



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y COMPUTACIÓN**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“Fabricación de morteros geopoliméricos  
ecoamigables a partir de residuos  
inorgánicos mineros como producto  
alternativo a morteros de cemento Portland”**

**Presentado por:**

**Bicher Luis Gutiérrez López**

**Para optar por el título profesional de:**

**Ingeniería Industrial**

**Orientador: Dr. Fredy A. Huamán Mamani**

**Arequipa, Febrero de 2018**

La presente tesis fue realizada como parte del proyecto “Implementación de un sistema de medidas termomecánicas para el estudio del comportamiento plástico de compuestos geopoliméricos basados en relaves mineros” con convenio 143-2015-FONDECYT a favor de la Universidad Católica San Pablo.



## **Título**

Fabricación de morteros geopoliméricos ecoamigables a partir de residuos inorgánicos mineros como producto alternativo a morteros de cemento Portland.

## **Dedicatoria**

A Dios, por haberme dado la fuerza, la voluntad y las ganas de continuar, por haberme permitido llegar hasta este punto y haber podido conseguir mis objetivos.

A mis padres, Yanet y Bicher que siempre me apoyaron y me motivaron, que están conmigo siempre y que me demuestran su cariño día con día. Porque creen y confían en mis capacidades, espero haberlos hecho sentir orgullosos.

A mis hermanas, Kattia y Jeame, que siempre tuvieron palabras de aliento hacia mí, por haber sido siempre un soporte y por todo lo que me enseñan siempre.

## **Agradecimientos**

A mi familia que en todo este viaje me apoyó para que pudiera siempre lograr las metas que me proponía y por su motivación constante.

A mis asesores Prof. Fredy y Prof. Saúl que confiaron en mi desde un principio, que siempre tuvieron el tiempo para resolver mis dudas y para ayudarme a conseguir este objetivo y por su amistad brindada.

A la Universidad Católica San Pablo, mi alma mater, por todo lo que me dio.

A mis amigos, por su amistad incondicional.

## Resumen

Existe una creciente preocupación por proteger el medio ambiente, que nos dirige a cambiar nuestras costumbres y forma de vida, procurando reducir el impacto negativo al medio ambiente de las actividades que día a día realizamos. La idea de llevar una vida amigable con el medio ambiente es cada vez más popular entre las personas, y la reutilización y reciclaje de productos es cada vez una actividad más común en nuestra sociedad. Por esta razón, en la presente investigación se estudiaron mezclas de residuo inorgánico minero y arena fina para la fabricación de morteros geopoliméricos, se encontró que estos materiales están constituidos por dos fases bien diferenciadas, una continua de geopolímero, formada por la activación alcalina (con solución de Na(OH) 9 molar) del residuo inorgánico minero, y otra dispersa de partículas individuales de arena fina, que no participa en el proceso de geopolimerización pero que es la que responde, en primera instancia, al esfuerzo mecánico externo de compresión uniaxial. Todos los morteros geopoliméricos fabricados fueron caracterizados microestructural y termomecánicamente y comparados, en ambos aspectos, con sus contrapartes de cemento Portland. Entre los mejores resultados mecánicos encontrados en el mortero geopolimérico podemos mencionar: (1) resistencias de 49 MPa a temperatura ambiente y (2) resistencias de 74 MPa a temperatura de ensayo de 500°C, siendo este último resultado el más alto encontrado en la presente investigación. En base a los resultados mecánicos obtenidos se verificó que los morteros geopoliméricos estudiados en este trabajo superan ampliamente las resistencias mínimas requeridas según la NTP 399.610 de los morteros de cemento Portland, superándolos en 186% aproximadamente. Estadísticamente, la mezcla denominada R37.5 (37.5 vol.% de residuo inorgánico minero) es la que presenta los mejores resultados mecánicos, diferenciándose de las demás mezclas debido a que presento, en las tres temperaturas de ensayo, los mejores resultados, hecho que se comprueba estadísticamente con el desarrollo de la prueba de ANOVA y Tukey. Esto puede colocar al material fabricado en ésta investigación como una alternativa frente a los productos que se fabrican y comercializan actualmente.

## **Abstract**

There is a growing concern to protect the environment, which directs us to change our customs and way of life, trying to reduce the negative impact to the environment of the activities we carry out every day. The idea of living an environmentally friendly life is becoming more popular among people, and reusing and recycling products is becoming a more common activity in our society. For this reason, in the present investigation we studied mixtures of mineral inorganic residue and fine sand for the manufacture of geopolymeric mortars, it was found that these materials are constituted by two well differentiated phases, a continuous geopolymer phase, formed by the alkaline activation (with solution of Na (OH) 9 molar) of the mineral inorganic residue, and another dispersion of individual particles of fine sand, which does not participate in the geopolymerization process but is the one that responds, in the first instance, to the external mechanical stress of uniaxial compression .

All fabricated geopolymer mortar were characterized microstructurally and thermomechanically and compared, in both respects, with their Portland cement counterparts. Among the best mechanical results found in the geopolymer mortar are: (1) 49 MPa resistances at room temperature and (2) 74 MPa resistances at a test temperature of 500 °C, the latter result being the highest found in the present investigation. Based on the mechanical results obtained, it was verified that the geopolymer mortars studied in this work far exceed the minimum required strengths according to the NTP 399.610 of the Portland cement mortars, surpassing them in approximately 186%. Statistically, the mixture known as R37.5 (37.5 vol.% Mineral inorganic residue) has the best mechanical results, differing from other mixtures because the best results were obtained at all three test temperatures, is statistically tested with the development of the ANOVA and Tukey test. This can place the material manufactured in this research as an alternative to the products that are currently manufactured and marketed.

## **Palabras Clave**

Geopolímero, geopolimerización, residuo inorgánico minero, cemento Portland, mortero.

## **Keywords**

Geopolymer, geopolymerization, mining tailings, Portland cement, mortar.



## Índice General

Título.....	III
Dedicatoria .....	IV
Agradecimientos .....	V
Resumen .....	VI
Abstract .....	VII
Índice de tablas .....	XII
Índice de figuras.....	XV
<b>Capítulo I.....</b>	<b>1</b>
<b>1.- Descripción del problema de investigación .....</b>	<b>1</b>
1.1.- El residuo inorgánico minero .....	1
1.2.- El cemento Portland .....	2
<b>2.- Objetivos de la investigación .....</b>	<b>7</b>
2.1.- Objetivo general .....	7
2.2.- Objetivos específicos.....	7
<b>3.- Justificación de la investigación .....</b>	<b>8</b>
3.1.- Conveniencia.....	8
3.2.- Justificación social .....	8
3.3.- Justificación teórica.....	8
3.4.- Utilidad metodológica .....	9
3.5.- Justificación práctica .....	9
<b>4.- Delimitación de la investigación .....</b>	<b>10</b>
4.1.- Temática .....	10
4.2.- Temporal .....	10
4.3.- Espacial.....	10
<b>5.- Resumen de la estructura capitular de la tesis .....</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo II .....</b>	<b>13</b>
<b>1.- Marco teórico conceptual .....</b>	<b>13</b>

2.- Hipótesis de la investigación .....	19
<b>Capítulo III</b> .....	20
1.- Modelo conceptual.....	20
1.1.- Preparación de la solución activadora alcalina .....	20
1.2.- Mezcla y homogeneización.....	21
2.- Descripción del objeto de estudio.....	23
3.- Unidad de análisis.....	23
4.- Descripción del tipo de investigación.....	23
5.- Método de investigación.....	24
6.- Instrumentos de investigación .....	24
7.- Recolección de datos.....	24
7.1.- Caracterización estructural y microestructural de la materia prima ..	25
7.1.1.- Adecuación de materia prima .....	25
7.1.2.- Granulometría por difracción láser .....	26
7.1.3.- Difracción de Rayos X.....	27
7.1.4.- Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	29
7.2.- Fabricación del mortero geopolimérico.....	30
7.3.- Diagrama de bloques y balance de materia para la fabricación de mortero geopolimérico .....	32
7.3.1.- Caracterización estructural y microestructural del mortero geopolimérico .....	33
7.3.1.1.- Microscopía Óptica .....	33
7.3.1.2.- Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	36
7.3.1.3.- Picnometría de helio .....	37
7.4.- Fabricación de mortero convencional.....	39
7.4.1.- Caracterización estructural del mortero convencional.....	40
7.4.1.1.- Microscopía óptica de mezclas pulidas de mortero convencional... 40	
7.5.- Resultados mecánicos.....	43
7.5.2.- Microscopía óptica de las mezclas de mortero geopolimérico luego de realizadas las pruebas mecánicas .....	52
7.5.3.- Microscopía electrónica de barrido (SEM) a las mezclas de mortero geopolimérico luego de realizadas las pruebas mecánicas. ....	57
7.5.4.- Resultados mecánicos del mortero convencional.....	63

7.5.5.- Microscopía óptica de las mezclas de mortero convencional luego de realizadas las pruebas mecánicas .....	73
<b>8.- Análisis de datos .....</b>	<b>79</b>
8.1. Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional .....	79
8.2. Comparación entre el mortero geopolimérico y morteros en otras investigaciones.....	80
8.3.- Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional según la norma NTP 366.610 .....	83
8.4.- Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional en base a aspectos de importancia social .....	84
<b>9.- Resumen de la operacionalización de las variables del modelo conceptual</b>	<b>87</b>
<b>10.- Limitaciones de la investigación.....</b>	<b>87</b>
<b>Capítulo IV .....</b>	<b>88</b>
1.- Análisis Estadístico.....	88
2.- Análisis estadístico previo.....	88
3.- El análisis de varianza.....	89
3.1.- Pruebas de normalidad para todas las mezclas en el tratamiento a 400°C.....	90
3.2.- Pruebas de normalidad para todas las mezclas en el tratamiento a 500°C.....	93
3.3.- Pruebas de normalidad para todas las mezclas en el tratamiento a 600°C.....	95
4.- La prueba de Tukey .....	98
<b>Capítulo V .....</b>	<b>109</b>
1.- Conclusiones .....	109
2.- Recomendaciones.....	110
<b>Bibliografía.....</b>	<b>112</b>
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>115</b>
<b>Anexo 2 .....</b>	<b>116</b>

## Índice de tablas

Tabla 01. Matriz de mezclas .....	23
Tabla 02. Matriz másica de las mezclas.....	30
Tabla 03. Densidad de la mezcla R25.....	38
Tabla 04. Densidad de la mezcla R75.....	38
Tabla 05. Matriz volumétrica de mezclas para mortero convencional.....	39
Tabla 06. Resultados mecánicos del mortero geopolimérico evaluado desde temperatura ambiente hasta los 600 °C .....	51
Tabla 07. Resultados mecánicos del mortero convencional evaluado desde temperatura ambiente hasta los 600 °C .....	73
Tabla 08. Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional.....	79
Tabla 09. Comparación del mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero con un mortero geopolimérico elaborado a base de escoria, ceniza volante y piedra caliza.....	81
Tabla 10. Comparación del mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero con un mortero geopolimérico elaborado a base de ceniza volante.....	82
Tabla 11. Comparación del mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero con un mortero geopolimérico elaborado a base de ceniza volante.....	82
Tabla 12. Resistencia de mortero convencional según NTP 399.610.....	83
Tabla 13. Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional en base a factores de importancia social.....	84
Tabla 14. Costo de las materias primas para la fabricación de ambos tipos de mortero.....	85
Tabla 15. Cantidad y costo de las materias primas para la fabricación de ambos tipos de mortero.....	86
Tabla 16. Análisis estadístico previo para las mezclas tratadas a 400°C.....	88
Tabla 17. Análisis estadístico previo para las mezclas tratadas a 500°C.....	89
Tabla 18. Análisis estadístico previo para las mezclas tratadas a 600°C.....	89
Tabla 19. Fórmulas para análisis ANOVA.....	98

Tabla 20. Hipótesis y nivel de significancia para ANOVA.....	99
Tabla 21. Resumen de los resultados de las cinco mezclas a 400 °C.....	100
Tabla 22. Fórmulas de ANOVA aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 400 °C .....	100
Tabla 23. Dato “F” para 99% de confianza obtenido de la tabla de Fisher.....	100
Tabla 24. Fórmulas de prueba de Tukey aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 400 °C .....	101
Tabla 25. Promedio de los resultados obtenidos a las cinco tipos de mezclas a 400 °C.....	102
Tabla 26. Diferencia de los promedios delos resultados obtenidos de los cinco tipos de mezclas a 400 °C .....	102
Tabla 27. Cuadro comparativo de Minitab.....	102
Tabla 28. Resumen de los resultados de las cinco mezclas a 500 °C.....	103
Tabla 29. Fórmulas de ANOVA aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 500 °C .....	103
Tabla 30. Fórmulas de prueba de Tukey aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 500 °C .....	104
Tabla 31. Promedio de los resultados obtenidos a las cinco tipos de mezclas a 500 °C .....	104
Tabla 32. Diferencia de los promedios delos resultados obtenidos de los cinco tipos de mezclas a 500 °C .....	104
Tabla 33. Cuadro comparativo de Minitab.....	105
Tabla 34. Resumen de los resultados de las cinco mezclas a 600 °C.....	105
Tabla 35. Fórmulas de ANOVA aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 600 °C .....	106
Tabla 36. Fórmulas de prueba de Tukey aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 600 °C .....	106
Tabla 37. Promedio de los resultados obtenidos a las cinco tipos de mezclas a 600 °C .....	106
Tabla 38. Diferencia de los promedios delos resultados obtenidos de los cinco tipos de mezclas a 600 °C .....	107
Tabla 39. Cuadro comparativo de Minitab.....	107
Tabla A1.1. Base de datos para el análisis estadístico.....	115

Tabla A2.1. Resultados de la investigación de Haoyang Su y otros autores.....	116
Tabla A2.2. Resultados de la investigación de Omar A. Abdulkareem y otros autores.....	116
Tabla A2.3. Resultados de la investigación de Ernesto J. Guades.....	117

