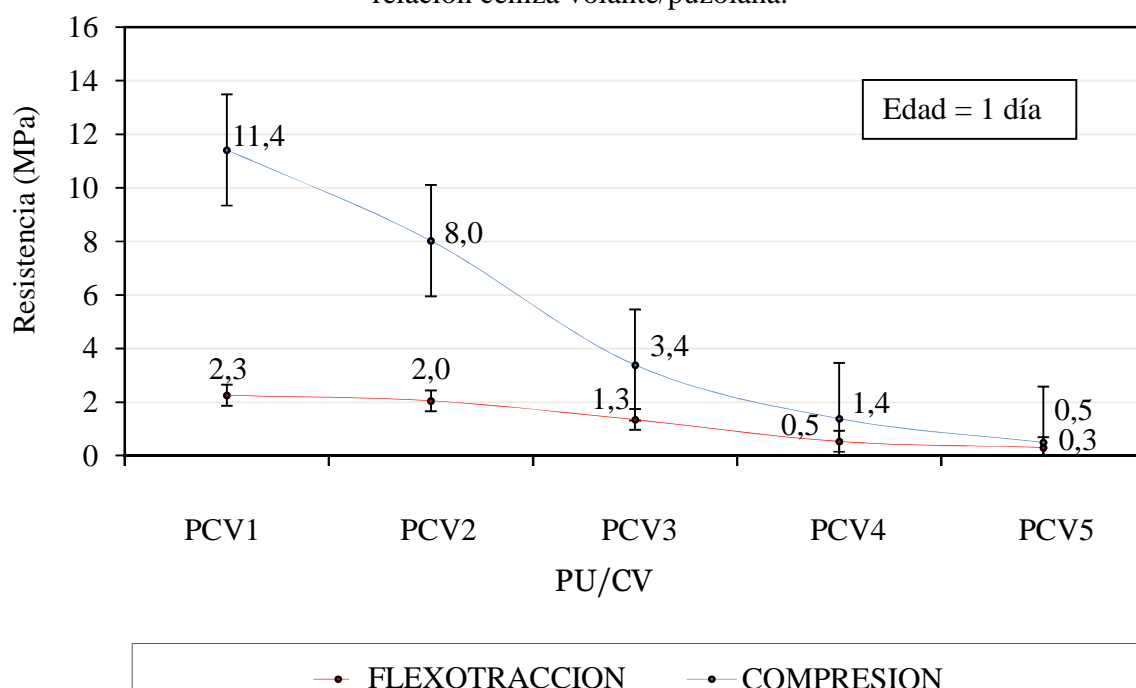


b) Resistencia mecánica.

Tabla 35: Resistencia mecánica para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.

Serie Mezcla	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
PCV1	2,3	11,4
PCV2	2,1	8,0
PCV3	1,3	3,4
PCV4	0,5	1,4
PCV5	0,3	0,5

Gráfico 16: Resistencia mecánica para la serie de ensayos de morteros con variación de la relación ceniza volante/puzolana.



5.3. Comportamiento mecánico de morteros geopoliméricos con diversas composiciones de fuentes de aluminosilicato.

5.3.1. Mortero en base a la mezcla de puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, serie PCV2.

Para los morteros con composición porcentual de 25% puzolana y 75% ceniza volante, se analiza cómo influye el curado al aire, posterior al curado inicial en horno, a temperatura de 60°C y durante 24 horas. Las muestras se ensayan a 1, 7 y 14 días.

Tabla 36: Parámetros constantes para la serie de ensayos PCV2.

Sol.Alcalina/F.Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Molaridad NaOH
0,5	1,50	14M

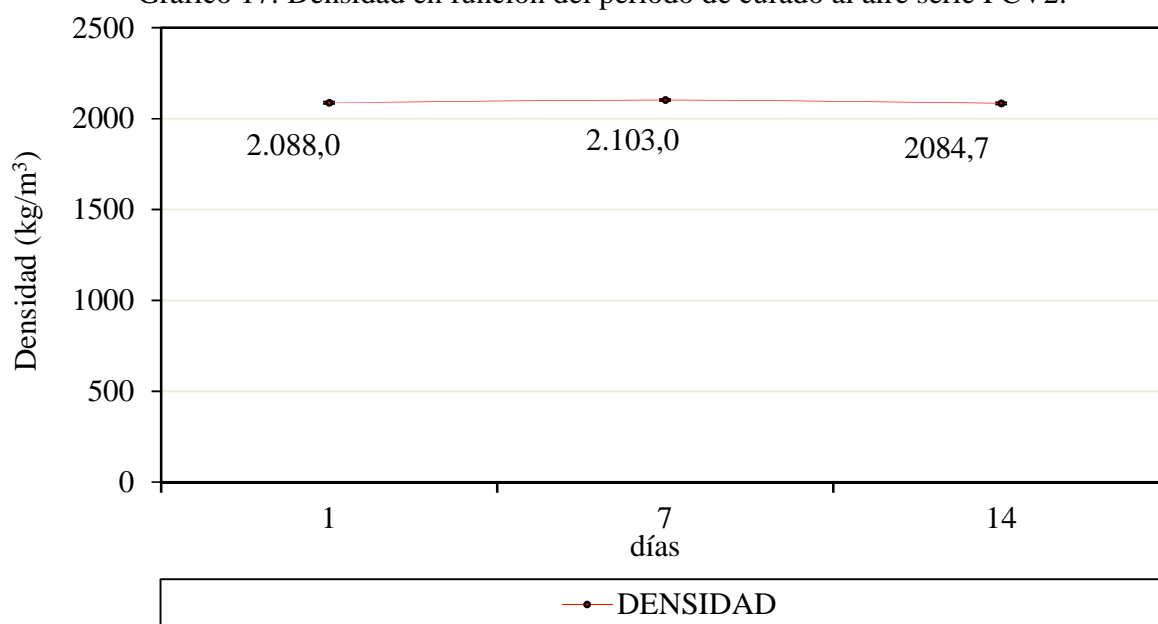
a) Densidad de mortero.

Los resultados obtenidos y su respectivo gráfico se presentan a continuación:

Tabla 37: Densidad en función del período de curado al aire Serie PCV2.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa mortero (g)	Densidad mortero (kg/m ³)
PCV2	1	534,5	2088,0
	7	538,4	2103,0
	14	533,7	2084,7

Gráfico 17: Densidad en función del período de curado al aire serie PCV2.



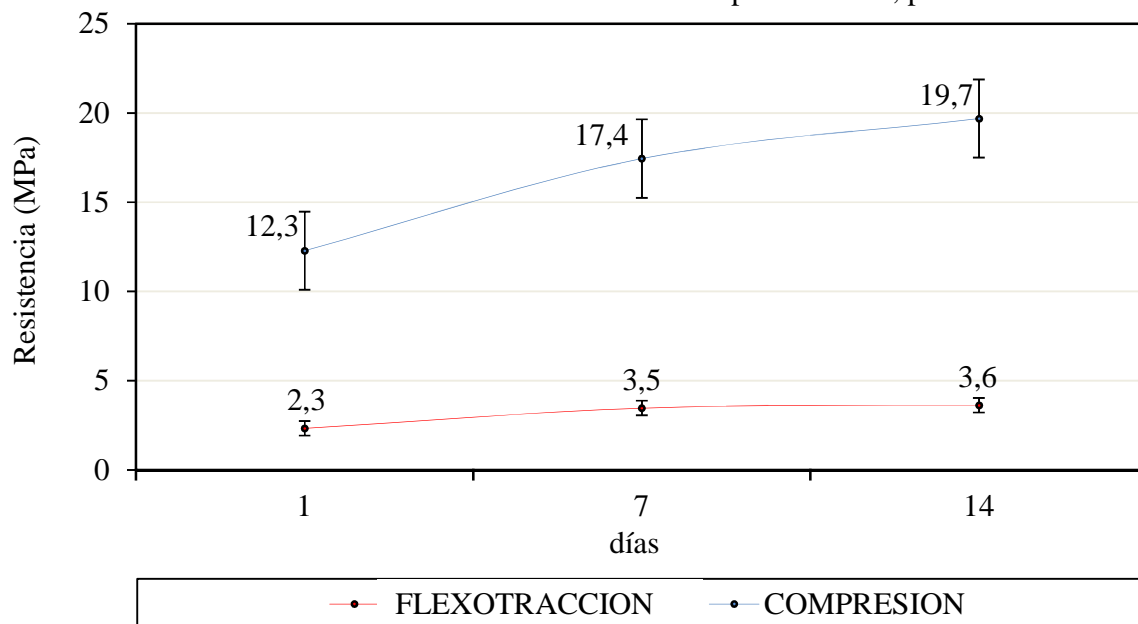
b) Resistencia mecánica.

Las resistencias a flexotracción y compresión, en función del tiempo de curado al aire serie PCV2:

Tabla 38: Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PCV2.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
PCV2	1	2,3	12,3
	7	3,5	17,5
	14	3,6	19,7

Gráfico 18: Resistencias mecánicas en función del tiempo de curado, para serie PCV2.



