



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OBTENCIÓN DE HORMIGONES
GEOPOLIMERICOS A PARTIR DE DESECHOS MINERALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PEDRO MANUEL DÍAZ SOSSA

PROFESOR GUÍA:

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

**GERARDO DÍAZ RODENAS
YURI TOMICIC CALVO**

**SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2012**

En este estudio se demuestra la factibilidad técnica de obtener hormigones geopoliméricos haciendo uso de una dosificación experimental. Esta dosificación tiene como componentes fundamentales un material aglomerante, una solución alcalina y áridos. El aglomerante es un material fino de partículas de aspecto amorfo que posee una cantidad importante de óxido de silicio y óxido de aluminio. La solución alcalina es una mezcla de silicato de sodio y una solución altamente concentrada de hidróxido de sodio. Aglomerante y solución alcalina se mezclan formando una pasta a la cual se incorporan áridos de manera de obtener un mortero que llega a desarrollar resistencias a la compresión de 40 [MPa].

La motivación de esta investigación viene dada por el creciente interés en desarrollar materiales de construcción sustentables. La industria de la construcción crece constantemente, este crecimiento involucra un impacto ambiental considerable. Por una parte, al necesitarse un gran volumen de materiales, se explotan muchos recursos naturales vírgenes, y por otro lado, el procesamiento de estos materiales involucra una gran polución de gases de efecto invernadero, en particular, la producción de cemento portland.

Para reducir estos efectos se intentó reproducir la tecnología de la geopolimerización haciendo uso de materiales a nivel local, la mayoría de ellos, pasivos ambientales. Como materiales aglomerantes se utilizó ceniza volante de clase F de División Ventanas de AES Gener y relaves de cobre obtenidos en División El Soldado de Anglo American. Como áridos se utilizó hormigón de desecho chancado otorgado por IDIEM, ripios de lixiviación de División El Soldado y polvo de roca.

Se confeccionaron y ensayaron a resistencia mecánica probetas RILEM con distintas dosificaciones donde se incluyeron los materiales mencionados. Se estudiaron densidades, curado y desarrollo de resistencias a flexión y a compresión.

Agradecimientos

A mi compañera

A mi familia

A mis amigos

A mi Universidad

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. General.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivos generales	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. Antecedentes	4
2.1. Generalidades.....	4
2.2. Geopolimerización.....	4
2.2.1. Introducción a la geopolimerización.....	4
2.2.2. Modelo conceptual de la geopolimerización	5
2.2.3. Ventajas del hormigón geopolimérico.....	6
2.3. Impacto ambiental del hormigón convencional	10
2.4. Ceniza Volante.....	10
2.4.1. Producción de energía eléctrica a carbón	10
2.4.2. Producción de ceniza volante	11
2.4.3. Propiedades y clasificación de las cenizas volantes.....	12
2.4.4. Problemas ambientales de las cenizas volantes	13
2.5. Pasivos ambientales producto de la producción de cobre	14
2.5.1. Ripios.....	14
2.5.2. Relaves.....	15
3. Planteamiento del problema	16
3.1. Introducción.....	16
3.2. Programa de ensayos	18
4. Materiales	21
4.1. Ceniza volante	21
4.2. Relaves de cobre	22
4.3. Solución alcalina	23
4.4. Áridos	24

5. Trabajo experimental	27
5.1. Introducción.....	27
5.2. Dosificación de hormigones de prueba	28
5.2.1. Áridos	28
5.2.2. Razón entre solución alcalina y fuente de aluminosilicatos	29
5.2.3. Razón entre silicato de sodio y solución de hidróxido de sodio.....	29
5.2.4. Agua extra	30
5.2.5. Ejemplo de dosificación	30
6. Presentación de resultados	32
6.1. Concentración de solución de hidróxido de sodio	32
6.1.1. Densidad	32
6.1.2. Resistencia a la flexión y compresión.....	33
6.2. Curado	35
6.2.1. Densidad	35
6.2.2. Resistencia a flexión y compresión.....	37
6.3. Uso de relaves de cobre	40
6.3.1. Densidad	40
6.3.2. Resistencia a flexión y compresión.....	41
6.4. Uso de ripios de cobre	42
6.4.1. Densidad	42
6.4.2. Resistencia a flexión y compresión.....	43
6.5. Uso de hormigón reciclado.....	44
6.5.1. Densidad	44
6.5.2. Resistencia a flexión y compresión.....	45
6.6. Uso de agua extra	46
6.6.1. Densidad	46
6.6.2. Resistencias a flexión y compresión.....	47
6.7. Tipo de silicato	48
6.7.1. Densidad	48
6.7.2. Resistencias a flexión y compresión.....	49

7. Análisis y discusión de resultados	50
7.1. Caracterización de materiales	50
7.2. Concentración de solución de hidróxido de sodio	53
7.3. Curado	55
7.4. Relaves de cobre	58
7.5. Ripios de cobre	59
7.6. Hormigón reciclado	60
7.7. Agua extra	62
7.8. Silicatos de sodio	64
8. Conclusiones	65
9. Bibliografía y Referencias	68
10. Anexos	71
10.1. Resultados ensayos variando concentración NaOH	71
10.2. Resultados ensayos curado previamente en horno	73
10.3. Resultados ensayos curado a temperatura ambiente	75
10.4. Resultados ensayos inclusión de relaves de cobre	77
10.5. Resultados ensayos inclusión de ripios de cobre	79
10.6. Resultados ensayos inclusión de hormigón reciclado	80
10.7. Resultados ensayos variando el agua extra	82
10.8. Resultados ensayos con distintos silicatos	84

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de cenizas volantes según ASTM C618.....	13
Tabla 2: Dosificación de mezclas variando [NaOH]	19
Tabla 3: Dosificación de mezclas, influencia del curado	19
Tabla 4: Dosificaciones, inclusión de relaves	19
Tabla 5: Dosificaciones, inclusión de ripios de lixiviación.....	19
Tabla 6: Dosificaciones, inclusión de hormigones reciclados.....	20
Tabla 7: Dosificaciones, influencia del agua extra.....	20
Tabla 8: Dosificaciones, influencia del tipo silicato.....	20
Tabla 9: FRX de cenizas volantes.....	21
Tabla 10: FRX de Relaves de Cobre.....	22
Tabla 11: Características silicato de sodio 2:1	24
Tabla 12: Características silicato de sodio 3:1	24
Tabla 13: Densidades en función de concentración de NaOH.....	32
Tabla 14: Resistencias en función de concentración de NaOH.....	33
Tabla 15: Densidades, curado previo en horno.....	35
Tabla 16: Densidades, curado a temperatura ambiente.....	35
Tabla 17: Resistencias a flexión y compresión, curado previo en horno.....	37
Tabla 18: Resistencias a flexión y compresión, curado a T° ambiente	37
Tabla 19: Densidad, inclusión de RC	40
Tabla 20: Resistencia a flexión y compresión, inclusión de RC	41
Tabla 21: Densidad, inclusión de RL.....	42
Tabla 22: Resistencias a flexión y compresión, inclusión de RL	43
Tabla 23: Densidad, inclusión de HR	44
Tabla 24: Resistencia a flexión y compresión, inclusión de HR	45
Tabla 25: Densidad, influencia del agua extra.....	46
Tabla 26: Resistencia a flexión y compresión, influencia del agua extra.....	47
Tabla 27: Densidad, influencia del tipo de silicato.....	48
Tabla 28: Resistencia a flexión y compresión, influencia del tipo de silicato.....	49
Tabla 29: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 8[M]	71
Tabla 30: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 10[M]	71
Tabla 31: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 12[M]	72
Tabla 32: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 14[M]	72
Tabla 33: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 16[M]	72
Tabla 34: Densidad y resistencia mecánica, 7 días.	73
Tabla 35: Densidad y resistencia mecánica, 14 días.	73
Tabla 36: Densidad y resistencia mecánica, 21 días.	73
Tabla 37: Densidad y resistencia mecánica, 28 días.	74
Tabla 38: Densidad y resistencia mecánica, 7 días.	75
Tabla 39: Densidad y resistencia mecánica, 14 días.	75
Tabla 40: Densidad y resistencia mecánica, 21 días.	76

Tabla 41: Densidad y resistencia mecánica, 28 días.	76
Tabla 42: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 0%	77
Tabla 43: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 25%	77
Tabla 44: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 50%	78
Tabla 45: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 75%	78
Tabla 46: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 100%	78
Tabla 47: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RL 0%	79
Tabla 48: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RL 25%	79
Tabla 49: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RL 50%	80
Tabla 50: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de HR 0%	80
Tabla 51: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de HR 25%	81
Tabla 52: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de HR 50%	81
Tabla 53: Densidad y resistencia mecánica, 30 [kg/m ³] de agua extra	82
Tabla 54: Densidad y resistencia mecánica, 40 [kg/m ³] de agua extra	82
Tabla 55: Densidad y resistencia mecánica, 50 [kg/m ³] de agua extra	83
Tabla 56: Densidad y resistencia de mortero, silicato Si/Na – 2:1	84
Tabla 57: Densidad y resistencia de mortero, silicato Si/Na – 3:1	84

Índice de Imágenes

Imagen 1: Estructura básica.....	5
Imagen 2: Modelo conceptual de la geopolimerización.....	6
Imagen 3: Granulometría de cenizas volantes	22
Imagen 4: Granulometría de relaves de cobre	23
Imagen 5: Curva granulométrica, polvo de roca.....	24
Imagen 6: Curva granulométrica, ripios de lixiviación	25
Imagen 7: Curva granulométrica, hormigón reciclado	25
Imagen 8: Densidades en función de concentración de NaOH.....	33
Imagen 9: Resistencia a compresión en función de concentración de NaOH.....	34
Imagen 10: Resistencia a flexión en función de concentración de NaOH.....	34
Imagen 11: Densidades, curado previo en horno.....	36
Imagen 12: Densidades, curado a temperatura ambiente.....	36
Imagen 13: Resistencia a compresión en función del tiempo, horno	38
Imagen 14: Resistencia a compresión en función del tiempo, T° ambiente	38
Imagen 15: Resistencia a flexión en función del tiempo, horno.....	39
Imagen 16: Resistencia a flexión en función del tiempo, T° ambiente	39
Imagen 17: Densidad en función de inclusión de RC.....	40
Imagen 18: Resistencia a flexión en función de inclusión de RC	41
Imagen 19: Resistencia a compresión en función de inclusión de RC	41
Imagen 20: Densidad en función de la inclusión de RL.....	42
Imagen 21: Resistencia a flexión en función de la inclusión de RL	43
Imagen 22: Resistencia a compresión en función de la inclusión de RL.....	43
Imagen 23: Densidad en función de la inclusión de HR	44
Imagen 24: Resistencia a flexión en función de la inclusión de HR	45
Imagen 25: Resistencia a compresión en función de la inclusión de HR	45
Imagen 26: Densidad en función del agua extra	46
Imagen 27: Resistencia a flexión en función del agua extra	47
Imagen 28: Resistencia a compresión en función del agua extra	47
Imagen 29: Densidades, distintos tipos de silicatos	48
Imagen 30: Resistencia a flexión, distintos tipos de silicato	49
Imagen 31: Resistencia a compresión, distintos tipos de silicato	49
Imagen 32: Granulometría de ceniza volante A	50
Imagen 33: Granulometría de ceniza volante B	51
Imagen 34: Granulometría ceniza volante C	51
Imagen 35: Granulometría de ceniza volante, División Ventanas	52
Imagen 36: Solución alcalina precipitada	54
Imagen 37: Densidades producto de distintos procesos de curado	55
Imagen 38: Resistencias a compresión el tiempo	56
Imagen 39: Resistencias a flexión en el tiempo	57
Imagen 40: Aire atrapado en la superficie superior	62

1. Introducción

1.1. General

Debido al gran crecimiento que enfrentan las distintas industrias a nivel mundial, el nivel de subproductos generados por estas industrias crece de igual manera. Las investigaciones acerca de la reutilización de estos subproductos se han incrementado en gran magnitud, muchas de estas investigaciones buscan la creación de nuevos materiales de construcción.

La industria de la construcción es una de las más grandes a nivel mundial, por lo general representa una parte crucial en el desarrollo de los países. Por su gran volumen la industria de la construcción utiliza grandes volúmenes de materias primas, entre ellas el hormigón. El hormigón es generalmente una mezcla de áridos, cemento y agua. El principio de este material es que el cemento al hidratarse con agua forma una pasta que es capaz de endurecer y aglomerar los áridos, generando una gran resistencia lo que le permite ser usado como un material para construir.

El cemento que se usa para la manufactura de hormigones es generalmente cemento portland o cemento portland con alguna adición como son puzolanas, cenizas volantes, escoria de alto horno, etc. Este material ha sido usado por años para la construcción, sin embargo, es un material muy poco amigable con el medio ambiente.

La producción de cemento portland puede ser señalada como un gran agente en lo que al calentamiento global se refiere, es responsable de un 5% del total de dióxido de carbono emitido al medio ambiente [1], excede las 2.8 billones de toneladas al año y crece un 5% anual [2].

Por otra parte, una fracción importante de la energía eléctrica producida a nivel mundial es generada haciendo uso de combustibles fósiles. De estos combustibles fósiles uno de los más utilizados es el carbón. Uno de los tantos problemas que trae esta manera de generar electricidad es la sub-producción de cenizas volantes. Distintas iniciativas para la reutilización de este material se han llevado a cabo, una de estas es la obtención de materiales llamados **geopolímeros**.

Geopolímero o polímero inorgánico es un término que acuñó el ingeniero francés Joseph Davidovits [4, 6, 13] a materiales que serían producto de la mezcla de materiales ricos en sílice y alúmina (aluminosilicatos amorfos) con una solución alcalina. Los aluminosilicatos que eventualmente reaccionarían con esta solución alcalina podrían ser de origen diverso, incluso se podrían usar subproductos de otras industrias como la escoria de alto horno, o la ceniza volante.

Diversos estudios a nivel mundial exhiben una variada gama de propiedades que presentan estos materiales, altas resistencias tempranas, resistencia al ataque tanto por sulfatos como ácido sulfúrico, baja retracción, resistencia a altas temperaturas, etc. Estas ventajas sumadas al alto nivel de sustentabilidad que presentaría su producción harían de los geopolímeros un material de construcción promisorio.

En Chile el escenario actual no es muy distinto, una parte considerable de la matriz energética la compone la generación de termoeléctricas a carbón y se espera que su participación dentro de la matriz siga creciendo. Las cenizas volantes producto de esta industria son depositadas en grandes tranques y aún no tienen un uso significativo, es más, representan un problema muchas veces para las empresas y las comunidades aledañas.

En el escenario de la construcción, las construcciones chilenas son en su mayoría de hormigón armado. Una de las dificultades dada la geografía de Chile es el transporte de materiales, no es de extrañar que los grandes centros urbanos se tengan que encontrar cerca de yacimientos de piedra caliza y puzolana. Dados los grandes volúmenes de materias primas que se usan en la elaboración de cemento, no es tampoco de extrañar que los costos de extracción de estos materiales aumenten con el tiempo debido al agotamiento de estos recursos, un ejemplo de esto es la mina El Navío que luego de operar por 80 años se tuvo que cerrar en 2011 pues su operación ya no era rentable [3].

Las anteriormente mencionadas son algunas razones por las cuales nuevas soluciones integrales tanto en el ámbito de la construcción como el de la sustentabilidad deben ser consideradas, este estudio tiene como fin dar un primer paso analizando la factibilidad de obtener geopolímeros haciendo uso de distintos materiales a nivel local.

Los materiales fundamentales para confeccionar geopolímeros son básicamente una fuente de aluminosilicatos, en este caso se utilizará ceniza volante de clase F y relaves de cobre, una solución alcalina que será una mezcla de silicato de sodio con una solución de hidróxido de sodio y áridos. Estos materiales obtenidos localmente son distintos que los que se usan en otras partes del mundo y es esta la importancia de estudiar su influencia en el producto final.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

- Determinar una dosificación que permita obtener geopolímeros haciendo uso de subproductos de industrias a nivel local.
- Estudiar que parámetros influyen directamente en la confección y el desarrollo de propiedades de estos geopolímeros.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar la caracterización de distintos materiales que son ricos en aluminosilicatos mediante fluorescencia de rayos x (FRX), y compararlos con los materiales usados en otras experiencias a nivel mundial para determinar la posibilidad de ser usados en la obtención de geopolímeros.
- Ver que complicaciones puede traer la confección de la solución alcalina, estas podrían venir dadas por la interacción que tendría el silicato de sodio con la solución de hidróxido de sodio.
- Determinar resistencias mecánicas de distintas mezclas como indicador de influencia de distintos materiales en la obtención de geopolímeros.

2. Antecedentes

2.1. Generalidades

En este capítulo se entrega la información que se ha recopilado y considerado en este trabajo de título. Se muestra parte del estado del arte del hormigón geopolimérico y sus ventajas respecto al problema ambiental que significa el hormigón tradicional.

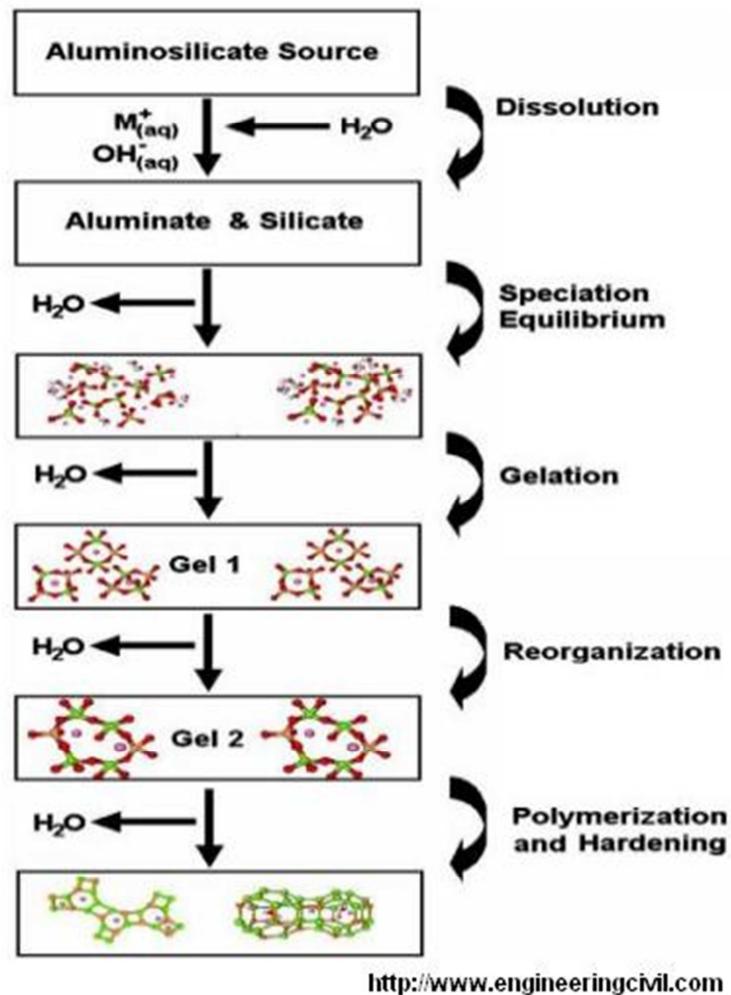
Así como el hormigón tradicional puede producir un daño ambiental considerable, los subproductos de la industria de la energía y minería considerados como pasivos ambientales también. Distintas iniciativas han sido dirigidas con el fin de mitigar o reducir el impacto ambiental de estos subproductos. El hormigón geopolimérico además de no necesitar cemento portland ha sido postulado como un buen material para atrapar desechos peligrosos. Se investigará si los relaves de cobre sirven como un potencial agente para la geopolimerización y además se estudiará la posibilidad de usar ripios de cobre como un árido no convencional.

2.2. Geopolimerización

2.2.1. Introducción a la geopolimerización

Por años se han comparado antiguas y nuevas estructuras y se ha visto que en general los hormigones usados en la antigüedad tenían mejor resistencia al ataque ácido y a los ciclos hielo deshielo que los hormigones actuales [4]. Se pensaba que la menor resistencia al ciclo hielo-deshielo y menor resistencia al ataque ácido era atribuible a los llamados CSH (Silicatos de Calcio Hidratados que son los que le dan la resistencia al hormigón tradicional). Más tarde se vio que los hormigones de la antigüedad contenían CSH y además grandes cantidades de material zeolítico y material amorfo, en consecuencia, la diferencia de propiedades con los hormigones recientes no venía dada por los CSH sino que por la cantidad de material zeolítico y material amorfo que contenía la roca antigua [5].

Imagen 2: Modelo conceptual de la geopolimerización



2.2.3. Ventajas del hormigón geopolimérico

- **Alta resistencia temprana**

El hormigón geopolimérico tiene en muchas ocasiones la capacidad de desarrollar hasta un 70% de resistencia a la compresión dentro de las 4 primeras horas de curado a una temperatura adecuada [6].

- **Baja retracción por secado**

La retracción del hormigón se divide en 4 [7] retracción plástica, química, retracción térmica y retracción por secado. De estas, la que aporta más a la retracción final es la retracción por secado que como su nombre lo indica es la pérdida de volumen que sufre el hormigón debido a la constante pérdida de agua debido al secado del hormigón. El hormigón geopolimérico muestra muy poca retracción por secado, luego de un año presenta entre 5 a 7 veces menos que el hormigón corriente [8].

- **Alta resistencia a los sulfatos**

En el hormigón convencional, los sulfatos son un agente preocupante puesto que deterioran algunas propiedades del hormigón, principalmente su resistencia a la compresión y cambio de volumen. Esto ocurre puesto que los sulfatos tienden a reaccionar con el calcio presente en el cemento portland formando yeso y etringita [9], estas reacciones son expansivas y por tanto generan esfuerzos internos indeseables en el hormigón. El hormigón geopolimérico al deber sus propiedades a otras reacciones en ausencia de calcio, no sufriría estas mismas consecuencias [10] y por tanto en este aspecto representa una mejor solución.

Distintos estudios se han hecho para demostrar este hecho. Se ha visto que después de un año en una solución de 5% en peso de sulfato de sodio la expansión en volumen de un hormigón geopolimérico alcanza un 0.015% [11], lejos de lo que se ha visto en el hormigón convencional donde después de 32 semanas en una solución del 5% se sulfato de sodio presenta expansiones de entre 0.035% a 0.1% [12].

Para estudiar la influencia del ataque por sulfatos en la resistencia a la compresión distintos estudios se han llevado a cabo. Bakharev [10] estudió la influencia del activador alcalino en la resistencia al ataque por sulfato de sodio y sulfato de magnesio encontrando que el tipo de activador influye en la resistencia al ataque por sulfatos. Los hormigones geopoliméricos activados solo con hidróxido de sodio tuvieron un mejor desempeño que aquellos activados con una mezcla de hidróxido de sodio e hidróxido de potasio y que aquellos activados solo con silicato de sodio. Esto se podría explicar debido a que los geopolímeros activados solo con hidróxido de sodio presentan una estructura entre cadenas de polímeros (cross-link polymer structure) más estable

que aquellos activados solo con silicato de sodio o con la mezcla entre hidróxido de sodio e hidróxido de potasio [10].