## Índice de figuras

Figura 01. (A) Distribución en volumen del tamaño de partícula de las materias primas. (B) Distribución en número del tamaño de partícula de las materias primas.....	26
Figura 02. Difractograma de residuos inorgánicos mineros.....	27
Figura 03. Difractograma de arena.....	28
Figura 04. Micrografía de arena obtenida por microscopía electrónica de barrido.....	29
Figura 05. Micrografía de residuo inorgánico minero obtenida por microscopía electrónica de barrido .....	29
Figura 06. Diagrama de bloques y balance de materia del proceso de producción de mortero geopolimérico.....	32
Figura 07. Micrografía por microscopia óptica del mortero geopolimérico R25.....	33
Figura 08. Micrografía por microscopia óptica del mortero geopolimérico R37.5.....	34
Figura 09. Micrografía por microscopia óptica del mortero geopolimérico R50.....	34
Figura 10. Micrografía por microscopia óptica del mortero geopolimérico R62.5.....	35
Figura 11. Micrografía por microscopia óptica del mortero geopolimérico R75.....	35
Figura 12. Micrografía por microscopia electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25.....	36
Figura 13. Micrografía por microscopia electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75.....	37
Figura 14. Micrografía por microscopia óptica del mortero convencional C25.....	40
Figura 15. Micrografía por microscopia óptica del mortero convencional C37.5.....	41
Figura 16. Micrografía por microscopia óptica del mortero convencional C50.....	41
Figura 17. Micrografía por microscopia óptica del mortero convencional C62.5.....	42
Figura 18. Micrografía por microscopia óptica del mortero convencional C75.....	42
Figura 19. Curva esfuerzo - deformación a temperatura ambiente (15 °C – 22 °C) de las cinco mezclas de mortero geopolimérico.....	44

Figura 20. Curvas esfuerzo - deformación a 400 °C para las cinco mezclas de mortero geopolimérico (A) lote 1 y (B) lote 2.....	45
Figura 21. Curvas esfuerzo - deformación a 500 °C para las cinco mezclas de mortero geopolimérico (A) lote 1 y (B) lote 2.....	46
Figura 22. Curvas esfuerzo - deformación a 600 °C para las cinco mezclas de mortero geopolimérico (A) lote 1 y (B) lote 2.....	47
Figura 23. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R25 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2.....	48
Figura 24. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R37.5 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2.....	49
Figura 25. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R50 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2.....	49
Figura 26. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R62.5 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2.....	50
Figura 27. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R75 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2.....	50
Figura 28. Micrografía por microscopia óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a temperatura ambiente .....	52
Figura 29. Micrografía por microscopia óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 400 °C .....	53
Figura 30. M Micrografía por microscopia óptica para el mortero geopolimérico R75 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 400 °C .....	53
Figura 31. Micrografía por microscopia óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 500 °C.....	54
Figura 32. Micrografía por microscopia óptica para el mortero geopolimérico R75 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 500 °C .....	55
Figura 33. Micrografía por microscopia óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 600 °C .....	56
Figura 34. Micrografía por microscopia óptica para el mortero geopolimérico R75 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 600 °C .....	56
Figura 35. Aspecto macroscópica del mortero geopolimérico R37.5 luego de ser ensayado a temperatura ambiente (A), 400 °C (B), 500 °C (C) y 600 °C (D).....	57



Figura 36. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a temperatura ambiente .....	58
Figura 37. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a temperatura ambiente .....	59
Figura 38. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a 400 °C.....	59
Figura 39. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a 400 °C.....	60
Figura 40. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a 500 °C.....	61
Figura 41. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a 500 °C.....	61
Figura 42. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a 600 °C.....	62
Figura 43. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a 600 °C.....	63
Figura 44. Curvas esfuerzo - deformación a temperatura ambiente (15 °C – 22 °C) para las cinco mezclas de mortero convencional.....	64
Figura 45. Curva esfuerzo - deformación a 400 °C de las cinco mezclas de mortero convencional.....	65
Figura 46. Curva esfuerzo - deformación a 500 °C de las cinco mezclas de mortero convencional .....	66
Figura 47. Curva esfuerzo - deformación a 600 °C de las cinco mezclas de mortero convencional.....	67
Figura 48. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C25 en las cuatro temperaturas de estudio .....	68
Figura 49. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C37.5 en las cuatro temperaturas de estudio.....	69
Figura 50. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C50 en las cuatro temperaturas de estudio.....	70

Figura 51. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C62.5 en las cuatro temperaturas de estudio.....	71
Figura 52. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C75 en las cuatro temperaturas de estudio.....	72
Figura 53. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C25 luego de ser comprimida a temperatura ambiente.....	73
Figura 54. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C75 luego de ser comprimida a temperatura ambiente.....	74
Figura 55. Micrografía de la mezcla C25 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 400 °C .....	75
Figura 56. Micrografía de la mezcla C75 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 400 °C .....	75
Figura 57. Micrografía de la mezcla C25 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 500 °C.....	76
Figura 58. Micrografía de la mezcla C75 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 500 °C.....	77
Figura 59. Micrografía de la mezcla C25 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 600 °C.....	78
Figura 60. Micrografía de la mezcla C75 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 600 °C.....	78
Figura 61. Prueba de normalidad para la mezcla R25 en el tratamiento a 400°C.....	90
Figura 62. Prueba de normalidad para la mezcla R37.5 en el tratamiento a 400°C.....	91
Figura 63. Prueba de normalidad para la mezcla R50 en el tratamiento a 400°C.....	91
Figura 64. Prueba de normalidad para la mezcla R62.5 en el tratamiento a 400°C.....	92
Figura 65. Prueba de normalidad para la mezcla R75 en el tratamiento a 400°C.....	92
Figura 66. Prueba de normalidad para la mezcla R25 en el tratamiento a 500°C.....	93
Figura 67. Prueba de normalidad para la mezcla R37.5 en el tratamiento a 500°C.....	93
Figura 68. Prueba de normalidad para la mezcla R50 en el tratamiento a 500°C.....	94
Figura 69. Prueba de normalidad para la mezcla R62.5 en el tratamiento a 500°C.....	94
Figura 70. Prueba de normalidad para la mezcla R75 en el tratamiento a 500°C.....	95
Figura 71. Prueba de normalidad para la mezcla R25 en el tratamiento a 600°C.....	95
Figura 72. Prueba de normalidad para la mezcla R37.5 en el tratamiento a 600°C.....	96
Figura 73. Prueba de normalidad para la mezcla R50 en el tratamiento a 600°C.....	96

Figura 74. Prueba de normalidad para la mezcla R62.5 en el tratamiento a 600°C.....	97
Figura 75. Prueba de normalidad para la mezcla R75 en el tratamiento a 600°C.....	97

## **Capítulo I**

### **Introducción**

#### **1.- Descripción del problema de investigación**

##### **1.1.- El residuo inorgánico minero**

El Perú es un país minero debido a que en su territorio podrían llegar a existir más de 150 minas en el territorio, en las cuales los principales minerales extraídos son el cobre, el oro, la plata, el hierro, etc. Yanacocha es la principal en cuanto a producción de oro, por ello es considerada la quinta a nivel mundial debido al volumen de producción anual, Toquepala, Cuajone y Cerro Verde destacan en producción de cobre (metal que es explotado y exportado en mayor volumen en nuestro territorio). Actualmente el Perú posee en cartera actualmente 47 proyectos mineros, de los cuales 5 son ampliaciones de minas que están en proceso de explotación, 15 proyectos que tienen el estudio de impacto ambiental aprobado y se encuentran en construcción, 2 proyectos en evaluación que ya presentaron el estudio de impacto ambiental y 25 proyectos que se encuentran en proceso de exploración. De esos proyectos, únicamente en Arequipa se está invirtiendo 5,019 millones de dólares, teniendo el 10.68% del total de inversión en el país, ubicándose en el cuarto lugar entre los departamentos. (Dirección de Promoción Minera, 2017)

En el Perú anualmente se producen 24.78 millones de toneladas de residuo inorgánico minero aproximadamente; residuo minero que únicamente es dispuesto por parte de las compañías mineras. Históricamente se sabe que la disposición de los relaves se hacían en riachuelos, ríos o lagos; aunque se vienen presentando distintas alternativas para la disposición y mantenimiento de este material, debido a la creciente preocupación por la aparición del “drenaje ácido de roca” ARD (Acid Rock Drainage) que se origina en la actividad minera, más específicamente en etapas de cierre y/o abandono luego de terminada la extracción de material en las minas, lo cual genera contaminación de suelo y agua. (Medina & Alarcón, 2010)

Existen 4 tipos de disposiciones para el residuo inorgánico minero que se están presentando:

- Depósitos superficiales: Comprende la disposición subaérea, disposición espesada y relave deshidratado.
- Rellenos subterráneos.
- Disposición submarina.
- Métodos combinados.

Para reducir este problema se plantea usar el residuo inorgánico minero como materia prima para la elaboración de mortero geopolimérico.

### **1.2.- El cemento Portland**

El mortero geopolimérico que se fabricó presenta dos fases, una continua que es el geopolímero y una discontinua que es la arena. La fase continua o geopolimérica tiene características cementantes, es decir que podría convertirse en una alternativa al cemento Portland ya que esta fase geopolimérica es ecoamigable al momento de su fabricación, es por esta razón que se piensa en la fabricación de mortero.

El mortero es un material de construcción, formado esencialmente de diferentes tamaños de un agregado el cual es la arena, agua y un aglomerante que normalmente es el cemento Portland, el cual posee un proceso de fabricación con alto nivel de contaminación por la cantidad de energía, calor y dióxido de carbono que genera, que representa el 5% de las emisiones de dióxido de carbono en el planeta. (Mo, Alengaram, & Jumaat, 2016)

Las emisiones de dióxido de carbono se presentan como un problema grave para el medio ambiente y se espera que Europa y Estados Unidos se comprometan en la disminución del mismo. Los países del tercer mundo aumentaron su producción de cemento ocasionando que la mayor fuente de emisión de dióxido de carbono provenga de la producción de cemento. En el año 2008 la producción de cemento alcanzó los 2900 millones de toneladas lo que generó un total de 2900 millones de toneladas de dióxido

de carbono emitido al medio ambiente y en el año 2015, la producción de dióxido de carbono debido al proceso de elaboración de cemento alcanzó 3500 millones de toneladas, las cuales fueron alcanzadas en toda Europa en el año 1990, pero sumando las emisiones industriales, energéticas y de transporte. Esto evidencia y resalta la necesidad por encontrar una solución a este problema y desarrollar nueva tecnología la cual pueda adaptarse a la economía de países en desarrollo. (Davidovits, 2015)

Algunas de las consecuencias de la emisión de dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, son las siguientes:

- La temperatura media de la superficie terrestre se ha visto incrementada a lo largo del siglo XX en 0,6° C. Se prevé que en el siglo XXI, la temperatura global se incremente entre 1° y 5° C.
- Se prevee también que en el siglo XXI el nivel del mar suba entre 9 y 88 cm, dependiendo de los escenarios de emisiones considerados.
- Existe la posibilidad de que se incrementen los fenómenos de erosión y salinización en áreas costeras.
- Aumento y propagación de enfermedades infecciosas (lo cual hemos visto a la actualidad en varios casos como la fiebre amarilla, el ébola, etc.)
- Las diferentes especies de fauna buscarán desplazarse altitudes o latitudes más frías, buscando los climas a los que están habituados. Aquellas especies que no puedan adaptarse ni sean capaces de desplazarse se extinguirán.
- Aumento en frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos.

(Arthur B. Robinson, 2010)

El proceso de producción de cemento no solo afecta al medio ambiente debido a la emisión de dióxido de carbono sino también dentro del proceso existe otro tipo de emisiones propias de la fabricación del cemento que no son controladas.

Inmersos dentro del proceso de fabricación del cemento existen subprocesos los cuales tienen un impacto ambiental negativo, algunos de estos son: manejo y almacenamiento de los materiales, molienda e incineración de residuos peligrosos, aparte de estos subprocesos existen otro tipo de emisiones durante el enfriamiento del horno las cuales

son partículas o "polvo del horno", gases de combustión que contienen monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos, aldehídos, cetonas, y óxidos de azufre y nitrógeno. A su vez también se emiten niveles altos de plomo, cadmio, arsénico y mercurio, de un total de 19 metales pesados hallados regularmente en las emisiones a la atmósfera. (Villalonca, 1977)

La exposición a monóxido de carbono afecta el sistema nervioso central y comparte los mismos efectos de los óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas suspendidas, las cuales ocasionan la irritación de los tejidos pertenecientes al sistema respiratorio y empeoran los síntomas en personas con enfermedades que afectan directamente los pulmones, como son el asma y la bronquitis. A parte de ello, es posible que incrementen los problemas cardiacos y enfermedades respiratorias agudas. (Banco Mundial - Departamento de Medio Ambiente, 1994)

Los contaminantes hídricos del proceso se encuentran en los derrames del material que alimenta el horno, estos contaminantes poseen alto pH, así como también sólidos suspendidos y sólidos disueltos (principalmente potasio y sulfato), a su vez el agua de enfriamiento del proceso se considera contaminante debido al calor residual que posee al momento de ser desechada. El escurrimiento y el líquido lixiviado de las áreas de almacenamiento de los materiales y de eliminación de los residuos de desecho pueden llegar a ser una fuente de contaminantes para las aguas superficiales y freáticas. El polvo generado, especialmente la sílice libre, constituye un riesgo importante para la salud de los trabajadores de la planta en la que se produce el cemento debido a que estar expuestos a este polvo provoca una enfermedad conocida como silicosis. (Villalonca, 1977)

La fabricación de cemento incluye dentro de sus procesos el transporte de materiales polvorientos, los cuales están triturados, desde la cantera de piedra caliza, hasta el embarque del producto final terminado y listo para su respectivo envío, estas partículas que se levantan hacia el aire son una de las causas más importantes del impacto negativo que se produce al medio ambiente. Los precipitadores electrostáticos, o los filtros de bolsa, constituyen un requerimiento común para poder controlar las emisiones de partículas por parte de los hornos. El control del polvo que resulta del transporte de los

materiales es un desafío muy complicado a afrontar porque las bandas transportadoras, pilas de acopio y caminos de la planta pueden llegar a ser causas aún más importantes de degradación de la calidad del aire que las emisiones tanto del molino como del horno. (Banco Mundial - Departamento de Medio Ambiente, 1994)

En las plantas del proceso "seco", el único efluente es el agua de enfriamiento, y ésta puede ser eliminada con torres especiales para el enfriamiento o en su defecto en piscinas. En el proceso "húmedo", se alimentan las materias primas al horno en forma de una lechada. En algunos casos, las plantas pueden lixiviar el polvo del horno que se ha recolectado, a fin de eliminar el álcali soluble antes de volver a alimentarlo al horno. En estas plantas, el rebosamiento del clarificador del proceso de lixiviación constituye la fuente más severa de contaminación hídrica; requiere neutralización antes de descargarlo. (Villalonca, 1977)

Dentro del proceso de fabricación del cemento también se incineran residuos peligrosos en hornos, lo cual aumenta la cantidad y el tipo de contaminantes suspendidos en el aire. Se producen nuevos contaminante como son algunos productos de combustión incompleta a los que también se incluyen dioxinas y furanos. (Banco Mundial - Departamento de Medio Ambiente, 1994)

Las dioxinas y furanos son contaminantes orgánicos persistentes, formados en la combustión de materiales que contienen cloro y tienen importantes características:

- Son persistentes, ya que tienen una vida media de 9 a 15 años en la superficie del suelo.
- Son muy tóxicos, esto se debe a que pueden provocar efectos graves en la salud, principalmente cáncer y otros problemas al sistema endocrino, incidir en la pérdida de fertilidad, afectar el sistema inmunológico y alterar el normal desarrollo de los fetos, tanto en seres humanos como en animales.