5.3.2. Mortero en base a mezclas escoria de alto horno Huachipato (escoria 2) y puzolana, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Se estudia la incidencia del tiempo de curado al aire en las propiedades mecánicas para los morteros elaborados con escoria de alto horno proporcionada por Huachipato (escoria 2) y puzolana, en proporciones 75/25, 50/50 y 25/75. Se utiliza como activador solución alcalina en proporción 0.65/1.

Los ensayos son realizados a 1, 14 y 28 días, siendo curadas inicialmente las muestras en horno durante 24 horas.

Las etiquetas PE₂², PE₂³ y PE₂⁴, corresponden a las razones entre puzolana y escoria 2 de: 25/75, 50/50 y 75/25, respectivamente.

Tabla 39: Parámetros constantes para los morteros de las series PE₂.

Sol.Alcalina/F. Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Activador [NaOH]
0,65	2,00	14M

a) Densidad de mortero.

Tabla 40: Densidad en función del curado al aire, serie PE₂².

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa colada (g)	Densidad compactada (kg/m ³)
PE ₂ ²	1	532,7	2080,9
	14	568,0	2218,8
	28	548,7	2143,5

Tabla 41: Densidad en función del curado al aire, serie PE₂³.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa colada (g)	Densidad compactada (kg/m ³)
PE ₂ ³	1	548,4	2142,4
	14	549,2	2145,2
	28	548,7	2143,2

Tabla 42: Densidad en función del curado al aire, serie PE₂⁴.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa colada (g)	Densidad compactada (kg/m ³)
PE ₂ ⁴	1	547,7	2139,3
	14	548,3	2141,9
	28	537,3	2098,9

b) Resistencia mecánica.

La resistencia mecánica alcanzada por los morteros con escoria de Huachipato, por los distintos períodos de curado al aire, variando la concentración puzolana/escoria, se presentan en las tablas N° 43, 44 y 45 y en Gráficos N°19 y 20 en función del tiempo de curado en cámara seca.

Tabla 43: Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PE₂².

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
PE ₂ ²	1	3,7	32,1
	14	5,0	43,1
	28	4,7	54,8

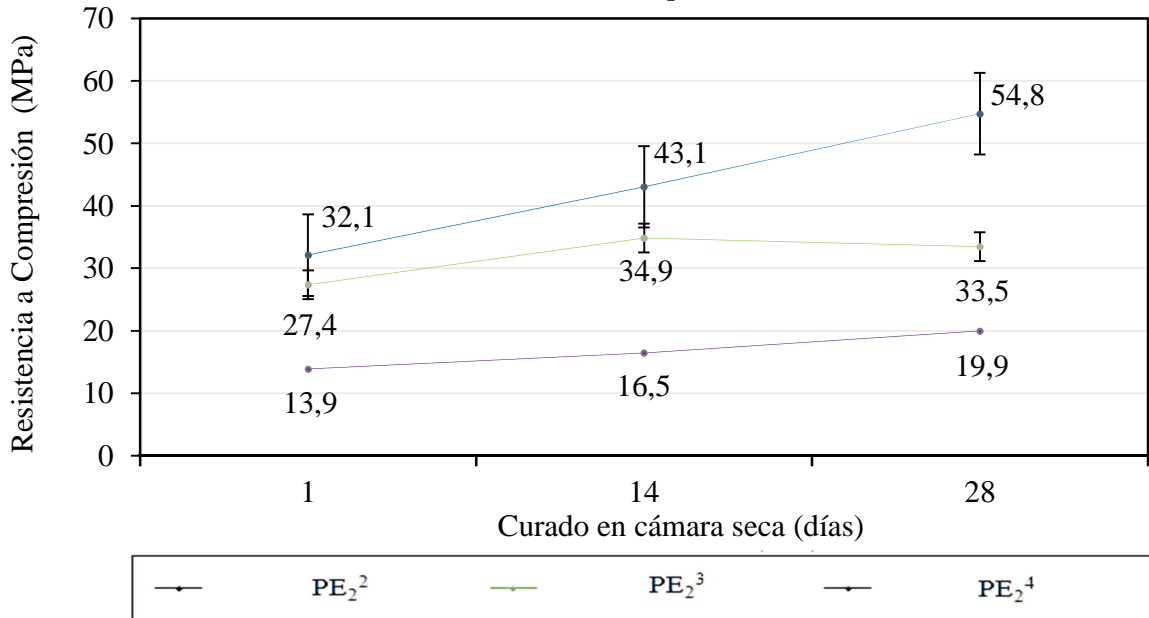
Tabla 44: Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PE₂³.

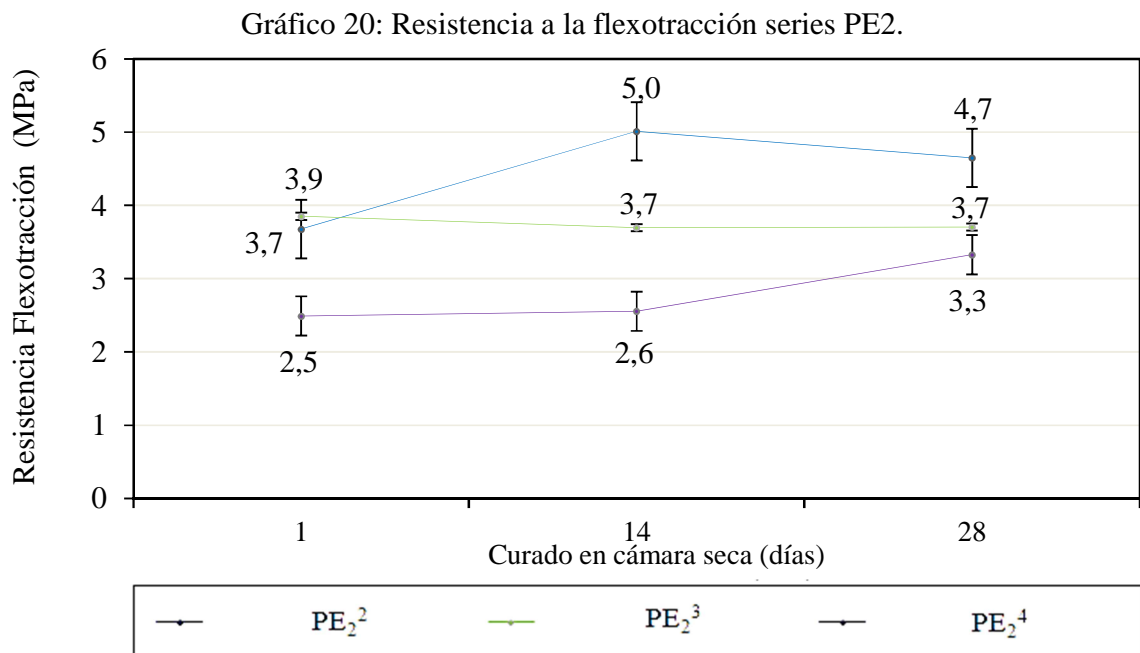
Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
PE ₂ ³	1	3,9	27,4
	14	3,7	34,9
	28	3,7	33,5

Tabla 45: Resistencia mecánica en función del período de curado al aire, serie PE₂⁴.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
PE ₂ ⁴	1	2,5	13,9
	14	2,6	16,5
	28	3,3	19,9

Gráfico 19: Resistencia a la compresión series PE₂.





5.3.3. Comportamiento de morteros con diversas composiciones de aluminosilicatos utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Se estudia la influencia del curado al aire, previo tratamiento de curado en horno durante 24 horas y a temperatura de 60°C para las diversas fuentes de aluminosilicato en estudio. Las fuentes de aluminosilicatos a considerar son: puzolana pura, ceniza volante pura, 75% ceniza volante y 25% puzolana (PCV2) y escoria proporcionada por Melón (escoria 1), cuyo porcentaje en la fuente de aluminosilicato corresponde a 75% escoria y 25% puzolana. Todos estos morteros son fabricados manteniendo fijos los parámetros de la mezcla de la Tabla 46, por lo que sólo varía la fuente de aluminosilicato a utilizar. Las muestras son ensayadas después de 1, 14 y 28 días de almacenamiento en la cámara seca y del tratamiento por 24 horas en horno a 60°C.

Tabla 46: Parámetros constantes para la elaboración de las mezclas con diversas composiciones de Aluminosilicatos utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Sol.Alcalina/Aluminosilicato	Sol.Na ₂ SiO ₃ /Sol.NaOH	Activador [NaOH]
0,65	2,00	14M

a) Densidad de mortero.