Wallah y Rangan [11] estudiaron la resistencia a la compresión de hormigones geopoliméricos activados con una mezcla entre hidróxido de sodio y silicato de sodio. Se vio que incluso después de un año de inmersión en una solución de sulfato de sodio al 5% estos no cambiaban en apariencia, presentaban muy poco cambio en volumen y muy poca variabilidad en resistencia a la compresión.

- **Resistencia a altas temperaturas**

A diferencia del hormigón con cemento portland, los geopolímeros son considerados resistentes a altas temperaturas debido a sus características cerámicas [13].

Kong (et ál) [14] estudió la resistencia a la compresión luego de exposición a elevadas temperaturas entre pasta de geopolímero y pasta de cemento portland encontrando que mientras a los 800[°C] la pasta de geopolímero había ganado resistencia a la compresión, la pasta de cemento portland ya había perdido toda resistencia residual a los 400[°C]. Esta pérdida de resistencia por parte del cemento portland es atribuida a la descomposición de Ca(OH)_2 que ocurre a 400[°C]. Por otra parte hay reportes de geopolímeros que siguen siendo estables a más de 1000[°C] [13].

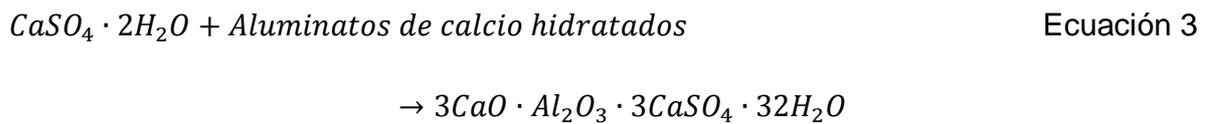
- **Alta resistencia al ataque ácido**

Una potencial ventaja del hormigón geopolimérico sobre el hormigón convencional es la resistencia al ataque por ácidos. Dentro de los ácidos más comunes que podrían atacar al hormigón encontramos ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico es el más estudiado como ataque al hormigón tradicional puesto que este se encuentra de manera natural en aguas subterráneas y suelos [15].

Puesto que el hormigón convencional presenta CSH y Ca(OH)_2 , el ácido sulfúrico reacciona disolviendo estos componentes formando yeso y óxido de silicio de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2 [15]:



El yeso tiene un efecto adverso en el hormigón, provoca reducción de masa y resistencia a la compresión [16], además los iones sulfato libres que penetran el hormigón reaccionan con aluminatos de calcio hidratados, aluminatos que son producto de la hidratación del cemento portland, y al reaccionar con ellos forman etringita de acuerdo a la Ecuación 3 [17]:



La formación de etringita provoca esfuerzos internos indeseables en el hormigón produciendo agrietamiento, lo que a la vez deja espacio para más penetración de ácido. Por estas razones el cemento portland no tienen un buen desempeño ante el ataque ácido, incluso los cementos de aluminatos de calcio que tienen un mejor desempeño al ataque ácido presentan pérdidas de masa entre un 30% y un 60% [6].

Se han llevado a cabo varias experiencias para estudiar el comportamiento del hormigón geopolimérico en la presencia de ácido sulfúrico, Davidovits [6] señala que los geopolímeros ante un ataque ácido moderado presentan estabilidad y perdidas de masa de entre un 5% y un 8% (no se señala concentración de ácido o tiempo de exposición), por otra parte Wallah y Rangan [11] vieron que luego de la exposición ante ácido sulfúrico con un 2% de concentración por 52 semanas la pérdida de masa fue de un 3%.

2.3. Impacto ambiental del hormigón convencional

Debido a su gran versatilidad el hormigón es uno de los materiales más usados en la industria de la construcción. Se estima que su consumo en el mundo es sólo superado por el consumo de agua [18].

El hormigón debe sus propiedades al cemento portland, el cual es una mezcla de clínker con yeso, el clínker es un material que proviene de la calcinación de piedra caliza y arcilla, esta calcinación ocurre en un horno a una temperatura de entre 1350[°C] y 1450[°C]. El problema de esta calcinación es la polución por dióxido de carbono.

El horno cementero produce aproximadamente 0.8 [ton] de dióxido de carbono por cada tonelada de cemento portland que se producirá [18]. Este contaminante es producto de los combustibles que usa el horno (generalmente carbón) y de la misma piedra caliza al quemarse.

La producción de cemento es una causa importante del cambio climático, la producción mundial de cemento ha alcanzado las 2.8 billones de toneladas al año y se estima que llegue a 4 billones de toneladas por año [2]. Por lo tanto la enorme carga ambiental que significan estas emisiones ha sido el foco de distintas iniciativas y estudios dedicados a buscar nuevas formas y nuevos procesos para aumentar la sustentabilidad de la construcción a nivel global.

2.4. Ceniza Volante

2.4.1. Producción de energía eléctrica a carbón

Actualmente existe una gran gama de tecnologías disponibles en el mundo para la producción de energía. Aunque el interés por las energías renovables no convencionales ha crecido últimamente, la mayor cantidad de energía eléctrica sigue siendo producida haciendo uso de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón).

Desde comienzos del siglo XX la generación de energía eléctrica haciendo uso de estos combustibles ha crecido enormemente debido a la gran explosión demográfica que ha sufrido el mundo. Al ritmo actual de consumo, con una estimación de la

población de 8.000 millones de habitantes para el 2030, la demanda global de energía eléctrica aumentaría en un 60%. De este 60% un 85% sería cubierto con un aumento en generación haciendo uso de combustibles fósiles [19].

Desde los años 80' que se consume más petróleo del que se descubre y por lo tanto ya es aceptado el hecho de que se alcanzará un techo. Este techo indicará el momento en que la extracción de petróleo empezará a ser más difícil y por lo tanto más cara, la AIE dice que no se alcanzará antes del 2030, sin embargo otros dicen que será antes o que incluso ya está ocurriendo [19]. Lo mismo pasa con el gas que encontrará un techo aproximadamente 20 años después que el petróleo. No así el carbón donde bajo el consumo actual existen reservas para los próximos 200 años [19].

Es este escenario donde el carbón ha vuelto a ganar protagonismo en la generación de energía eléctrica, un 40% de la energía eléctrica producida en el mundo viene de la generación a base de este combustible [20].

La situación en Chile es parecida, en la última década ha aumentado el consumo de electricidad debido al consumo doméstico e industrial. Las fluctuaciones en los precios del gas como del petróleo junto con la dependencia climática a la que se ven enfrentadas las hidroeléctricas genera incertidumbre y fluctuaciones en la producción nacional de energía. Esto ha hecho mirar de nuevo a las termoeléctricas a carbón como una solución económica y estable. Actualmente la producción de energía en base a carbón en Chile es de un 27% del total y se estima que de ser aprobados todos los proyectos presentados en el SEA a la fecha la oferta de energía a carbón se cuadruplicaría [20].

2.4.2. Producción de ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto de la producción de energía por parte de plantas termoeléctricas a carbón. Al quemar el carbón pulverizado se produce un material muy fino que contiene la parte inorgánica de lo que se quemó anteriormente. Este polvo llamado ceniza volante [21] es expulsado hacia afuera de la caldera producto de gases de escape y atrapado por un sistema de captación.

Esta ceniza de color grisáceo tendrá distintas propiedades dependiendo del tipo de carbón que se use, en general contienen silicio, aluminio, calcio y hierro, componentes que son indicados en forma de óxidos. Físicamente poseen un tamaño de partícula de entre 10 y 100 micrones [21] y sus principales componentes son aluminosilicatos amorfos (razones por las cuales las cenizas volantes son idóneas para obtener hormigón geopolimérico).

2.4.3. Propiedades y clasificación de las cenizas volantes

Físicamente las cenizas volantes son en su mayoría partículas esféricas, sólidas o huecas con aspecto vítreo (amorfo). Las cenizas que vienen del carbón sub-bituminoso por lo general son más grandes que las del carbón bituminoso. La densidad de las cenizas volantes varía entre 2.1 [ton/m³] a 3.0 [ton/m³] mientras que la superficie específica puede variar entre 170 a 1000 [m²/kg]. Su color es grisáceo pero puede ser más oscuro a medida que la ceniza contiene más carbón que no se quemó totalmente [22].

Las propiedades químicas de las cenizas volantes dependen del carbón del que fueron obtenidas, generalmente están compuestas mayormente por óxido de sílice, alúmina, óxido de hierro, óxido de calcio y pérdidas de la ignición. Los lignitos y carbones sub-bituminosos se caracterizan por tener mayor concentración de calcio y magnesio y un porcentaje menor de óxido de silicio y alúmina que el carbón bituminoso.

Además el lignito y el carbón sub-bituminoso podrían originar ceniza con una mayor concentración de sulfatos que el bituminoso.

Las cenizas volantes son usualmente clasificadas por su uso en cementos en clase F y clase C. La ceniza clase F es generalmente subproducto de la combustión de carbones de buena calidad (carbones bituminosos o antracita) en tanto que la de clase C es subproducto de la combustión de baja calidad (carbones sub-bituminosos y/o lignito). Sin embargo, la mayor diferencia entre ambas clases es la concentración de óxido de calcio que presentan, mientras la ceniza clase F tiene muy baja concentración de este, la ceniza clase C tiene concentraciones en algunas ocasiones superiores al 30%. Esta diferencia entre concentraciones de óxido de calcio hace que la ceniza de clase C pueda ser cementicea por si sola (endurece con agua) en tanto que la ceniza

de clase F es de naturaleza puzolánica (necesitaría Ca(OH)_2 y agua para endurecer) [22]. La clasificación según la norma ASTM C618 se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de cenizas volantes según ASTM C618

		Clase F	Clase C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	mín%	70	50
SO_3	máx%	5	5
Humedad	máx%	3	3
Perdidas en la incineración (LOI)	máx%	6	6

2.4.4. Problemas ambientales de las cenizas volantes

En el mundo se producen aproximadamente 600 millones de toneladas al año de cenizas de carbón, 500 millones de esas son cenizas volantes [22]. De esta cantidad solo entre un 10% y un 20% es reusado [23]. El aumento de áreas donde depositar cenizas volantes se está transformando en un problema ambiental serio. El banco mundial ha advertido que hacia 2015 en la India por ejemplo se necesitarán 1000 $[\text{km}^2]$ para almacenar todas las cenizas volantes que se habrán producido, esto equivale a necesitar 1 $[\text{m}^2]$ de terreno por persona para almacenar cenizas volantes [24].

En 2007 la generación de cenizas volantes se estimó en 1.797 $[\text{t/día}]$, lo que equivale a 593.043 $[\text{t}]$ de cenizas al año en Chile. De acuerdo con este mismo estudio, dada la gran cantidad de nuevos proyectos que empezarán a funcionar, el escenario para el año 2016 sería una producción de más de 3.000.000 $[\text{t/año}]$ de cenizas volantes [20]. Si pensamos en la cantidad de carbón que queda, el eventual agotamiento del gas como del petróleo, el creciente abandono de la opción nuclear y el desarrollo que aún falta para las energías renovables no convencionales, es de esperar que la producción de energía con carbón crezca o al menos se mantenga. Esto da para un gran margen en nuevos depósitos de cenizas volantes.

2.5. Pasivos ambientales producto de la producción de cobre

2.5.1. Ripios

La lixiviación del cobre es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener cobre de los minerales oxidados que lo contienen aplicando una solución de ácido sulfúrico y otros reactivos llamada solución de refino. Este proceso se basa en que los minerales oxidados son sensibles al ataque de soluciones ácidas.

Luego de ser extraído de la mina, el mineral oxidado de cobre pasa por un proceso llamado chancado donde se fragmenta para reducir el tamaño de partícula. El mineral pasa a través de un chancador primario y luego un chancador secundario obteniendo un material con tamaño máximo de ½". El tamaño con el que queda el material es suficiente para que los óxidos queden expuestos a la solución ácida.

El material chancado se transporta mediante cintas transportadoras y/o camiones hacia el lugar donde se formarán pilas de lixiviación. Una pila de lixiviación es básicamente un terraplén de material chancado rico en óxidos de cobre que será expuesto a una constante irrigación de solución ácida con el fin de disolver los óxidos y así poder rescatar desde debajo del terraplén una solución rica en cobre desde donde a través de otros procesos se obtendrá cobre fino.

Todo el material restante que contenía el mineral oxidado de cobre se denomina **ripio** y es roca chancada que aún tiene un poco de cobre y solución ácida producto de la lixiviación. Este material luego del ciclo de lixiviación es llevado a botaderos donde se acumula en un tranque.

2.5.2. Relaves

Los sulfuros de cobre no se lixivian pues demorarían mucho en desprenderse del cobre. Este tipo de minerales pasa por un proceso llamado flotación en el cual se obtiene lo que se denomina concentrado de cobre.

La flotación es una técnica de concentración de minerales en húmedo donde se aprovechan las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas para efectuar la selección. La idea es separar los materiales aprovechando sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas desde una pulpa acuosa gracias al uso de burbujas de aire.

La flotación tiene 3 fases, la sólida que son los materiales que se quieren disociar, la líquida que es el agua y la gaseosa que es el aire. La pulpa acuosa se forma con material molido muy finamente con tamaños cercanos a los 100 micrones, agua y además reactivos para la flotación. Normalmente el porcentaje de sólidos en la pulpa no supera el 40%. La idea de que el material este molido tan finamente es que las partículas estén bien diferenciadas y sean capaces de adherirse a las burbujas de aire.

En un proceso ideal el material que se obtiene por flotación está bien concentrado mientras que el material que no flota decanta, toda este material fino que sobra se llama **relave** y es depositado mediante tuberías en grandes tranques.

3. Planteamiento del problema

3.1. Introducción

El hormigón geopolimérico lleva varios años en investigación y desarrollo y probablemente siga siendo objeto de estudio por sus características tanto en desempeño como en sustentabilidad. Este trabajo persigue estos mismos objetivos y es por esto que en el espíritu de la sustentabilidad se quiere buscar alternativas a los materiales que ya se usan y que han demostrado ser competentes para obtener hormigón geopolimérico.

Para obtener hormigón geopolimérico básicamente se necesita una fuente de aluminosilicatos, un medio alcalino activador y agregados. El hormigón convencional necesita el uso de cemento portland, mezcla de clínquer con yeso, este clínquer es obtenido a través de la técnica de la calcinación de piedra caliza y arcilla. Al tener que utilizar esta técnica la variabilidad para obtener cemento portland es reducida puesto que incluso cuando los cementos pueden tener adiciones (cenizas volantes, puzolanas, escorias de alto horno, etc.), estas significan solo un porcentaje del total y por lo tanto la dependencia del clínquer es absoluta.

A diferencia del hormigón convencional, el hormigón geopolimérico cuenta con la ventaja de poder ser obtenido haciendo uso de distintas fuentes de aluminosilicatos (caolín, escoria de alto horno, puzolanas, cenizas volantes, humo de sílice, ceniza de cascara de arroz, etc.). Este hecho fue considerado para intentar hacer uso de relaves de cobre en un porcentaje de la fuente de aluminosilicatos que se usa, la cual en el caso de este estudio es ceniza volante clase F. La razón que motiva la inclusión de relaves de cobre es que estos presentan óxido de silicio, óxido de aluminio, poco óxido de calcio y además son elementos muy finos (puesto que provienen de un proceso donde el mineral fue molido muy finamente para obtener cobre de él).

Además de estudiar la inclusión de relaves como fuente de aluminosilicatos se estudiará la posibilidad de usar ripios de cobre como agregado en la obtención de hormigón geopolimérico. Se han intentado usar ripios de cobre en la obtención de

hormigones convencionales sin éxito debido a la alta cantidad de sulfatos que poseen. Estos sulfatos reaccionan con los compuestos del cemento portland creando yeso y etringita como fue mencionado anteriormente. El hormigón geopolimérico al no reaccionar con los sulfatos presenta una oportunidad para darle uso a este pasivo ambiental que al igual que los relaves de cobre se deposita en grandes áreas y que no tiene un uso a gran escala actualmente.

Se llevará a cabo una serie de ensayos usando como árido hormigón reciclado, al igual que los ripios de cobre, se reemplazará gradualmente una parte del agregado común por hormigón reciclado. De esta manera se pretende ver si el hormigón reciclado es apto como árido para la obtención de hormigón geopolimérico.

Otro factor que es importante a la hora de masificar el uso del hormigón geopolimérico como material de construcción es el curado que se le dará. La literatura muestra que en general se necesita una temperatura superior a la temperatura ambiente para poder desarrollar las reacciones químicas que le dan resistencia al hormigón geopolimérico. Este uso de temperatura para el curado podría ser un impedimento para la masificación del hormigón geopolimérico puesto que le quita facilidad en la implementación a diferencia del hormigón convencional que desarrolla resistencia a temperatura ambiente.

Si bien es cierto que la temperatura aumenta la velocidad de las reacciones químicas en el hormigón geopolimérico, a temperatura ambiente es posible obtener resistencias útiles para su uso como material de construcción, la literatura indica que con el paso del tiempo a temperatura ambiente el hormigón geopolimérico aumenta en resistencia. Por lo tanto se estudiará el efecto que tiene la temperatura en el curado del hormigón geopolimérico, curando probetas tanto a temperatura ambiente como a una temperatura de 60[°C], a temperaturas mayores la ganancia en resistencia disminuye significativamente [25].

Otros parámetros que son importante debido al costo que representa la construcción con hormigón geopolimérico son el silicato de sodio y la solución de hidróxido de sodio, de hecho, si consideramos que la ceniza y los áridos que se pueden emplear son básicamente sub-productos de otras industrias, lo único que tiene un costo

significativo dentro de todos los elementos son estos materiales. Se estudiará la influencia que tiene la concentración de la solución de hidróxido de sodio y la alcalinidad del silicato de sodio.

3.2. Programa de ensayos

Para el programa de ensayos se consideraron 7 distintos set de ensayos, primero se variará la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio de manera de estudiar su influencia en las propiedades que desarrollará la mezcla.

Se fijará una dosificación y se confeccionarán dos mezclas con el fin de someter cada una a procesos de curado distinto. Se estudiará el curado a temperatura ambiente como a 60[°C] por 24[h] y luego se realizarán ensayos a 7, 14, 21 y 28 días para ambas mezclas.

En el siguiente set de ensayos se variará la fuente de aluminosilicatos creando una mezcla entre ceniza volante y relaves de cobre para estudiar la influencia que podrían tener estos pasivos ambientales dentro de un hormigón geopolimérico.

Se estudiará la influencia de dos áridos no convencionales como remplazo de áridos comunes. En un primer set de ensayos se mezclarán áridos convencionales con ripios de cobre y en un segundo set de ensayos se mezclarán áridos convencionales con áridos reciclados intentando hacer una reutilización de hormigón en desuso.

Durante experiencias previas se vio la importancia del agua extra dentro de la mezcla dado el aumento de la trabajabilidad que aporta a la mezcla, sin embargo, esta cantidad de agua extra afectaría las propiedades que desarrollará el material, se confeccionarán 3 distintas mezclas con distintas cantidades de agua extra para estudiar el efecto en la propiedades que tiene esta adición.

En todos los ensayos anteriores se usará un tipo de silicato que es lo que más aparece en la literatura, sin embargo, se conseguirá otro silicato con menor alcalinidad (tiene un menor costo) para ver cómo funciona y que influencia tiene en la mezcla.

Tabla 2: Dosificación de mezclas variando [NaOH]

Mezcla	Ceniza	Árido	Hidróxido de	Silicato	Agua	Curado		
	Volante	Común	Sodio	de Sodio	extra	[h]	[°C]	
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[h]	[°C]
HG1	420	1507	8	91	182	50	24	60
HG2	420	1507	10	91	182	50	24	60
HG3	420	1507	12	91	182	50	24	60
HG4	420	1507	14	91	182	50	24	60
HG19	420	1507	16	91	182	50	24	60

Tabla 3: Dosificación de mezclas, influencia del curado

Mezcla	Ceniza	Árido	Hidróxido de	Silicato	Agua	Curado		
	Volante	Común	Sodio	de Sodio	extra	[h]	[°C]	
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[h]	[°C]	
HG5	420	1507	14	91	182	40	24	60
HG6	420	1507	14	91	182	40	24	24

Tabla 4: Dosificaciones, inclusión de relaves

Mezcla	Ceniza	Relaves de	Árido	Hidróxido de	Silicato de	Agua	Curado	
	Volante	Cobre	Común	Sodio	Sodio	extra	[h]	[°C]
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[h]	[°C]
HG5	420	0	1507	14	91	182	40	24 60
HG7	315	105	1507	14	91	182	40	24 60
HG8	210	210	1507	14	91	182	40	24 60
HG9	105	315	1507	14	91	182	40	24 60
HG10	0	420	1507	14	91	182	40	24 60

Tabla 5: Dosificaciones, inclusión de rípios de lixiviación

Mezcla	Ceniza	Árido	Rípios de	Hidróxido de	Silicato de	Agua	Curado	
	Volante	Común	Cobre	Sodio	Sodio	extra	[h]	[°C]
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[h]	[°C]
HG5	420	1507	0	14	91	182	40	24 60
HG11	420	1130	377	14	91	182	40	24 60
HG12	420	754	754	14	91	182	40	24 60

Tabla 6: Dosificaciones, inclusión de hormigones reciclados

Mezcla	Ceniza Volante	Árido Común	Hormigón reciclado	Hidróxido de Sodio		Silicato de Sodio	Agua extra	Curado	
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[h]	[°C]
HG5-1	420	1507	0	14	91	182	40	24	60
HG15	420	1130	377	14	91	182	40	24	60
HG16	420	754	754	14	91	182	40	24	60

Tabla 7: Dosificaciones, influencia del agua extra

Mezcla	Ceniza Volante	Árido Común	Hidróxido de Sodio		Silicato de Sodio	Agua extra	Curado	
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[h]	[°C]
HG4	420	1507	14	91	182	30	24	60
HG5-1	420	1130	14	91	182	40	24	60
HG20	420	754	14	91	182	50	24	60

Tabla 8: Dosificaciones, influencia del tipo silicato

Mezcla	Ceniza Volante	Árido Común	Hidróxido de Sodio		Silicato de Sodio		Agua extra	Curado	
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M]	[kg/m ³]	SiO ₂ :Na ₂ O	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[h]	[°C]
HG5-1	420	1507	14	91	3:1	182	40	24	60
HG21	420	1130	14	91	2:1	182	40	24	60

Por cada mezcla se confeccionó un molde RILEM el cual tiene 3 probetas, por tanto, para ver densidad y ensayar a resistencia a la flexión se tendrán 3 valores por mezcla en tanto que para ensayar a compresión se tendrán 6 valores puesto que se usan las mitades de las probetas ensayadas a flexión. La excepción es en el caso donde se estudió curado donde por cada mezcla se confeccionaron 4 moldes, se ensayaron a 7, 14, 21 y 28 días.