Las dioxinas son uno de los 12 contaminantes orgánicos persistentes que la ONU ha recomendado disminuir y paulatinamente eliminar prioritariamente. (Villalonca, 1977). Son bioacumulables debido a que se depositan en los tejidos grasos, aumentando su



concentración a medida que sube la cadena alimenticia, lo que significa que el ser humano recibe la mayor concentración y como consecuencia los niños la reciben a través de la leche materna. (Banco Mundial - Departamento de Medio Ambiente, 1994)

Aproximadamente cada tonelada de producción de cemento genera una tonelada de dióxido de carbono. En el Perú el año 2015 se produjo un total de 10.41 millones de toneladas de cemento, habiendo reducido en 2.4% en relación al año 2014. Esto quiere decir que el 2015 se emitió 10.41 millones de toneladas de dióxido de carbono debido a la producción de cemento. En el año 2016 se produjeron 10.094 millones de toneladas de cemento, lo que significan aproximadamente 10.094 millones de toneladas de dióxido de carbono emitidas al ambiente. (Asociación de Productores de Cemento - ASOCEM, 2016)

En nuestro país se emiten diariamente al medio ambiente un total de 380 mil toneladas de dióxido de carbono, lo que hace un total de 138 millones de toneladas en el año (El Comercio, 2014), con lo cual podemos concluir que en el Perú el 7.54% de las emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente en el año 2015 se dieron debido a la producción de cemento.

Según la Asociación de Productores de Cemento, en el año 2012 se produjeron en el mundo un total de 3831 millones de toneladas de cemento. China tuvo el 61% de consumo mientras que en el Perú se consumió el 0.27% del total de la producción mundial para ese año. Así mismo en el mundo existía en ese año una capacidad instalada para la producción de cemento de 4,000 millones de toneladas. En cuanto al consumo per cápita, para el año 2013 en el Perú fue de 364 kg.

Si bien la producción en 2016 disminuyó con respecto al año anterior debido a la reducción en la inversión pública por las trabas generadas en el gobierno, mundialmente el mercado del cemento es considerado en crecimiento debido a la expansión que se lleva a cabo en otros países como lo es China.

Ricardo Arbulú, el presidente del Instituto de la Construcción y Desarrollo (ICD) de la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO), estimó que el sector construcción e inmobiliario se incrementará 4% en el 2017. Explicó que esta proyección dependerá mucho de la agilización que se pueda llevar a cabo en los grandes proyectos de

infraestructura que se encuentran hasta el momento entrampados. (La República, 2016)  
Esto se vió reflejado desde los últimos meses del año pasado en el incremento del PBI del sector construcción.

Con el incremento del 4% del sector construcción podemos decir que para el presente año la producción de cemento se verá incrementada debido al incremento del sector construcción, si bien son factores directamente proporcionales, esto no indica que el crecimiento de ambos será el mismo ya que el sector construcción es también influenciado por otros factores lejanos a la producción de cemento.

De lo anterior, el problema de investigación se puede plantear del modo siguiente:

¿Los morteros geopoliméricos sintetizados a partir de residuo inorgánico minero y arena con agente endurecedor, poseen propiedades mecánicas similares a las del mortero elaborado a base de cemento Portland?

## **2.- Objetivos de la investigación**

### **2.1.- Objetivo general**

Encontrar una metodología adecuada para la fabricación de morteros geopoliméricos a partir de residuos inorgánicos mineros, con resistencias a la compresión uniaxial mayores al 20% respecto de sus contrapartes de cemento Portland convencional.

### **2.2.- Objetivos específicos**

- Determinar la matriz de mezclas a partir del diseño experimental Simplex Lattice.
- Determinar las propiedades estructurales y microestructurales de la materia prima.
- Fabricar morteros geopoliméricos ecoamigables a partir de la matriz de mezclas.

- Caracterizar por pruebas mecánicas de compresión uniaxial los morteros geopoliméricos fabricados.
- Validar estadísticamente los resultados mecánicos obtenidos de los morteros geopoliméricos y sus contrapartes de cemento Portland.

### **3.- Justificación de la investigación**

#### **3.1.- Conveniencia**

La ruta de fabricación de mortero geopolimérico será presentado como un proceso alternativo para la utilización de residuo inorgánico minero y a su vez como una alternativa al mortero de cemento Portland. Se buscó comprobar que el mortero geopolimérico sometido a temperaturas intermedias (hasta 600° C) mejora sus propiedades mecánicas, y de ese modo sugerir nuevas aplicaciones para el material fabricado.

#### **3.2.- Justificación social**

El mortero geopolimérico tendrá un impacto positivo en la sociedad mejorando su calidad de vida al contribuir con la disminución de la contaminación y también en el medio ambiente ya que mediante su fabricación se le otorgará al residuo inorgánico minero un uso alternativo y se buscará disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producidas en el proceso de fabricación de cemento Portland, contribuyendo así a la reducción de la contaminación ambiental en nuestro país.

#### **3.3.- Justificación teórica**

Esta investigación servirá como referencia para investigaciones similares futuras, ya que se diseñó e implementó un proceso alternativo para la fabricación de mortero geopolimérico con menor impacto ambiental. Esto se llevó a cabo gracias a una intensiva investigación en papers, artículos científicos y libros.

### **3.4.- Utilidad metodológica**

La presente investigación se desarrolló empezando por una extensa revisión bibliográfica para determinar el diseño experimental pertinente para la elaboración de la matriz de mezclas de mortero geopolimérico, paralelamente se realizó una adecuación preliminar de la materia prima (molienda y tamizado), seguidamente se llevó a cabo la caracterización física, estructural y microestructural de la materia prima; con los resultados de esta caracterización, la matriz de mezclas y la información de la bibliografía, se procedió a diseñar la metodología de fabricación de mortero geopolimérico a partir de residuos inorgánicos mineros, inmediatamente después se preparó la solución alcalina activadora; con las mezclas y concentración de solución alcalina definidas se procedió a la obtención, por prensado uniaxial en molde metálico, de probetas cilíndricas de morteros geopoliméricos, estas fueron colocadas en bolsas herméticas para completar el proceso de geopolimerización y endurecimiento. Las probetas de mortero geopolimérico endurecidas fueron caracterizadas microestructural y termomecánicamente. Finalmente se realizó una comparación de las microestructuras de las probetas geopoliméricas antes y después de los ensayos mecánicos, el objetivo de esta comparación fue determinar los mecanismos microscópicos responsables de la fractura y deformación de las probetas, esta información nos sirvió para retroalimentar la etapa de fabricación de morteros geopoliméricos hasta obtener la mejor metodología. Cabe señalar que también se fabricaron y ensayaron probetas hechas con cemento Portland ordinario y los resultados fueron comparados con los obtenidos en las probetas de mortero geopolimérico.

### **3.5.- Justificación práctica**

Esta investigación buscó desarrollar un producto con características similares al mortero de cemento Portland pero con aplicaciones a temperaturas intermedias (entre temperatura ambiente y 600°C), de esta manera se elaboró un producto amigable con el medio ambiente y con mayor variedad de aplicaciones que los productos cementantes comunes.

## **4.- Delimitación de la investigación**

### **4.1.- Temática**

La presente investigación se orientó a la fabricación de mortero geopolimérico a partir de residuo inorgánico minero para luego medir sus propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a temperaturas intermedias (de 20°C hasta 600°C).

### **4.2.- Temporal**

La investigación tomó 12 meses de trabajo y comenzó en el mes de Junio del año 2016, culminando el mes de Mayo del año 2017.

### **4.3.- Espacial**

La presente investigación se realizó en las instalaciones de los laboratorios de la carrera profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Católica San Pablo, ubicados en el Instituto del Sur, en la calle Salaverry 301, Cercado-Arequipa, Perú.

## **5.- Resumen de la estructura capitular de la tesis**

### Capítulo I

#### 1.- Descripción del problema de investigación

##### 1.1.- El residuo inorgánico minero

##### 1.2.- El cemento Portland

#### 2.- Objetivos de la investigación

##### 2.1.- Objetivo general

##### 2.2.- Objetivos específicos

#### 3.- Justificación de la investigación

##### 3.1.- Conveniencia

##### 3.2.- Justificación social

- 3.3.- Justificación teórica
- 3.4.- Utilidad metodológica
- 3.5.- Justificación práctica
- 4.- Delimitación de la investigación
  - 4.1.- Temática
  - 4.2.- Temporal
  - 4.3.- Espacial
- 5.- Resumen de la estructura capitular de la tesis

## Capítulo II

- 1.- Marco teórico conceptual
- 2.- Hipótesis de la investigación

## Capítulo III

- 1.- Modelo conceptual
  - 1.1.- Preparación de la solución activadora alcalina
  - 1.2.- Mezcla y homogeneización
- 2.- Descripción del objeto de estudio
- 3.- Unidad de análisis
- 4.- Descripción del tipo de investigación
- 5.- Método de investigación
- 6.- Instrumentos de investigación
- 7.- Recolección de datos
  - 7.1.- Caracterización estructural y microestructural de la materia prima
    - 7.1.1.- Adecuación de materia prima
    - 7.1.2.- Granulometría por difracción láser
    - 7.1.3.- Difracción de Rayos X
    - 7.1.4.- Microscopía electrónica de barrido (SEM)
  - 7.2.- Fabricación del mortero geopolimérico
    - 7.2.1.- Caracterización estructural y microestructural del mortero geopolimérico
      - 7.2.1.1.- Microscopía Óptica

7.2.1.2.- Microscopía electrónica de barrido (SEM)

7.2.1.3.- Picnometría de helio

7.3.- Resultados mecánicos

7.3.1.- Resultados mecánicos del mortero geopolimérico

7.3.2.- Microscopía electrónica de barrido (SEM) a las mezclas de mortero geopolimérico luego de realizadas las pruebas mecánicas

7.3.3.- Resultados mecánicos del mortero convencional

8.- Análisis de datos

8.1. Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional

8.2. Comparación entre el mortero geopolimérico y morteros en otras investigaciones

8.3.- Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional según la norma NTP 366.610

9.- Resumen de la operacionalización de las variables del modelo conceptual

10.- Limitaciones de la investigación

#### Capítulo IV

1.- Análisis Estadístico

2.- El análisis de varianza

3.- La prueba de tukey

#### Capítulo V

1.- Conclusiones

2.- Recomendaciones

Bibliografía

Anexo 1

## **Capítulo II**

### **Referencial teórico**

#### **1.- Marco teórico conceptual**

A lo largo de los años se han venido realizando investigaciones para elaborar productos alternativos a los materiales de construcción tradicionales, tal es el caso del papercrete, este material utilizado en la construcción es amigable con el medio ambiente ya que está compuesto de una mezcla de cemento Portland (en muy baja proporción), arena y papel. Si bien no es ideal el uso del cemento Portland debido a la contaminación que este genera, al usarse una cantidad muy pequeña en relación al resto del material, contribuimos también al decrecimiento en el uso de cemento Portland. Patentado por primera vez en el año 1928, se ha reavivado desde la década de 1980. Eric Patterson y Mike McCain fueron quienes se atribuyeron a sí mismos y de manera independiente el haber inventado este material al que ellos lo llamaban "padobe" o "fibrocemento". (Vélez, 2014)

El papel que se utiliza para la fabricación del papercrete puede provenir de distintas fuentes, tales como son: periódicos, revistas, libros, etc., obtenidos de la recolección local o de contenedores de este tipo de residuo específico; dependiendo del tipo de mezclador utilizado para la mezcla de la pulpa pudiendo estar el papel remojado en agua de antemano, lo cual se realiza para otorgar elasticidad al material. El proceso de fabricación del papercrete se lleva a cabo utilizando una mezcla de papel reciclado con una pequeña cantidad de cemento y arena. Según lo investigado la proporción es de 3:1:1 – (papel: cemento: arena). (Vélez, 2014)

Este material tiene una desventaja importante y es que no es impermeable, debido a la presencia de papel este material se remoja con facilidad, se suaviza y se deteriora si se mantiene húmedo por mucho tiempo, por esa razón hay que ser cuidadoso en la construcción para asegurar que sea impermeable por el exterior. Su principal ventaja es que utiliza muy poco cemento y que el papel puede provenir de cualquier fuente como se mencionó anteriormente, así como también es un buen aislante sonoro y térmico.



En otra investigación, realizada en la Escuela Tecnológica de Ingeniería Civil y Ambiental en la ciudad de Georgia en Estados Unidos, Mulalo Doyoyo desarrolló un nuevo material estructural basado en ceniza volante. Este material conocido como Cenocell ofrece alta resistencia y es menos pesado comparado con los materiales de construcción tradicionales. Con amplias aplicaciones potenciales y ventajas tales como buen aislamiento térmico y de resistencia al fuego, el Cenocell podría reemplazar al hormigón, a la madera y a otros materiales en una amplia gama de aplicaciones en la construcción, transporte e incluso en la industria aeroespacial. (Phys.Org, 2008)

Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados, están compuestas de pequeñas partículas extraídas de los gases de combustión por los sistemas de control de la contaminación. Actualmente la mayor parte debe ser desechada, aunque ciertos tipos de cenizas volantes se pueden utilizar para reemplazar una parte del cemento utilizado en hormigón convencional. Cenocell, producido a partir de cenizas volantes o cenizas de fondo en una reacción con productos químicos orgánicos, no requiere ni cemento ni agregado (arena y roca) como normalmente es utilizado en el hormigón. A diferencia del hormigón, que emerge de hornos de curado en su forma final, no requiere un largo periodo para alcanzar su resistencia máxima. En palabras de Moyoyo, lidiar con las cenizas es un problema en todo el mundo, pero si las usamos en aplicaciones reales, se puede convertir en un material útil a diferencia de que solo sea un desecho. (Phys.Org, 2008)

Es un material muy diferente al concreto debido a que utiliza lo que ahora se considera como un material de desecho para reemplazar al cemento. El nuevo material es considerado como un activo para el medio ambiente, este puede tener una amplia gama de propiedades que lo hacen competitivos con el hormigón tradicional, especialmente las nuevas clases de hormigón ligero en autoclave. Existen investigaciones realizadas sobre mortero geopolimérico elaborado a base de diferentes materiales, estudiando su potencial en la industria de la construcción, así como su posible uso como producto alternativo al mortero convencional elaborado a base de cemento Portland. A

continuación se podrá apreciar las investigaciones consideradas más importantes para la presente investigación.