En las tablas 47, 48, 49 y 50, se presentan los valores de densidades de morteros compactados:

Tabla 47: Densidad de morteros para las series con puzolana pura.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa colada (g)	Densidad compactada (kg/m ³)
PU	1	525,5	2052,6
	14	527,9	2061,9
	28	524,2	2047,8

Tabla 48: Densidad de morteros para las series con ceniza volante pura.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa colada(g)	Densidad compactada (kg/m ³)
CV	1	551,1	2152,9
	14	554,2	2164,7
	28	544,9	2128,5

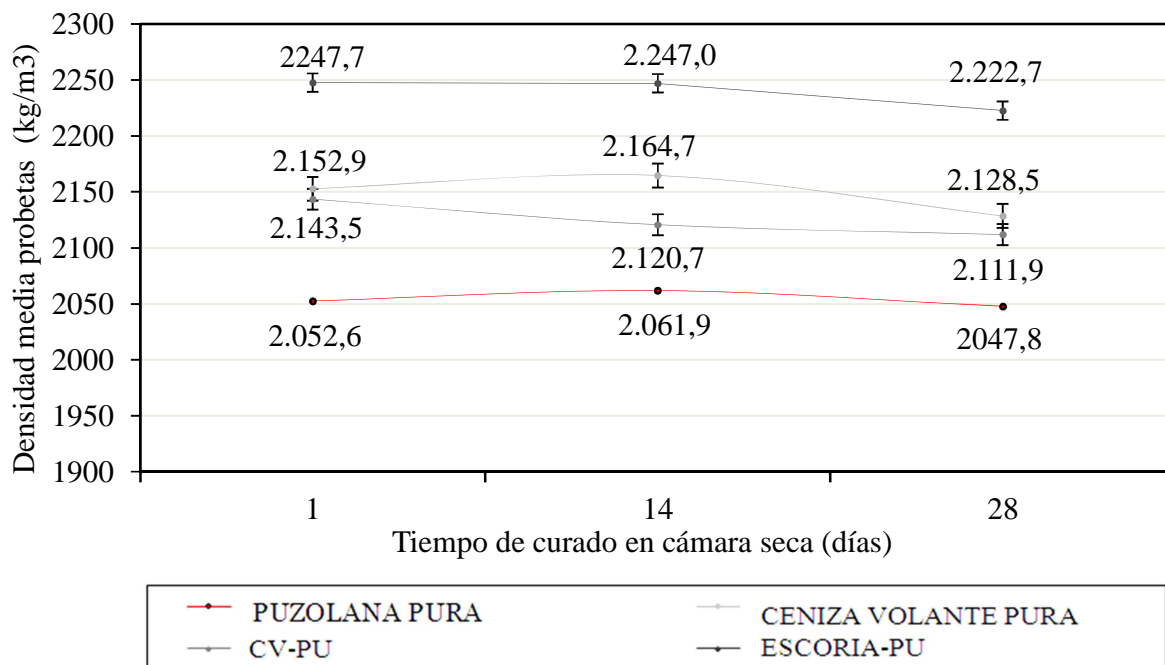
Tabla 49: Densidades para las series con cenizavolante/puzolana=75/25.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa colada (g)	Densidad compactada (kg/m ³)
CV/PU 75/25	1	548,7	2143,5
	14	542,9	2120,7
	28	540,7	2111,9

Tabla 50: Densidades para las series con escoria1/puzolana=75/25.

Serie	Tiempo de Curado en cámara seca (días)	Masa colada(g)	Densidad compactada (kg/m ³)
ESC/PU 75/25	1	575,4	2247,7
	14	575,2	2247,0
	28	569,0	2222,7

Gráfico 21: Densidad de morteros (probetas compactadas) las diversas fuentes de aluminosilicato en estudio.



b) Resistencia mecánica.

Las resistencias alcanzadas para los distintos períodos de curado son los que se presentan en Tablas 51, 52, 53 y 54 y en gráficos 22 y 23.

Tabla 51: Resistencia mecánica de morteros para puzolana pura.

Serie	Tiempo de curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
PU	1	0,0	0,0
	14	0,4	1,1
	28	0,6	1,9

Tabla 52: Resistencia mecánica de morteros para ceniza volante pura.

Serie	Tiempo de curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
CV	1	1,8	7,7
	14	3,9	17,2
	28	5,0	24,0

Tabla 53: Resistencia mecánica de morteros para 75% ceniza volante y 25% puzolana.

Serie	Tiempo de curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
CV/PU 75/25	1	1,9	7,0
	14	3,2	12,9
	28	4,0	17,2

Tabla 54: Resistencia mecánica de morteros para 75% escoria 1 y 25% puzolana.

Serie	Tiempo de curado en cámara seca (días)	Resistencia flexotracción (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
ESC/PU 75/25	1	4,8	45,7
	14	5,1	53,3
	28	4,9	55,9

Gráfico 22: Resistencias de mortero a la flexotracción para las diversas fuentes de aluminosilicato.

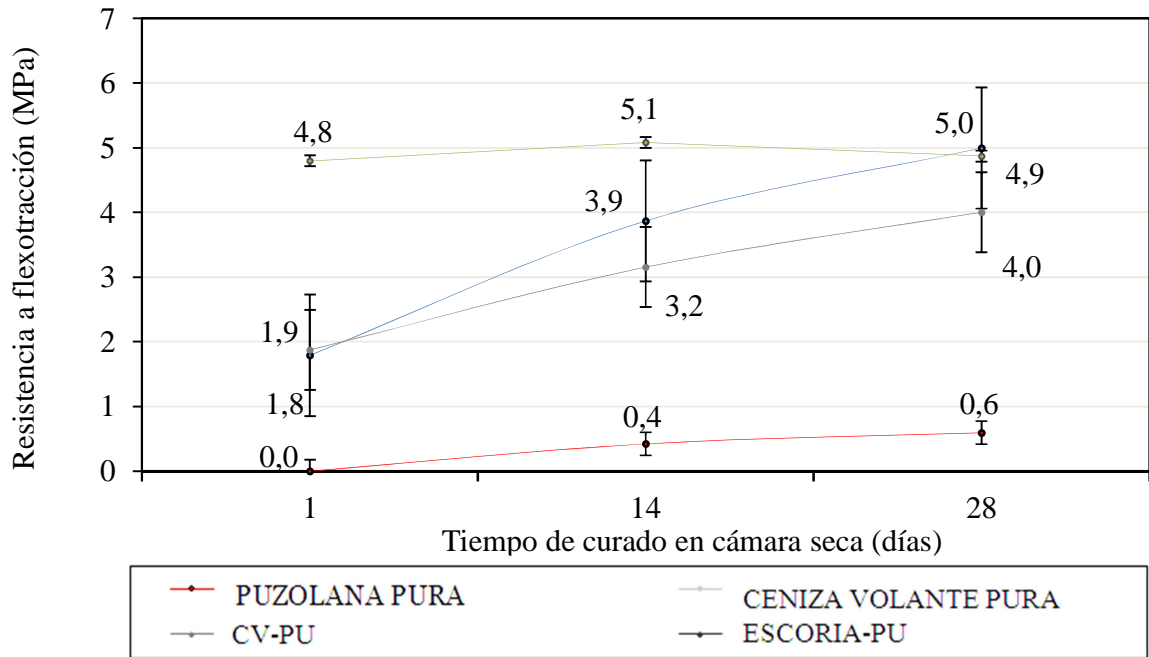
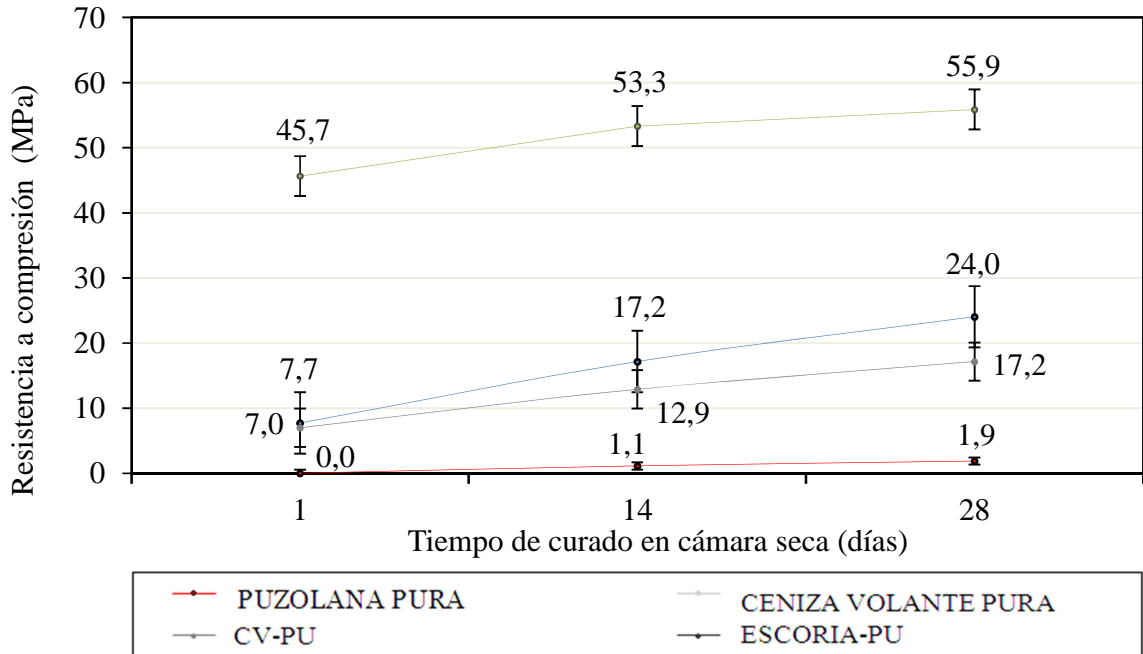


Gráfico 23: Resistencias a la compresión para diversas fuentes de aluminosilicato.