4. Materiales

4.1. Ceniza volante

La ceniza volante usada en este estudio pertenece a la división **Ventanas** de **AES Gener**, fue extraída desde los silos de acopio aún húmeda y fue secada en horno por 24 horas a 60°C, la composición química mediante fluorescencia de rayos x es presentada en la Tabla 9.

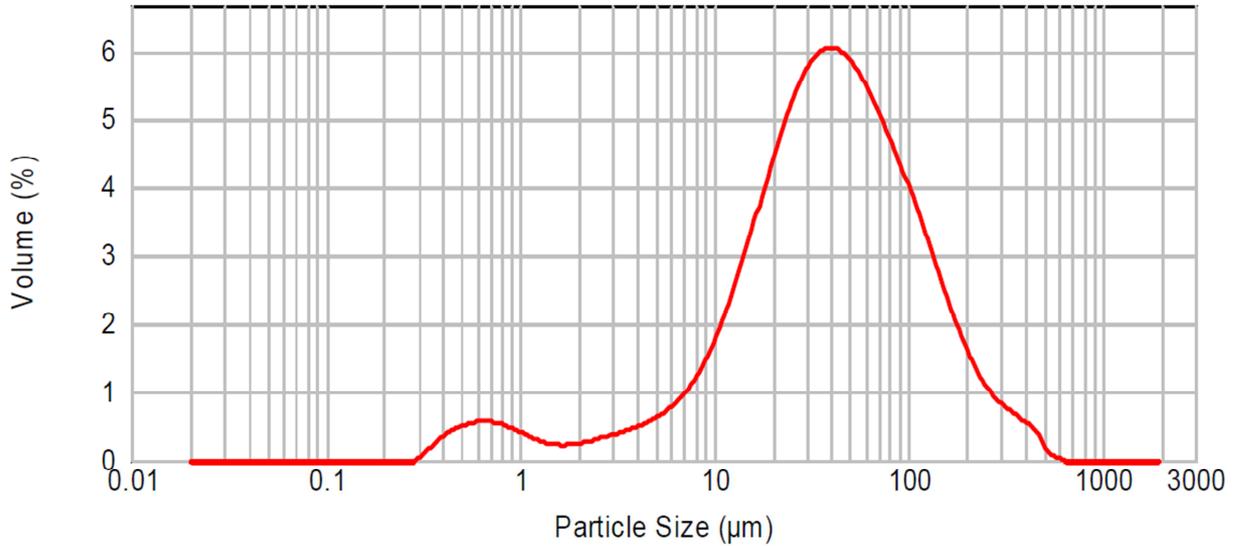
Tabla 9: FRX de cenizas volantes

Óxido	Contenido (%)
Si ₂ O	55,1
Al ₂ O ₃	26,5
Fe ₂ O ₃	8,5
CaO	4,4
K ₂ O	2,3
TiO ₂	1,1
P ₂ O ₅	0,6
SO ₃	0,6

Como se puede ver la cantidad de calcio es menor a un 5% y la suma $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 90.1\% > 70\%$ y por lo tanto esta ceniza es de clase F. Adicionalmente se tiene que la razón $SiO_2/Al_2O_3 = 2.08$ y por lo tanto esta ceniza es un material idóneo desde el punto de vista de composición química para obtener geopolímeros [25].

La superficie específica resultó ser de 0.647 [m²/g], la curva granulométrica se presenta en la Imagen 3 , como se puede ver, la mayor parte de la distribución se encuentra entre los 30[μm] y 50[μm], tema que será discutido en el capítulo de análisis.

Imagen 3: Granulometría de cenizas volantes



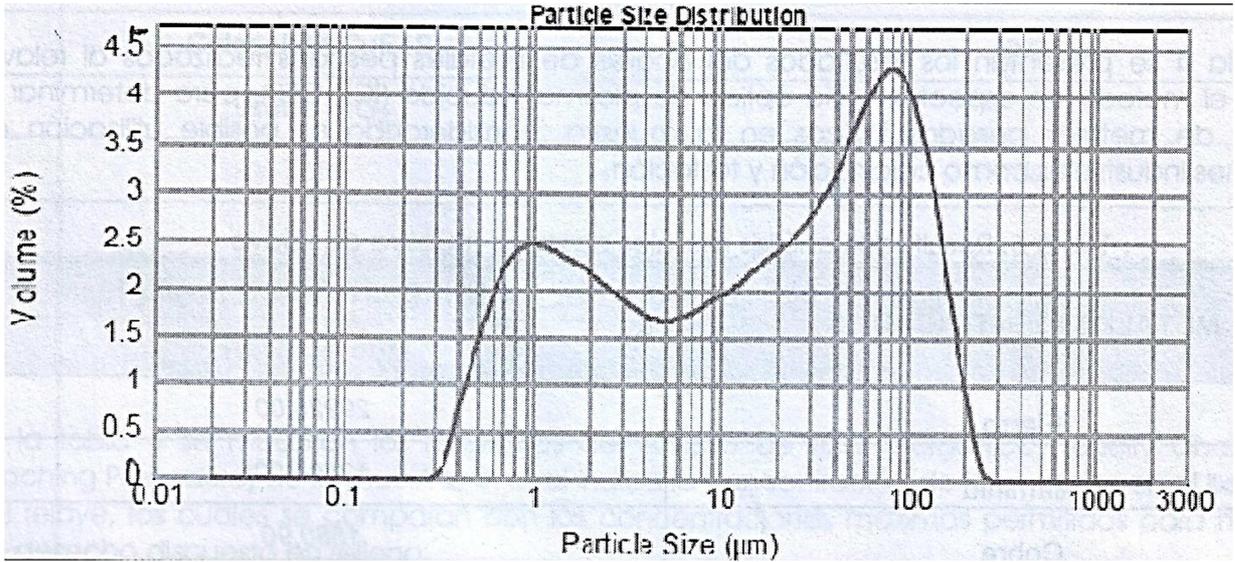
4.2. Relaves de cobre

Los relaves que son utilizados en este estudio pertenecen a la división **EI Soldado** de **Anglo American** y fueron caracterizados de acuerdo al informe 711.664 elaborado por el IDIEM de la Universidad de Chile, la caracterización química por **Fluorescencia de Rayos X (FRX)** se muestra en la Tabla 10 en tanto que la granulometría se presenta en la Imagen 4.

Tabla 10: FRX de Relaves de Cobre

Óxido	Contenido (%)
Si ₂ O	49,6
Al ₂ O ₃	14,6
Fe ₂ O ₃	9,1
CaO	7,2
MgO	4,8
Na ₂ O	4,4
K ₂ O	1,3
SO ₃	0,3

Imagen 4: Granulometría de relaves de cobre



4.3. Solución alcalina

Para este estudio se utilizó una mezcla de silicato de sodio con una solución de hidróxido de sodio. Para hacer la solución de hidróxido de sodio se usaron pellets de hidróxido de sodio con una pureza mayor al 99%.

Para preparar la solución de hidróxido de sodio de una determinada concentración molar se llevaron a cabo los siguientes pasos:

Se calculó el peso molecular del hidróxido de sodio de acuerdo a la Ecuación 4 como:

$$PM_{NaOH} = P_{Na} + P_{O} + P_{H} = 22.99 \left[\frac{g}{mol} \right] + 15.99 \left[\frac{g}{mol} \right] + 1.01 \left[\frac{g}{mol} \right] = 39.99 \left[\frac{g}{mol} \right] \sim 40 \left[\frac{g}{mol} \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

La concentración molar de una solución está definida como cantidad de moles en 1 litro de solución, por lo tanto, tomemos por ejemplo una solución de hidróxido de sodio de concentración 14[M], necesitamos según la Ecuación 5:

$$14[mol] * 40 \left[\frac{g}{mol} \right] = 560[g] \quad \text{Ecuación 5}$$

Así, se añaden 560[g] de soluto completando con agua hasta obtener 1[l] de solución.

Los silicatos de sodio que se emplearon en este estudio fueron proporcionados por la empresa **Austral Chemicals**. En todos los ensayos fue utilizado solo el silicato de sodio con una razón $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ de aproximadamente 2:1. En el último estudio se utilizó adicionalmente otro silicato de sodio de razón 3:1 con el fin de comparar resultados entre ambos silicatos. Las características de estos silicatos se presentan en la Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente.

Tabla 11: Características silicato de sodio 2:1

Parámetros	Determinación
Alcalinidad Total (% Na_2O)	14,82
Razón	2,08
% SiO_2	30,82
Viscosidad 20[°C] [cps]	900

Tabla 12: Características silicato de sodio 3:1

Parámetros	Determinación
Alcalinidad Total (% Na_2O)	8,03
Razón	3,42
% SiO_2	27,5
Viscosidad 20[°C] [cps]	90

4.4. Áridos

Se emplearon tres áridos distintos, un árido convencional que es polvo de roca, y dos áridos no convencionales que son ripios de lixiviación y hormigón reciclado. Se optó por usar polvo de roca en vez de arena normal con la idea de tamizarla de tal manera de asemejarse en granulometría al resto de los dos áridos, por tanto, los tres áridos fueron cortados para tener tamaño máximo uniforme en la malla n°8. Las granulometrías de estos áridos se presentan en la Imagen 5, la Imagen 6 y la Imagen 7 respectivamente.

Imagen 5: Curva granulométrica, polvo de roca

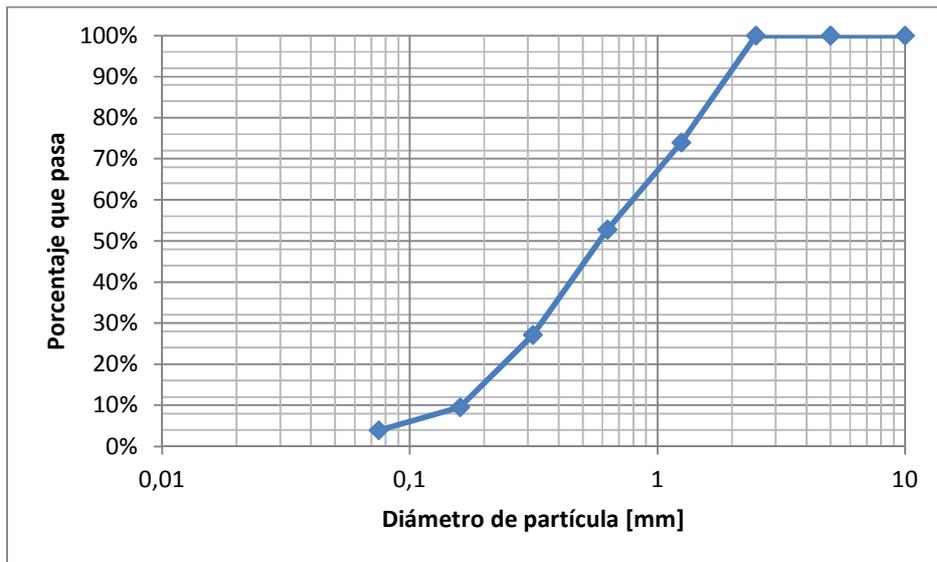


Imagen 6: Curva granulométrica, ripios de lixiviación

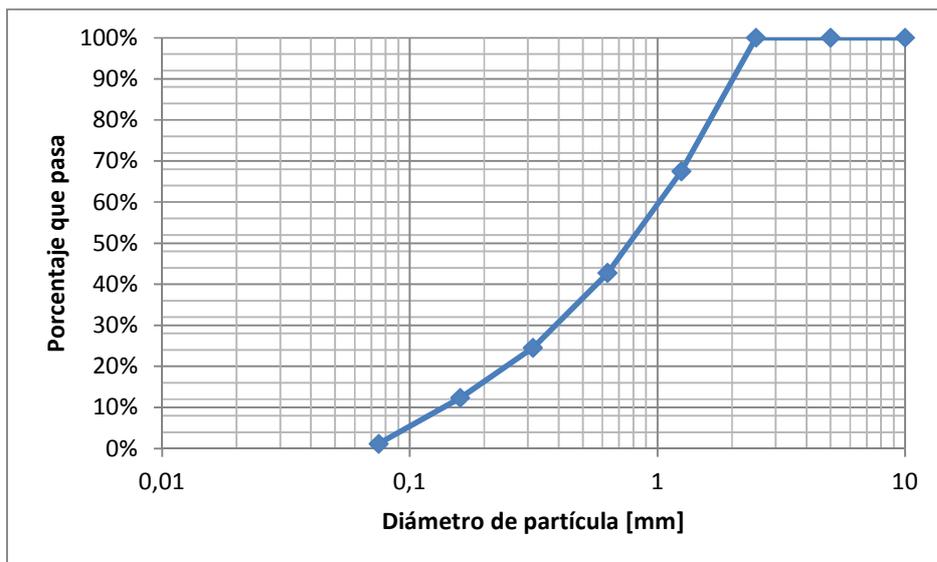
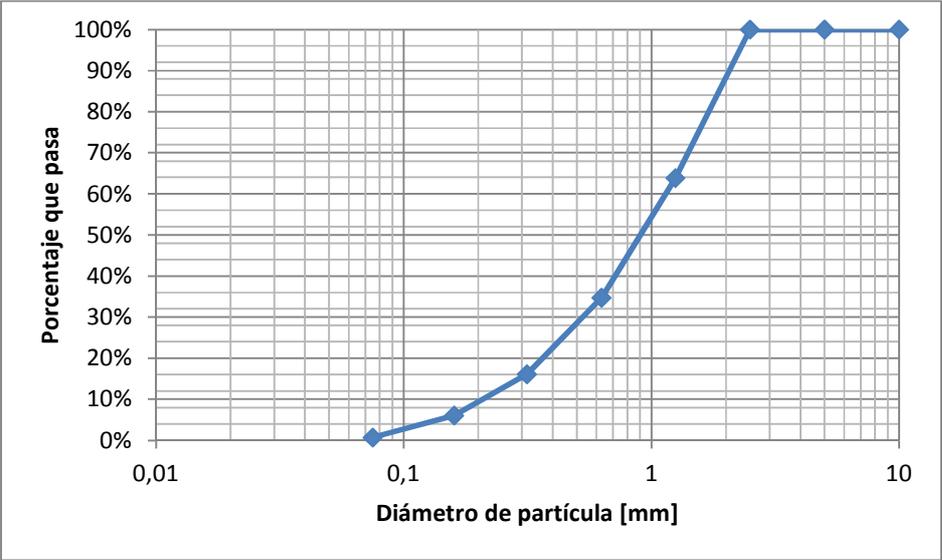


Imagen 7: Curva granulométrica, hormigón reciclado



5. Trabajo experimental

5.1. Introducción

En este capítulo se presenta en detalle el desarrollo del proceso con el cual se lograron obtener morteros geopoliméricos.

Durante la investigación del estado del arte respecto de la obtención de geopolímeros no se logró encontrar experiencias previas a nivel local por lo cual se tomaron en cuenta metodologías que se emplearon en experiencias previas en distintos países descritas en el capítulo 2.

Dado que el principal objetivo de esta investigación es intentar encontrar una dosificación tal que el hormigón geopolimérico pueda ser empleado como material de construcción se puso énfasis en intentar reproducir la metodología por la cual se obtiene el hormigón convencional, esto es, intentar hacer uso de los mismos equipos, herramientas y materiales que se usan en la industria del hormigón.

Sin duda uno de los parámetros más importantes en la industria del hormigón es la resistencia mecánica que desarrollará el material, esta propiedad es necesaria para el diseño estructural de cualquier tipo de elemento. En consecuencia, para este estudio se tomó la resistencia mecánica como el principal parámetro de análisis.

Como se mencionó anteriormente los materiales que se usaron para este estudio fueron ceniza volante clase F, hidróxido de sodio, silicato de sodio y diversos tipos de áridos. Dada la probabilidad de que estos materiales que se obtuvieron para la experiencia presentaran diferencias con los materiales usados en distintas partes del mundo (diferencia con otras cenizas y distinto silicato de sodio básicamente) se hicieron bastantes pruebas hasta poder llegar a una dosificación y un proceso por el cual se lograra obtener geopolímeros.

5.2. Dosificación de hormigones de prueba

La obtención de geopolímeros está sujeta a distintas condiciones necesarias para poder desarrollar las reacciones químicas que luego permitirán al material obtener sus propiedades, algunas de estas propiedades se describieron en el capítulo 2.

Para lograr obtener geopolímeros se tomó una dosificación de carácter experimental que ha sido utilizada en experiencias anteriores [25]. La idea era tomar esta dosificación, reproducirla e intentar modificarla de manera de obtener una mezcla trabajable que lograra desarrollar resistencia mecánica haciendo uso de los materiales que se habían obtenido.

Los parámetros que componen esta dosificación de hormigón geopolimérico son: densidad (r), áridos (AR), razón entre solución alcalina (SA) y fuente de aluminosilicatos (FA), razón entre silicato de sodio - solución de hidróxido de sodio y agua extra.

A través de sucesivas mezclas de prueba se estudiaron los parámetros anteriormente descritos, se vio su influencia en la mezcla y se llegó a una dosificación que cumplía con los requisitos de trabajabilidad y desarrollo de resistencia mecánica tal que en un entorno cercano a estos parámetros se pudiera estudiar su dependencia en el desarrollo de resistencia mecánica de la mezcla.

Se vio que hubo una diferencia entre la dosificación propuesta por Hardjito y Rangan [25] y la que se terminó utilizando en esta investigación, las diferencias en cada parámetro se detallan a continuación.

5.2.1. Áridos

Similar al hormigón convencional, la cantidad de árido que se usa para la obtención de hormigón geopolimérico está entre un 75% y un 80% en peso. Para este estudio se utilizó cerca de un 70% en peso de áridos dada la granulometría de los áridos que se utilizaron (elevada cantidad de finos), esto llevo a incluir mayor cantidad de pasta de geopolímero. Una mayor cantidad de áridos en la mezcla mostró dificultades en el mezclado, baja compacidad y por tanto baja resistencia mecánica.

Por otra parte, para las mezclas que incluían hormigón reciclado (**HR**), se tomó en cuenta la absorción que presenta el árido (>5%), lo que es un potencial problema al desarrollo de las reacciones de geopolimerización. Al presentar una alta absorción el árido absorbe solución alcalina, se vio que este proceso provocaría lo siguiente:

- Reducción en la alcalinidad de la mezcla, lo que disminuye la capacidad de disolver sílice y alúmina.
- Menor cantidad de iones Na^+ , que afecta la cantidad de gel que se puede formar.
- Aumento de viscosidad en la pasta, aumento en la cantidad de aire atrapado, menor resistencia a la compresión.

5.2.2. Razón entre solución alcalina y fuente de aluminosilicatos

La razón que se ve en la literatura puede variar entre 0.3 y 0.45, para este estudio se tomó una razón de 0.65 puesto que con menores razones no se pudo obtener uniformidad en la consistencia de la mezcla para las diferentes series de ensayos que se llevarán a cabo.

$$\frac{\text{Solución alcalina} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{\text{Fuente de aluminosilicatos} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} = 0.65 \quad \text{Ecuación 6}$$

5.2.3. Razón entre silicato de sodio y solución de hidróxido de sodio

Esta razón puede estar entre 0.4 y 2.5, para este estudio se usó 2.0 pues el silicato es más barato que el hidróxido de sodio, el aumento de esta razón ha demostrado un aumento en la resistencia a la compresión [25], sin embargo en base a estudios previos se vio que con una razón de 2.5 hay un aumento de exudación y que con valores menores a 2.0 la mezcla de soluciones precipita y por lo tanto no es posible físicamente mezclarla con el resto de los componentes.

$$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{\text{NaOH} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} = 2.0 \quad \text{Ecuación 7}$$

5.2.4. Agua extra

Se vio que la incorporación de agua extra es necesaria debido a la viscosidad de la pasta de geopolímero, el agua extra aumenta la trabajabilidad y disminuye la cantidad de aire atrapado en la mezcla.

5.2.5. Ejemplo de dosificación

Se ejemplificará la dosificación que se usará para el hormigón geopolimérico de prueba 1 (HG1). Se supone una densidad de 2200 [kg/m³]. La porción de agregado para este hormigón será de un 68.5% en peso, por lo tanto:

$$68.5\% * 2400 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 1507 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Teniendo la proporción entre solución alcalina (SA) y fuente de aluminosilicatos (FA) fijada en 0.65, y sabiendo que la suma en peso de estos componentes es igual a la densidad del hormigón geopolimérico menos la porción en peso de áridos tenemos el sistema de ecuaciones representado por las ecuaciones 9 y 10:

$$\frac{SA}{FA} = 0.65 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$SA + FA = 2200 \left[\frac{kg}{m^3} \right] - 1507 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 693 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 10}$$

Resolviendo se obtiene que la cantidad de FA en peso dentro de la mezcla será:

$$FA = \frac{693 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{(1+0.65)} = 420 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

De esta manera la cantidad de solución alcalina será la densidad esperada menos la porción de áridos y la cantidad aluminosilicatos calculada:

$$SA = D - AG - FA = 2200 \left[\frac{kg}{m^3} \right] - 1507 \left[\frac{kg}{m^3} \right] - 420 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 273 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

Como la razón entre silicato de sodio y la solución de hidróxido de sodio es de 2.0 y la suma de estos componentes es el total de la solución alcalina, tenemos:

$$\frac{Na_2SO_3(aq)}{NaOH(aq)} = 2,0 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Na_2SO_3 + NaOH_{aq} = SA = 273 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 14}$$

Resolviendo el sistema encontramos cada cantidad:

$$Na_2SO_3 = \frac{SA}{\left(1 + \frac{1}{2,0}\right)} = \frac{273 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{1,5} = 182 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

$$NaOH_{aq} = SA - Na_2SO_3 = 273 \left[\frac{kg}{m^3} \right] - 182 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 91 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 16}$$

6. Presentación de resultados

Se realizaron ensayos a flexión y compresión de acuerdo a la norma NCh 158. Of67 para ensayar probetas RILEM, las cuales son paralelepípedos (4 x 4 x 16 [cm³]) modificando la confección y el curado de las probetas como de señaló anteriormente. Para calcular densidad se tomó el peso de cada probeta y se dividió entre volumen.