Según Mohammed Haloob Al-Majidi y otros autores hay muchos problemas ambientales asociados con la producción de cemento Portland, tales como el consumo de un 5% de los recursos naturales y la generación de un 5-7% del total de las emisiones antropogénicas globales de dióxido de carbono. Esto ha dado lugar a una necesidad urgente para el desarrollo de materiales que pueden proporcionar alternativas técnicamente viables para el mortero de cemento convencional, con credenciales ambientales más favorables. La fabricación de mortero geopolimérico es una de las técnicas más prometedoras, que se ha desarrollado en los últimos años.

La utilización de materiales geopoliméricos puede reducir el 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de cemento Portland, y superar los problemas relacionados con la producción de este material y la eliminación descontrolada de materiales industriales mediante el reciclaje de estos en la fabricación de geopolímeros. Los geopolímeros son materiales inorgánicos de materias primas ricas en aluminosilicatos que reaccionan con activadores alcalinos para formar cadenas poliméricas tridimensionales de sialato y poli (sialato) (Si- O-Al-O). Investigaciones previas indican que las reacciones químicas y la resistencia mecánica desarrollada del mortero geopolimérico se ven afectados por varios parámetros tales como la composición del activador químico y su proporción, las materias primas y las condiciones de curado. Se observó que el tipo y la dosis de activador utilizado son particularmente importantes en la producción de mortero geopolimérico a base de escoria. Como conclusión la resistencia del mortero geopolimérico mejora cuando la dosificación y el módulo de silicato del activador se incrementan. (Al-Majidi, Lampropoulos, Cundya, & Meikle, 2016)

Un geopolímero fabricado a base de metacaolín con activador alcalino que contiene potasio, mostró el doble de la resistencia a la compresión de la misma mezcla con geopolímeros usando como solución activadora alcalina al sodio. (R.R. Lloyd, 2009) Lloyd también observó que, en base a observaciones micro estructurales, el uso de activadores basados en silicato resultó en una microestructura más homogénea en

comparación con las mezclas activadas con hidróxido de sodio (NaOH) y en una mejor resistencia a la compresión.

De acuerdo con Hai Yan Zhang y otros autores, los geopolímeros son una nueva clase de materiales aglomerantes inorgánicos ecoamigables, derivados de la activación de una fuente de aluminosilicato (como metacaolín, cenizas volantes y escorias) por medio de una solución alcalina endurecedora; estos materiales están atrayendo considerable atención en los últimos años como una alternativa práctica para el cemento Portland tradicional. Los geopolímeros exhiben características de durabilidad y propiedades mecánicas comparables con las del cemento Portland, pero tienen menores requerimientos de energía y a su vez menores emisiones de gases de efecto invernadero durante su producción. Por lo tanto, existe un interés cada vez mayor de investigación en el desarrollo de procesos viables para aplicación de geopolímeros y sus productos resultantes en la industria de la construcción. (Zhang, KodurM, Cao, & Wang, 2016)

El cemento Portland es un material aglomerante y de reparación de uso común. La factibilidad de materiales geopoliméricos, como sustituto prometedor para el cemento Portland, ha sido ampliamente discutido en la literatura. Temuujin (Temuujin, Riessen, & MacKenzie, 2010) reportó que el aglomerante geopolimérico exhibió una fuerte unión con el agregado fino (arena). Chi y Huang (Chi & Huang, 2013) investigaron la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, la contracción por secado y absorción de agua de las cenizas volantes activadas con una solución alcalina, sus resultados mostraron que, con excepción de la contracción por secado, el mortero de ceniza volante presentaba mejores propiedades mecánicas y de absorción que el mortero de cemento Portland. Pacheco-Torgal (F. Pacheco-Torgal, 2011) estudiaron el efecto de la concentración de hidróxido de sodio, el contenido de súper plastificante y el porcentaje de sustitución de metacaolín por hidróxido de calcio en la resistencia a la compresión y flexión del morteros basados en metacaolín y activados alcalinamente. Ueng y otros autores (Ueng, Lyu, Chu, Lee, & Wang, 2012) han llevado a cabo una serie de pruebas de laboratorio para determinar el módulo de deformación y los parámetros de fuerza de interfaz de adherencia entre el mortero de cemento y el cemento geopolimérico.

Davidovits en su libro, Geopolímero; química y aplicaciones, afirma que suele haber confusión cuando se habla de concreto y de cemento. El cemento es un aglomerante, mientras el concreto es el material resultante de la mezcla entre un cemento (aglomerante) y agregados de piedra. El cemento geopolimérico es un sistema aglomerante que se endurece a temperatura ambiente, si el cemento necesita de una temperatura mayor programada quizás no sea un cemento geopolimérico. Para crear un cemento geopolimérico se necesita de un material aluminosilicatado, un reactivo alcalino, el cual normalmente es sodio o potasio disuelto en silicatos, y agua.

Los geopolímeros poseen una amplia variedad de potenciales aplicaciones, las cuales incluyen materiales resistentes al fuego, piedras decorativas, aislamientos térmicos, materiales de construcción de baja tecnología, azulejos de cerámica de baja tecnología, biotecnologías, industria de fundición, cementos y concretos, compuestos de reparación estructural y reforzamiento, compuestos de alta tecnología para interiores de aviones y automóviles, sistemas de resina de alta tecnología, contenedores para material radioactivo y tóxico, etc. (Davidovits, 2015)

De la misma forma J. L. Provis y Jannie S. J. van Deventer en el libro Geopolímeros; estructura, procesamiento, propiedades y aplicaciones industriales, comentan que los geopolímeros son una clase compleja de materiales, cuya forma de sintetizarlos es combinar una solución alcalina con un polvo de aluminosilicato reactivo, en particular, metacaolín (arcilla de caolinita calcinada) o cenizas volantes (un subproducto de la combustión de carbón). Estos resultados en la formación de una fase de gel de aluminosilicato alcalino desordenada son conocidos como la fase geopolimérica aglomerante del gel. Incrustado dentro de esta fase hay partículas precursoras de sólidos que no han reaccionado, y la red de poros del gel contiene el agua que se utilizó en la mezcla de los precursores (normalmente suministrado a través de la “solución alcalina de activación”). El marco fundamental del gel es una altamente conectada red tridimensional de tetraedros de aluminato y silicato, con la carga negativa debido a  $Al^{3+}$  en cuatro veces la coordinación localizada en uno o más de los oxígenos de puente en cada tetraedro de aluminato y equilibrada por los cationes de metales alcalinos proporcionados por la solución de activación.

El área de aplicación de la tecnología de geopolímeros está actualmente en el desarrollo de materiales de construcción con emisiones reducidas de CO<sub>2</sub>, como una alternativa a los morteros basados en cemento Portland. Varias otras propiedades de los geopolímeros proporcionan ventajas tecnológicas sobre los materiales de construcción tradicionales, pero el rendimiento en sí mismo no será suficiente para impulsar un cambio revolucionario en la tecnología de materiales de construcción. Un nuevo material no puede ser forzado sobre un mercado indispuerto; el propio mercado debe exigir un nuevo material, y esto está comenzando a ser el caso para los geopolímeros en la construcción. Otras aplicaciones para los geopolímeros incluyen como una matriz de acogida en encapsulamiento de residuos, como una cerámica de bajo costo (ya sea directa o utilizada como precursora para la calcinación), y en la protección contra incendios de estructuras. (Provis & Deventer, 2009)

J. L. Provis concluye diciendo que los geopolímeros son una clase de materiales, cuyo potencial todavía no se ha desbloqueado totalmente. Es sólo a través de una comprensión detallada de la ciencia de los geopolímeros que su completo uso puede ser llevado a cabo a través de las propiedades de los geopolímeros en aplicaciones específicas. Sin embargo, tal ciencia podría rápidamente convertirse en irrelevante en ausencia de éxito comercial; un material que está bien caracterizado, pero no se utiliza en el mundo real es inútil.

Desde un punto de vista científico, debates respecto a la nomenclatura y la semántica de los geopolímeros son totalmente contraproducentes, siempre y cuando la nomenclatura existente sea adecuada para la tarea en cuestión. Lo que es más importante es que la comprensión de geopolímeros se dio hasta el punto donde las propiedades aglomerantes se pueden adaptar a priori por el diseño racional de mezcla, y la comprensión de la estructura aglomerante es suficiente para explicar por qué estas propiedades pueden durar por un período de tiempo suficiente para hacer al material apto para el propósito en un sentido ingenieril.

Hay una demanda creciente de nuevos materiales de construcción que tienen bajas emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a su fabricación. Por lo tanto, el mortero geopolimérico podría ser utilizado como un reemplazo para mortero de

cemento Portland, pero esto sólo ocurrirá cuando tanto una eficiente cadena de suministro de materias primas como una red de distribución para los productos estén desarrolladas. Iniciativas comerciales recientes en este sentido son alentadoras, pero tomará algún tiempo para hacer del mortero geopolimérico un escalable producto básico disponible globalmente. (Provis & Deventer, 2009)

## **2.- Hipótesis de la investigación**

Es posible fabricar morteros geopoliméricos ecoamigables a partir de residuos inorgánicos mineros con resistencia de compresión uniaxial mayores al 20% de su contraparte de cemento Portland, cumpliendo la norma técnica NTP 399.610 de los morteros de cemento Portland.

## Capítulo III

### Método de Investigación

#### 1.- Modelo conceptual

A continuación se presenta, paso a paso, el procedimiento seguido en la elaboración del mortero geopolimérico.

##### 1.1.- Preparación de la solución activadora alcalina

La concentración de la solución activadora alcalina se seleccionó en base a papers y trabajos de investigación similares, siendo el rango óptimo para esta entre 8 y 12 molar. (Yao, Zhang, Zhu, & Chen, 2009) Por lo tanto, en la presente investigación se utilizó una solución de Na(OH) con una concentración 9 molar. Luego de que la concentración fuera definida se procedió a la preparación propiamente dicha empezando por medir, en una vaso de precipitados y con ayuda de una balanza digital, una cantidad adecuada de pellets de Na(OH), ésta cantidad fue calculada utilizando la siguiente ecuación.

$$M = \frac{m}{(PM)(V)} \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

M = molaridad

m = masa de Na(OH) utilizada

PM = peso molecular del Na(OH)

V = volumen en litros del solvente

Con la ecuación 1 se determinó que para fabricar una probeta de mortero geopolimérico, de masa total igual a 20 gramos (únicamente residuo inorgánico minero y arena) y 10 ml de solución alcalina, la masa de hidróxido de sodio necesaria fue de 3.6 gramos. Luego de tener la cantidad necesaria de Na(OH), se mezcló con 10 mililitros de agua destilada correspondiente a la concentración requerida, para inmediatamente después mezclar

hasta disolver los pellets de Na(OH), una vez disuelto el Na(OH), se dejó la mezcla en reposo.

## 1.2.- Mezcla y homogeneización

Se determinó las variables independientes (fracciones volumétricas de residuo inorgánico minero y arena fina) y dependiente (resistencia a la compresión uniaxial), luego se procedió a elegir el diseño experimental más adecuado para nuestra investigación, en este caso el diseño Simplex Lattice, que es extensamente utilizado en investigación de mezclas. (Calderón, 2012)

El diseño Simplex Lattice esparce los experimentos de manera uniforme y espaciada sobre toda una región definida por medio de un arreglo ordenado. Debe contar con una correspondencia especial y única con una ecuación polinomial específica, por ejemplo, para soportar un modelo de grado “m” (el grado del modelo será la distancia entre las proporciones del diseño) en “q” componentes debemos contar con un Lattice (q, m). (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 2013)

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (\text{ecuación 2})$$

donde:

$x_i$  = distintos valores que puede tener el componente i dentro de la mezcla

m = grado del modelo experimental

Para el caso de la presente investigación se realizó un diseño con dos componentes (fracciones volumétricas de residuo inorgánico minero y arena fina), es decir q = 2; la distancia entre proporciones es 1/8 (m = 8). Utilizando la ecuación 3 se determinó la cantidad de proporciones.

$$n = \frac{(q + m - 1)!}{(m!(q - 1)!)} \quad (\text{ecuación 3})$$

$$n = \frac{(2 + 8 - 1)!}{(8!(2 - 1)!)}$$

$$n = 9$$



Finalmente el número de posibles combinaciones será 9 y la función quedaría de la siguiente forma:

$$L(q, m) = \left\{ (1, 0); \left(\frac{7}{8}, \frac{1}{8}\right); \left(\frac{3}{4}, \frac{1}{4}\right); \left(\frac{5}{8}, \frac{3}{8}\right); \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right); \left(\frac{3}{8}, \frac{5}{8}\right); \left(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\right); \left(\frac{1}{8}, \frac{8}{8}\right); (0, 1) \right\}$$

En nuestra investigación se utilizó el software Statgraphics Centurion XV para generar la matriz de mezclas a partir del diseño Simplex Lattice, se trabajó con límites superior e inferior de 75 y 25 %, respectivamente, para los dos componentes. Estos límites fueron determinados a partir de la composición volumétrica estándar de mortero convencional de cemento Portland (25 a 30 % vol. de cemento y 70 a 75 % vol. de arena), entonces para nuestra investigación se determinaron límites cercanos a esa composición, de manera que podamos evaluar la relación entre la fracción volumétrica de los componentes y la resistencia mecánica a la compresión uniaxial de los morteros geopoliméricos fabricados. Luego, incluyendo los límites composicionales antes mencionados la cantidad de mezclas se reduce a cinco, tal como se muestra a continuación:

$$L(q, m) = \left\{ \left(\frac{3}{4}, \frac{1}{4}\right); \left(\frac{5}{8}, \frac{3}{8}\right); \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right); \left(\frac{3}{8}, \frac{5}{8}\right); \left(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\right) \right\}$$

Finalmente, las cinco composiciones fueron codificadas en base a la fracción volumétrica de residuo inorgánico minero (R) dentro de la composición de los morteros geopoliméricos, por ejemplo, la muestra R25 corresponde a una muestra de mortero geopolimérico con 25 vol.% de residuo inorgánico minero. En la tabla 1 se muestra la codificación utilizada para cada mortero geopolimérico estudiado.