Capítulo 6

Análisis de resultados

6.1. Variación Porcentual de ceniza volante y puzolana

De acuerdo a los resultados experimentales, se observa que la puzolana sola, como fuente de aluminosilicato, no logra ser activada significativamente para obtener morteros con propiedades mecánicas satisfactorias. Es por eso que se adicionan proporciones de ceniza volante, para aumentar su resistencia mecánica. De acuerdo a esto, a medida que la proporción de ceniza volante aumenta, la resistencia también se incrementa, alcanzando resistencias a un día de 11,4 MPa en ensayo Compresión y de 2,2 MPa para ensayo a flexotracción.

Esto ocurre debido al menor contenido de alúmina en la puzolana. De acuerdo a la composición química, se tiene que la puzolana Pudahuel tiene una razón $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ igual a 5.3, muy por encima del valor preferencial para la geopolimerización. Debido a esto, las resistencias para un 100% de puzolana son muy bajas. En consecuencia, para obtener un grado de resistencia considerable es necesario agregar a la fuente de aluminosilicatos una cierta cantidad de alúmina, para lo cual se adiciona ceniza volante, el cual posee una razón $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ del orden de 2,0.

La densidad obtenida al compactar las probetas de laboratorio, presenta un comportamiento constante en la mayoría de los ensayos, mostrando una variación del 8,7% en relación al valor promedio.

Durante la fabricación de morteros de puzolana pura, existe dificultad para tratar la mezcla, esto debido a que se hace muy seca y por lo mismo, difícil de compactar.

En relación a los puntos descritos anteriormente, se escoge la composición 25% puzolana y 75% ceniza volante, como mezcla de interés para el presente estudio.

6.2. Comportamiento mecánico de morteros geopoliméricos con diversas composiciones de fuentes de aluminosilicato.

Lograr aumentar la resistencia mecánica utilizando como fuente principal la puzolana, lleva a probar la adición en proporciones diferentes de otras fuentes de aluminosilicato: ceniza volante y escoria, y así lograr aumentar la resistencia de la mezcla geopolimérica.

6.2.1. Mortero en base a la mezcla de puzolana/ ceniza volante y solución alcalina 1.

Se observa de los gráficos que la resistencia a la compresión y a la flexotracción, que para una temperatura de curado en horno de 60°C, a medida que los días de curado de las probetas aumentan, la resistencia aumenta. En particular, a ensayos a un día, se alcanza el 60% de la resistencia alcanzada a los 14 días.

La densidad se mantiene en promedio en 2080 kg/m³, con variaciones no más allá del 1,5%. Esto pues se trata de la misma mezcla, en las mismas condiciones de fabricación.

6.2.2. Mortero en base a mezclas escoria de alto horno (Escoria 2) y puzolana, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

De acuerdo a los resultados obtenidos, existe un aumento en las resistencias mecánicas. En promedio, las resistencias alcanzadas a compresión a 1 día en horno a 60°C, logran el 70% de la resistencia final. A los 28 días, los morteros geopoliméricos con mayor razón puzolana/escoria: 75/25, alcanzan resistencias mecánicas a la compresión de 20 MPa. Si la razón puzolana/escoria es 50/50 se logra una resistencia 34 MPa y si la razón puzolana/escoria es 25/75 se alcanzan resistencias de 55 MPa. Para resistencia a la flexotracción a 1 día se logra, en promedio, el 75% de la resistencia final. A mayor proporción de puzolana natural, se tendrá una menor resistencia. Razones puzolana/escoria 75/25 logran 3.33MPa, 50/50 alcanza 4 MPa y 25/75 alcanzan 5 MPa a los 28 días.

Una variante importante a considerar al momento de la elección de escoria, es su contenido de CaO. Si este valor es muy alto, implica que el tiempo de fraguado será menor. A mayor porcentaje de contenido de escoria en la fuente mixta de aluminosilicato, la mezcla se hará menos trabajable y habrá menor compactación de la mezcla.

6.2.3. Comportamiento de morteros con diversas composiciones de Aluminosilicatos utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Los ensayos realizados, indican que la fuente de aluminosilicato escoria granulada de Alto Horno de Melón, alcanza aproximadamente el 80% de su resistencia final a un día de curado en horno.

El resto de las fuentes aumentan progresivamente su resistencia, no alcanzando valores superiores a los 25 MPa a los 28 días. En particular, la resistencia alcanzada para geopolímeros en base a escoria de alto horno, es la que registra el valor mayor con resistencia a compresión a 1 día de aproximadamente 46 MPa, alcanzando un valor de 56 MPa a los 28 días. La puzolana, es el material que posee menor cantidad de alúmina, además de tener una razón $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 5.3, el mayor de todos los índices. La ceniza volante tiene una razón 2.1, y la escoria 1 una razón 2.0. El contenido de CaO presente en la fuente de aluminosilicato también es mayor para la escoria, y menor para la puzolana natural. Se concluye que el contenido de CaO así como la razón $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ influyen directamente en la resistencia alcanzada utilizando las diversas fuentes de aluminosilicato. Valores mayores de CaO, causan mayores resistencias tempranas, y valores mayores de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ por sobre 2.0 causan una disminución en la resistencia. El CaO, tal como ocurre en el cemento, favorece la resistencia, sin embargo, provoca que fragüe rápidamente. Esto impacta directamente en la trabajabilidad de la mezcla: a mayor contenido de CaO, el fraguado por efecto de su hidratación será más rápido y por ende disminuirá la trabajabilidad de la mezcla.

Por otra parte, los morteros fabricados únicamente en base a puzolana natural, como agente puro, presentan resistencias mecánicas muy bajas. Para mejorar dicha situación, se adiciona alúmina, a través de diversas fuentes de aluminosilicato: ceniza volante y escoria, para lograr así disminuir la razón $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. En ambos casos, la resistencia aumenta, sin embargo, si se adiciona ceniza volante, esta debe ser en una proporción mayor: 75%.

Las resistencias alcanzadas a los 28 días para las distintas mezclas de aluminosilicatos estudiados se puede comparar en la tabla 55:

Tabla 55. Resistencias de diversas fuentes de aluminosilicatos a 28 días.

Fuente de Aluminosilicato	Resistencia Flexotracción MPa	Resistencia Compresión MPa
Puzolana pura	0,6	1,9
Ceniza Volante pura	5,0	24,0
75% Escoria 1 y 25% puzolana	4,9	55,9

6.3. Influencia de las variables relacionadas con la composición de la solución alcalina y con el método de elaboración de los morteros geopoliméricos.

6.3.1. Influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.

Un factor importante al momento de elaborar las mezclas de geopolímeros, es la trabajabilidad de la mezcla, pues incide directamente en la energía de compactación requerida. Si una muestra está mal compactada, tendrá como consecuencia mayor porosidad y alta variabilidad de propiedades,

y muestras con niveles altos de aire atrapado al interior de la probetas. Una manera de poder controlar la trabajabilidad, es mediante la elección de la solución de silicato de sodio.

De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos anteriormente, se observa un comportamiento similar en las resistencias de los morteros de geopolímero. No obstante, al existir variación en la viscosidad de la solución de silicato de sodio, manteniendo relativamente constante los valores de composición química de la solución. Se obtienen resistencias que no van más allá del 17% en relación con el valor promedio para las resistencias a la flexotracción y de un 3% aproximadamente para resistencias a la compresión. Por otra parte, la trabajabilidad también se relaciona directamente con la viscosidad de la solución de silicato de sodio. De acuerdo a la experiencia en laboratorio, un mayor valor en viscosidad, dificulta el movimiento entre partículas, lo que hace menos trabajable la mezcla. Combinando los parámetros de trabajabilidad y viscosidad, se considera para los ensayos una viscosidad de 400 cps como la más adecuada.

Para esas condiciones, las densidades no varían más allá del 0,05%, por lo que no se ve afectada la densidad de la mezcla.

Las mezclas para viscosidades de la solución de silicato de sodio de 900 cps, son más difíciles de compactar, pues como se señaló, las partículas se mueven más lentamente entre sí. Al estar menos compacta, por ende, se alcanzan resistencias menores.

6.3.2. Influencia del contenido del agua extra en la mezcla PCV2.

Para ajustar la trabajabilidad de las mezclas se utiliza la adición de agua. De acuerdo a las gráficas, existe un punto óptimo, el cual combina trabajabilidad y resistencia. Una cantidad de 30 g de agua, presenta menor resistencia que aquella obtenida mediante la adición de 40 g, el cual se escoge como el punto óptimo para el estudio presente. Esto se debe a que la mezcla al ser más seca, provoca una disminución en la trabajabilidad y una menor compactación. Mientras más seca sea la mezcla, se tendrán más espacios de aire dentro de la probeta, y por lo tanto, menor resistencia. Esto se puede observar en el gráfico de densidad, en el cual efectivamente, la densidad de la muestra es menor si la cantidad de agua es mayor e igual a 50 g, y a una cantidad menor igual a 30 g también se tiene una resistencia menor. Si se adiciona 50 g, la resistencia también será menor al óptimo, pues a pesar que aumenta la trabajabilidad del mortero, es mayor la cantidad de agua que debe ser evaporada durante el curado en horno. Este comportamiento se da tanto en las resistencia a la compresión como a la flexotracción.