6.1. Concentración de solución de hidróxido de sodio

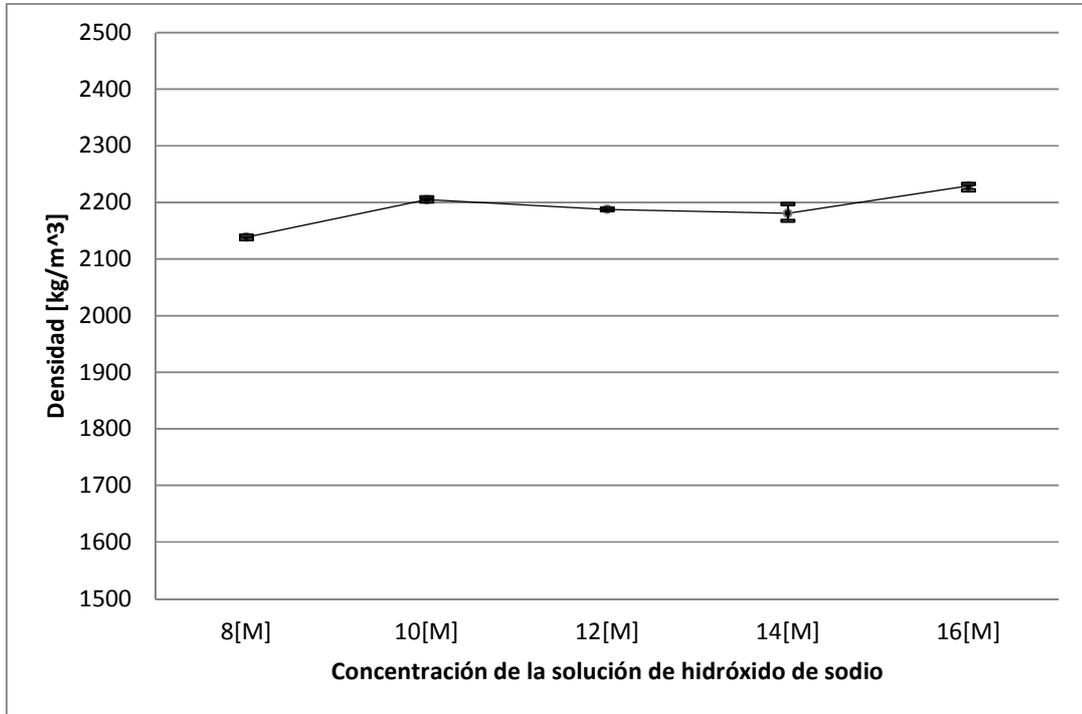
Se prepararon y ensayaron a compresión distintas mezclas variando solo la concentración de la solución de hidróxido de sodio. Estas concentraciones fueron 8[M], 10[M], 12[M], 14[M] y 16[M]. Las probetas fueron curadas primero en horno a 60 [°C] por 24 [h], se desmoldaron, se envolvieron en papel film para evitar pérdidas por evaporación, se dejaron a una temperatura constante de 24[°C] por 6 días más, se registró densidad, se ensayaron a flexión y compresión.

6.1.1. Densidad

Tabla 13: Densidades en función de concentración de NaOH

Mezcla	Concentración NaOH	Peso	Densidad
	[M]	[g]	[kg/m ³]
HG1	8	547,5	2139
HG2	10	564,5	2205
HG3	12	560,0	2188
HG4	14	558,2	2181
HG19	16	570,6	2229

Imagen 8: Densidades en función de concentración de NaOH



6.1.2. Resistencia a la flexión y compresión

Tabla 14: Resistencias en función de concentración de NaOH

Mezcla	Concentración NaOH	Flexión [MPa]	Compresión [MPa]
	[M]		
HG1	8	3,43	16,45
HG2	10	4,02	20,25
HG3	12	3,96	21,34
HG4	14	4,62	24,44
HG19	16	5,07	28,36

Imagen 9: Resistencia a compresión en función de concentración de NaOH

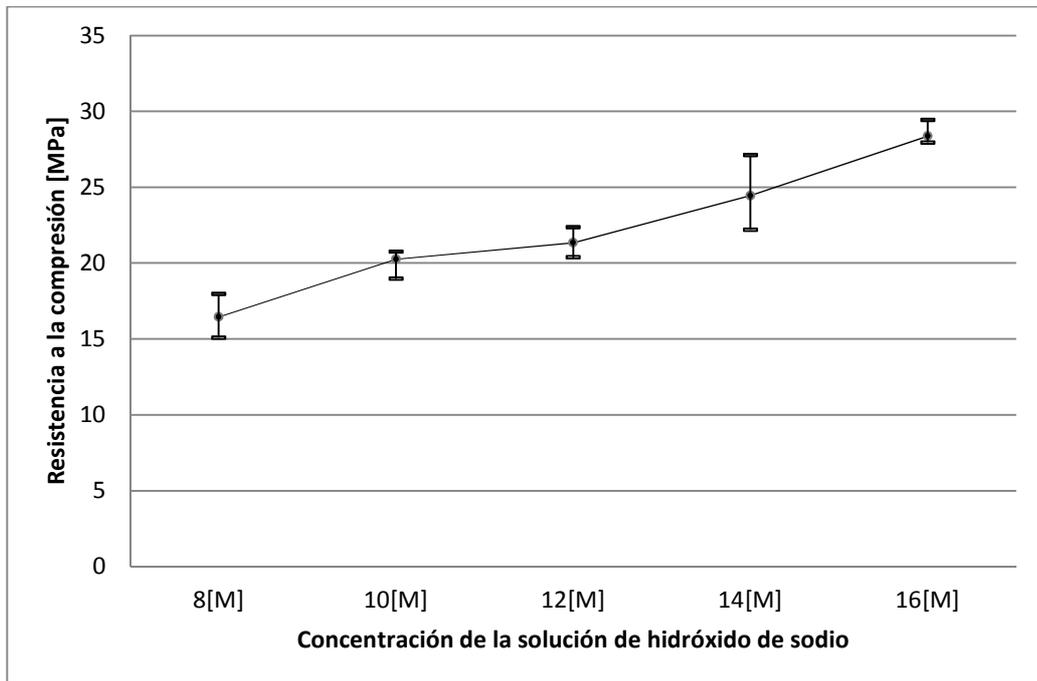
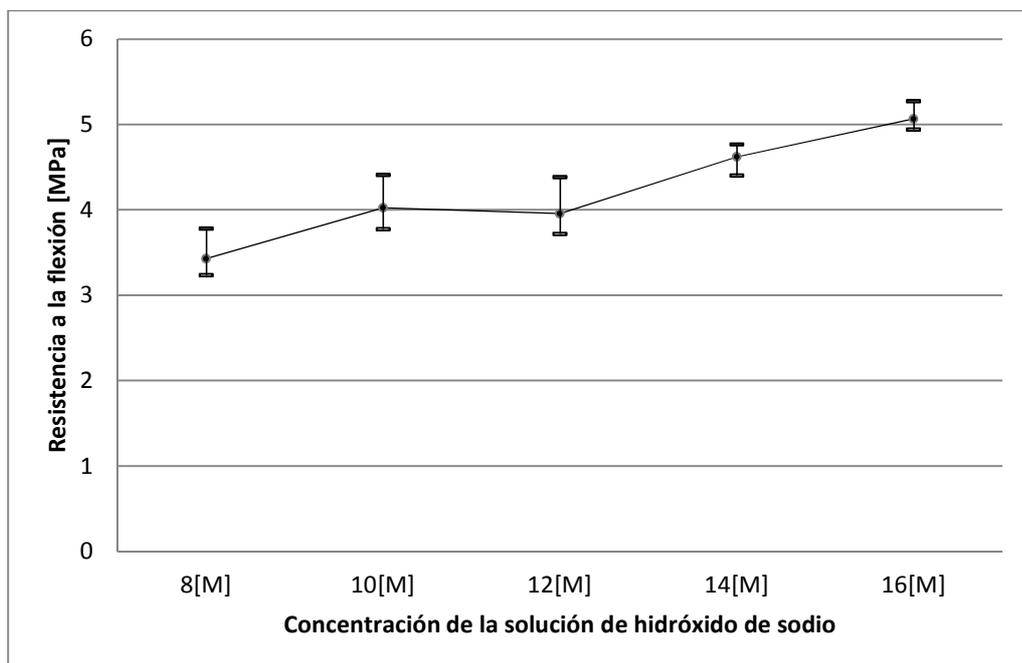


Imagen 10: Resistencia a flexión en función de concentración de NaOH



6.2. Curado

Para una mezcla de prueba se estudió la influencia de la temperatura y el tiempo de curado en morteros geopoliméricos. Para una misma dosificación se confeccionaron morteros los que fueron sometidos a dos tipos de curado, el primer curado se hizo en horno a 60[°C] por 24[h], estos morteros se desmoldaron, se envolvieron en papel film para evitar excesiva evaporación y se dejaron a una temperatura constante de 24[°C], se midió densidad, resistencia a la flexión y resistencia a la compresión luego de 7, 14, 21 y 28 días.

Para el segundo tipo de curado no se hizo uso de horno. Se confeccionaron morteros los que se curaron a una temperatura de 24[°C] y luego de 6 días se desmoldaron (no se pudieron desmoldar antes pues no habían desarrollado una resistencia necesaria para esta tarea), se envolvieron en papel film para evitar evaporación excesiva, se dejaron curando a una temperatura constante de 24[°C], se midió densidad, resistencia a la flexión y resistencia a la compresión luego de 7, 14, 21 y 28 días.

6.2.1. Densidad

Tabla 15: Densidades, curado previo en horno

Mezcla	Peso [g]	Curado [dia]	Densidad [kg/m ³]
HG5-1	567,9	7	2218
HG5-2	568,6	14	2221
HG5-3	564,9	21	2207
HG5-4	561,0	28	2192

Tabla 16: Densidades, curado a temperatura ambiente

Mezcla	Peso [g]	Curado [dia]	Densidad [kg/m ³]
HG6-1	570,3	7	2228
HG6-2	577,8	14	2257
HG6-3	571,3	21	2232
HG6-4	567,0	28	2215

Imagen 11: Densidades, curado previo en horno

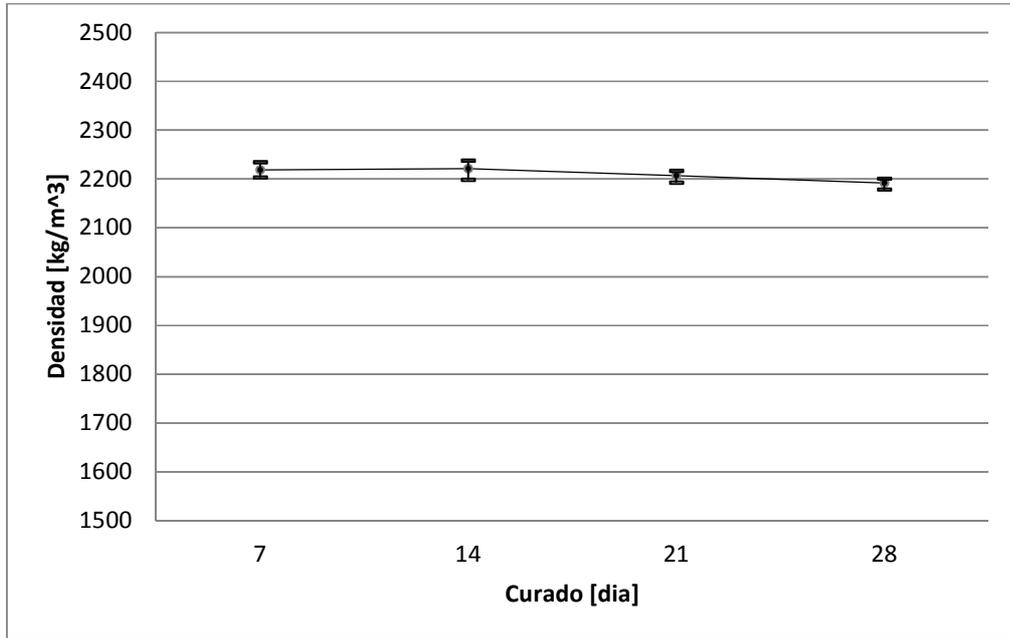
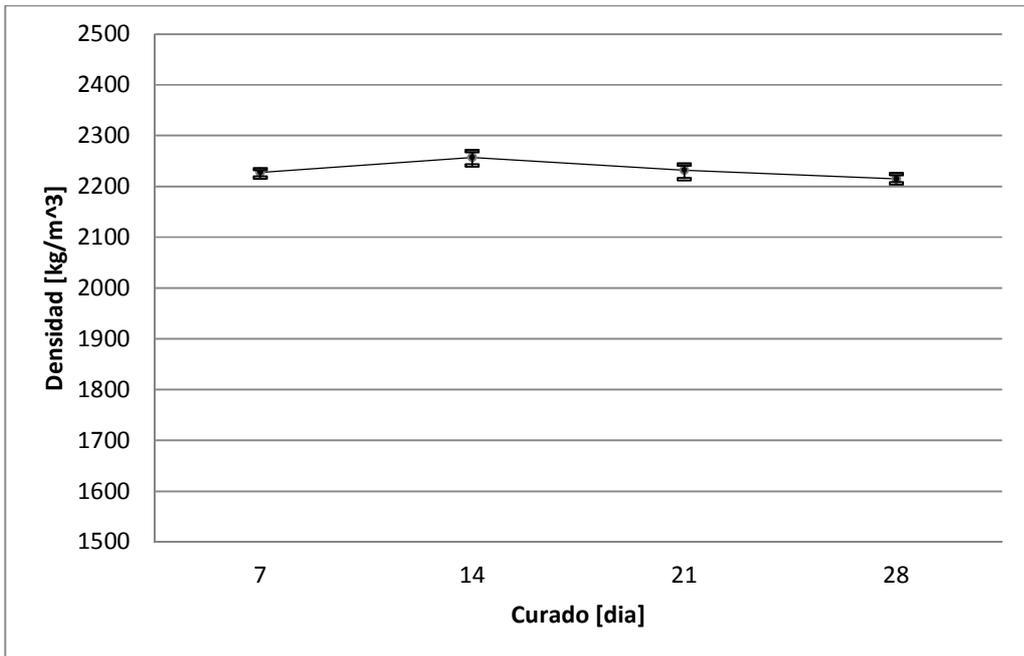


Imagen 12: Densidades, curado a temperatura ambiente



6.2.2. Resistencia a flexión y compresión

Tabla 17: Resistencias a flexión y compresión, curado previo en horno

Mezcla	Curado	Curado	Flexión	Compresión
	[T°]	[dia]	[MPa]	[MPa]
HG5-1	60	7	5,42	31,03
HG5-2	60	14	5,67	32,92
HG5-3	60	21	6,20	34,30
HG5-4	60	28	5,63	35,01

Tabla 18: Resistencias a flexión y compresión, curado a T° ambiente

Mezcla	Curado	Curado	Flexión	Compresión
	[T°]	[dia]	[MPa]	[MPa]
HG6-1	24	7	1,13	3,31
HG6-2	24	14	2,94	13,16
HG6-3	24	21	4,09	24,31
HG6-4	24	28	5,31	31,75

Imagen 13: Resistencia a compresión en función del tiempo, horno

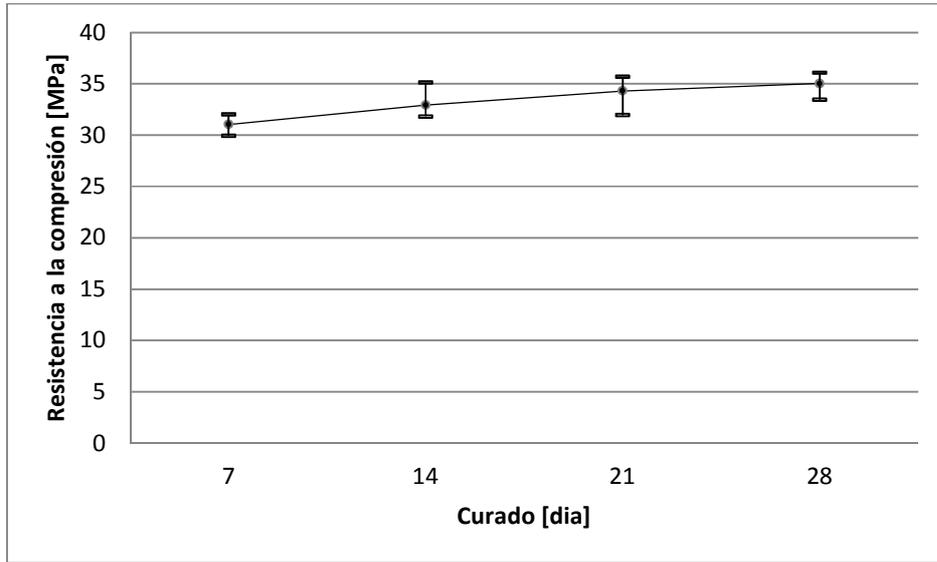


Imagen 14: Resistencia a compresión en función del tiempo, T° ambiente

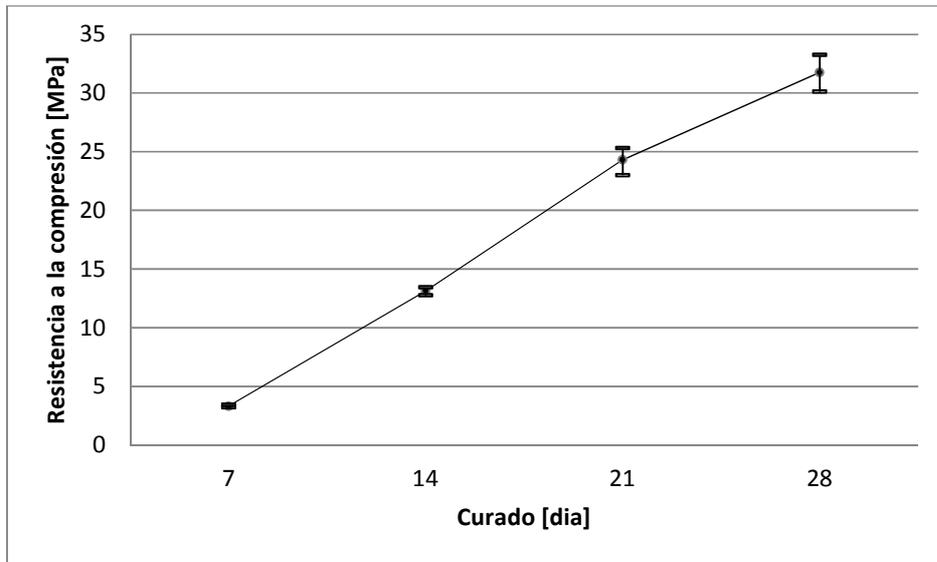


Imagen 15: Resistencia a flexión en función del tiempo, horno

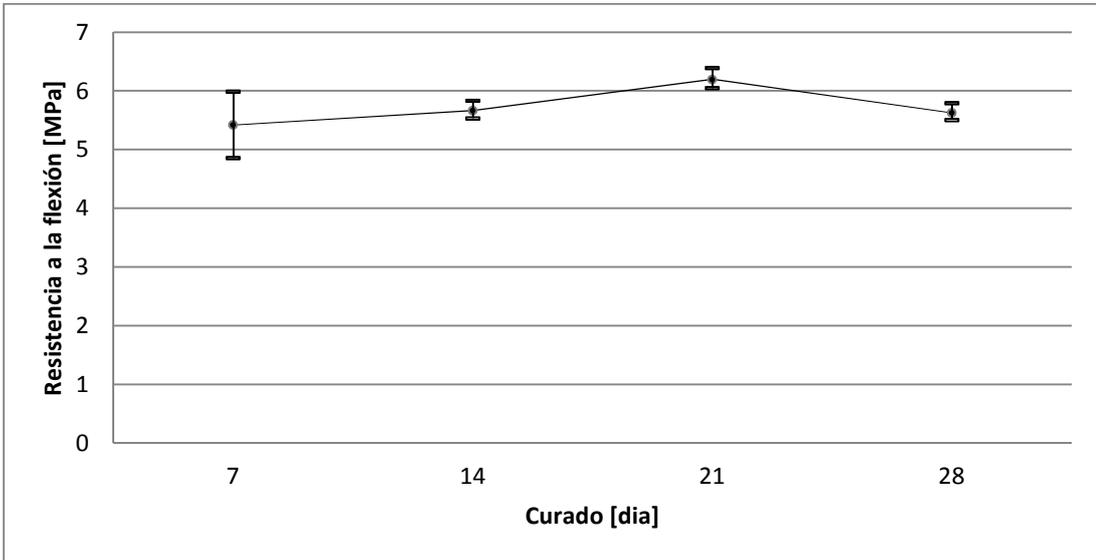
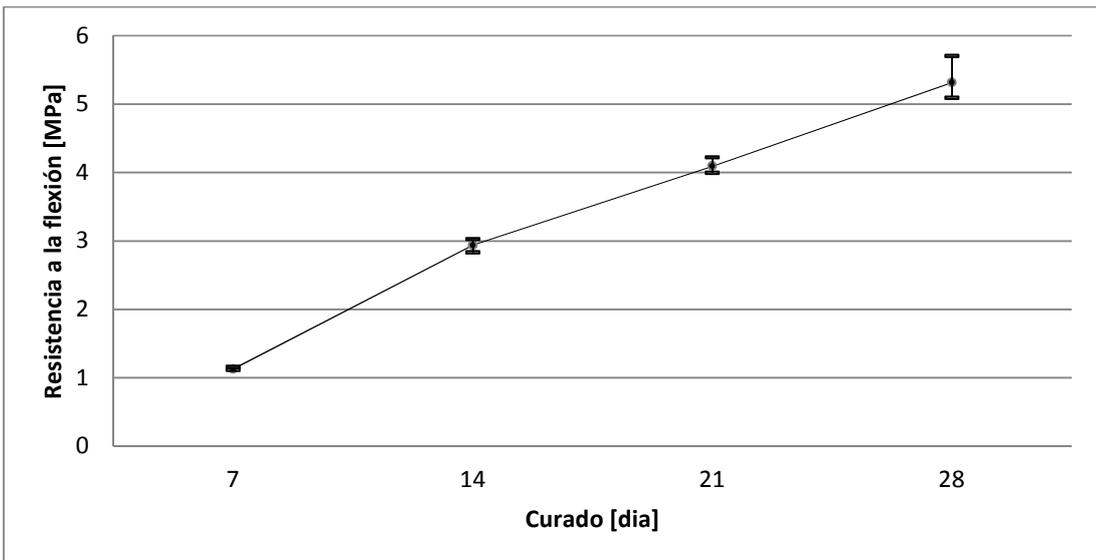


Imagen 16: Resistencia a flexión en función del tiempo, T° ambiente



6.3. Uso de relaves de cobre

Se estudió la posibilidad de incluir relaves de cobre (**RC**) como fuente de aluminosilicatos debido a la composición química que presentaron en el ensayo de FRX, es decir, altos niveles de sílice y alúmina. Se confeccionaron 5 morteros de prueba reemplazando en cada dosificación un porcentaje de la fuente de aluminosilicatos original, cenizas volantes clase F (**FA**).