Tabla 01.  
*Matriz de mezclas*

Código	Volumen (%)	
	Relave	Arena
<b>R62.5</b>	62.5	37.5
<b>R50</b>	50.0	50.0
<b>R25</b>	25.0	75.0
<b>R75</b>	75.0	25.0
<b>R37.5</b>	37.5	62.5

## 2.- Descripción del objeto de estudio

En la presente investigación se estudiaron morteros geopoliméricos fabricados a partir de residuos inorgánicos mineros activados con una solución alcalina de hidróxido de sodio 9 molar y arena fina sin adición de cemento Portland. Los morteros estudiados tuvieron características y propiedades mecánicas similares a las del mortero elaborado con cemento Portland.

## 3.- Unidad de análisis

La unidad de análisis indica quiénes o qué es lo que será medido, es decir, los participantes o casos a quienes en el proceso de la investigación se les aplicará el instrumento de medición. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014) Entonces la unidad de análisis de la presente investigación serán las probetas de mortero geopolimérico en sus cinco proporciones determinadas a las cuales se les realizarán pruebas de resistencia a la compresión uniaxial.

## 4.- Descripción del tipo de investigación

Esta investigación fue de tipo cuantitativa ya que los resultados que se buscaron obtener fueron valores de resistencia a la compresión uniaxial, los cuales son explicados y comparados sobre curvas esfuerzo - deformación con datos de investigaciones

anteriores de naturaleza similar. Se realizó de manera secuencial, un paso a la vez, esto debido a la naturaleza de la investigación. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014)

## **5.- Método de investigación**

Esta investigación fue cuantitativa debido a que se obtuvieron valores de resistencia mecánica a la compresión uniaxial en unidades de esfuerzo (MPa). Estos datos fueron analizados en gráficas y cuadros comparativos, y luego se realizó un análisis estadístico con los mismos. Por las razones expuestas el método de investigación utilizado fue el experimental.

## **6.- Instrumentos de investigación**

Se utilizaron bases de datos como ScienceDirect y Scopus, de donde se pudo encontrar papers y trabajos de investigación relacionados al tema de investigación de la presente tesis. Así mismo se usaron técnicas especializadas de caracterización de materiales, como: Difracción de Rayos X y Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) (scanning electron microscopy), las que nos permitieron caracterizar los materiales estudiados en su aspecto estructural y microestructural, respectivamente. El software Stastisgraphics nos permitió elaborar el diseño de mezclas en base al diseño experimental Simplex Lattice previamente definido. El equipo necesario para la evaluación mecánica del morteros geopoliméricos fue una máquina de ensayos universales electromecánica EM1/50/FR, con un sistema termomecánico y de atmosfera controlada incorporados, y que trabaja con el software de control y adquisición de datos SCM3000. Para el análisis estadístico se utilizó el software Minitab.

## **7.- Recolección de datos**

En cuanto al tipo de información que se recolectó, esta fue de dos tipos de fuentes; una fuente secundaria al momento de recolectar información de investigaciones similares que nos ayudó al desarrollo de la presente investigación y una fuente primaria que fueron los datos generados por el mismo desarrollo de la investigación, la cual fue la

información que se obtuvo al medir las propiedades mecánicas de morteros geopoliméricos a través de ensayos de compresión uniaxial, es así como se obtuvieron los datos de la resistencia a la compresión que presentó el material.

El primer paso fue caracterizar la materia prima utilizada en las mezclas, en este caso el residuo inorgánico minero y la arena fina, que constituyeron los materiales base para la fabricación de los morteros geopoliméricos, luego se procedió a la fabricación de los morteros geopoliméricos y finalmente a su caracterización termomecánica, debemos señalar que adicionalmente los morteros geopoliméricos fueron caracterizados microestructuralmente antes y después de las pruebas de compresión uniaxial.

La caracterización de materiales es una disciplina de la Ciencia de los Materiales que permite estudiar, clasificar y analizar sus propiedades físicas, mecánicas, ópticas, químicas, etc. Es decir, la caracterización de materiales sirve para obtener distintos parámetros que sirven para distintas aplicaciones, en este caso la caracterización tiene como finalidad entender el posterior comportamiento del mortero geopolimérico al momento de realizar las pruebas de compresión, ya que al conocer más sobre la materia prima utilizada se pueden sacar conclusiones sobre el material fabricado. En la presente investigación se realizaron los siguientes ensayos para caracterizar estructural y microestructuralmente a la materia prima y al producto final:

- Granulometría por difracción láser
- Picnometría de helio
- Difracción de rayos X
- Microscopía óptica
- Microscopía electrónica de barrido

## **7.1.- Caracterización estructural y microestructural de la materia prima**

### **7.1.1.- Adecuación de materia prima**

El residuo inorgánico minero y la arena son los materiales necesarios para la elaboración del mortero geopolimérico, éstos en primera instancia fueron triturados y luego tamizados en una malla de tamaño de paso de partícula de 106 micras. Esto se llevó a

cabo para tener controlada la granulometría de la materia prima, y así se pueden crear las mejores condiciones para la reacción de geopolimerización.

### 7.1.2.- Granulometría por difracción láser

Este ensayo nos permite conocer la distribución de tamaños de las partículas y el tamaño medio de partícula de un material pulverulento. Este ensayo se llevó a cabo sobre muestras en polvo de residuo inorgánico minero y arena fina. Para el funcionamiento de este ensayo se proyecta un rayo láser hacia las muestras, este rayo se difracta debido a la presencia de las partículas de la muestra, en ángulos diferentes los cuales nos dan la información sobre el tamaño de partícula de los polvos, cada ángulo se traduce en un tamaño, mientras el ángulo sea mayor, la partícula será más pequeña y viceversa.

A continuación se presentan los resultados de este ensayo realizado a los precursores del mortero.

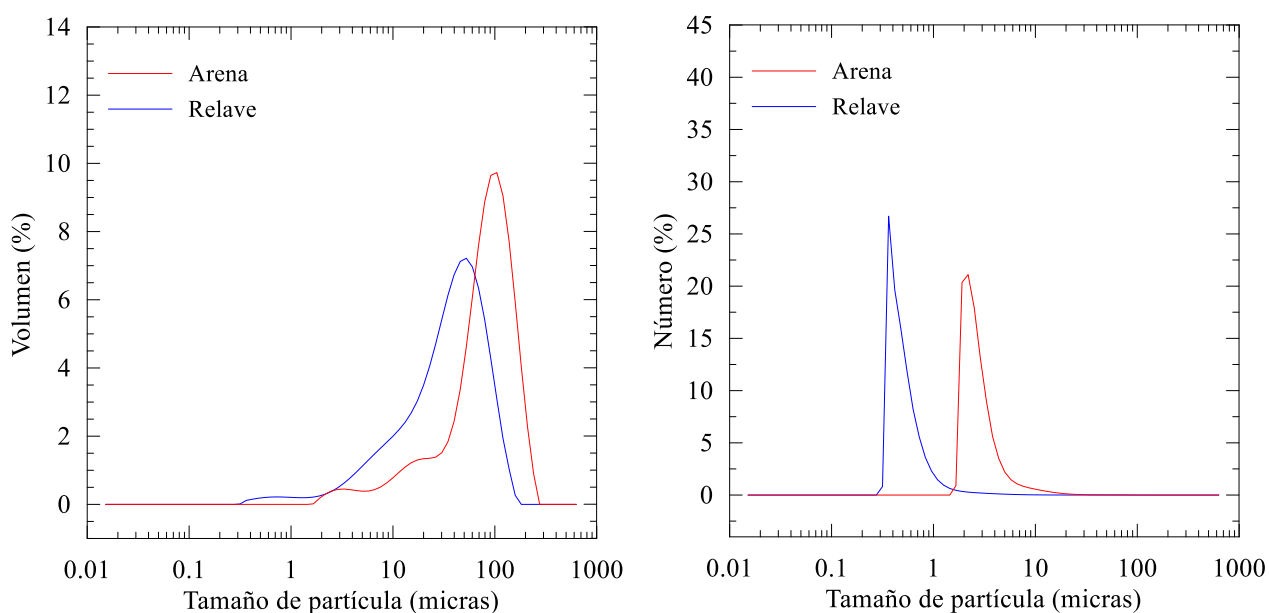


Figura 01. (A) Distribución en volumen del tamaño de partícula de las materias primas. (B) Distribución en número del tamaño de partícula de las materias primas.

En la figura 01 (A y B) se observa la distribución de tamaños, en volumen y número, que poseen las partículas, tanto de arena como del residuo inorgánico minero. Como se mencionó anteriormente ambos tipos de materia prima fueron trituradas y tamizadas en

una malla con tamaño de paso de 106 micras, por esta razón, ambos materiales poseen tamaños de partículas inferiores a 106 micras, en el caso de la muestra de arena se observa que el tamaño de algunas partículas son aparentemente mayores a 106 micras, esto se debe a que durante la ejecución del ensayo, algunas partículas de arena se cohesionan unas contra otras y forman un aglomerado de mayor tamaño, que el equipo detecta como una única partícula. En la figura 01.B se muestra la distribución de tamaños en función del número de partículas, observando que el número de aglomerados con tamaño mayor a 106 micras es despreciable. Las distribuciones mostradas en la figura 1 (A y B) son unimodales (presentan un único pico) con un máximo correspondiente al tamaño medio de partícula en cada muestra. El tamaño medio de partícula se determinó de la figura 1B, (donde los aglomerados son despreciables), siendo 0.5 y 3 micras aproximadamente para el residuo inorgánico minero y arena fina, respectivamente.

### 7.1.3.- Difracción de Rayos X

Esta técnica permite identificar las distintas fases cristalinas presentes en muestras en polvo o sólidas.

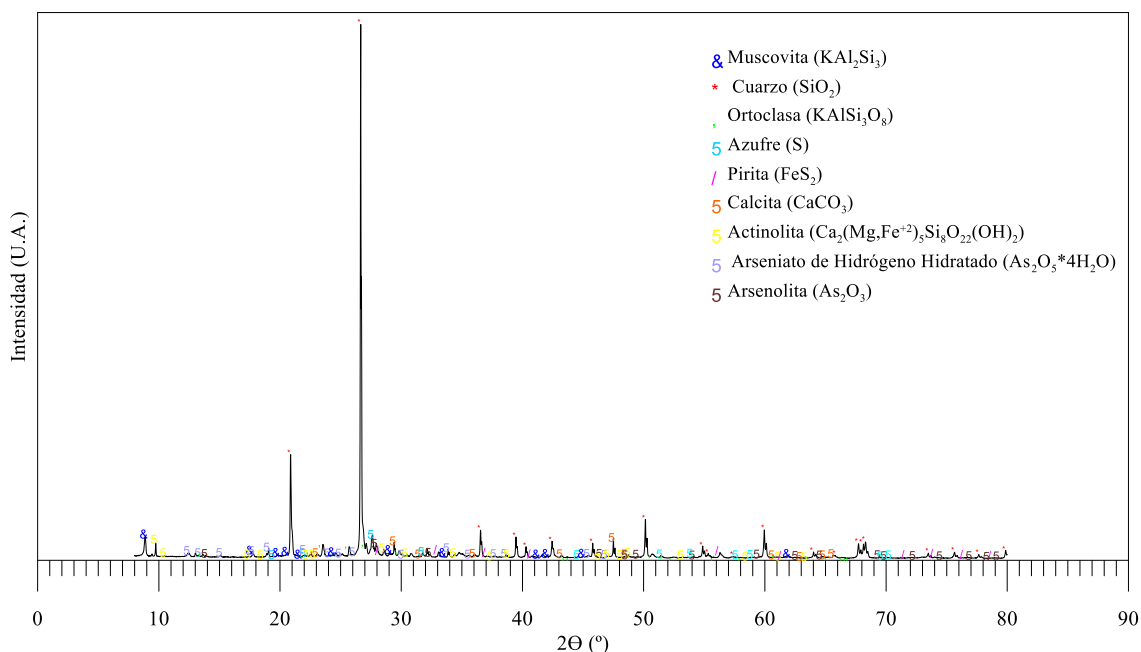


Figura 02. Difractograma de residuo inorgánico minero

En la figura 2 se muestra el difractograma del residuo inorgánico minero, en él se han identificado hasta nueve fases cristalinas (indicadas en la misma figura), destacando la presencia de compuestos de arsénico muy comunes en los residuos mineros y suelos agrícolas (Barrachina, Carbonell, & Beneyto, 1995)

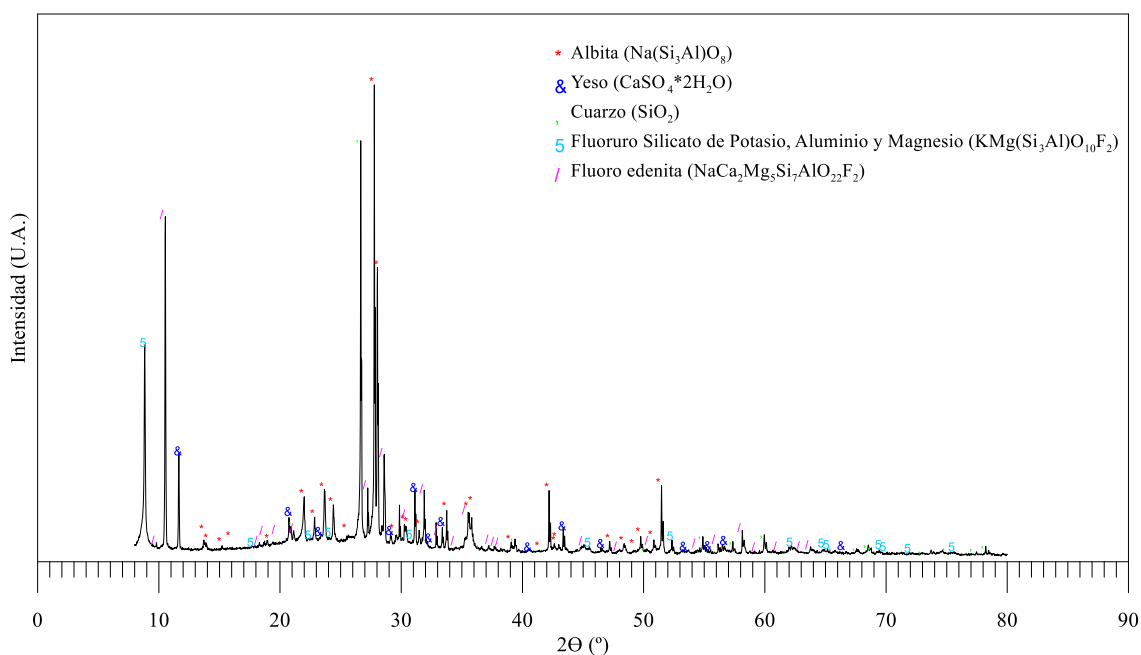


Figura 03. Difractograma de arena

La figura 3 presenta el difractograma correspondiente a la muestra de arena fina, en este se han identificado hasta cinco fases cristalinas (indicadas en la misma figura). Se puede destacar la presencia de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), típico de suelos arenosos.