6.3.3. Influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

De las series se observa que a una temperatura de 80°C se alcanzan resistencias de 18.5 MPa a la compresión y 3,3 MPa a la flexotracción, a ensayos a 1 día, siendo estos mayores que aquellos alcanzados a temperatura de 40°C. A mayores temperaturas de curado se obtienen mayores resistencias mecánicas tanto a la flexotracción como a la compresión, por lo que la temperatura de curado inicial en horno favorece el proceso de geopolimerización: la temperatura incide en el

desarrollo de la matriz geopolimérica. Se propone como estudio analizar el efecto del tiempo de curado al aire luego de un precurado en horno a diferentes temperaturas para determinar si este proceso es un aceleramiento o bien las resistencias logran crecer a los 28 días a temperaturas mayores así como también analizar el efecto de la temperatura en la formación de grietas para mortero.

6.3.4. Influencia de la variación en la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato.

De acuerdo al gráfico de resistencias para la mezcla puzolana/ceniza volante, a una razón de 0.4, se tiene una resistencia a la compresión de 4.3 MPa, y para una razón de 0.45 una resistencia de 11,1 MPa a compresión. Esto se debe a que la muestra era difícil de compactar a la razón de 0,4, por lo que no es recomendable trabajar bajo razones de 0,45 ya que la mezcla geopolimérica se hace menos trabajable. La resistencia a la Compresión alcanza un peak dentro del rango 0.45 a 0.5, con una resistencia promedio entre ambos puntos de 11,3 MPa. A medida que la razón aumenta, la resistencia disminuye. Esto pues si la razón es mayor, mayor es la cantidad de solución, y por ende, se tendrá más agua libre en la red geopolimérica. Esta agua se evapora durante el proceso de curado, por lo que al aumentar la solución alcalina, habrá más agua que evaporar, causando mayor cantidad de poros internos dentro del geopolímero, provocando un debilitamiento de la estructura. Este suceso causa menores resistencias mecánicas.

6.3.5. Influencia de la variación de concentración molar del activador serie PCV2.

Los resultados que se obtienen variando la concentración de la solución del activador NaOH, indican que el valor óptimo se encuentra a una concentración molar de 12M. Los valores de resistencia a la compresión aumentan conforme aumenta la concentración molar, tendiendo a dicho valor pasado los 12 M. Sin embargo, en flexotracción, existe dispersión en las resistencias obtenidas en las diferentes mezclas. Esto se debe a que el material tiende a ser sensible a ensayos a un día para este tipo de combinación de fuente aluminosilicato. Se infiere por tanto, que a 12 Molar, se disuelve la mayor cantidad de fuente de aluminosilicato dentro del rango a considerar, pues las resistencias son similares a una concentración molar mayor. Una menor concentración molar, conlleva a una menor disolución de la fuente de aluminosilicato, y por ende, se rompen menos enlaces y así la resistencia alcanzada será menor.

En la concentración de la solución de NaOH, tiene un efecto menor la densidad de los morteros con una variación de no más de 2,3%.

6.3.6. Influencia de la variación de la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.

De acuerdo a las gráficas, la resistencia a la flexotracción aumenta de acuerdo crece la razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio. Sin embargo, en la resistencia a la compresión, se observa un peak en la resistencia, cuando esta razón es igual a 2.5 alcanzando un valor de resistencia mecánica equivalente a los 8.8 MPa a un día. De acuerdo a esto, el encargado de dar rigidez a la matriz geopolimérica es la solución de silicato de sodio, pues las resistencias a

flexotracción y a compresión son mayores cuando dicha razón aumenta. La solución de hidróxido de sodio sería la responsable de romper los enlaces de la fuente de aluminosilicato.

La razón solución silicato de sodio/ solución NaOH no influye significativamente en las densidades de los morteros estudiados.

6.3.7. Influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de solución alcalina/fuente de aluminosilicato.

De acuerdo a los valores de resistencia mecánica obtenidas, se observa que si el curado inicial en horno es equivalente a 72 horas, la resistencia es superior a aquella desarrollada durante un período de 24 horas. Se infiere por tanto, que el proceso de geopolimerización se ve favorecido por el tiempo de curado inicial en horno. Por otra parte, a medida que aumenta la razón Solución alcalina/fuente de aluminosilicato, al tercer día de curado en horno, se muestra un aumento significativo en relación con aquel obtenido durante un día de curado en horno. Se mantiene la tendencia de un valor máximo de resistencia mecánica tanto a la flexotracción como a la compresión a la razón 0.5. Se concluye, por tanto, que el tiempo de curado inicial aumenta la resistencia de la mezcla geopolimérica y no modifica su comportamiento bajo variación de razones solución alcalina/fuente de aluminosilicato.

Las densidades no presentan variación superior a 3,0%.

7. Conclusiones y Comentarios Finales

A partir de lo observado en los estudios realizados a lo largo de este trabajo de título se concluye que la geopolimerización depende de la composición mineralógica y de la relación sílice/alúmina de la fuente de aluminosilicato utilizada.

Por otro lado, se observa que la puzolana como fuente de aluminosilicato pura no es posible de activar. Esto debido a su bajo contenido de alúmina. Es necesario, por tanto, adicionar alúmina de manera que la razón $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ disminuya a valores cercanos a 2.0.

Los resultados muestran que una mezcla mixta: puzolana – ceniza volante, o puzolana – escoria, aumentan el contenido de alúmina, mejorando así la resistencia mecánica de los morteros geopoliméricos que se obtienen. La adición de escoria entrega resistencias mayores tanto en la flexotracción como en la compresión, siendo esta mayor que aquella obtenida por adición de ceniza volante.

Asimismo, para una razón puzolana/ceniza volante 25/75, se tiene que a razón solución alcalina/fuente de aluminosilicato de 0.5, concentración molar 14 M y solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio igual a 2.5, se alcanza una resistencia a la compresión de 8,8 MPa y de 1.5 MPa a la flexotracción, para ensayos a 1 día.

Además, los gráficos revelan que para un mortero geopolimérico en proporción puzolana/escoria 75/25, razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio igual a 2.0, contenido de árido del 70%, concentración solución hidróxido de sodio 14 M, y solución alcalina/fuente de aluminosilicato igual a 0.65, alcanza resistencias a la compresión de 20 MPa y de 3,33 MPa para resistencia a la flexotracción, a los 28 días de edad.

Se obtiene que la variación de procedencia de escoria de alto horno empleada, no altera significativamente el nivel de resistencia final a los 28 días, sirviendo ambas para este tipo de mortero geopolimérico. Sin embargo, aquella con mayor porcentaje de CaO, resulta menos trabajable, pues su fraguado es más rápido.

A su vez, se observa que una viscosidad menor de 400 cps para la solución de silicato de sodio, implica una mayor trabajabilidad de la mezcla así como de resistencia, que una con la misma composición química, pero con un valor mayor de viscosidad: 900 cps.

Se concluye que en promedio, los geopolímeros obtenidos a partir de diversas mezclas de fuentes de aluminosilicatos que incluyen la puzolana natural, alcanzan resistencias tempranas, llegando a alcanzar el 60% de resistencia final para ensayos a 1 día.

Finalmente se obtiene que el tiempo y la temperatura de curado inicial en horno favorecen el proceso de geopolimerización. La resistencia a la compresión y a la flexotracción se incrementa con el aumento de la temperatura entre los 40°C y 80°C de curado para ensayos mecánicos a 1 día. Si aumenta el tiempo de curado, también se logra aumentar las resistencias. Merecen un estudio adicional la implicancia de la temperatura de curado en horno en conjunto con las grietas provocadas por dicho curado, lo cual se deja propuesto para estudios futuros.

8. Referencias Bibliográficas

Davidovits Joseph, “GEOPOLYMER” chemistry & Applications, 3rd edition, Julio 2011.

Bondar Dali, Lynsdale C.J., Milestone N.B., Hassani N., Ramezaniapour A.A., *Effect of heat Treatment on Reactivity-Strength of Alkali-activated Natural Pozzolans*, Construction and Building Materials 25 (2011) 4065-4071.

Joseph Benny, Mathew G., *Influence of Aggregate Content on the Behavior of fly ash Based Geopolymer concrete*, July 2012.

Bondar D., Lynsdale C.J., Ramezaniapour A.A., *Alkali Activation of Natural Pozzolan for Geopolymer Cement Production*, 2nd International Conference on Concrete & Development, April, 2005.

Najafi Jani E., Allahverdu Ali, *Effects of curing time and temperatura on strenght development of inorganic polymeric bunder base don natural pozzolan*, 2009.

Bondar Dali, Lynsdale C.J., Milestone N.B., Hassani N., Ramezaniapour A.A., *Effect of adding mineral additives to alkali-activated pozzolan paste*, Construction and Building Materials 2011.

Bondar D., Lynsdale C.J., Milestone N.B., Hassani N., Rammezaniapour A.A., *Engineering Properties of Alkali Activated Natural Pozzolan Concrete*, 2010.

Bondar D., Lynsdale C.J., Milestone Neil B., Hassani N., Ramezaniapour A.A., *Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans*, Cement & Concrete Composites, 2011.