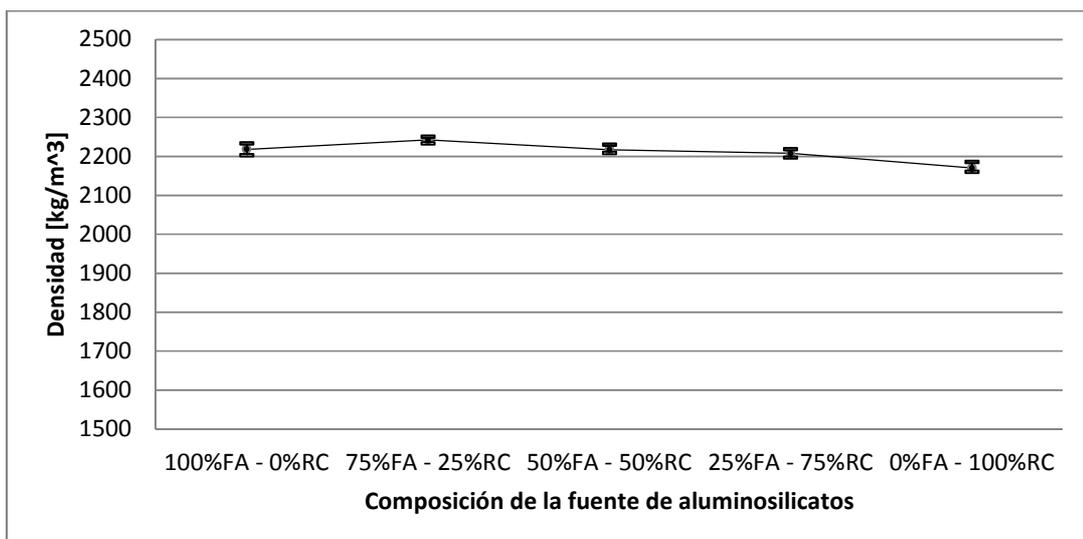
Del peso total de la fuente de aluminosilicatos (ceniza volante) se reemplazó un porcentaje en peso por relaves de cobre, desde el caso usando solo ceniza volante (100%FA-0% RC) hasta el caso usando solo relaves de cobre (0%FA-100%RC) variando cada vez en un 25%.

6.3.1. Densidad

Tabla 19: Densidad, inclusión de RC

Mezcla	Aluminosilicatos [FA%-RC%]	Peso [g]	Curado [dia]	Densidad [kg/m ³]
HG5-1	100-0	567,9	7	2218
HG7	75-25	574,1	7	2243
HG8	50-50	567,6	7	2217
HG9	25-75	565,1	7	2207
HG10	0-100	555,5	7	2170

Imagen 17: Densidad en función de inclusión de RC



6.3.2. Resistencia a flexión y compresión

Tabla 20: Resistencia a flexión y compresión, inclusión de RC

Mezcla	Aluminosilicatos [FA%-RC%]	Curado [día]	Flexión [MPa]	Compresión [MPa]
HG5-1	100-0	7	5,42	31,03
HG7	75-25	7	5,90	27,58
HG8	50-50	7	4,73	19,41
HG9	25-75	7	2,96	11,02
HG10	0-100	7	0,96	2,99

Imagen 18: Resistencia a flexión en función de inclusión de RC

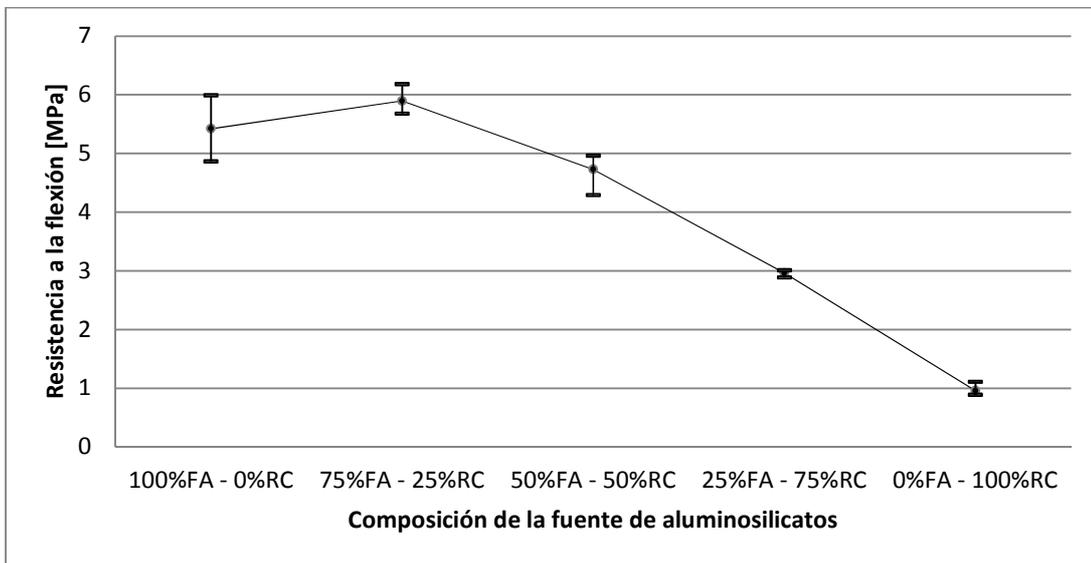
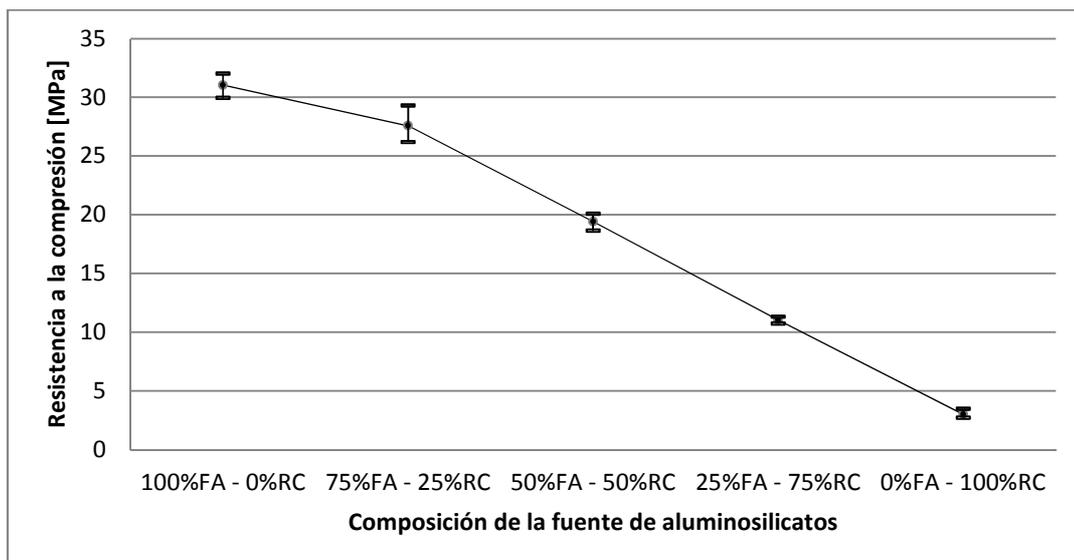


Imagen 19: Resistencia a compresión en función de inclusión de RC



6.4. Uso de ripios de cobre

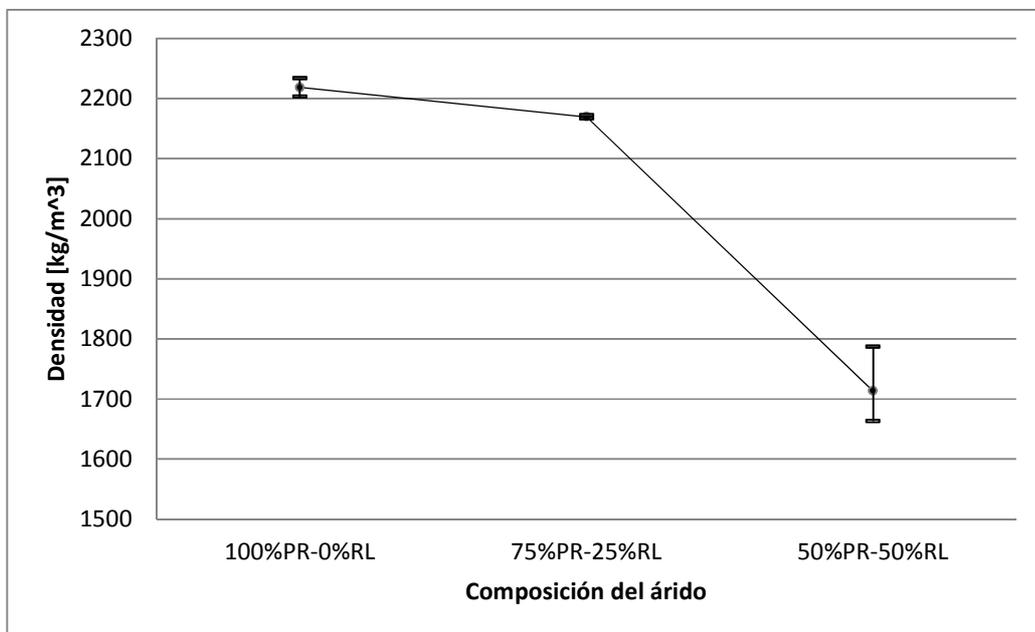
Se estudió la inclusión de ripios de cobre (**RL**) como áridos para confección de morteros geopoliméricos. Para esto se tomó la cantidad total de áridos y se reemplazó un porcentaje en cada mezcla por ripios de cobre (el resto del árido es roca chancada). Se hicieron 3 mezclas, una mezcla patrón donde no se utilizaron ripios de cobre, luego un 75% de roca chancada y un 25% de ripios de cobre para finalmente hacer otra mezcla con 50% roca chancada y 50% ripios de cobre. Una cantidad superior de ripios de cobre en la mezcla no permitió a la mezcla desarrollar ninguna resistencia.

6.4.1. Densidad

Tabla 21: Densidad, inclusión de RL

Mezcla	Áridos [PR%-RL%]	Peso [g]	Curado [día]	Densidad [kg/m ³]
HG5-1	100-0	567,9	7	2218
HG11	75-25	555,4	7	2170
HG12	50-50	438,7	7	1714

Imagen 20: Densidad en función de la inclusión de RL



6.4.2. Resistencia a flexión y compresión

Tabla 22: Resistencias a flexión y compresión, inclusión de RL

Mezcla	Áridos [PR%-RL%]	Curado [día]	Flexión [MPa]	Compresión [MPa]
HG5-1	100-0	7	5,42	31,03
HG11	75-25	7	5,62	29,77
HG12	50-50	7	1,20	6,74

Imagen 21: Resistencia a flexión en función de la inclusión de RL

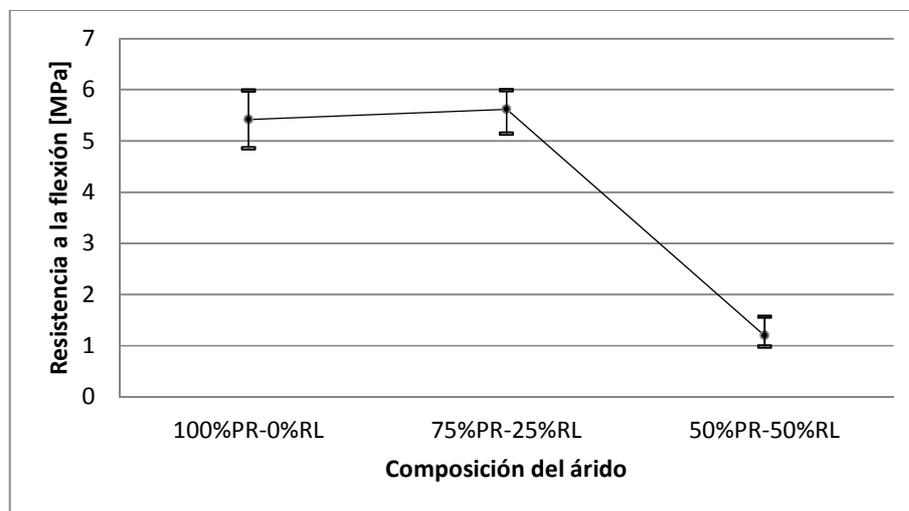
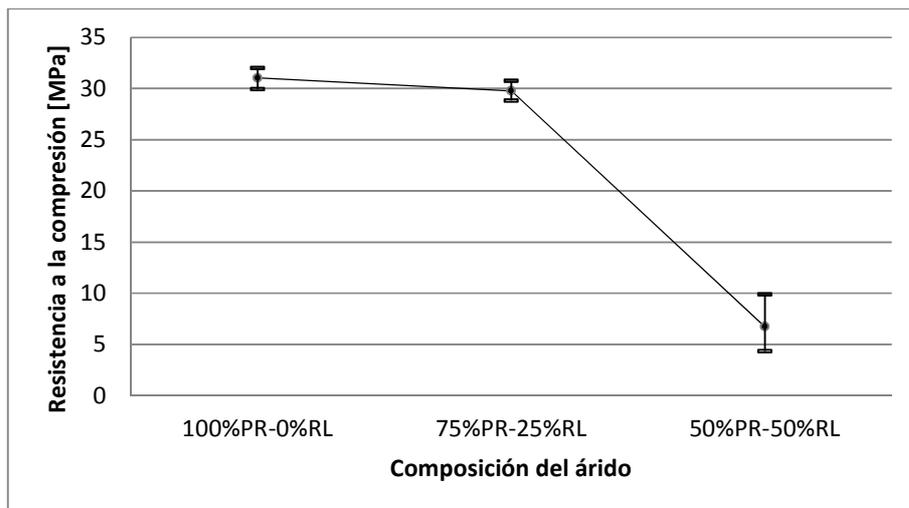


Imagen 22: Resistencia a compresión en función de la inclusión de RL



6.5. Uso de hormigón reciclado

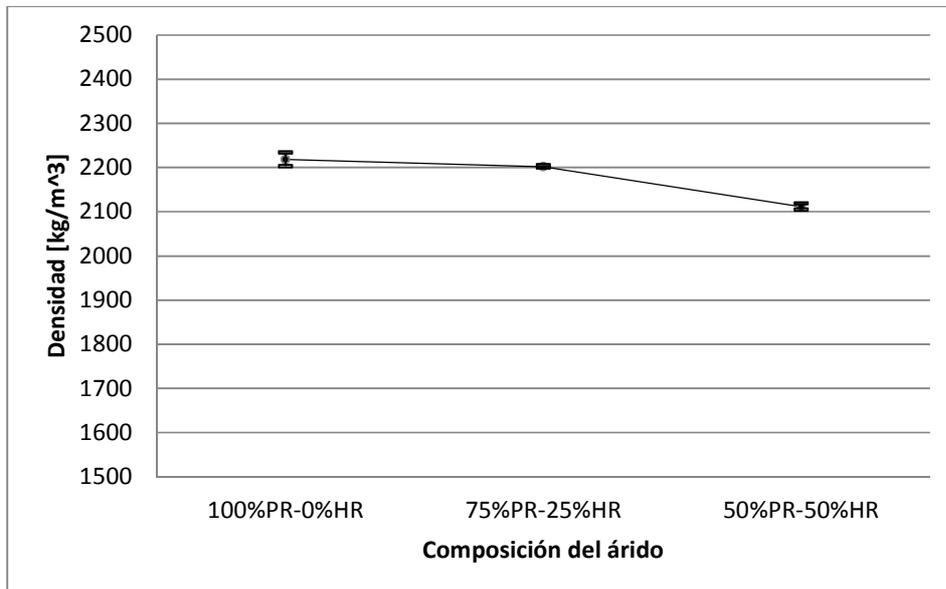
Al igual que con los ripios de cobre se estudió la inclusión de hormigón de reciclaje (HR) como árido para morteros geopoliméricos. Se elaboraron 3 mezclas, la primera como patrón sin incluir hormigón reciclado y las restantes con un remplazo del 25% y 50% en peso por hormigón reciclado respectivamente.

6.5.1. Densidad

Tabla 23: Densidad, inclusión de HR

Mezcla	Áridos [PR%-HR%]	Peso [g]	Curado [día]	Densidad [kg/m ³]
HG5-1	100-0	567,9	7	2218
HG15	75-25	563,7	7	2202
HG16	50-50	540,6	7	2112

Imagen 23: Densidad en función de la inclusión de HR



6.5.2. Resistencia a flexión y compresión

Tabla 24: Resistencia a flexión y compresión, inclusión de HR

Mezcla	Áridos [PR%-HR%]	Curado [día]	Flexión [MPa]	Compresión [MPa]
HG5-1	100-0	7	5,42	31,03
HG15	75-25	7	5,70	33,65
HG16	50-50	7	5,89	38,02

Imagen 24: Resistencia a flexión en función de la inclusión de HR

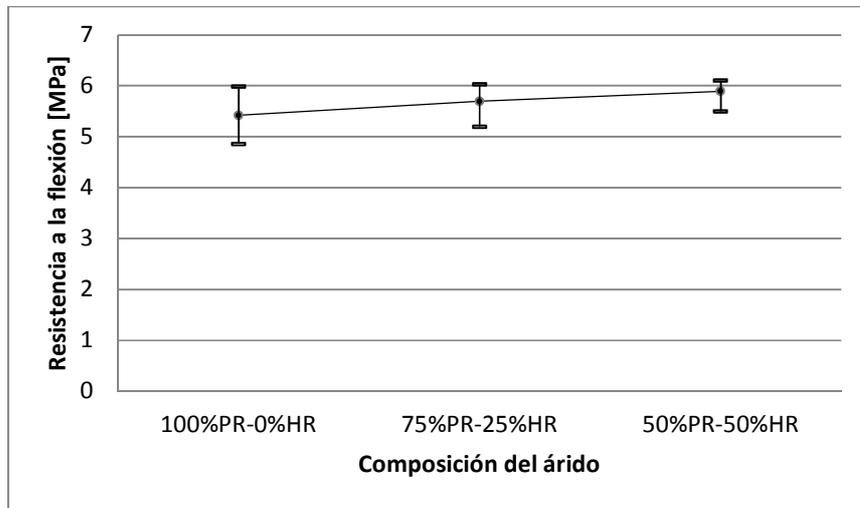
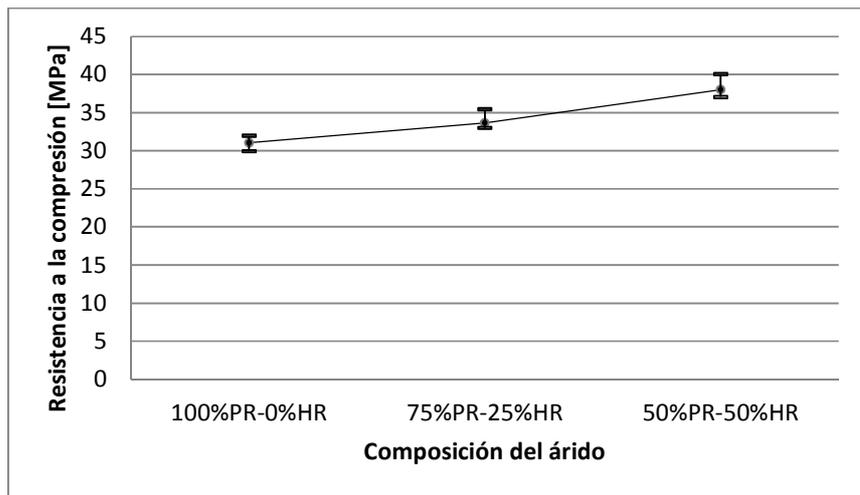


Imagen 25: Resistencia a compresión en función de la inclusión de HR



6.6. Uso de agua extra

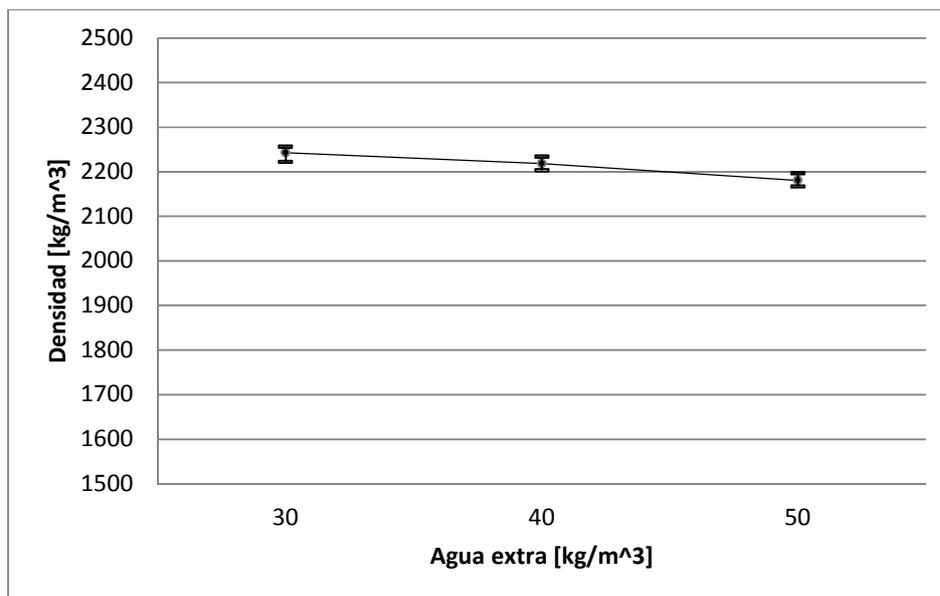
Se estudió el efecto que tiene el agua extra en la confección de morteros geopoliméricos, se mezclaron 3 dosificaciones variando solamente la cantidad de agua extra en 50, 40 y finalmente 30 [kg/m³].

