

ÍNDICE

RESUMEN **V**

ÍNDICE **XI**

CONVENCIONES XVI

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA **18**

1.1 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 18

1.2 Déficit de la vivienda en países en desarrollo de América Latina.. 21

1.2.1 Situación de la vivienda social en Bolivia..... 26

1.2.2 Importancia de la vivienda de bajo costo 28

1.3 Eficiencia energética en los edificios 29

1.4 Cemento portland y su impacto ambiental 33

1.5 Antecedentes históricos de la cal 37

1.5.1 La cal 39

1.5.2 Tipos de cal 42

1.5.3 Propiedades de la cal 45

1.5.4 Usos y aplicaciones de la cal 45

1.6 Antecedentes históricos de la activación alcalina 46

1.6.1 Activación alcalina 48

1.6.2 Clasificación de los métodos de activación alcalina 48

1.6.3 Proceso de activación alcalina 49

1.6.4 Activadores Alcalinos..... 51

1.6.5 Activadores Alternativos 53

1.7 Puzzolanas utilizadas en la investigación 54

1.7.1 Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) 55

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1.7.2 | Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)..... | 61 |
| 1.7.3 | Ceniza de lodo de depuradora (CLD)..... | 74 |
| 1.7.4 | Tierra de diatomea (TD)..... | 82 |
| 1.8 | Justificación del problema | 91 |
| 2 | <i>OBJETIVOS</i> | 95 |
| 2.1 | Objetivo general | 96 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 97 |
| 3 | <i>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</i> | 99 |
| 3.1 | Materiales | 99 |
| 3.1.1 | La cal | 99 |
| 3.1.2 | Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) | 99 |
| 3.1.3 | Ceniza de cáscara de arroz (CCA)..... | 100 |
| 3.1.4 | Ceniza de lodo de depuradora (CLD)..... | 100 |
| 3.1.5 | Tierra de diatomea natural de Guatemala (TDN)..... | 101 |
| 3.1.6 | Tierra de diatomea residual (TDR)..... | 101 |
| 3.1.7 | Hidróxido de sodio..... | 101 |
| 3.1.8 | Silicato de sodio..... | 102 |
| 3.1.9 | Árido | 102 |
| 3.1.10 | Otros reactivos químicos | 102 |
| 3.2 | Procedimientos experimentales..... | 103 |
| 3.2.1 | Preparación de las disoluciones a partir de silicato sódico comercial (GCOM) 103 | |
| 3.2.2 | Preparación de la disolución activadora con el uso de fuentes de sílice alternativas | 105 |
| 3.2.3 | Preparación de las pastas..... | 106 |
| 3.2.4 | Preparación de los morteros | 107 |
| 3.2.5 | Medida de la consistencia por el método de la mesa de sacudidas.. | 110 |
| 3.2.6 | Medidas de resistencias mecánicas..... | 111 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2.6.1 | Resistencia a la compresión | 112 |
| 3.2.6.2 | Resistencia a la flexión | 112 |
| 3.2.7 | Pruebas de absorción de agua por capilaridad..... | 114 |
| 3.2.8 | Ciclos de hielo y deshielo..... | 115 |
| 3.3 | Equipamiento..... | 116 |
| 3.3.1 | Fluorescencia de rayos X (FRX) | 117 |
| 3.3.2 | Granulometría por difracción láser (ADL)..... | 118 |
| 3.3.3 | Análisis termogravimétrico (TG)..... | 119 |
| 3.3.4 | Difracción de rayos X (DRX) | 121 |
| 3.3.5 | Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) . | 123 |
| 3.3.6 | Cámara climática | 125 |
| 4 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 128 |
| 4.1 | Caracterización de las materias primas | 128 |
| 4.1.1 | Catalizador de craqueo catalítico (FCC)..... | 128 |
| 4.1.2 | Ceniza de Casca de Arroz (CCA)..... | 131 |
| 4.1.3 | Ceniza de lodo de depuradora (CLD)..... | 134 |
| 4.1.4 | Tierra de diatomea natural de Guatemala (TDN)..... | 137 |
| 4.1.5 | Tierra de diatomea residual de cerveza Heineken (TDR) | 140 |
| 4.2 | Propiedades químicas de las pastas mixtas..... | 143 |
| 4.2.1 | Análisis Termogravimétrico | 144 |
| 4.2.1.1 | Análisis termogravimétrico de las pastas cal/FCC..... | 144 |
| 4.2.1.2 | Análisis Termogravimétrico de las pastas cal/CCA..... | 157 |
| 4.2.1.3 | Análisis Termogravimétrico de las pastas cal/CLD..... | 166 |
| 4.2.2 | Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). | 173 |