Pacheco Torgal F., Abdollahnejad Z., Camoes A.f., Jamshidi M., Ding Y., *Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cemento r an unproven issue?*, Construction and Building Materials, 2012.

Komnitsas Konstantinos A., *Potential of geopolymer technology towards Green buildings and sustainable cities*, International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, 2011.

Davidovits J., *GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement*, 1994.

Díaz Pedro S., *Estudio de Factibilidad de Obtención de Hormigones Geopoliméricos a partir de desechos minerales*, 2012.

9. ANEXOS

Estudios Previos

9.1. Influencia de la viscosidad de la solución silicato de sodio de la solución alcalina en la mezcla PCV2.

Tabla 56. Densidad y resistencia mecánica para mortero con viscosidad de la solución de silicato de sodio igual a 400 cps.

Viscosidad (cps)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
400	1A	520,0	0,97		15,90	18,79		2031,25
	2A	523,8	0,94	2,23	15,74	17,85	11,57	2046,09
	3A	529,8	0,94		19,44	18,90		2069,53
Promedio		524,53	0,95		17,03	18,51		2048,96
DESVEST		4,94	0,02		2,09	0,58		19,30

Tabla 57. Densidad y resistencia mecánica para mortero con viscosidad de la solución de silicato de sodio igual a 700 cps.

Viscosidad (cps)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
700	1B	541,0	1,29		20,03	18,64		2113,28
	2B	546,1	1,28	3,07	19,26	18,41	11,59	2133,20
	3B	545,4	1,36		19,83	18,58		2130,47
Promedio		544,17	1,31		19,71	18,54		2125,65
DESVEST		2,76	0,04		0,40	0,12		10,80

Tabla 58. Densidad y resistencia mecánica para mortero con viscosidad de la solución de silicato de sodio igual a 900 cps.

Viscosidad (cps)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
900	1C	534,4	1,37		20,10	19,12		2087,50
	2C	527,4	0,97	2,78	17,16	18,89	12,10	2060,16
	3C	535,8	1,23		19,50	20,06		2092,97
Promedio		532,53	1,19		18,92	19,36		2080,21
DESVEST		4,50	0,20		1,55	0,62		17,58

9.2. Influencia del contenido de agua extra en la mezcla PCV2.

Tabla 59. Densidad y resistencia mecánica para mortero con 30 g de contenido de agua extra en la mezcla PCV2.

Agua extra (g)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
30	1A	556,4	1,05		15,63	15,43		2173,44
	2A	557,8	1,03	2,46	15,21	15,64	9,64	2178,91
	3A	559,1	1,07		15,67	15,22		2183,98
Promedio		557,77	1,05		15,50	15,43		2178,78
DESVEST		1,35	0,02		0,25	0,21		5,27

Tabla 60. Densidad y resistencia mecánica para mortero con 40 g de contenido de agua extra en la mezcla PCV2.

Agua extra (g)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
40	1B	556,2	1,31		22,98	22,39		2172,66
	2B	558,2	1,33	3,05	23,33	23,08	14,44	2180,47
	3B	562,8	1,27		23,00	23,83		2198,44
Promedio		559,07	1,30		23,10	23,10		2183,85
DESVEST		3,38	0,03		0,20	0,72		13,22

Tabla 61. Densidad y resistencia mecánica para mortero con 50 g de contenido de agua extra en la mezcla PCV2.

Agua extra (g)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
50	1C	558,2	1,19		19,56	16,70		2180,47
	2C	558,3	1,10	2,74	19,95	20,05	11,79	2180,86
	3C	561,6	1,22		18,90	19,82		2193,75
Promedio		559,37	1,17		19,47	18,86		2185,03
DESVEST		1,93	0,06		0,53	1,87		7,56

9.3. Influencia de la variación de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Tabla 62. Densidad y resistencia mecánica de mortero a 40°C de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Temperatura (°C)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
40	1A	528,2	0,22		2,98	3,19		2063,28
	2A	533,8	0,24	0,56	3,14	3,17	1,97	2085,16
	3A	530,0	0,26		3,14	3,11		2070,31
Promedio		530,67	0,24		3,09	3,16		2072,92
DESVEST		2,86	0,02		0,09	0,04		11,17

Tabla 63. Densidad y resistencia mecánica de mortero a 60°C de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Temperatura (°C)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
60	1B	522,1	0,64		12,03	11,33		2039,45
	2B	526,6	0,64	1,51	11,30	10,93	6,95	2057,03
	3B	523,7	0,65		12,06	11,12		2045,70
Promedio		524,13	0,64		11,80	11,13		2047,40
DESVEST		2,28	0,00		0,43	0,20		8,91

Tabla 64. Densidad y resistencia mecánica de mortero a 80°C de temperatura de curado en horno para mezcla PCV2.

Temperatura (°C)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
80	1C	509,3	1,42		31,10	29,51		1989,45
	2C	513,8	1,39	3,34	29,53	29,33	18,45	2007,03
	3C	508,6	1,48		29,28	29,71		1986,72
Promedio		510,57	1,43		29,97	29,52		1994,40
DESVEST		2,82	0,04		0,99	0,19		11,02

9.4. Influencia de la variación en la razón Solución Alcalina/Fuente de Aluminosilicato.

Tabla 65. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,4.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,4	1A	534,2	0,46		10,60	9,24		2086,72
	2A	541,2	0,43	1,02	10,81	0,78	4,28	2114,06
	3A	542,3	0,42		10,73	10,52		2118,36
Promedio		539,23	0,44		10,71	6,85		2106,38
DESVEST		4,39	0,02		0,11	5,29		17,16

Tabla 66. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,45.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,45	1B	556,8	0,80		16,38	18,50		2175,00
	2B	559,5	0,68	1,71	16,92	16,96	11,10	2185,55
	3B	558,7	0,72		16,11	17,80		2182,42
Promedio		558,33	0,73		16,47	17,75		2180,99
DESVEST		1,39	0,06		0,41	0,77		5,42

Tabla 67. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,5.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,5	1C	520,0	0,97		15,90	18,79		2031,25
	2C	523,8	0,94	2,23	15,74	17,85	11,57	2046,09
	3C	529,8	0,94		19,44	18,90		2069,53
Promedio		524,53	0,95		17,03	18,51		2048,96
DESVEST		4,94	0,02		2,09	0,58		19,30

Tabla 68. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,55.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,55	1D	549,7	1,02		15,76	14,69		2147,27
	2D	549,8	0,97	2,33	14,12	15,09	9,31	2147,66
	3D	556,2	1,00		15,33	14,90		2172,66
Promedio		551,90	1,00		15,07	14,89		2155,86
DESVEST		3,72	0,02		0,85	0,20		14,55

Tabla 69. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,6.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,6	1E	557,3	0,81		11,84	12,58		2176,95
	2E	559,8	0,88	2,05	12,92	12,79	8,02	2186,72
	3E	559,5	0,93		13,23	13,14		2185,55
Promedio		558,87	0,88		12,66	12,84		2183,07
DESVEST		1,37	0,06		0,73	0,28		5,33

Tabla 70. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,65.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,65	1F	553,9	0,77		10,81	10,78		2163,67
	2F	562,5	0,76	1,84	11,17	10,29	6,66	2197,27
	3F	560,4	0,83		11,23	10,90		2189,06
Promedio		558,93	0,79		11,07	10,66		2183,33
DESVEST		4,48	0,04		0,23	0,32		17,51

9.5. Influencia de la Variación de Concentración Molar del activador serie PCV2.

Tabla 71. Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 8 M del activador serie PCV2.

CM M	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
8,00	1A	526,90	0,52		11,38	11,21		2058,20
	2A	528,80	0,53	1,27	10,50	10,54	6,81	2065,63
	3A	525,20	0,57		10,75	10,96		2051,56
Promedio		526,97	0,54		10,89			2058,46
DESVEST		1,80	0,03		0,36			7,03

Tabla 72. Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 10 M del activador serie PCV2.

CM M	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
10,00	1B	512,60	0,59		11,17	9,93		2002,34
	2B	514,20	0,60	1,40	10,27	9,85	6,16	2008,59
	3B	510,70	0,61		9,21	9,78		1994,92
Promedio		512,50	0,60		10,04			2001,95
DESVEST		1,75	0,01		0,65			6,84

Tabla 73. Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 12 M del activador serie PCV2.

CM M	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
12,00	1C	520,30	0,59		12,61	12,06		2032,42
	2C	530,50	0,64	1,49	13,01	12,48	7,48	2072,27
	3C	521,40	0,67		12,18	11,35		2036,72
Promedio		524,07	0,64		12,28			2047,14
DESVEST		5,60	0,04		0,57			21,87

Tabla 74. Densidad y resistencia mecánica de mortero para mortero con concentración 14 M del activador serie PCV2.

CM M	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
14,00	1D	503,40	0,59		11,76	10,51		1966,41
	2D	508,00	0,67	1,50	11,44	10,85	6,49	1984,38
	3D	505,10	0,66		11,83	9,81		1973,05
Promedio		505,50	0,64		11,03			1974,61
DESVEST		2,33	0,04			0,79		9,09

9.6. Influencia de la variación de la razón Solución silicato de sodio a Solución hidróxido de sodio en la solución alcalina.