6.6.1. Densidad

Tabla 25: Densidad, influencia del agua extra

Mezcla	Agua extra [kg/m ³]	Peso [g]	Curado [dia]	Densidad [kg/m ³]
HG4	50	558,2	7	2181
HG5-1	40	567,9	7	2218
HG20	30	574,1	7	2243

Imagen 26: Densidad en función del agua extra



6.6.2. Resistencias a flexión y compresión

Tabla 26: Resistencia a flexión y compresión, influencia del agua extra

Mezcla	Agua extra [kg/m ³]	Curado [dia]	Flexión [MPa]	Compresión [MPa]
HG4	30	7	6,07	35,91
HG5-1	40	7	5,42	31,03
HG20	50	7	4,62	24,44

Imagen 27: Resistencia a flexión en función del agua extra

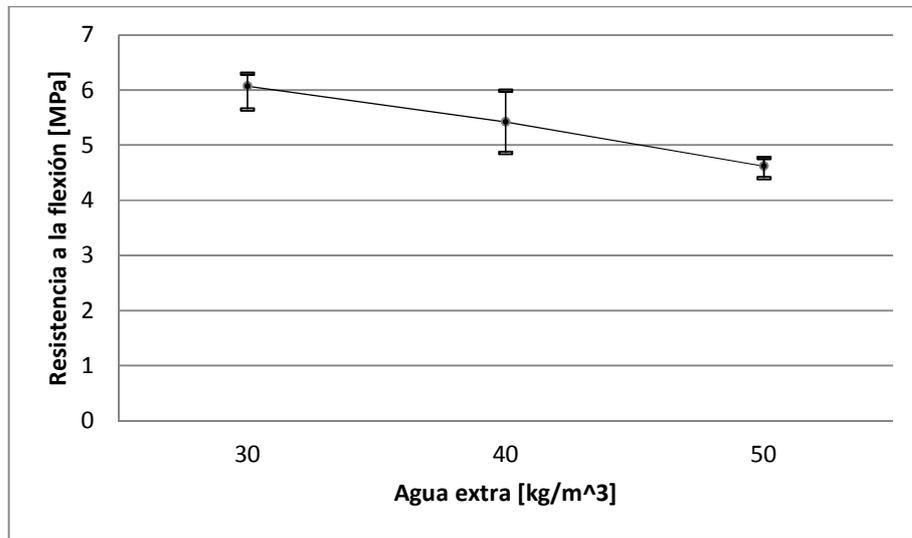
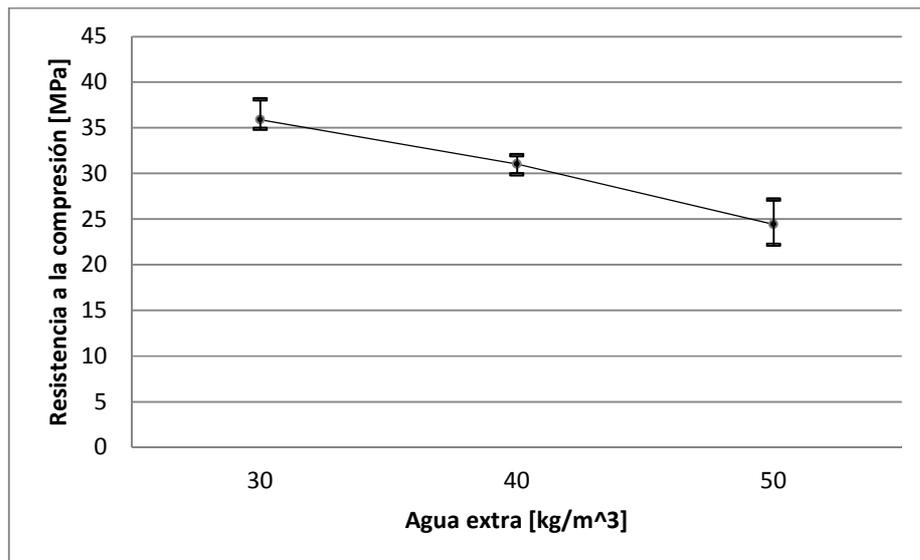


Imagen 28: Resistencia a compresión en función del agua extra



6.7. Tipo de silicato

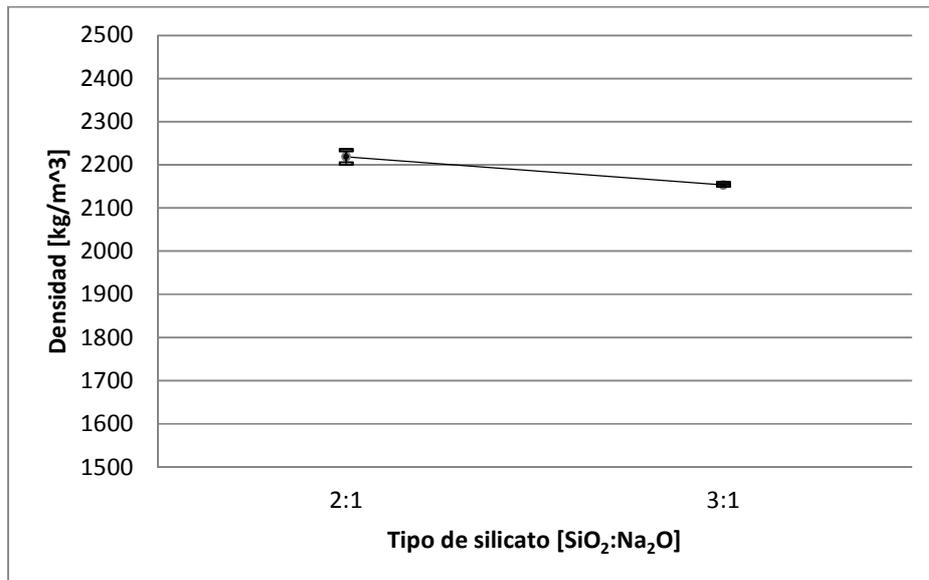
Se probaron dos tipos de silicato, el primer silicato es el que se usó en todos los ensayos salvo en este, es decir, el de una relación entre $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ de aproximadamente 2:1. El otro tipo de silicato es uno menos alcalino, de una razón entre $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ de aproximadamente 3:1, se quiere estudiar el efecto que tiene este cambio en densidad y resistencia mecánica.

6.7.1. Densidad

Tabla 27: Densidad, influencia del tipo de silicato

Mezcla	Silicato $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$	Peso [g]	Curado [dia]	Densidad [kg/m^3]
HG5-1	2:1	567,9	7	2218
HG21	3:1	551,3	7	2154

Imagen 29: Densidades, distintos tipos de silicatos



6.7.2. Resistencias a flexión y compresión

Tabla 28: Resistencia a flexión y compresión, influencia del tipo de silicato

Mezcla	Silicato SiO ₂ :Na ₂ O	Curado [día]	Flexión [MPa]	Compresión [MPa]
HG5-1	2:1	7	5,42	31,03
HG21	3:1	7	3,76	18,61

Imagen 30: Resistencia a flexión, distintos tipos de silicato

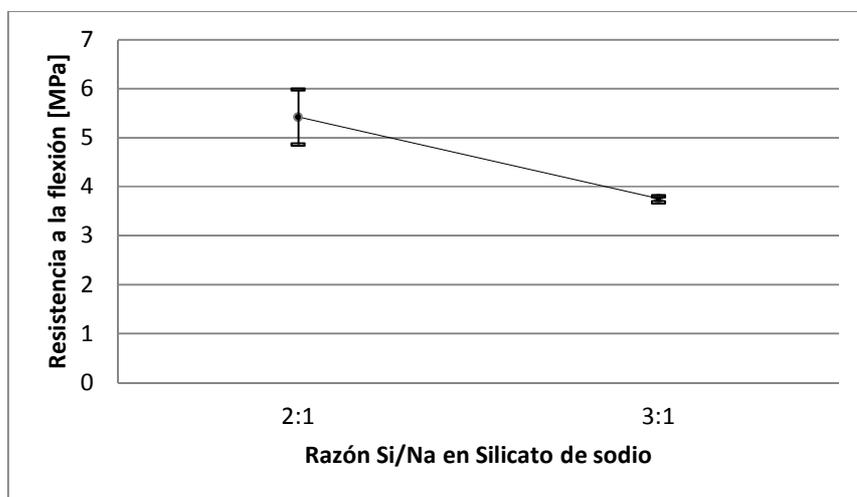
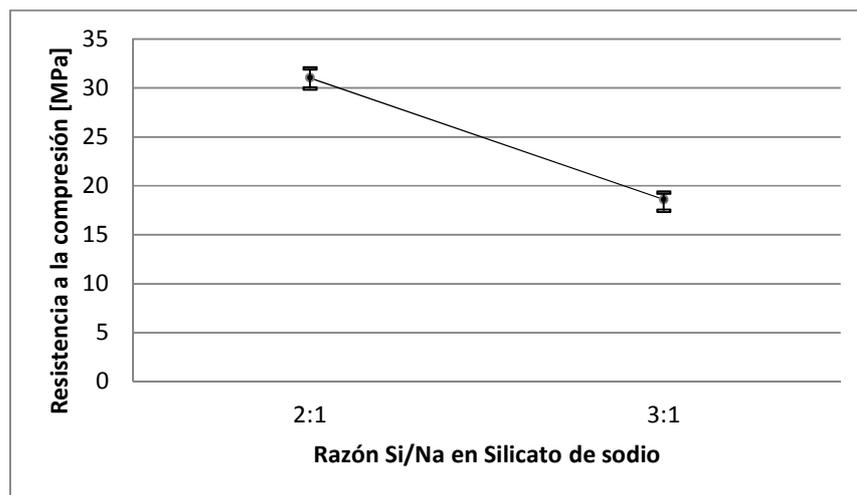


Imagen 31: Resistencia a compresión, distintos tipos de silicato



7. Análisis y discusión de resultados

7.1. Caracterización de materiales

Tanto para cenizas volantes como para relaves de cobre se hicieron dos tipos de caracterización, una caracterización química mediante fluorescencia de rayos x y una caracterización física para obtener granulometría. De la fluorescencia de rayos x se desprende el porcentaje en peso de los componentes del material. La ceniza volante es clase F, tiene en su mayoría sílice, alúmina y óxido de fierro (la alta cantidad de óxido de fierro produce el color oscuro de los geopolímeros que se obtuvieron), lo interesante de esta ceniza en especial es la razón que tiene entre sílice y alúmina la cual es alrededor de 2, lo que de acuerdo a algunos autores [16, 19, 24] podría ser el óptimo para la obtención de geopolímeros hechos con ceniza volante. Por otra parte la granulometría muestra un hecho interesante, la ceniza empleada en este estudio es muy grande comparada con otras cenizas volantes de clase F que han sido usadas en otros estudios, granulometrías de otras cenizas y de la empleada en este estudio se pueden ver desde la Imagen 32 a la Imagen 35.

Imagen 32: Granulometría de ceniza volante A

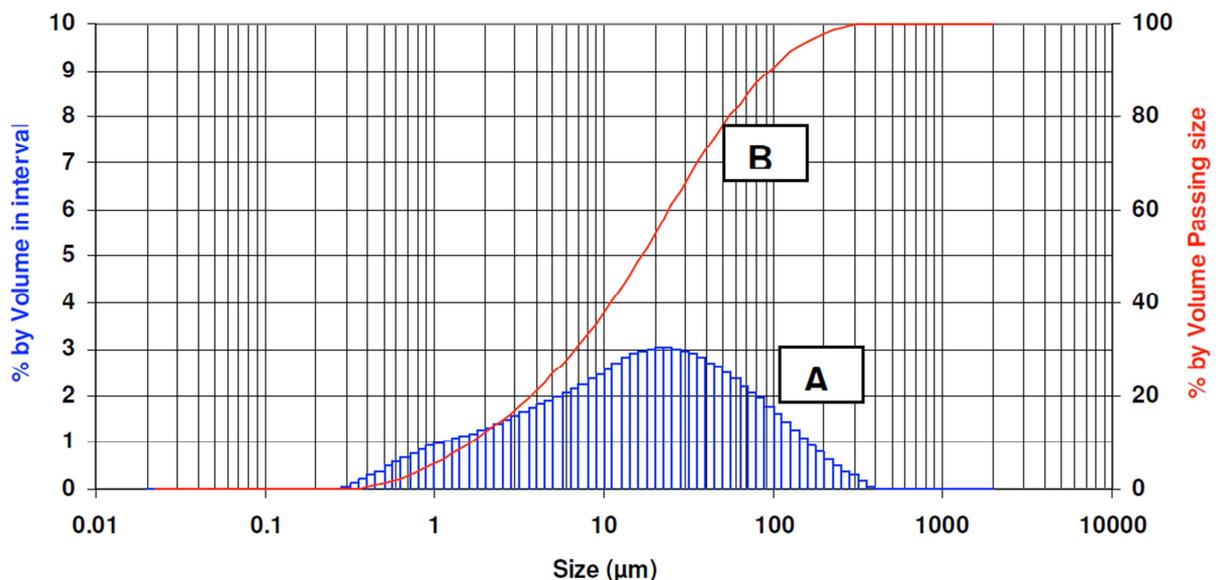


Imagen 33: Granulometría de ceniza volante B

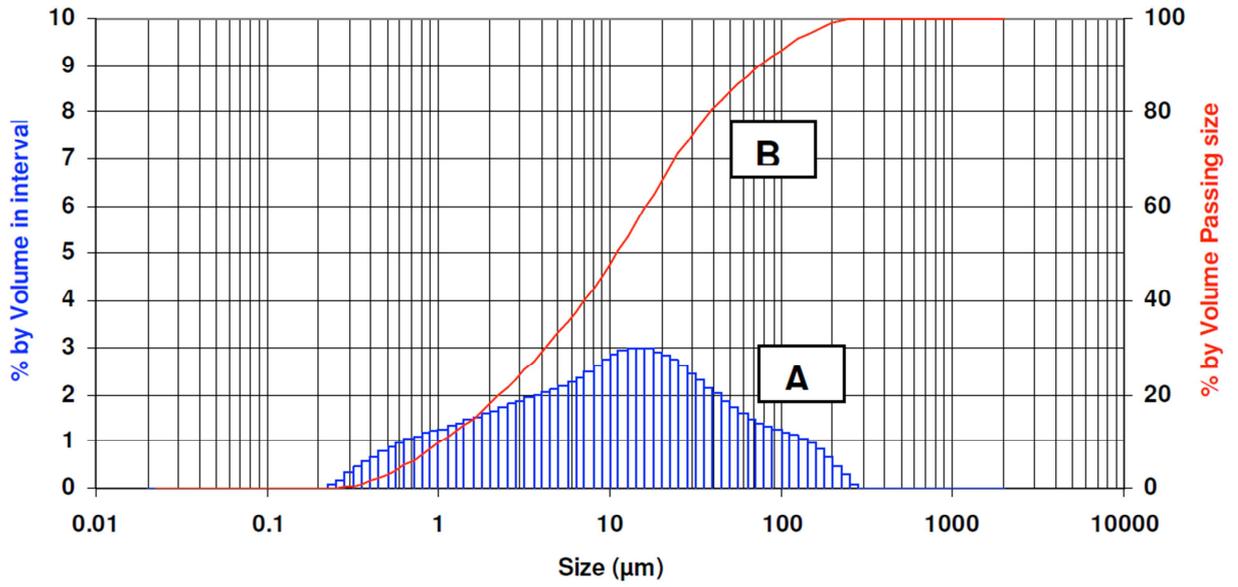


Imagen 34: Granulometría ceniza volante C

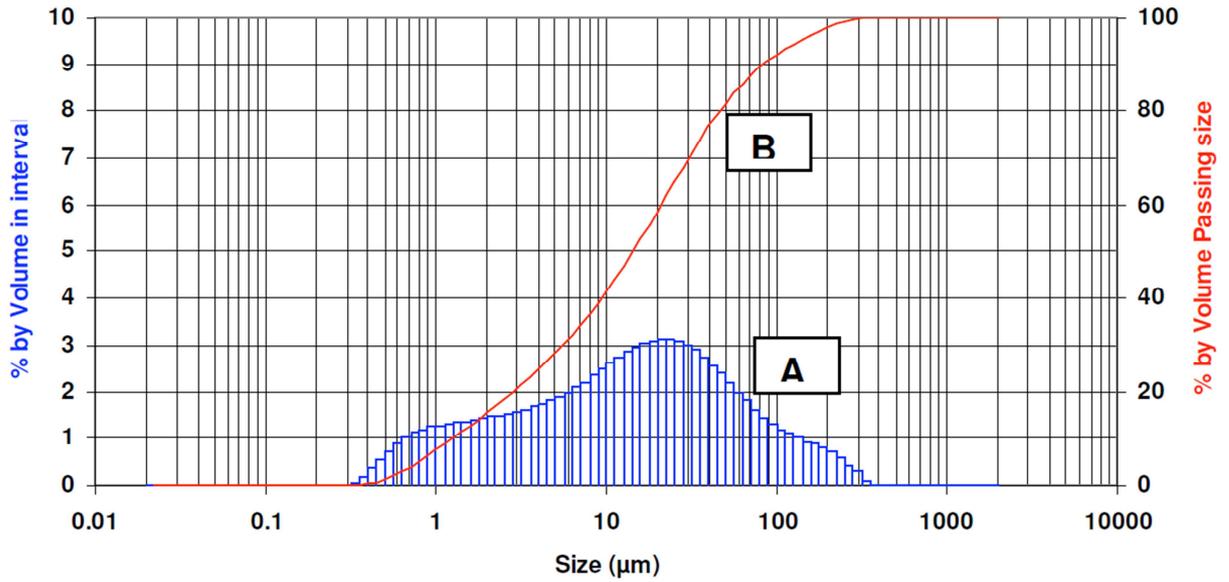
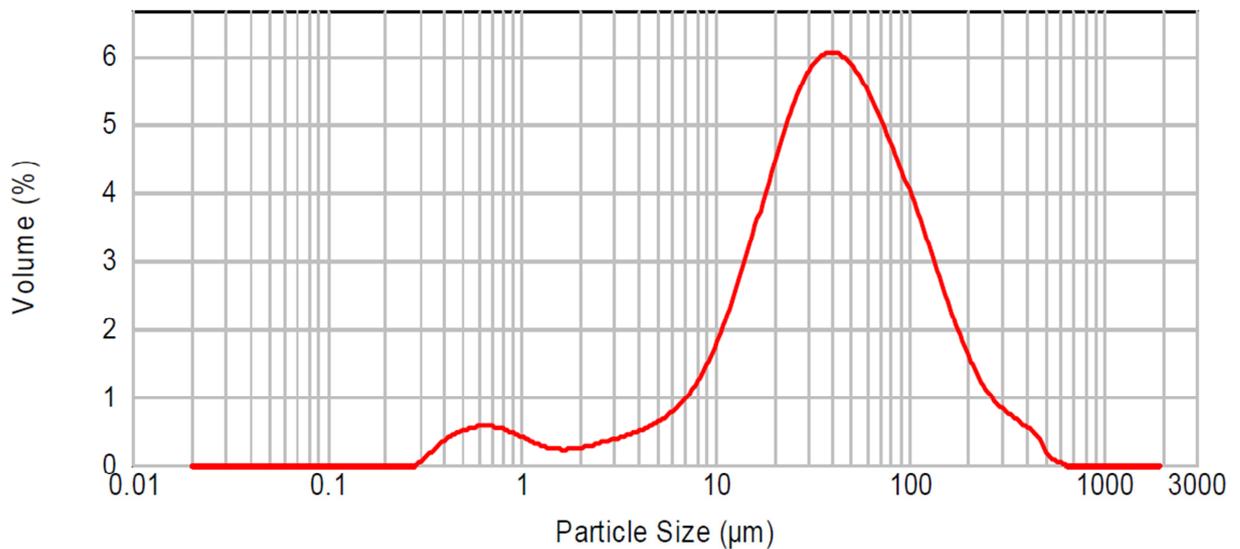


Imagen 35: Granulometría de ceniza volante, División Ventanas



Las granulometrías mostradas anteriormente corresponden a cenizas volantes provenientes de silos de acopio de **Collie Power Station** en el oeste de Australia, la ceniza A es del 2001, la ceniza B del 2003 y la ceniza C es del 2004, cenizas que fueron usadas por Hardjito y Rangan [25]. La última ceniza corresponde a la empleada en este estudio. La diferencia entre estos tamaños podría ser la causa del aumento de la razón entre solución alcalina y fuente de aluminosilicatos que se tuvo que usar en esta experiencia (casi dos veces mayor). Al ser las partículas de mayor tamaño podría existir una dificultad para poder moverse entre ellas, por lo cual, el aumento de la fase líquida es necesaria para hacer la pasta fluida. Los relaves de cobre por otra parte mostraron cantidades suficientes tanto de alúmina como de sílice para obtener geopolímeros, sin embargo, al ser material 100% cristalino, es menos reactivo que el material amorfo de la ceniza volante. En tamaño los granos de relaves son pequeños comparados con los granos de ceniza volante, al mezclarlos, la pasta fue significativamente más fluida que la hecha solo con ceniza volante, hecho que sirve como argumento para explicar la necesidad de una mayor razón entre solución alcalina y fuente de aluminosilicatos para las pastas hechas solo con ceniza volante.

7.2. Concentración de solución de hidróxido de sodio

No hubo un cambio significativo en la densidad de las probetas. Esto se debe a que se dosifica en peso, por lo cual independiente de la concentración de la solución de hidróxido de sodio en las mezclas, la cantidad en peso es la misma. Sin embargo, en el largo plazo cuando estas mezclas hubiesen evaporado toda el agua que se produjo producto de la reacción de geopolimerización se debería esperar que la densidad aumentara conforme se aumenta la concentración pues las soluciones con mayores concentraciones presentan en peso menor agua que las de menores concentraciones y por lo tanto hay menor agua que se pueda evaporar aumentando la densidad de la mezcla.

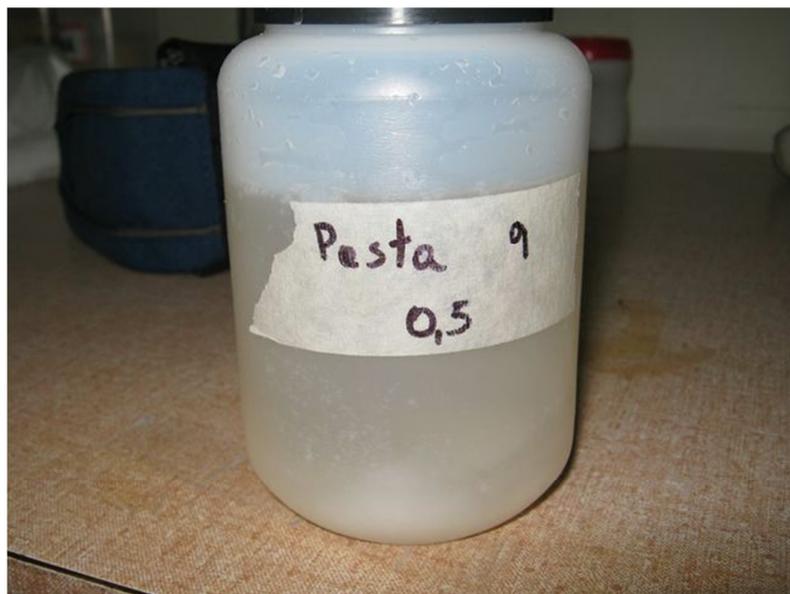
Respecto de la variación tanto en resistencia a flexión como a la compresión se puede ver claramente un aumento conforme aumenta la concentración de la solución de hidróxido de sodio, esto sucede debido al rol que cumple la solución alcalina en los geopolímeros, la alcalinidad de esta solución permite tanto la disolución de sílice y alúmina como la incorporación de cationes que estabilizarán a la alúmina presente en la matriz. De esta manera a mayores niveles de concentración se disuelve una mayor cantidad de material amorfo que luego será incorporado en la matriz. Sin embargo, debería llegar un punto en el cual una mayor concentración de la solución de hidróxido de sodio no aportaría ganancia en resistencia mecánica, esto pasaría primero porque debería haber un límite teórico donde primero, no se disuelve una cantidad mayor de material amorfo, y segundo, no queda más aluminio disuelto disponible en la matriz para ser estabilizado, por tanto, los cationes disponibles, (en el caso de esta experiencia sodio) quedan incorporados en la matriz no siendo parte de cadenas de geopolímeros teniendo la posibilidad de reaccionar con otros elementos formando distintos compuestos cuya reacción en si misma podría crear estados de tensiones indeseables que disminuirían la resistencia mecánica de la matriz.

Este punto no fue alcanzado en la experiencia probablemente por diversas razones. Primero, el agua extra, que como se verá más adelante, es de mucha importancia en la confección de geopolímeros.