#### 7.1.4.- Microscopía electrónica de barrido (SEM)

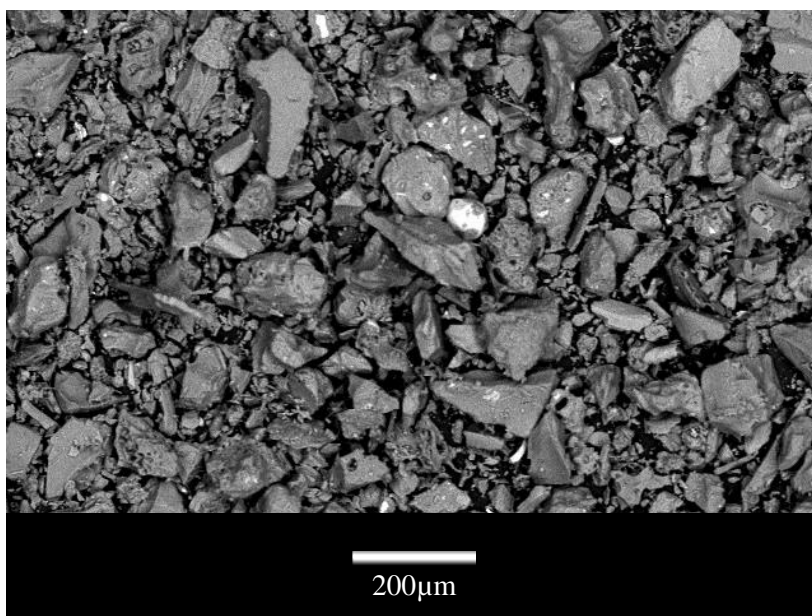


Figura 04. Micrografía de arena obtenida por microscopía electrónica de barrido

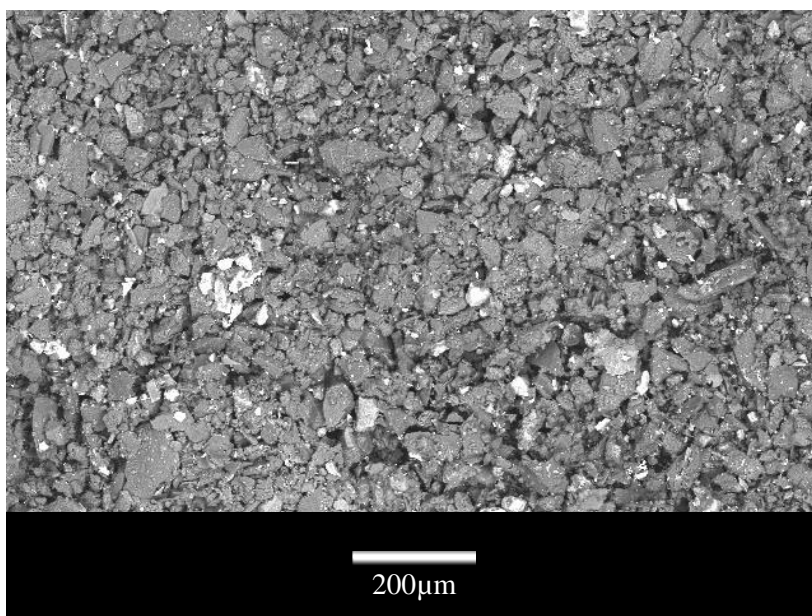


Figura 05. Micrografía de residuo inorgánico minero obtenida por microscopía electrónica de barrido

En las figuras 04 y 05 se presentan micrografías que evidencian las diferencias en tamaños de partícula de muestras de arena fina y residuo inorgánico minero, estos



resultados están en buen acuerdo con lo observado en los ensayos de granulometría por difracción láser. Otra observación importante es la forma que presentan las partículas, siendo angulares en el caso de la muestra de arena fina (figura 4) y redondeadas en la muestra de residuo inorgánico minero (figura 5).

## 7.2.- Fabricación del mortero geopolimérico

Para la fabricación de los morteros geopoliméricos fue necesario convertir la matriz volumétrica de la tabla 1 en una matriz másica, para esto se tomó en cuenta la densidad real de cada componente, las que a su vez fueron determinadas por picnometría de helio. En la tabla 2 se muestra la matriz másica obtenida a partir de las densidades de arena fina ( $3.07 \text{ g/cm}^3$ ) y residuo inorgánico minero ( $2.83 \text{ g/cm}^3$ ).

Tabla 02.

*Matriz másica de las mezclas*

Código	Masa (%)		Masa (g)	
	Relave	Arena	Relave	Arena
<b>R62.5</b>	60.6	39.4	12.12	7.87
<b>R50.0</b>	48.0	52.0	9.60	10.39
<b>R25.0</b>	23.5	76.5	4.70	15.29
<b>R75.0</b>	73.5	26.5	14.69	5.30
<b>R37.5</b>	35.7	64.3	7.13	12.86

Para la fabricación del mortero se comenzó midiendo cantidades adecuadas, según la tabla 02, de residuo inorgánico minero y arena fina, se mezclaron los componentes de cada una de las mezclas hasta conseguir un polvo homogéneo, este proceso duró aproximadamente 5 minutos, luego se agregó la solución activadora alcalina previamente preparada, se mezcló y homogeneizó durante aproximadamente 15 minutos hasta que se formó una pasta trabajable, seguidamente se dejó reposar las mezclas en bolsas herméticas durante 5 minutos, finalmente se realizó el conformado de probetas en un molde cilíndrico de acero de 20 mm de diámetro interno y a una presión de 60 MPa, las probetas cilíndricas fabricadas se dejaron en bolsas herméticas

a temperatura ambiente durante 01 semana y luego se sometieron a 60°C en un horno durante 24 horas.

Debemos señalar que el proceso de geopolimerización se inicia al añadir la solución alcalina a la mezcla de polvos, solubilizando los compuestos de sílice y alúmina amorfos presentes en el residuo inorgánico minero, la reacción es lenta y su velocidad depende tanto de la concentración molar de la solución activadora como del tamaño de partícula promedio de los componentes. (Yao, Zhang, Zhu, & Chen, 2009)

### 7.3.- Diagrama de bloques y balance de materia para la fabricación de mortero geopolimérico

Para el presente diagrama se utilizó la mezcla R37.5 debido a que es la que presenta los mejores resultados en la caracterización que se realiza en los siguientes puntos.

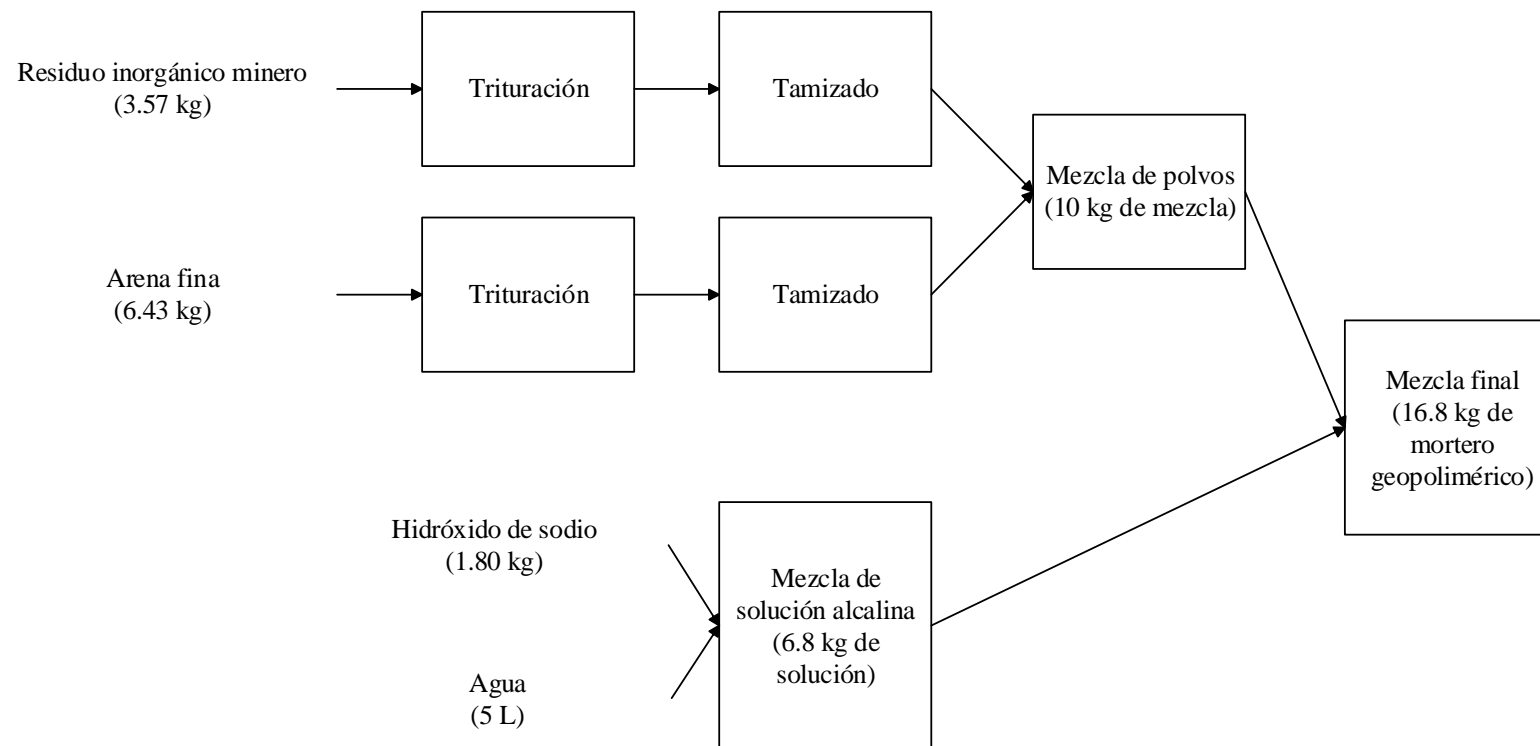


Figura 06. Diagrama de bloques y balance de materia del proceso de producción de mortero geopolimérico

### 7.3.1.- Caracterización estructural y microestructural del mortero geopolimérico

#### 7.3.1.1.- Microscopía Óptica

Se utilizó un microscopio óptico en donde se analizaron los cinco tipos de mortero geopolimérico estudiados. Esta técnica se utilizó para estudiar la forma y distribución de las distintas fases presentes en los morteros. En las figuras 7 a 11 se muestran micrografías por microscopía óptica de las cinco proporciones de mortero geopolimérico.