| 4.2.2.1 | FESEM para pastas con FCC como puzolana | 173 |
| 4.2.2.2 | FESEM para pastas con CCA como puzolana | 177 |
| 4.2.2.3 | FESEM para pastas con CLD como puzolana..... | 180 |
| 4.3 | Propiedades físicas de los morteros mixtos | 183 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.3.1 | Consistencia de los morteros por el método de la mesa de sacudidas | 183 |
| 4.3.2 | Resistencia a la compresión de los morteros cal/FCC con sustituciones por geopolímero | 187 |
| 4.3.2.1 | Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero comercial (FCC GCOM) | 188 |
| 4.3.2.2 | Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (FCC GRES) | 191 |
| 4.3.2.3 | Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea natural (FCC GTDN) | 194 |
| 4.3.2.4 | Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea residual (FCC GTDR) | 196 |
| 4.3.2.5 | Discusión de los morteros cal/FCC con los distintos tipos de geopolímero | 198 |
| 4.3.3 | Resistencia a la compresión de los morteros cal/CCA con sustituciones por geopolímero | 199 |
| 4.3.3.1 | Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero comercial (CCA GCOM) | 200 |
| 4.3.3.2 | Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (CCA GRES) | 202 |
| 4.3.3.3 | Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea natural (CCA GTDN) | 205 |
| 4.3.3.4 | Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea residual (CCA GTDR) | 207 |
| 4.3.3.5 | Discusión de los morteros cal/CCA con los distintos tipos de geopolímero | 208 |
| 4.3.4 | Resistencia a la compresión de los morteros cal/CLD con sustituciones por geopolímero | 210 |
| 4.3.4.1 | Mezclas cal/CLD con sustituciones por geopolímero comercial (CLD GCOM) | 211 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.3.4.2 | Mezclas cal/ CLD con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (CLD GRES) | 212 |
| 4.3.4.3 | Discusión de los morteros cal/CLD con sustituciones por geopolímeros. | 214 |
| 4.3.5 | Discusión del comportamiento de las diferentes puzolanas con relación a la resistencia en la compresión. | 215 |
| 4.4 | Ensayos de durabilidad | 221 |
| 4.4.1 | Pruebas de absorción de agua por capilaridad..... | 221 |
| 4.4.1.1 | Mezclas cal/FCC con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos | 222 |
| 4.4.1.2 | Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos | 223 |
| 4.4.1.3 | Mezclas cal/CLD con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos | 224 |
| 4.4.1.4 | Discusión del comportamiento de las diferentes puzolanas con relación a la absorción de agua por capilaridad..... | 225 |
| 4.4.2 | Ciclos de hielo y deshielo..... | 229 |
| 4.5 | Propuesta de la vivienda de bajo coste | 240 |
| 5 | CONCLUSIONES..... | 248 |
| 5.1 | FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 251 |
| 6 | BIBLIOGRAFÍA | 254 |
| 7 | ANEXOS | 275 |
| ANEXO I | Índice de figuras | 275 |
| ANEXO II | Índice de tablas | 282 |
| ANEXO III | Proyecto de Vivienda de bajo coste..... | 285 |

CONVENCIONES

| | |
|-------|--|
| ADL | Granulometría por difracción láser |
| CAA | Coefficiente de absorción de agua |
| CCA | Ceniza de cascara de arroz |
| CLD | Ceniza de lodo de depuradora |
| DRX | Difracción de rayos X |
| DTG | Curva derivada termogravimétrica |
| FCC | Catalizador gastado de craqueo catalítico |
| FESEM | Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo |
| FRX | Fluorescencia de rayos X |
| GCOM | Geopolímero con silicato comercial |
| GRES | Geopolímero a partir de ceniza de cascara de arroz |
| GTDN | Geopolímero a partir de tierra diatomea natural |
| GTDR | Geopolímero a partir de tierra diatomea residual |
| ODS | Objetivos de Desarrollo Sostenible |
| PC | Cemento Portland |
| Rc | Resistencia a la compresión |
| TD | Tierra de diatomea |
| TDN | Tierra diatomea natural |
| TDR | Tierra diatomea residual |
| TG | Termogravimetría |