El agua extra reduce el PH de la solución alcalina presente en la mezcla, al reducir la alcalinidad de la solución se reduciría la capacidad de disolver sílice y alúmina y por tanto habría menos material que podría reaccionar para formar geopolímeros. En segundo lugar, podría ser que aun cuando la alcalinidad fue la suficiente para disolver el material amorfo, existiría material cristalino que se empezó a disolver y que también aportó a la creación de gel de geopolímero. Adicionalmente, siendo que existe calcio presente en la fuente de aluminosilicatos, en un ambiente alcalino podría haber reaccionado con silicio formando CSH que igualmente se incorporaría en la matriz.

De cualquier manera, preparar soluciones con una mayor concentración de hidróxido de sodio empieza a generar un problema en la misma solución, y es que la capacidad que tiene el agua (sea agua destilada o agua potable) de disolver hidróxido de sodio a temperatura ambiente y presión atmosférica se vio reducida. Cuando se intentó preparar soluciones con una mayor concentración se vio una especie de precipitación de la solución, y más adelante cuando estas soluciones aparentemente turbias se mezclaron con silicato de sodio, la solución resultante (bajo condiciones normales) se solidificó imposibilitando la confección de mezclas geopoliméricas, este fenómeno se puede ver en la Imagen 36. Este fenómeno requiere una explicación del punto de vista químico que no es propio de este trabajo y por tanto se propone como tema de investigación.

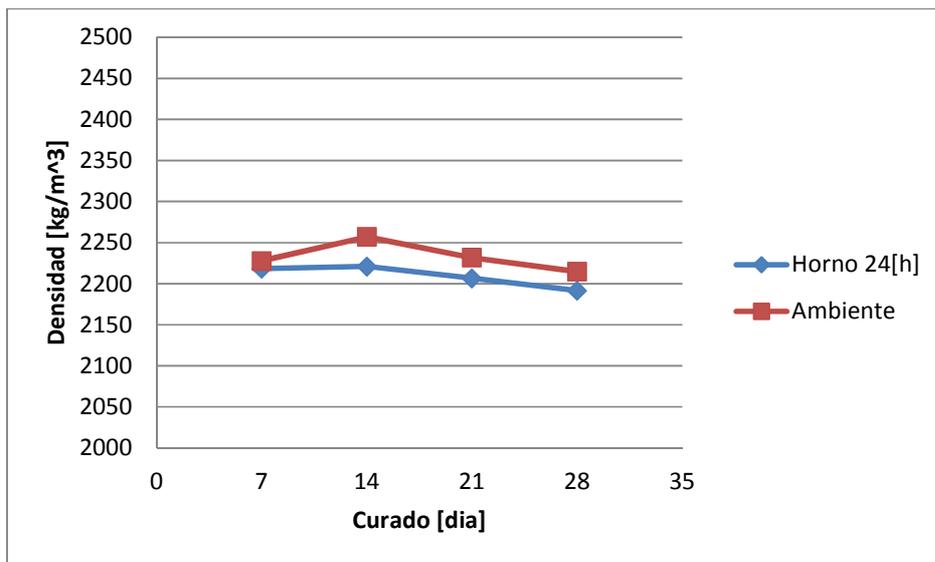
Imagen 36: Solución alcalina precipitada



7.3. Curado

Se ve que el proceso de curado al cual será sometido el geopolímero influye directamente en las propiedades que el material desarrollará. De la densidad, tanto para el caso cuando las probetas se curaron previamente en horno como para el caso donde fueron curadas a temperatura ambiente, se puede ver que hay una disminución conforme aumenta el tiempo de curado, la explicación lógica de esto es que la reacción de geopolimerización tiene como producto agua en estado libre, la cual se evaporaría disminuyendo así la densidad obtenida, sin embargo, para el caso cuando las probetas se curaron previamente en horno, se ve una menor densidad que cuando se curaron a temperatura ambiente, esto sucede debido a la evaporación inicial de agua de la solución alcalina al interior del horno, agua que no se evaporó inicialmente para el caso de curado a temperatura ambiente.

Imagen 37: Densidades producto de distintos procesos de curado



La diferencia en el desarrollo de resistencia mecánica entre estas mezclas que fueron sometidas a distintos procesos de curado es considerable, al cabo de 7 días, la resistencia mecánica de las probetas curadas a temperatura ambiente fue entorno a un 10% de la resistencia mecánica alcanzada por la misma mezcla que fue curada previamente en horno, sin embargo al cabo de 28 días, la diferencia entre las probetas curadas en horno y las curadas a temperatura ambiente es de aproximadamente un 10% con respecto a la mayor. Esto tiene una explicación directa y es que conforme se

aumenta la temperatura de curado, la velocidad de la reacción de geopolimerización aumenta varias veces, lo que permite reafirmar lo que se puede ver en la literatura y es que los geopolímeros en general bajo una temperatura de curado adecuada pueden desarrollar en un corto periodo de tiempo gran resistencia mecánica, un gran porcentaje del total de resistencia que desarrollarán en el tiempo.

Este hecho tiene dos consecuencias importantes, primero, que este material sería competente en el mercado de prefabricados al desarrollar gran resistencia en poco tiempo, y segundo, que en el tiempo a temperatura ambiente es posible desarrollar buenas resistencias, extendiendo su uso a distintos mercados en la construcción.

Imagen 38: Resistencias a compresión el tiempo

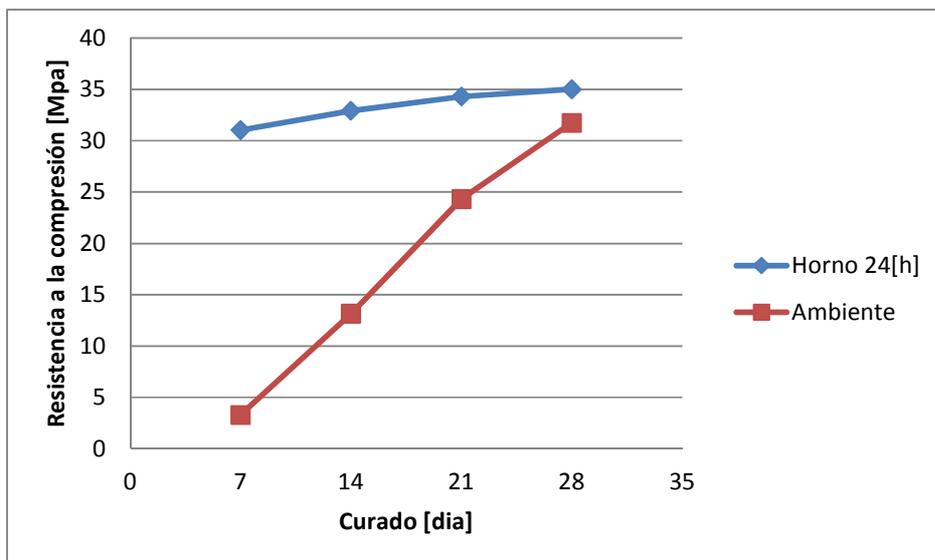
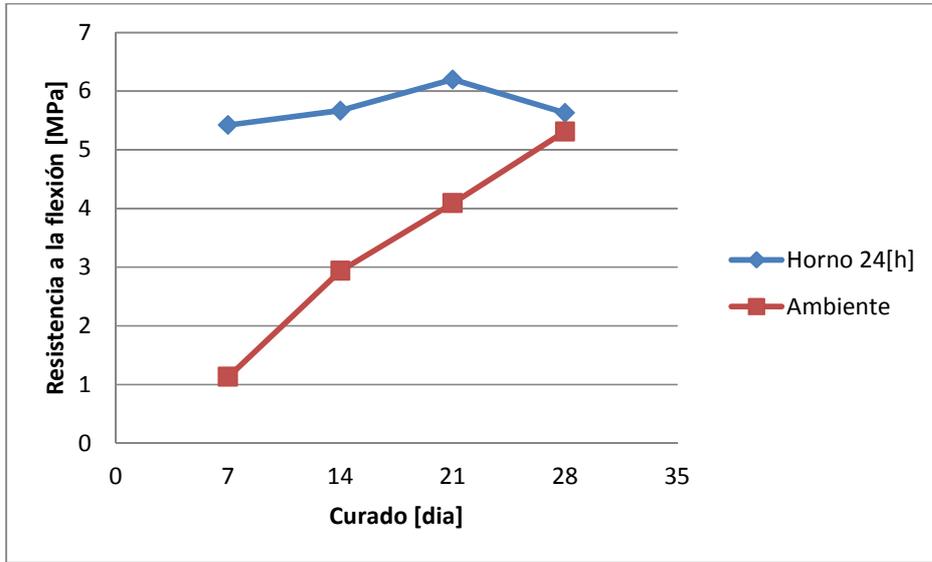


Imagen 39: Resistencias a flexión en el tiempo



7.4. Relaves de cobre

La inclusión de relaves de cobre produce cambios significativos tanto en el momento de la confección de la mezcla como en el desarrollo de las propiedades del geopolímero resultante. En primer lugar, la densidad decrece a medida que aumenta el porcentaje de relaves en la mezcla, esto se debería a la menor compacidad de la mezcla, lo que tendría relación con el peso específico de los relaves de cobre. Al ser más pesados que la ceniza volante, el volumen total de pasta disminuye conforme aumenta la cantidad de relaves incluida en la fuente de aluminosilicatos, la disminución del volumen de pasta conlleva a la generación de espacios entre los áridos que no serán rellenados por la misma, por tanto, un aumento en la cantidad de aire en la mezcla que reduce la densidad.

Tanto en compresión como en flexión se ve una clara tendencia a la disminución de ambas propiedades mecánicas conforme se aumenta la cantidad de relaves de cobre en la fuente de aluminosilicatos, esto se debería principalmente a que los relaves de cobre presentan un 100% de compuestos cristalinos, por lo cual tienen menor reactividad y no se disuelven al igual que el material amorfo de la ceniza volante a pesar de presentar cantidades de sílice y alúmina suficientes, esto llevaría por tanto a la creación de menor cantidad de gel geopolimérico y por tanto menor desarrollo de resistencia mecánica. Sin embargo, en cantidades moderadas se logran obtener buenas resistencias por lo cual se podrían emplear para determinados materiales de construcción.

7.5. Ripios de cobre

Los ripios de cobre son áridos porosos debido al ataque químico al que se vieron expuestos en el proceso de lixiviación para la extracción de cobre, la solución con la que se riegan estos áridos es rica en ácido sulfúrico, los óxidos de cobre tienen alta sensibilidad a los ácidos, al penetrar la solución en la roca reacciona con los óxidos formándose así una solución rica en cobre.

Producto del ácido sulfúrico los ripios de cobre tienen una alta cantidad de sulfatos, al ver los resultados de las mezclas que se prepararon con estos áridos se puede ver que tanto densidad como resistencias mecánicas bajaron conforme se reemplazó una mayor cantidad de árido por ripios de cobre. Esta baja se podría atribuir a la reacción que hayan tenido los químicos presentes en los áridos con la solución alcalina.

Sin embargo, una razón bastante probable, es la remanencia de ácido sulfúrico en los ripios. Los ácidos son muy reactivos con las bases, por lo tanto, al mezclar una solución muy alcalina con ácido presente en los ripios se habrían formado sales que se incluyeron en la matriz y además, bajó la alcalinidad de la mezcla en general, por lo que no habría habido un ambiente propicio para las reacciones de geopolimerización.

7.6. Hormigón reciclado

En densidad se ve una pequeña disminución a medida que aumenta la cantidad de hormigón reciclado incluido en la mezcla, esto se debe probablemente a la porosidad que tiene el hormigón reciclado, al ser poroso es un árido más liviano que el polvo de roca y como consecuencia de esto la mezcla es menos densa.

La inclusión de hormigón reciclado como árido para morteros geopoliméricos resultó en un aumento en la resistencia mecánica que desarrolló la mezcla, este hecho podría tener varias explicaciones.

Este árido proviene de cubos de hormigón ensayados previamente en laboratorio, estos cubos usualmente son ensayados en un tiempo no mayor a 28 días. Producto de esto podría ser que el árido contenga aún cemento activo el que en presencia de agua podría reaccionar formando silicatos de calcio hidratados (CSH) los cuales son los que le dan la resistencia al hormigón. Estos CSH se incorporarían a la matriz aumentando la resistencia mecánica.

También se podría dar el caso de que en el hormigón reciclado no existiera cemento activo (lo cual es probable dado el tiempo que este árido estuvo acopiado). En este caso podría ocurrir que dada la alta alcalinidad de la solución se disolviera material cristalino perteneciente al hormigón reciclado. Al disolverse calcio en presencia de sílice tanto disuelto como del silicato de sodio se podrían formar CSH los que se incluirían en la matriz aportando a la resistencia.

Otra razón probable es la absorción que presenta el árido. Como se vio en la presentación de resultados, el agua extra tiene un efecto adverso en resistencia mecánica, conforme mayor es la cantidad de agua extra, la resistencia mecánica disminuye. El hormigón reciclado tiene la particularidad de presentar una gran absorción (del orden de un 10%), y considerando que para esta experiencia se utilizaron solo arenas, la absorción total podría haber sido incluso mayor. Dado que estos áridos se incluyeron en estado seco, podría darse el caso de que absorbieran agua extra de la mezcla. Al absorber agua extra, la pérdida de alcalinidad por parte de la mezcla se reduce y por lo tanto se reduce el efecto adverso en la resistencia mecánica del mortero, este hecho será visto en detalle más adelante.

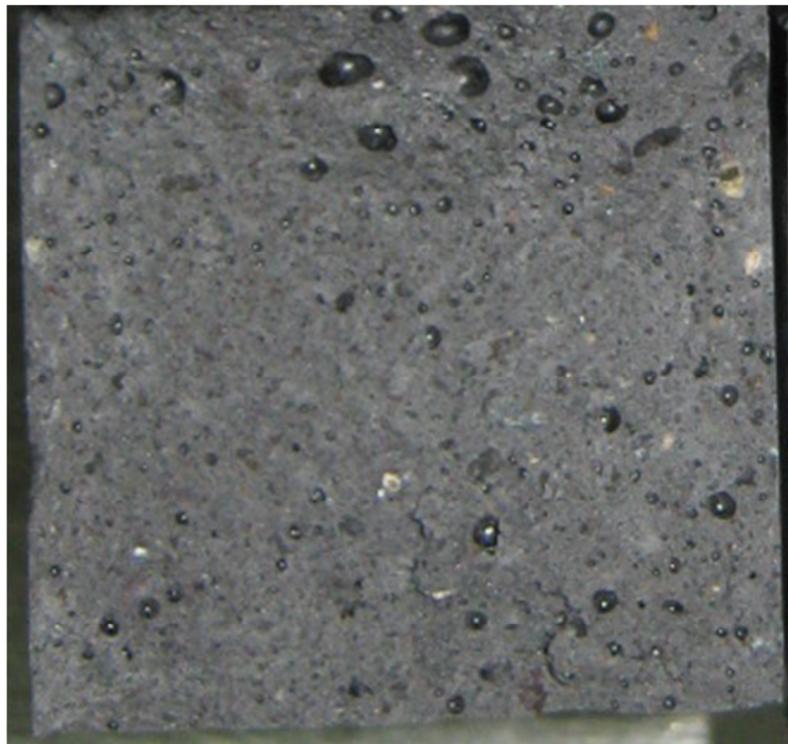
Esta mejora en desempeño de los morteros podría ser una consecuencia de alguna de las razones antes o expuestas o bien una mezcla de ellas. De cualquier modo, la incorporación de hormigón reciclado de manera total o parcial del árido presenta una idea interesante a considerar para la confección de hormigones 100% sustentables. Otro hecho que se podría considerar útil es que el uso de hormigones reciclados en hormigones con cemento portland conlleva a un aumento significativo en la retracción y el creep. Este efecto se produce principalmente por la absorción que tiene el árido. Si consideramos que el hormigón geopolimérico presentaría menos de la mitad de retracción que el hormigón corriente (entre 5 y 7 veces menos según la literatura), el efecto adverso por retracción que produce el hormigón reciclado se podría ver disminuido, tema que podría ser investigado como mayor detalle.

7.7. Agua extra

Se vio que el agua extra tiene un efecto muy importante tanto en la confección como en el posterior desarrollo de resistencia mecánica de morteros geopoliméricos. En confección puesto que al igual que el hormigón corriente, el hormigón geopolimérico necesita trabajabilidad de manera de que sea posible su vaciado y posterior compactación, como consecuencia de esta ganancia en trabajabilidad el incremento de agua extra baja la alcalinidad de la mezcla por lo que la capacidad de disolver material amorfo se ve reducida.

Dado que las mezclas geopoliméricas son altamente viscosas (viscosidad que viene dada por la solución alcalina) su mezclado y posterior vaciado es distinto que el del hormigón corriente. Al ser más viscosas las mezclas geopoliméricas atrapan bastante aire, el cual incluso la compactación no se logra expulsar fácilmente (esto se puede ver en la Imagen 40). El agua extra disminuye la viscosidad generando una mezcla más trabajable y más compactable, de esta manera es posible a la mezcla expulsar más aire.

Imagen 40: Aire atrapado en la superficie superior



Como se vio en los resultados, en términos de densidad, a medida que aumenta la cantidad de agua extra la densidad disminuye, la explicación es directa, a medida que aumenta la cantidad de agua en la mezcla, es mayor la cantidad de agua que el mortero evapora en el curado, y además es menor la cantidad de sólidos totales, por lo tanto, baja la densidad.

En resistencias mecánicas se ve una disminución conforme se aumenta la cantidad de agua extra en la mezcla. Como se dijo anteriormente, cuanto más agua existe en la mezcla, bajaría la alcalinidad de la mezcla y por lo tanto se disolvería menos material amorfo. Adicionalmente a esto, la razón $H_2O:Na_2O$ aumenta, en consecuencia, existe menos Na en la mezcla y esta menor cantidad de Na afectaría la capacidad de estabilizar las cadenas de geopolimeros en la matriz, lo que disminuiría la resistencia mecánica del producto final.

Una buena alternativa para reducir el agua extra (que reduce en cantidades considerables la resistencia mecánica del geopolímero) sería intentar utilizar algún tipo de superplastificante que no representara una alteración a la reacción geopolimérica.

7.8. Silicatos de sodio

El silicato de sodio que se utilizó en la mayoría de los ensayos es un silicato especial que no se comercializa a gran escala en Chile y que por tanto es significativamente más costoso que el que si se comercializa normalmente, al momento de este estudio el silicato especial es aproximadamente un 30% más caro.

En términos de densidad se vio que el silicato 3:1 produjo una disminución en densidad en la mezcla con respecto al silicato especial 2:1 que se utilizó en todos los anteriores estudios. Esta baja en densidad podría ocurrir por la menor densidad que tiene el silicato 3:1, esta baja en densidad permite que la solución alcalina contenga una mayor cantidad en volumen de silicato, la mayor cantidad de volumen en silicato conlleva una mayor cantidad de agua del mismo silicato, una mayor cantidad de agua en la mezcla como se dijo anteriormente conlleva directamente una disminución en densidad.

Hubo una baja importante en resistencia mecánica, esto se debe a que el silicato 3:1 tiene una menor cantidad de Na_2O , por lo tanto la razón $\text{H}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$ aumenta, lo que consecuentemente disminuiría la resistencia mecánica del geopolímero final.

Un punto a considerar de este tipo de silicato que tiene un menor nivel de alcalinidad total que el silicato especial es su viscosidad. La viscosidad es aproximadamente 10 veces menor que la del silicato especial, esta baja en viscosidad produjo un aumento significativo en la trabajabilidad de la mezcla, por tanto, podría ser posible no necesitar agua extra en la dosificación. El no utilizar agua extra debería llevar a un aumento en resistencia mecánica, este hecho debería ser investigado dada la baja en el costo total de producción comparado con el otro silicato.

8. Conclusiones

Basados en los resultados y el análisis se puede concluir lo siguiente:

1. Un aumento tanto en el tamaño de partículas de la fuente de aluminosilicatos como una mayor viscosidad del silicato de sodio empleados para la confección de morteros geopoliméricos conlleva a la necesidad de aumentar la cantidad de la solución alcalina necesaria para darle trabajabilidad y desarrollo de resistencia mecánica a las mezclas geopoliméricas.
2. La concentración molar de la solución de hidróxido de sodio influye directamente en la resistencia mecánica que desarrollará una mezcla geopolimérica. Conforme aumenta la concentración de la solución, aumenta la resistencia mecánica que se desarrollará, este aumento vendría dado por el aumento de material amorfo que se logra disolver y por una mayor cantidad de iones positivos que estabilizan las cadenas de geopolímeros.
3. El proceso de curado influye en el desarrollo de resistencia mecánica. Una mayor temperatura de curado aumenta la velocidad en la que se desarrollan las reacciones químicas de geopolimerización, sin embargo, a temperatura ambiente es posible obtener en el tiempo buenas resistencias en estos elementos.
4. Los relaves de cobre pueden ser incluidos como remplazo de la fuente de aluminosilicatos en mezclas geopoliméricas. Sin embargo, a medida que se aumenta el remplazo de estos materiales se obtienen menores resistencias mecánicas. Esto se debería a que los relaves son en su totalidad materiales cristalinos los que no tendrían la misma capacidad de disolución que los materiales amorfos, en particular, el material que se usó mayoritariamente en este estudio, ceniza volante clase F.

5. La inclusión de ripios de cobre en mezclas geopoliméricas conlleva a una pérdida de resistencia mecánica. Esto se podría deber a la existencia de químicos presentes en estos áridos que afectarían la reacción de geopolimerización, sin embargo, en pequeñas cantidades son factibles como reemplazo del árido.
6. El uso de hormigón reciclado como árido para morteros geopoliméricos produjo un aumento en la resistencia mecánica a medida que se aumentó la cantidad de estos áridos en la dosificación. Esto podría deberse a la formación de CSH que se incorporaría en la matriz o bien a la absorción de agua en estado libre que afectaría las reacciones de geopolimerización.
7. El agua extra tiene una doble influencia en la confección de morteros geopoliméricos, por una parte conlleva un aumento en la trabajabilidad de la mezcla pero a la vez produce una importante baja en resistencia mecánica a medida que la cantidad de agua extra aumenta. Este efecto podría deberse tanto a la disminución en la alcalinidad de la mezcla como a la reducción de Na libre que estabilizaría las cadenas de geopolímeros.
8. El tipo de silicato de sodio influye tanto en la confección como en el desarrollo de resistencia mecánica de las mezclas geopoliméricas. En tanto que la viscosidad del silicato tiene como directa consecuencia la trabajabilidad de la mezcla, la cantidad de Na_2O o alcalinidad del silicato influye en el desarrollo de resistencia mecánica que experimentará la mezcla, esto se debería a la cantidad de Na disponible que queda para estabilizar las cadenas de geopolímeros.

Como consecuencia de este estudio y de variadas experiencias a nivel mundial se ve que efectivamente los materiales geopoliméricos son técnicamente factibles de ser obtenidos, esta obtención dista de ser un proceso complejo y por tanto, dadas las potenciales ventajas que presentan tanto a nivel industrial como ambiental, deberían ser objeto de un desarrollo que permitiera entre otras cosas, aumentar la sustentabilidad de los materiales de construcción que se emplean comúnmente, principalmente, el hormigón convencional.