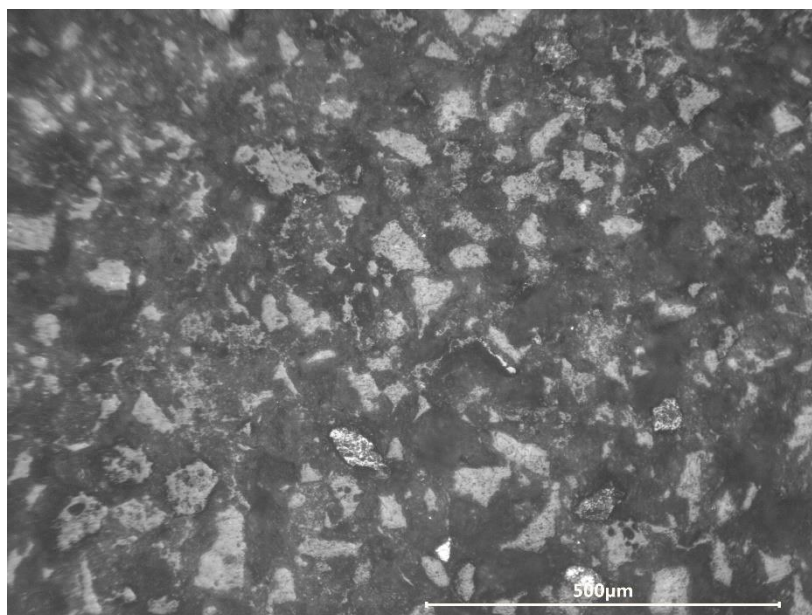


Figura 07. Micrografía por microscopía óptica del mortero geopolimérico R25

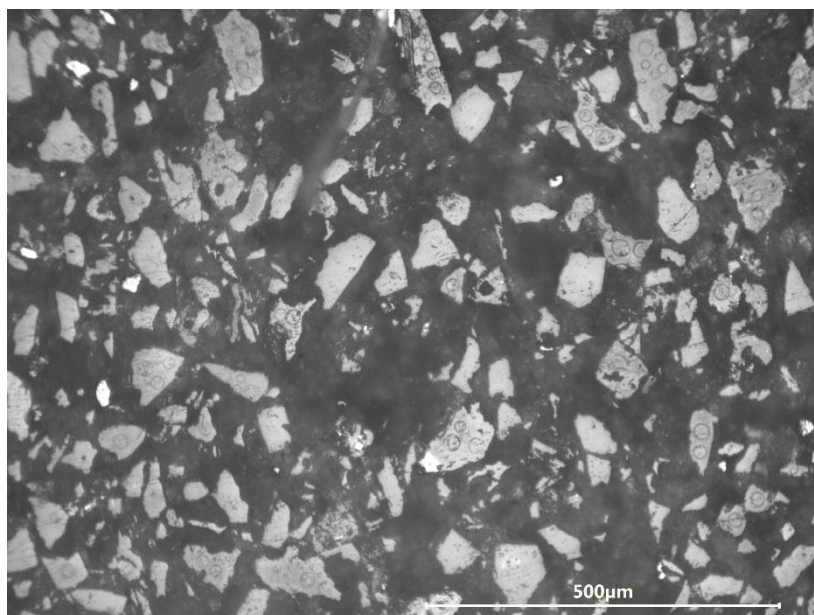


Figura 08. Micrografía por microscopía óptica del mortero geopolimérico R37.5

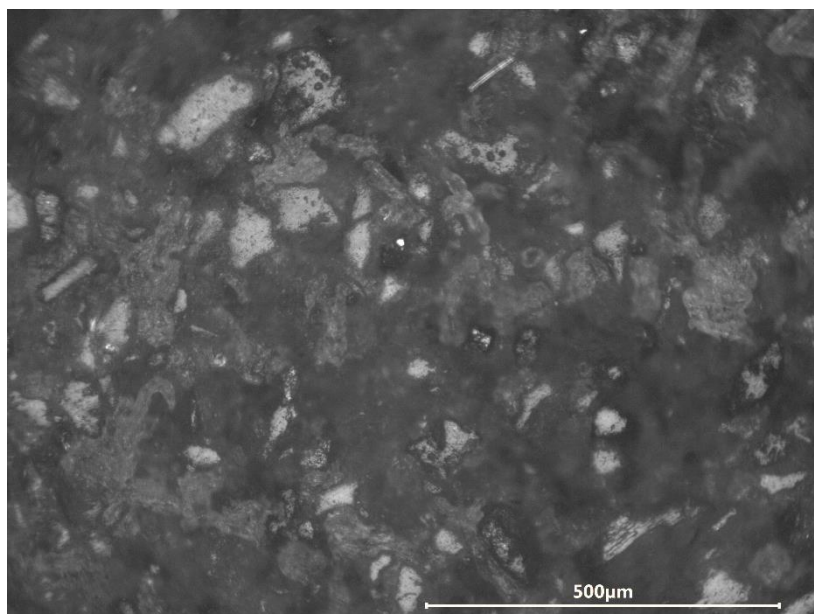


Figura 09. Micrografía por microscopía óptica del mortero geopolimérico R50

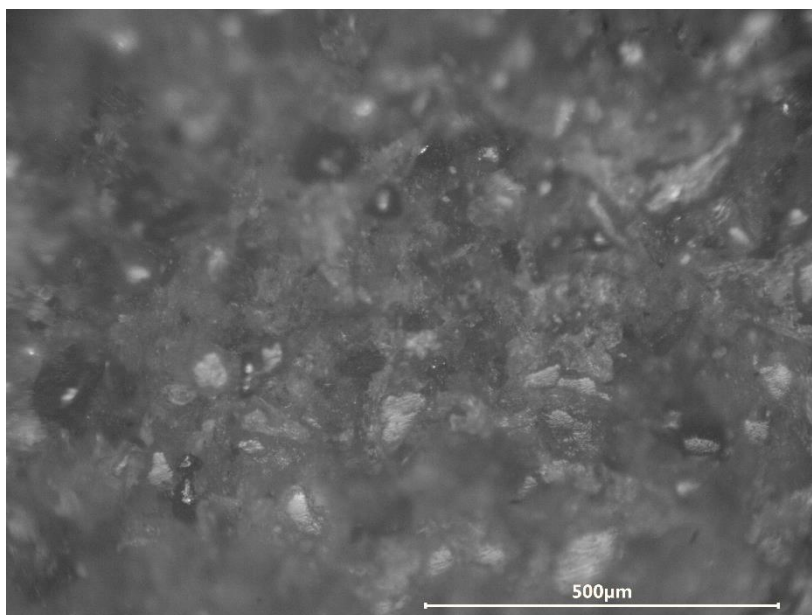


Figura 10. Micrografía por microscopía óptica del mortero geopolimérico R37.5

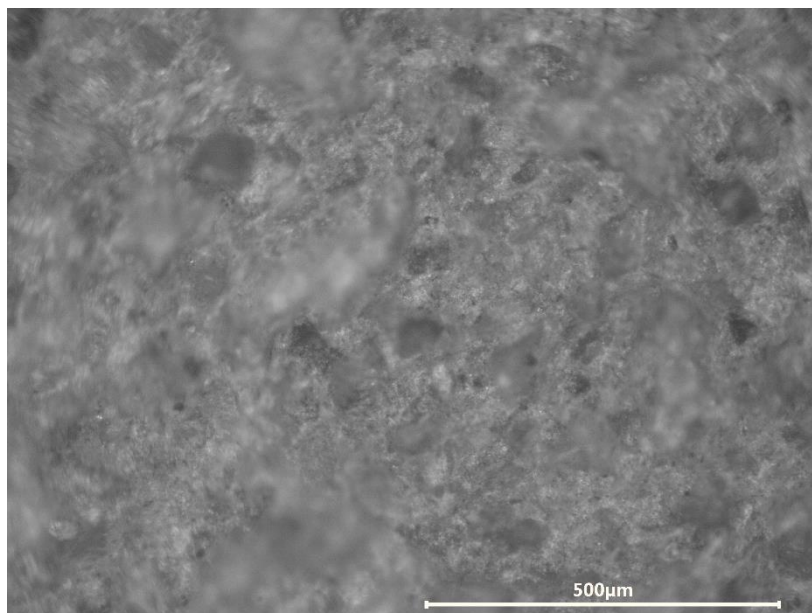


Figura 11. Micrografía por microscopía óptica del mortero geopolimérico R75

Las observaciones microestructurales mostradas en las figuras 7 a 11 se realizaron sobre superficies pulidas metalográficamente de cada uno de los tipos de morteros estudiados. En general se puede observar que los morteros geopoliméricos están constituidos de dos fases bien diferenciadas, una de granos de arena fina (en contraste claro) dispersos dentro de una fase gris continua que corresponde a la fase de geopolímero (formado a partir del residuos inorgánico minero), la presencia de granos dispersos de arena fina en contraste claro está en buen acuerdo con las composiciones de la tabla 1.

#### 7.3.1.2.- Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Esta técnica nos permite estudiar, con mayor detalle, la morfología y distribución de las fases presentes en los materiales, además de su porosidad. En estas pruebas se utilizaron las mismas muestras pulidas que las usadas en las observaciones por microscopía óptica, En las figuras 12 y 13 se presentan micrografías por SEM de superficies pulidas de morteros R25 y R75, respectivamente.

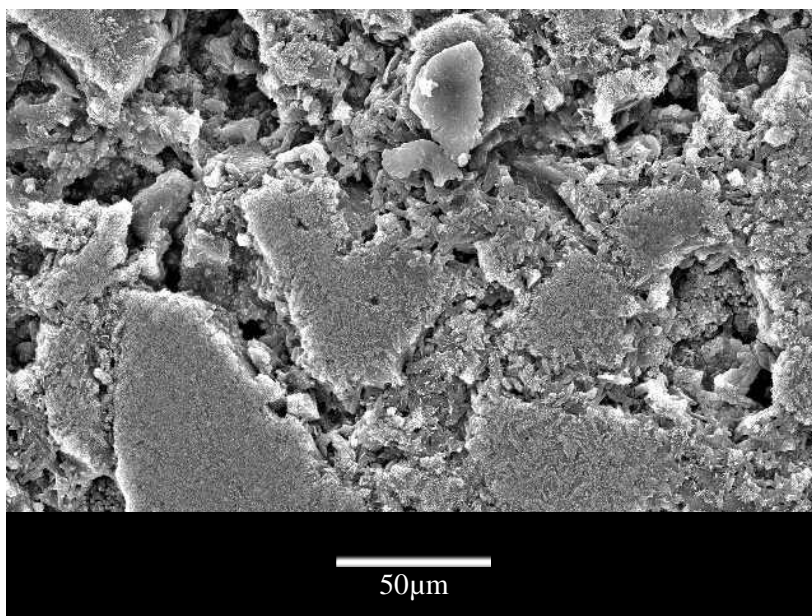


Figura 12. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25

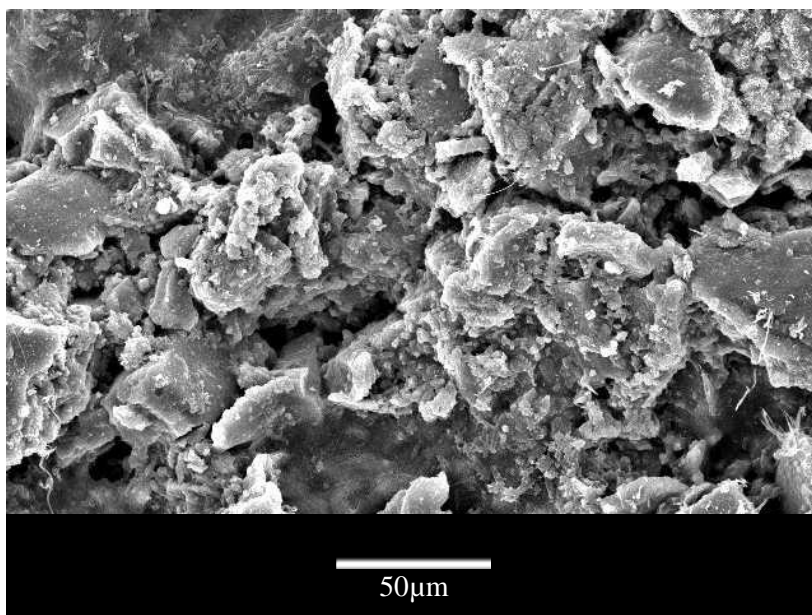


Figura 13. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75

Las micrografías de las figuras 12 y 13 muestran morteros con composiciones extremas en composición. El mortero R25 de la figura 12 muestra una superficie con mayor porosidad que la observada en el mortero R75 de la figura 13, esto se debe principalmente a la existencia de menor fase aligante (fase geopolimérica) en el mortero R25 respecto del mortero R75, la fase aligante es continua y homogénea, está formada por pequeñas partículas de residuo inorgánico minero que pueden lograr rellenar aquellos espacios vacíos entre partículas de mayor tamaño de arena fina, este resultado está en buen acuerdo con las medidas de densidad real por picnometría de helio mostradas a continuación.

#### **7.3.1.3.- Picnometría de helio**

Mediante este ensayo se encontró la densidad real de las dos mezclas extremas R25 y R75. Se utilizó el equipo Ultramic 1200R de la Universidad de Sevilla (España) el cual usa corriente de helio con una presión típica de 20 bar/pulgada. En las tablas 3 y 4 se presentan los resultados de estas pruebas, se puede destacar que los mismos están en buen acuerdo con lo observado en las micrografías de las figuras 12 y 13, presentando



mayor densidad en los morteros con mayor fracción volumétrica de fase geopolimérica o aligante.

Tabla 03.

*Densidad real del mortero R25*

	<b>Volumen cc</b>	<b>Densidad g/cc</b>
<b>1</b>	0.1464	2.5691
<b>2</b>	0.1459	2.5769
<b>3</b>	0.1475	2.5487
<b>4</b>	0.1482	2.5378
<b>5</b>	0.1477	2.5457
<b>6</b>	0.1480	2.5411
<b>7</b>	0.1477	2.54.51
<b>8</b>	0.1481	2.5288
<b>Promedio</b>	0.1464	2.5503
<b>Desviación Estándar</b>		0.0008
<b>Temperatura</b>		20.5°C

Tabla 04.

*Densidad real del mortero R75*

	<b>Volumen cc</b>	<b>Densidad g/cc</b>
<b>1</b>	0.1033	3.1083
<b>2</b>	0.1027	3.1242
<b>3</b>	0.1028	3.1230
<b>4</b>	0.1030	3.1161
<b>5</b>	0.1028	3.1221
<b>6</b>	0.1025	3.1327
<b>7</b>	0.1028	3.1223
<b>8</b>	0.1024	3.1356
<b>Promedio</b>	0.1028	3.1230
<b>Desviación Estándar</b>		0.0003
<b>Temperatura</b>		20.6°C

#### 7.4.- Fabricación de mortero convencional

Para la fabricación de mortero convencional se utilizó la misma metodología de fabricación que la usada en la fabricación de los morteros geopoliméricos, empezando por la determinación de la matriz de mezclas volumétrica, la cual fue la misma que la de los morteros geopoliméricos, ya que también son dos los componentes de las mezclas, pero en este caso cemento Portland y la arena fina.

Tabla 05.

*Matriz volumétrica de mezclas para mortero convencional*

Código	Volumen (%)	
	Cemento	Arena
<b>C62.5</b>	62.5	37.5
<b>C50</b>	50.0	50.0
<b>C25</b>	25.0	75.0
<b>C75</b>	75.0	25.0
<b>C37.5</b>	37.5	62.5

En la tabla 05 se observa que las proporciones volumétricas del mortero convencional son las mismas que las del mortero geopolimérico (tabla 01), cambiando únicamente el porcentaje correspondiente al componente aligante, residuo inorgánico minero en el caso de morteros geopoliméricos y cemento Portland en el caso de morteros convencionales. En la fabricación de mortero convencional no se necesitó de un activador alcalino ya que el cemento Portland solo necesita de una cantidad adecuada de agua potable para convertirse en una pasta plástica y luego fraguar, por esta razón solamente se le añadió la cantidad de agua necesaria (se elaboraron mezclas de cemento y arena fina de 10 gramos y la cantidad de agua necesaria fue 7 mililitros). Luego de mezclar los componentes con el agua se dejó la mezcla en pequeños vasos de tecnopor para que fragüe. La fabricación del mortero convencional se realizó exactamente igual a la que se conoce normalmente con la diferencia de que fue a pequeña escala.

#### **7.4.1.- Caracterización estructural del mortero convencional**

##### **7.4.1.1.- Microscopía óptica de mezclas pulidas de mortero convencional**

En las figuras 14 a 18 se muestran micrografías por microscopía óptica de los cinco tipos de mortero convencional.