Tabla 75. Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 1,0.

<i>Sol. Na₂SiO₃</i> <i>Sol. NaOH</i>	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1,00	1A	519,10	0,51		8,77	8,87		2027,73
	2A	523,70	0,49	1,18	8,42	8,13	5,25	2045,70
	3A	517,50	0,51		7,89	8,22		2021,48
Promedio		520,10	0,50		8,38			2031,64
DESVEST		3,22	0,01			0,38		12,57

Tabla 76. Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 1,5.

<i>Sol. Na₂SiO₃</i> <i>Sol. NaOH</i>	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1,50	1B	515,80	0,45		8,94	8,86		2014,84
	2B	518,40	0,45	1,04	8,66	8,43	5,23	2025,00
	3B	512,80	0,43		7,86	7,83		2003,13
Promedio		515,67	0,44		8,43			2014,32
DESVEST		2,80	0,01			0,49		10,95

Tabla 77. Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 2,0.

$Sol. Na_2SiO_3$	Probeta	masa	RF	RF	RC	RC	RC	Densidad
$Sol. NaOH$	(\circ)	(g)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(kg/m^3)
2,00	1C	519,30	0,53		10,44	9,96		2028,52
	2C	516,50	0,57	1,29	9,26	9,70	5,99	2017,58
	3C	518,80	0,56		9,40	9,09		2026,56
Promedio		518,20	0,55		9,64			2024,22
DESVEST		1,49	0,02		0,50			5,83

Tabla 78. Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 2,5.

$Sol. Na_2SiO_3$	Probeta	masa	RF	RF	RC	RC	RC	Densidad
$Sol. NaOH$	(\circ)	(g)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(kg/m^3)
2,50	1D	514,00	0,67		14,38	14,38		2007,81
	2D	513,40	0,66	1,57	13,79	13,71	8,79	2005,47
	3D	517,30	0,68		14,32	14,11		2020,70
Promedio		514,90	0,67		14,12			2011,33
DESVEST		2,10	0,01		0,30			8,20

Tabla 79. Densidad y resistencia mecánica para mortero con razón solución silicato de sodio a solución hidróxido de sodio de 3,0.

$Sol. Na_2SiO_3$	Probeta	masa	RF	RF	RC	RC	RC	Densidad
$Sol. NaOH$	(\circ)	(g)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(kg/m^3)
3,00	1E	511,00	0,65		13,67	12,67		1996,09
	2E	516,00	0,61	1,50	13,94	13,03	7,91	2015,63
	3E	511,80	0,67		12,93	12,25		1999,22
Promedio		512,93	0,64		13,08			2003,65
DESVEST		2,69	0,03		0,63			10,49

9.7. Influencia de la variable tiempo de curado en horno, para variación de Solución Alcalina/Fuente de Aluminosilicato.

Tabla 80. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,5 y 72 horas de curado en horno.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,5	1A	540,8	1,86		45,20	47,20		2112,50
	2A	546,4	1,93	4,65	47,50	46,80	29,77	2134,38
	3A	549,7	2,18		48,50	48,90		2147,27
Promedio		545,63	1,99		47,07	47,63		2131,38
DESVEST		4,50	0,17		1,69	1,12		17,58

Tabla 81. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,55 y 72 horas de curado en horno.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,55	1B	535,4	1,95		19,95	33,90		2091,41
	2B	540,5	1,93	4,58	29,82	33,50	21,33	2111,33
	3B	535,6	1,99		31,90	35,00		2092,19
Promedio		537,17	1,96		27,22	34,13		2098,31
DESVEST		2,89	0,03		6,38	0,78		11,28

Tabla 82. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,6 y 72 horas de curado en horno.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,6	1C	553,9	1,77		37,90	40,40		2163,67
	2C	555,7	1,80	4,11	36,60	33,10	23,42	2170,70
	3C	556,2	1,70		38,10	38,90		2172,66
Promedio		555,27	1,76		37,53	37,47		2169,01
DESVEST		1,21	0,06		0,81	3,86		4,73

Tabla 83. Densidad y resistencia mecánica de mortero para razón Sol.alcalina/Fuente de aluminosilicato igual a 0,65 y 72 horas de curado en horno.

SA/FA	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
0,65	1D	552,4	1,36		31,10	31,20		2157,81
	2D	552,7	1,63	3,55	30,90	30,80	18,86	2158,98
	3D	552,9	1,57		33,40	28,54		2159,77
Promedio		552,67	1,52		31,80	30,18		2158,85
DESVEST		0,25	0,14		1,39	1,43		0,98

Estudio Experimental

9.8. Variación Porcentual de ceniza volante y puzolana

Tabla 84: Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV1.

PU/CV	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PCV1	1A	471,3	0,92		19,08	17,58		1841,02
	2A	475,5	0,96	2,25	20,36	19,75	11,42	1857,42
	3A	468,1	1,01		19,57	17,48		1828,52
Promedio		471,63	0,96		19,67	18,27		1842,32
DESVEST		3,71	0,04		0,65	1,28		14,50

Tabla 85: Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV2.

PU/CV	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PCV2	1B	557,3	0,81		11,84	12,58		2176,95
	2B	559,8	0,88	2,05	12,92	12,79	8,02	2186,72
	3B	559,5	0,93		13,23	13,14		2185,55
Promedio		558,87	0,88		12,66	12,84		2183,07
DESVEST		1,37	0,06		0,73	0,28		5,33

Tabla 86. Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV3.

PU/CV	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PCV3	1C	530,1	0,60		5,07	5,44		2070,70
	2C	532,0	0,61	1,34	5,09	5,39	3,39	2078,13
	3C	528,9	0,52		4,87	5,43		2066,02
Promedio		530,33	0,57		5,01	5,42		2071,61
DESVEST		1,56	0,05		0,12	0,03		6,11

Tabla 87. Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV4.

PU/CV	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PCV4	1D	519,6	0,21		2,21	2,13		2029,69
	2D	519,8	0,24	0,53	2,32	2,08	1,38	2030,47
	3D	517,9	0,23		2,44	2,43		2023,05
Promedio		519,10	0,23		2,32	2,21		2027,73
DESVEST		1,04	0,02		0,12	0,19		4,08

Tabla 88. Densidad y resistencia mecánica para morteros PCV5.

PU/CV	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PCV5	1E	514,3	0,11		0,74	0,76		2008,98
	2E	513,2	0,14	0,31	0,80	0,78	0,49	2004,69
	3E	503,5	0,15		0,77	0,83		1966,80
Promedio		510,33	0,13		0,77	0,79		1993,49
DESVEST		5,94	0,02		0,03	0,04		23,22

Comportamiento Mecánico de Morteros Geopoliméricos con diversas composiciones de Fuentes de Aluminosilicato.

9.9. Mortero en base a la mezcla de puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1.

Tabla 89: Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ ceniza volante y solución alcalina 1, a 1 día.

Tiempo (días)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1	1A	540,6	0,71		12,23	12,47		2111,72
	2A	531,6	0,68	1,65	11,91	12,00	7,63	2076,56
	3A	532,8	0,72		12,32	12,15		2081,25
Promedio		535,00	0,71		12,15	12,21		2089,84
DESVEST		4,89	0,02		0,22	0,24		19,09

Tabla 880: Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 1 día.

Tiempo (días)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1	1B	529,7	1,21		24,59	26,79		2069,14
	2B	536,0	1,36	2,99	24,78	25,71	16,93	2093,75
	3B	536,5	1,28		26,01	28,77		2095,70
Promedio		534,07	1,28		25,13	27,09		2086,20
DESVEST		3,79	0,08		0,77	1,55		14,80

Tabla 91: Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 7 días.

Tiempo (días)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
7	1C	538,9	1,48		24,48	25,39		2105,08
	2C	540,4	1,41	3,52	26,28	27,49	16,65	2110,94
	3C	545,0	1,62		27,88	27,06		2128,91
Promedio		541,43	1,50		26,21	26,65		2114,97
DESVEST		3,18	0,11		1,70	1,11		12,42

Tabla 92. Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 7 días.

Tiempo (días)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
7	1D	523,5	1,48		27,60	27,21		2044,92
	2D	539,9	1,44	3,41	30,03	29,73	18,24	2108,98
	3D	542,5	1,44		31,30	30,60		2119,14
Promedio		535,30	1,46		29,64	29,18		2091,02
DESVEST		10,30	0,02		1,88	1,76		40,24

Tabla 93. Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 14 días.

Tiempo (días)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
14	1E	529,6	1,46		30,18	28,59		2068,75
	2E	533,8	1,43	3,44	28,72	29,64	18,59	2085,16
	3E	535,4	1,52		29,35	31,00		2091,41
Promedio		532,93	1,47		29,42	29,74		2081,77
DESVEST		3,00	0,04		0,73	1,21		11,70

Tabla 94. Densidad y resistencia mecánica para mortero en base a la mezcla puzolana/ceniza volante y solución alcalina 1, a 14 días.