La aplicación de estos materiales se podría encontrar en un espectro muy amplio en la industria, desde cubiertas en mobiliario para cocinas hasta elementos estructurales prefabricados de alto desempeño ante ataque químico. Adicionalmente, los equipos que se utilizan en la confección de este material son los mismos que se utilizan para obtener hormigón convencional y por tanto, no se necesitaría de un esfuerzo en inversión mayor del que ya se tiene en la actualidad en la industria del hormigón.

Si consideramos que una tonelada de ceniza clase F es de un bajo costo (incluso podría llegar a ser gratis con una correcta política en subproductos de la industria de la energía producida con carbón) y que un mayor desarrollo en la técnica podría llegar a necesitar alrededor de la mitad de los agentes alcalinos que se utilizaron en la confección de geopolímeros en esta experiencia, se podría obtener hormigones geopoliméricos significativamente más baratos que el hormigón con cemento portland [25].

9. Bibliografía y Referencias

- [1] **International Energy Agency**, World Business Council for Sustainable Development, Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050, 2009.
- [2] **Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., Bolio, H.**, Sustainable cement production-present and future, *Cement and Concrete Research*, 41, 642-650 (2011).
- [3] **Radio Universidad de Chile**, “Cierre de mina El Navío afectará a 180 trabajadores”, <http://radio.uchile.cl/noticias/57630/>, 2009.
- [4] **Davidovits, J.**, Ancient and modern concretes: What is the real difference?, *Concrete International*, 9, 23-25 (1987).
- [5] **Campbell, D.H., Folk, R.L.**, The ancient Egyptian pyramids – concrete or rock?, *Concrete International*, 29-44 (Agosto 1991)
- [6] **Davidovits, J.**, Properties of Geopolymer Cements, *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 131-149 (1994).
- [7] **Gilbert, R. I.**, Creep and shrinkage models for high strength concrete – proposal for inclusion in AS3600, *Australian Journal of Structural Engineering*, 4(2), 95-106.
- [8] **Wallah, S. E.**, Drying Shrinkage of Heated-Cured Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Modern Applied Science*, 3 (12), 2009.
- [9] **Ferraris, C. F. et ál**, Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack, *-Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based systems*, 185-192 (1997).
- [10] **Bakharev, T.**, Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete Research*, 35, 1233-1246 (2005).
- [11] **Wallah, S.E., Rangan, B. V.**, Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties, Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, 2006.

- [12] **Wee, T. H. et ál**, Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures, *ACI Materials Journal*, 97(5), 536-549.
- [13] **Davidovits, J.**, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656 (1991).
- [14] **Kong, D. y Sanjayan, J.**, Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete, *Cement and Concrete Research*, 40, 334-339 (2010).
- [15] **Hewlett, P.C.**, Lea's chemistry of cement and concrete, London, New York, Arnold: Copublished in North, Central, and South America by J. Wiley, ISBN 0340565896, 324-327 (1998).
- [16] **Cohen, M. D. y Mather, B.**, Sulphate attack on concrete—research needs, *ACI materials journal*, 88(1), 62-69(1991).
- [17] **St John, D. A., Poole, A. B., y Sims, I.**, Concrete petrography: a handbook of investigative techniques, London, New York, Arnold; Copublished the North, Central and South America by J. Wiley, ISBN: 0340692669, 46, 193(1998).
- [18] **Borger, J. et ál**, Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete, *Advanced Cement Based Materials*, 1(6), 267-274 (1994).
- [19] **Fernández, R.**, El inicio del fin de la era de los combustibles fósiles, Peak oil: mercado versus geopolítica y guerra, 2006.
- [20] **Salazar, C.**, Estimación de la generación de cenizas de centrales térmicas a carbón y su reuso en la industria del cemento y hormigón, tesis de grado, 2009.
- [21] **ACAA, American Coal Ash Association**, Fly ash facts for highway engineers, 2003.
- [22] **Ahmaruzzaman, M.**, A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 327-363 (2010).
- [23] **Iyer, R.S., Scott, J.A.**, Power station fly ash – a review of value-added utilization outside of the construction industry, *Resources, Conservation & Recycling*, 31, 217-228 (2001).

- [24] **Canales Alvarez, L.**, Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes de la planta térmica de Mudunuru (India) en materiales de construcción, tesis de minor, 2007.
- [25] **Hardjito, D. y Rangan B. V.**, Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, 2005.

10. Anexo A: Resultados de ensayos

10.1. Resultados ensayos variando concentración NaOH

Tabla 29: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 8[M]

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG1	1-1	548,1	2141	7	1,397	33,344	24,9	158,93	15,58
	1-2			7			27,9	177,80	17,43
	2-1	547,9	2140	7	1,616	38,571	28,7	183,22	17,96
	2-2			7			27,5	175,25	17,18
	3-1	546,5	2135	7	1,382	32,986	24,7	157,40	15,43
	3-2			7			24,1	153,89	15,09
Promedio		547,5	2139		1,465	34,967	26,31	167,75	16,45
DESV		0,87	3		0,131	3,13	1,95	12,44	1,22

Tabla 30: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 10[M]

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG2	1-1	565,5	2209	7	1,884	44,967	30,3	193,42	18,96
	1-2			7			32,4	206,55	20,25
	2-1	564,3	2204	7	1,612	38,475	32,7	208,46	20,44
	2-2			7			33,2	211,65	20,75
	3-1	563,6	2202	7	1,662	39,669	33,0	210,38	20,63
	3-2			7			32,8	209,10	20,50
Promedio		564,5	2205		1,719	41,037	32,41	206,59	20,25
DESV		0,96	4		0,145	3,46	1,05	6,68	0,66

Tabla 31: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 12[M]

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG3	1-1	559,7	2186	7	1,874	44,729	35,8	228,23	22,38
	1-2			7			33,8	215,48	21,13
	2-1	559,8	2187	7	1,610	38,427	34,9	222,49	21,81
	2-2			7			33,8	215,48	21,13
	3-1	560,5	2189	7	1,589	37,926	34,0	216,75	21,25
	3-2			7			32,6	207,83	20,38
Promedio		560	2188		1,691	40,361	34,15	217,71	21,34
DESV		0,44	2		0,159	3,79	1,09	6,96	0,68

Tabla 32: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 14[M]

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG4	1-1	562,4	2197	7	2,004	47,831	37,8	240,98	23,63
	1-2			7			39,5	251,81	24,69
	2-1	554,8	2167	7	2,037	48,619	40,9	260,74	25,56
	2-2			7			43,4	276,68	27,13
	3-1	557,5	2178	7	1,881	44,896	35,5	226,31	22,19
	3-2			7			37,5	239,06	23,44
Promedio		558,2	2181		1,974	47,115	39,10	249,26	24,44
DESV		3,85	15		0,082	1,96	2,80	17,83	1,75

Tabla 33: Densidad y resistencia mecánica, [NaOH] = 16[M]

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG19	1-1	568,6	2221	7	2,131	50,863	44,8	285,60	28,00
	1-2			7			45,5	290,06	28,44
	2-1	571,6	2233	7	2,111	50,385	45,0	286,88	28,13
	2-2			7			44,7	284,96	27,94
	3-1	571,6	2233	7	2,252	53,751	45,2	288,15	28,25
	3-2			7			47,1	300,26	29,44
Promedio		570,6	2229		2,165	51,666	45,38	289,32	28,36
DESV		1,73	7		0,076	1,82	0,89	5,67	0,56

10.2. Resultados ensayos curado previamente en horno

Tabla 34: Densidad y resistencia mecánica, 7 días.

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [día]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG5-1	1-1	571,9	2234	7	2,076	49,550	51,2	326,40	32,00
	1-2			7			47,9	305,36	29,94
	2-1	567,8	2218	7	2,315	55,254	50,7	323,21	31,69
	2-2			7			49,7	316,84	31,06
	3-1	564	2203	7	2,558	61,054	48,2	307,28	30,13
	3-2			7			50,2	320,03	31,38
Promedio		567,9	2218		2,316	55,286	49,65	316,52	31,03
DESV		3,95	15		0,241	5,75	1,34	8,54	0,84

Tabla 35: Densidad y resistencia mecánica, 14 días.

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [día]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG5-2	1-1	562,6	2198	14	2,494	59,527	51,5	328,31	32,19
	1-2			14			56,2	358,28	35,13
	2-1	570,3	2228	14	2,403	57,355	50,9	324,49	31,81
	2-2			14			53,9	343,61	33,69
	3-1	572,8	2238	14	2,365	56,448	51,6	328,95	32,25
	3-2			14			51,9	330,86	32,44
Promedio		568,6	2221		2,421	57,776	52,67	335,75	32,92
DESV		5,32	21		0,066	1,58	2,01	12,82	1,26

Tabla 36: Densidad y resistencia mecánica, 21 días.

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [día]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG5-3	1-1	561,2	2192	21	2,585	61,699	53,9	343,61	33,69
	1-2			21			51,1	325,76	31,94
	2-1	567,3	2216	21	2,731	65,184	57,1	364,01	35,69
	2-2			21			55,3	352,54	34,56
	3-1	566,2	2212	21	2,626	62,677	56,5	360,19	35,31
	3-2			21			55,4	353,18	34,63
Promedio		564,9	2207		2,647	63,187	54,88	349,88	34,30
DESV		3,25	13		0,075	1,80	2,16	13,75	1,35

Tabla 37: Densidad y resistencia mecánica, 28 días.

Mezcla	Probeta []	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [día]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG5-4	1-1	563,3	2200	28	2,353	56,161	57,6	367,20	36,00
	1-2			28			57,0	363,38	35,63
	2-1	557,6	2178	28	2,474	59,049	57,7	367,84	36,06
	2-2			28			55,8	355,73	34,88
	3-1	562,2	2196	28	2,385	56,925	54,5	347,44	34,06
	3-2			28			53,5	341,06	33,44
Promedio		561	2192		2,404	57,379	56,02	357,11	35,01
DESV		3,02	12		0,063	1,50	1,73	11,04	1,08

10.3. Resultados ensayos curado a temperatura ambiente

Tabla 38: Densidad y resistencia mecánica, 7 días.

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [día]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG6-1	1-1	571,9	2234	7	0,477	11,385	5,2	32,83	3,22
	1-2			7			5,2		
	2-1	571,4	2232	7	0,477	11,385	5,4	34,17	3,35
	2-2			7			5,5		
	3-1	567,6	2217	7	0,497	11,862	5,5	34,81	3,41
	3-2			7			5,2		
Promedio		570,3	2228		0,484	11,544	5,30	33,80	3,31
DESV		2,35	9		0,012	0,28	0,16	0,99	0,10

Tabla 39: Densidad y resistencia mecánica, 14 días.

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [día]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG6-2	1-1	573,7	2241	14	1,293	30,861	20,8	132,73	13,01
	1-2			14			21,5		
	2-1	581	2270	14	1,262	30,121	21,0	133,94	13,13
	2-2			14			21,1		
	3-1	578,7	2261	14	1,210	28,880	21,4	136,62	13,39
	3-2			14			20,4		
Promedio		577,8	2257		1,255	29,954	21,05	134,19	13,16
DESV		3,73	15		0,042	1,00	0,41	2,61	0,26

Tabla 40: Densidad y resistencia mecánica, 21 días.

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [dia]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG6-3	1-1	572,9	2238	21	1,803	43,034	40,5	258,19	25,31
	1-2			21			39,4	251,18	24,63
	2-1	574,2	2243	21	1,735	41,411	39,3	250,54	24,56
	2-2			21			38,4	244,80	24,00
	3-1	566,9	2214	21	1,707	40,743	39,0	248,63	24,38
	3-2			21			36,8	234,60	23,00
Promedio		571,3	2232		1,748	41,729	38,90	247,99	24,31
DESV		3,89	15		0,049	1,18	1,24	7,88	0,77

Tabla 41: Densidad y resistencia mecánica, 28 días.

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [dia]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG6-4	1-1	569,4	2224	28	2,436	58,142	52,8	336,60	33,00
	1-2			28			49,7	316,84	31,06
	2-1	564,7	2206	28	2,198	52,462	48,2	307,28	30,13
	2-2			28			48,8	311,10	30,50
	3-1	566,8	2214	28	2,176	51,937	52,1	332,14	32,56
	3-2			28			53,2	339,15	33,25
Promedio		567,0	2215		2,270	54,180	50,80	323,85	31,75
DESV		2,35	9		0,144	3,44	2,16	13,80	1,35

10.4. Resultados ensayos inclusión de relaves de cobre

Tabla 42: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 0%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
	[l]	[g]	[kg/m ³]	[dia]					
HG5-1	1-1	571,9	2234	7	2,076	49,550	51,2	326,40	32,00
	1-2			7			47,9	305,36	29,94
	2-1	567,8	2218	7	2,315	55,254	50,7	323,21	31,69
	2-2			7			49,7	316,84	31,06
	3-1	564	2203	7	2,558	61,054	48,2	307,28	30,13
	3-2			7			50,2	320,03	31,38
Promedio		567,9	2218		2,316	55,286	49,65	316,52	31,03
DESV		3,95	15		0,241	5,75	1,34	8,54	0,84

Tabla 43: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 25%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
	[l]	[g]	[kg/m ³]	[dia]					
HG7	1-1	571,7	2233	7	2,640	63,012	42,1	268,39	26,31
	1-2			7			45,4	289,43	28,38
	2-1	574,7	2245	7	2,490	59,431	41,9	267,11	26,19
	2-2			7			44,2	281,78	27,63
	3-1	576	2250	7	2,426	57,904	44,3	282,41	27,69
	3-2			7			46,9	298,99	29,31
Promedio		574,1	2243		2,519	60,116	44,13	281,35	27,58
DESV		2,21	9		0,110	2,62	1,92	12,23	1,20

Tabla 44: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 50%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
	[l]	[g]	[kg/m ³]	[dia]					
HG8	1-1	566,5	2213	7	1,832	43,726	32,1	204,64	20,06
	1-2			7			31,2	198,90	19,50
	2-1	570,9	2230	7	2,107	50,290	30,5	194,69	19,09
	2-2			7			31,9	203,36	19,94
	3-1	565,4	2209	7	2,119	50,576	30,8	196,35	19,25
	3-2			7			29,8	190,04	18,63
Promedio		567,6	2217		2,019	48,197	31,06	198,00	19,41
DESV		2,91	11		0,162	3,87	0,86	5,49	0,54

Tabla 45: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 75%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
	[l]	[g]	[kg/m ³]	[dia]					
HG9	1-1	564,8	2206	7	1,279	30,527	17,9	114,11	11,19
	1-2			7			17,5	111,63	10,94
	2-1	562,4	2197	7	1,285	30,670	17,2	109,40	10,73
	2-2			7			17,6	112,07	10,99
	3-1	568	2219	7	1,233	29,429	17,6	112,01	10,98
	3-2			7			18,1	115,39	11,31
Promedio		565,1	2207		1,266	30,209	17,64	112,43	11,02
DESV		2,81	11		0,028	0,68	0,33	2,09	0,20

Tabla 46: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RC 100%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
	[l]	[g]	[kg/m ³]	[dia]					
HG10	1-1	554	2164	7	0,472	11,266	5,51	35,13	3,44
	1-2			7			5,57	35,51	3,48
	2-1	553	2160	7	0,377	8,998	4,41	28,11	2,76
	2-2			7			4,32	27,54	2,70
	3-1	559,5	2186	7	0,379	9,046	4,51	28,75	2,82
	3-2			7			4,36	27,80	2,73
Promedio		555,5	2170		0,409	9,770	4,78	30,47	2,99
DESV		3,50	14		0,054	1,30	0,59	3,78	0,37

10.5. Resultados ensayos inclusión de ripios de cobre

Tabla 47: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RL 0%

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [dia]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG5-1	1-1	571,9	2234	7	2,076	49,550	51,2	326,40	32,00
	1-2			7			47,9	305,36	29,94
	2-1	567,8	2218	7	2,315	55,254	50,7	323,21	31,69
	2-2			7			49,7	316,84	31,06
	3-1	564	2203	7	2,558	61,054	48,2	307,28	30,13
	3-2			7			50,2	320,03	31,38
Promedio		567,9	2218		2,316	55,286	49,65	316,52	31,03
DESV		3,95	15		0,241	5,75	1,34	8,54	0,84

Tabla 48: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RL 25%

Mezcla	Probeta	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [dia]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG11	1-1	554,6	2166	7	2,447	58,405	47,2	300,90	29,50
	1-2			7			49,2	313,65	30,75
	2-1	556,1	2172	7	2,559	61,078	48,3	307,91	30,19
	2-2			7			48,4	308,55	30,25
	3-1	555,5	2170	7	2,198	52,462	46,1	293,89	28,81
	3-2			7			46,6	297,08	29,13
Promedio		555,4	2170		2,401	57,315	47,63	303,66	29,77
DESV		0,75	3		0,185	4,41	1,19	7,59	0,74

Tabla 49: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de RL 50%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[MPa]
HG12	1-1	457,5	1787	7	0,670	15,992	15,83	100,92	9,89
	1-2			7			11,13	70,95	6,96
	2-1	425,8	1663	7	0,420	10,025	6,98	44,50	4,36
	2-2			7			7,12	45,39	4,45
	3-1	432,7	1690	7	0,450	10,741	11,93	76,05	7,46
	3-2			7			11,73	74,78	7,33
Promedio		438,7	1714		0,513	12,252	10,79	68,77	6,74
DESV		16,67	65		0,137	3,26	3,34	21,27	2,09

10.6. Resultados ensayos inclusión de hormigón reciclado

Tabla 50: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de HR 0%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[MPa]
HG5-1	1-1	571,9	2234	7	2,076	49,550	51,2	326,40	32,00
	1-2			7			47,9	305,36	29,94
	2-1	567,8	2218	7	2,315	55,254	50,7	323,21	31,69
	2-2			7			49,7	316,84	31,06
	3-1	564	2203	7	2,558	61,054	48,2	307,28	30,13
	3-2			7			50,2	320,03	31,38
Promedio		567,9	2218		2,316	55,286	49,65	316,52	31,03
DESV		3,95	15		0,241	5,75	1,34	8,54	0,84

Tabla 51: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de HR 25%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG15	1-1	564,5	2205	7	2,506	59,813	53,3	339,79	33,31
	1-2			7			56,7	361,46	35,44
	2-1	563,2	2200	7	2,577	61,508	53,0	337,88	33,13
	2-2			7			54,3	346,16	33,94
	3-1	563,3	2200	7	2,218	52,939	52,8	336,60	33,00
	3-2			7			52,9	337,24	33,06
Promedio		563,7	2202		2,434	58,087	53,83	343,19	33,65
DESV		0,72	3		0,190	4,54	1,51	9,61	0,94

Tabla 52: Densidad y resistencia mecánica, inclusión de HR 50%

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG16	1-1	540,4	2111	7	2,349	56,066	64,10	408,64	40,06
	1-2			7			59,40	378,68	37,13
	2-1	538,9	2105	7	2,598	62,009	59,30	378,04	37,06
	2-2			7			61,30	390,79	38,31
	3-1	542,4	2119	7	2,607	62,224	59,90	381,86	37,44
	3-2			7			61,00	388,88	38,13
Promedio		540,6	2112		2,518	60,100	60,83	387,81	38,02
DESV		1,76	7		0,146	3,49	1,80	11,47	1,12

10.7. Resultados ensayos variando el agua extra

Tabla 53: Densidad y resistencia mecánica, 30 [kg/m³] de agua extra

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG20	1-1	577,6	2256	7	2,676	63,871	56,0	357,00	35,00
	1-2			7			55,8	355,73	34,88
	2-1	575,8	2249	7	2,689	64,181	61,0	388,88	38,13
	2-2			7			57,0	363,38	35,63
	3-1	568,9	2222	7	2,413	57,593	57,7	367,84	36,06
	3-2			7			57,2	364,65	35,75
Promedio		574,1	2243		2,593	61,882	57,45	366,24	35,91
DESV		4,59	18		0,156	3,72	1,88	12,01	1,18

Tabla 54: Densidad y resistencia mecánica, 40 [kg/m³] de agua extra

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG5-1	1-1	571,9	2234	7	2,076	49,550	51,2	326,40	32,00
	1-2			7			47,9	305,36	29,94
	2-1	567,8	2218	7	2,315	55,254	50,7	323,21	31,69
	2-2			7			49,7	316,84	31,06
	3-1	564	2203	7	2,558	61,054	48,2	307,28	30,13
	3-2			7			50,2	320,03	31,38
Promedio		567,9	2218		2,316	55,286	49,65	316,52	31,03
DESV		3,95	15		0,241	5,75	1,34	8,54	0,84

Tabla 55: Densidad y resistencia mecánica, 50 [kg/m³] de agua extra

Mezcla	Probeta []	Peso [g]	Densidad [kg/m ³]	Curado [día]	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG4	1-1	562,4	2197	7	2,004	47,831	37,8	240,98	23,63
	1-2			7			39,5	251,81	24,69
	2-1	554,8	2167	7	2,037	48,619	40,9	260,74	25,56
	2-2			7			43,4	276,68	27,13
	3-1	557,5	2178	7	1,881	44,896	35,5	226,31	22,19
	3-2			7			37,5	239,06	23,44
Promedio		558,2	2181		1,974	47,115	39,10	249,26	24,44
DESV		3,85	15		0,082	1,96	2,80	17,83	1,75

10.8. Resultados ensayos con distintos silicatos

Tabla 56: Densidad y resistencia de mortero, silicato Si/Na – 2:1

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG5-1	1-1	571,9	2234	7	2,076	49,550	51,2	326,40	32,00
	1-2			7			47,9	305,36	29,94
	2-1	567,8	2218	7	2,315	55,254	50,7	323,21	31,69
	2-2			7			49,7	316,84	31,06
	3-1	564	2203	7	2,558	61,054	48,2	307,28	30,13
	3-2			7			50,2	320,03	31,38
Promedio		567,9	2218		2,316	55,286	49,65	316,52	31,03
DESV		3,95	15		0,241	5,75	1,34	8,54	0,84

Tabla 57: Densidad y resistencia de mortero, silicato Si/Na – 3:1

Mezcla	Probeta	Peso	Densidad	Curado	RF		RC		
					[kN]	[kgf/cm ²]	[kN]	[kgf/cm ²]	[MPa]
HG21	1-1	550,8	2152	7	1,624	38,762	30,3	193,29	18,95
	1-2			7			30,3	192,84	18,91
	2-1	550,8	2152	7	1,573	37,544	30,9	196,99	19,31
	2-2			7			30,6	195,01	19,12
	3-1	552,3	2157	7	1,617	38,595	28,7	183,03	17,94
	3-2			7			27,9	178,05	17,46
Promedio		551,3	2154		1,605	38,300	29,78	189,87	18,61
DESV		0,87	3		0,028	0,66	1,18	7,54	0,74