Tiempo (días)	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
14	1F	532,0	1,57		29,33	32,30		2078,13
	2F	534,2	1,58	3,82	30,80	33,00	20,79	2086,72
	3F	537,1	1,74		34,70	34,50		2098,05
Promedio		534,43	1,63		31,61	33,27		2087,63
DESVEST		2,56	0,10		2,78	1,12		9,99

9.10. Mortero en base a mezclas escoria de alto horno (Escoria 2) y puzolana, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Tabla 95. Densidad y resistencia mecánica a 1 día, para mortero PE₂², activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ²	1A	524,70	1,50		48,10	46,40		2049,61
	2A	532,70	1,69	3,68	50,10	54,30	32,13	2080,86
	3A	540,70	1,52		46,10	53,50		2112,11
Promedio		532,70	1,57		49,75			2080,86
DESVEST		8,00	0,11		3,53			31,25

Tabla 96. Densidad y resistencia mecánica a 1 día, para mortero PE₂³, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ³	1B	559,60	1,63		43,80	41,40		2185,94
	2B	569,10	1,73	3,85	48,80	47,50	27,40	2223,05
	3B	575,30	1,58		45,20	42,60		2247,27
Promedio		568,00	1,65		44,88			2218,75
DESVEST		7,91	0,07		2,86			30,89

Tabla 89. Densidad y resistencia mecánica a 1 día, para mortero PE₂⁴, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ⁴	1B	548,70	1,09		23,82	22,95		2143,36
	2B	546,00	1,05	2,49	23,80	21,61	13,89	2132,81
	3B	551,50	1,06		25,36	22,11		2154,30
Promedio		548,73	1,06		23,28			2143,49
DESVEST		2,75	0,02		1,35			10,74

Tabla 98. Densidad y resistencia mecánica a 14 días, para mortero PE₂², activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ²	1A	549,47	2,35		77,80	67,20		2146,37
	2A	547,88	2,19	5,01	84,90	72,50	43,06	2140,16
	3A	547,98	1,88		79,00	67,00		2140,55
Promedio		548,44	2,14		74,73			2142,36
DESVEST		0,89	0,24		7,11			3,48

Tabla 99. Densidad y resistencia mecánica a 14 días, para mortero PE₂³, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ³	1B	548,22	1,58		49,50	53,80		2141,48
	2B	549,56	1,64	3,70	57,90	56,40	34,88	2146,72
	3B	549,73	1,53		57,30	57,20		2147,38
Promedio		549,17	1,58		55,35			2145,20
DESVEST		0,83	0,06		3,21			3,23

Tabla 100. Densidad y resistencia mecánica a 14 días, para mortero PE₂⁴, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ⁴	1B	548,90	1,00		22,25	26,81		2144,14
	2B	547,75	1,03	2,56	23,89	24,91	16,47	2139,65
	3B	549,35	1,25		25,33	27,34		2145,90
Promedio		548,67	1,09		25,09			2143,23
DESVEST		0,83	0,14		1,88			3,22

Tabla 101. Densidad y resistencia mecánica a 28 días, para mortero PE₂², activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ²	1A	547,00	2,04		83,90	87,90		2136,72
	2A	543,00	1,97	4,65	87,70	87,00	54,75	2121,09
	3A	553,00	1,95		87,90	87,90		2160,16
Promedio		547,67	1,99		87,05			2139,32
DESVEST		5,03	0,05			1,58		19,66

Tabla 102. Densidad y resistencia mecánica a 28 días, para mortero PE₂³, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ³	1B	546,00	1,63		51,60	53,30		2132,81
	2B	550,00	1,60	3,71	56,80	53,10	33,48	2148,44
	3B	549,00	1,53		53,50	54,30		2144,53
Promedio		548,33	1,58		53,77			2141,93
DESVEST		2,08	0,05			1,73		8,13

Tabla 103. Densidad y resistencia mecánica a 28 días, para mortero PE₂⁴, activados con solución alcalina 2 en proporción 0.65/1.

Serie ()	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
PE ₂ ⁴	1B	533,00	1,37		34,60	32,10		2082,03
	2B	543,00	1,62	3,33	34,30	32,60	19,98	2121,09
	3B	536,00	1,27		29,56	31,20		2093,75
Promedio		537,33	1,42		32,39			2098,96
DESVEST		5,13	0,18			1,90		20,05

9.11. Comportamiento de morteros con diversas composiciones de Aluminosilicatos utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tabla 104. Densidad y resistencia mecánica a 1 día para puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1,00	1A	524,38	0,00		0,00	0,00		2048,36
	2A	526,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2055,55
	3A	525,78	0,00		0,00	0,00		2053,83
Promedio		525,46	0,00		0,00			2052,58
DESVEST		0,96	0,00			0,00		3,75

Tabla 105. Densidad y resistencia mecánica a 14 días para puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
14,00	1B	527,60	0,17		1,66	1,73		2060,94
	2B	527,20	0,16	0,42	1,73	1,81	1,12	2059,38
	3B	528,80	0,21		1,85	1,83		2065,63
Promedio		527,87	0,18		1,77			2061,98
DESVEST		0,83	0,03			0,07		3,25

Tabla 106. Densidad y resistencia mecánica a 28 días para puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
28,00	1B	521,70	0,23		2,86	2,92		2037,89
	2B	526,40	0,25	0,59	2,98	2,73	1,90	2056,25
	3B	524,60	0,29		3,27	3,46		2049,22
Promedio		524,23	0,25		3,04			2047,79
DESVEST		2,37	0,03			0,27		9,26

Tabla 107. Densidad y resistencia mecánica a 1 día para ceniza volante, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1,00	1A	552,50	0,76		12,81	12,51		2158,20
	2A	550,90	0,75	1,79	12,39	12,29	7,72	2151,95
	3A	550,00	0,78		11,93	12,26		2148,44
Promedio		551,13	0,77		12,37			2152,86
DESVEST		1,27	0,02			0,29		4,95

Tabla 108. Densidad y resistencia mecánica a 14 días para ceniza volante, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
14,00	1B	557,70	1,56		27,00	27,07		2178,52
	2B	553,20	1,74	3,87	28,12	29,06	17,17	2160,94
	3B	551,60	1,66		28,78	26,28		2154,69
Promedio		554,17	1,65		27,72			2164,71
DESVEST		3,16	0,09			1,10		12,35

Tabla 109. Densidad y resistencia mecánica a 28 días para ceniza volante, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
28,00	1B	544,20	2,08		39,80	39,60		2125,78
	2B	544,70	2,15	5,00	39,00	37,10	24,04	2127,73
	3B	545,80	2,17		39,70	38,70		2132,03
Promedio		544,90	2,13		38,98			2128,52
DESVEST		0,82	0,05			1,02		3,20

Tabla 110. Densidad y resistencia mecánica a 1 día para ceniza volante y puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1,00	1A	548,10	0,80		10,43	11,79		2141,02
	2A	548,50	0,76	1,87	11,05	10,62	7,01	2142,58
	3A	549,60	0,84		11,71	11,26		2146,88
Promedio		548,73	0,80		11,14			2143,49
DESVEST		0,78	0,04			0,56		3,03

Tabla 111. Densidad y resistencia mecánica a 14 días para ceniza volante y puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
14,00	1B	539,90	1,30		20,74	20,84		2108,98
	2B	545,40	1,43	3,15	21,27	20,92	12,90	2130,47
	3B	543,40	1,31		20,07	20,16		2122,66
Promedio		542,90	1,35		20,67			2120,70
DESVEST		2,78	0,07			0,46		10,87

Tabla 112. Densidad y resistencia mecánica a 28 días para ceniza volante y puzolana, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta (°)	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
28,00	1B	540,00	1,71		25,36	26,96		2109,38
	2B	540,00	1,66	4,00	27,35	26,94	17,15	2109,38
	3B	542,00	1,76		27,33	28,43		2117,19
Promedio		540,67	1,71		27,06			2111,98
DESVEST		1,15	0,05			0,99		4,51

Tabla 113. Densidad y resistencia mecánica a 1 día para escoria, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1,00	1A	580,80	2,12		75,20	74,10		2268,75
	2A	574,30	1,96	4,80	75,30	71,00	45,67	2243,36
	3A	571,10	2,07		68,50	74,10		2230,86
Promedio		575,40	2,05		73,03			2247,66
DESVEST		4,94	0,08		2,71			19,31

Tabla 114. Densidad y resistencia mecánica a 14 días para escoria, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
14,00	1B	571,90	2,21		82,90	82,10		2233,98
	2B	576,30	2,19	5,08	89,30	87,70	53,33	2251,17
	3B	577,50	2,12		85,60	86,20		2255,86
Promedio		575,23	2,17		85,63			2247,01
DESVEST		2,95	0,05		2,76			11,52

Tabla 115. Densidad y resistencia mecánica a 28 días para escoria, utilizando solución alcalina 2, en proporción 0.65/1.

Tiempo días	Probeta ()	masa (g)	RF (kN)	RF (MPa)	RC (kN)	RC (MPa)	RC (MPa)	Densidad (kg/m ³)
28,00	1B	571,00	2,23		93,40	91,70		2230,47
	2B	566,00	2,08	4,87	88,30	86,60	55,90	2210,94
	3B	570,00	1,93		91,00	90,00		2226,56
Promedio		569,00	2,08		90,17			2222,66
DESVEST		2,65	0,15		2,44			10,33