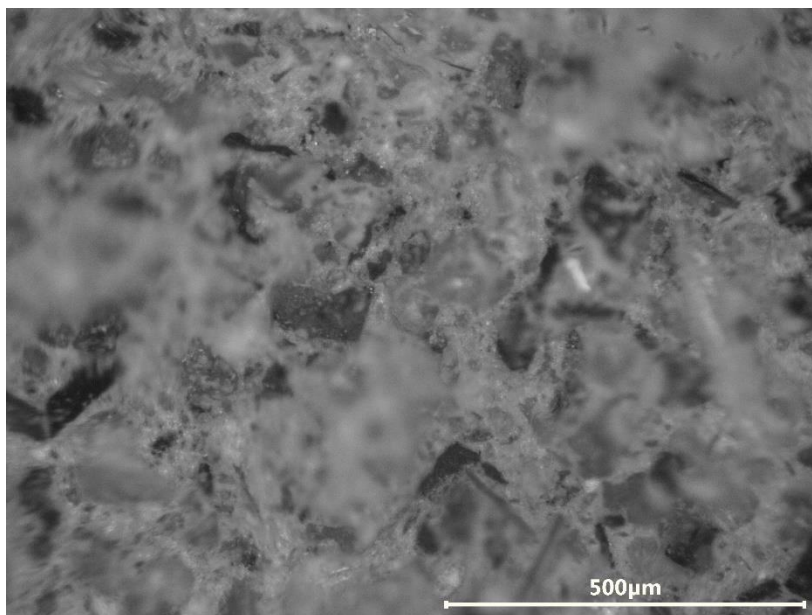


Figura 14. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C25

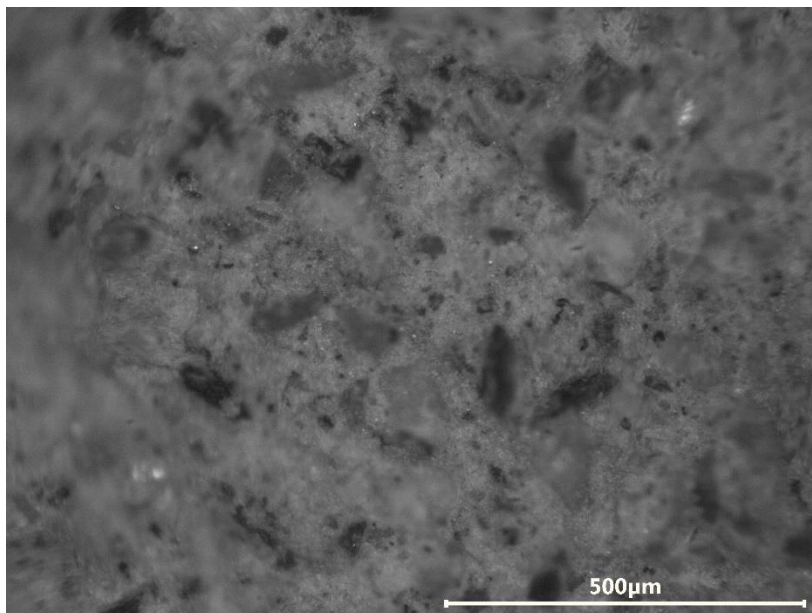


Figura 15. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C37.5

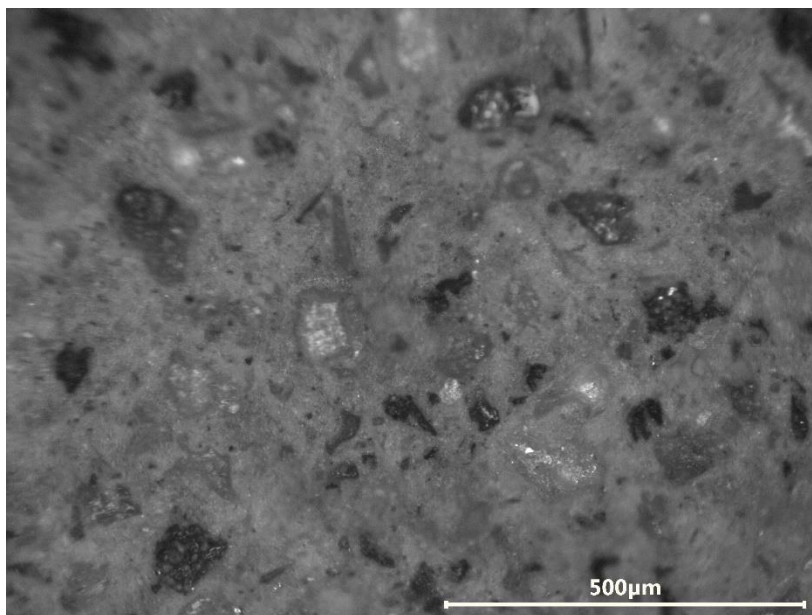


Figura 16. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C50

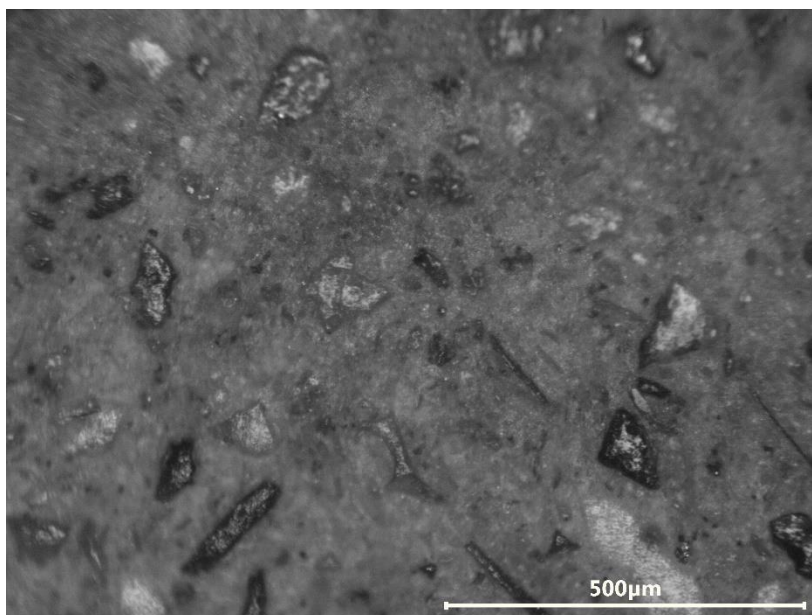


Figura 17. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C62.5

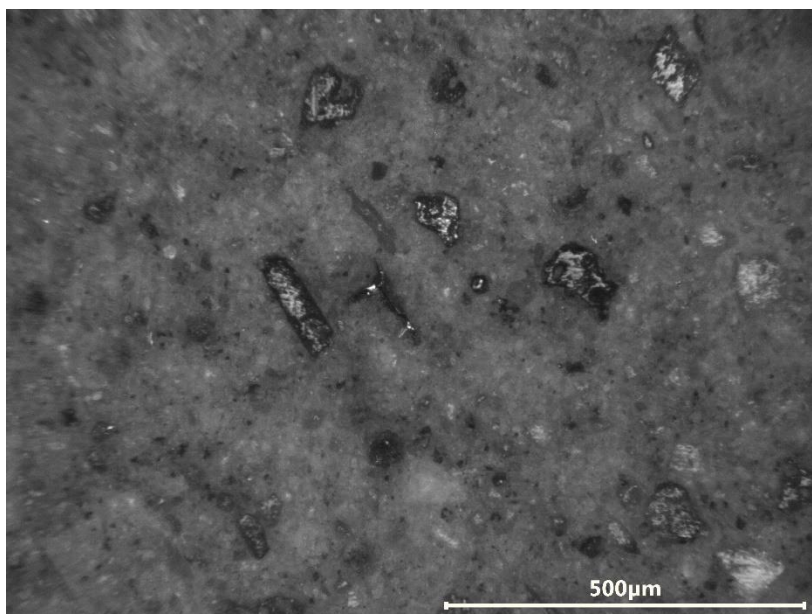


Figura 18. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C75

De la figura 14 a la 18 se observan micrografías de los morteros convencionales fabricados. En general, se han podido identificar a las partículas de arena fina por su contraste oscuro, además por estar distribuidas dentro de otra fase continua gris correspondiente al cemento Portland. Las micrografías de los morteros convencionales,

tal como se observó en las de los morteros geopoliméricos, muestran una total coherencia con la tabla composicional inicial (tabla 5).

### **7.5.- Resultados mecánicos**

Las probetas cilíndricas obtenidas en la etapa anterior y luego de aproximadamente 7 días de iniciada la reacción de geopolimerización fueron cortadas en paralelepípedos de 5x5x10 mm en una cortadora de precisión con disco de borde adiamantado. Todas las probetas fueron sometidas a ensayos de compresión uniaxial a temperatura ambiente (15 – 22°C) e intermedias (400, 500 y 600°C) a una velocidad de ensayo de 5 mm/min. Los datos obtenidos de estos ensayos se graficaron en curvas esfuerzo vs deformación para su análisis y comparación.

Al subir la temperatura de ensayo se espera que los morteros geopoliméricos incrementen su resistencia mecánica, tal como se encontró en algunos trabajos de investigación similares (Martin, Pastor, Palomo, & Jiménez, 2015). Debemos señalar que el proceso de geopolimerización a temperatura ambiente no se completa en un breve periodo de tiempo, es por eso que se espera que al elevar la temperatura el proceso de geopolimerización se acelere y de ese modo se logre incrementar la resistencia mecánica en los morteros geopoliméricas. Este incremento progresivo en la resistencia continuará hasta que el proceso de geopolimerización se haya completado. (Yao, Zhang, Zhu, & Chen, 2009)

#### **7.5.1.- Resultados mecánicos del mortero geopolimérico**

Los ensayos mecánicos se realizaron en compresión uniaxial a temperaturas de ensayo de ambiente (15°C – 22°C), 400, 500 y 600°C y velocidad de compresión de 0.05 mm/min.

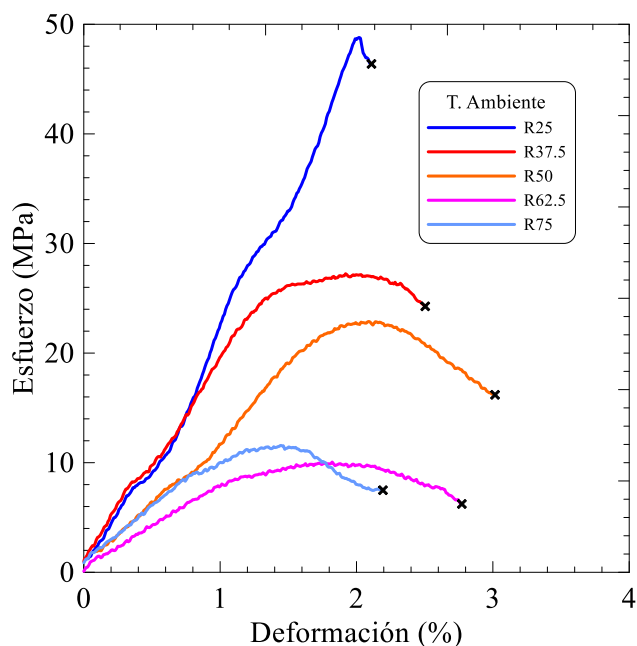


Figura 19. Curva esfuerzo - deformación a temperatura ambiente ( $15^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ ) de las cinco mezclas de mortero geopolimérico

En la figura 19 se muestran curvas esfuerzo – deformación a temperatura ambiente para los cinco tipos de morteros geopoliméricos estudiados. El mortero geopolimérico R25 mostró la mejor respuesta mecánica y el mortero R62.5 la peor, con valores de esfuerzo máximo de aproximadamente 49 y 10 MPa, respectivamente. De lo anterior se puede concluir, preliminarmente, que a temperatura ambiente existe una relación directa entre el contenido de arena fina en los morteros geopoliméricos y su resistencia máxima a la compresión uniaxial; además, que la fase que controla los mecanismos de respuesta mecánica a temperatura ambiente (la fase de menor resistencia) es la geopolimérica, que a medida que aumenta en contenido dentro de los morteros geopoliméricos la resistencia máxima de estos disminuye.

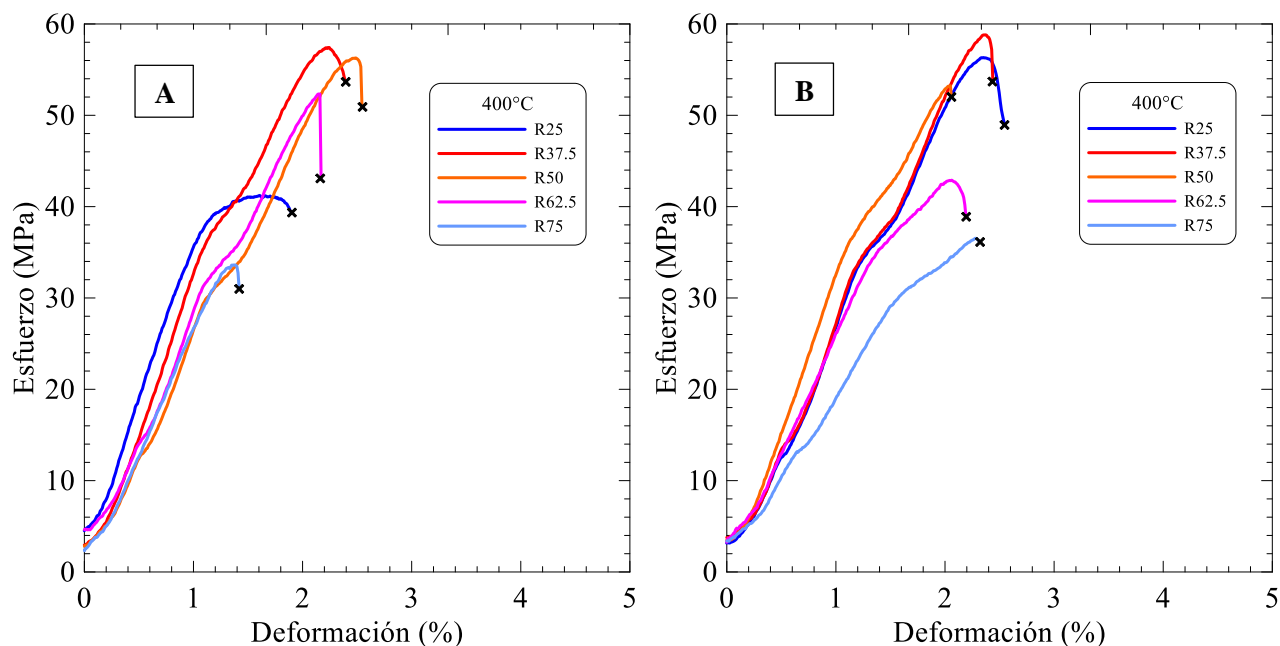


Figura 20. Curvas esfuerzo - deformación a 400°C para las cinco mezclas de mortero geopolimérico (A) lote 1 y (B) lote 2

En la figura 20 (A y B) observamos curvas esfuerzo - deformación a 400 °C para los cinco tipos de morteros geopoliméricos estudiados. El mortero geopolimérico que presentó la resistencia más alta, en A y B, fue R37.5 (60 MPa aproximadamente); así mismo, el mortero que mostró la menor resistencia, en A y B, fue R75 (35 MPa aproximadamente). Los morteros geopoliméricos ensayados a 400°C presentaron sistemáticamente mejor resistencia mecánica que sus correspondientes ensayados a temperatura ambiente, este resultado sugiere que el aumento de temperatura acelera el proceso de geopolymerización, logrando que la fase aligante geopolimérica tenga mayor resistencia y añada un componente resistivo mecánico al mortero geopolimérico, que junto a la resistencia vinculada a la fase de arena fina hacen que el mortero geopolimérico incremente su resistencia máxima final.



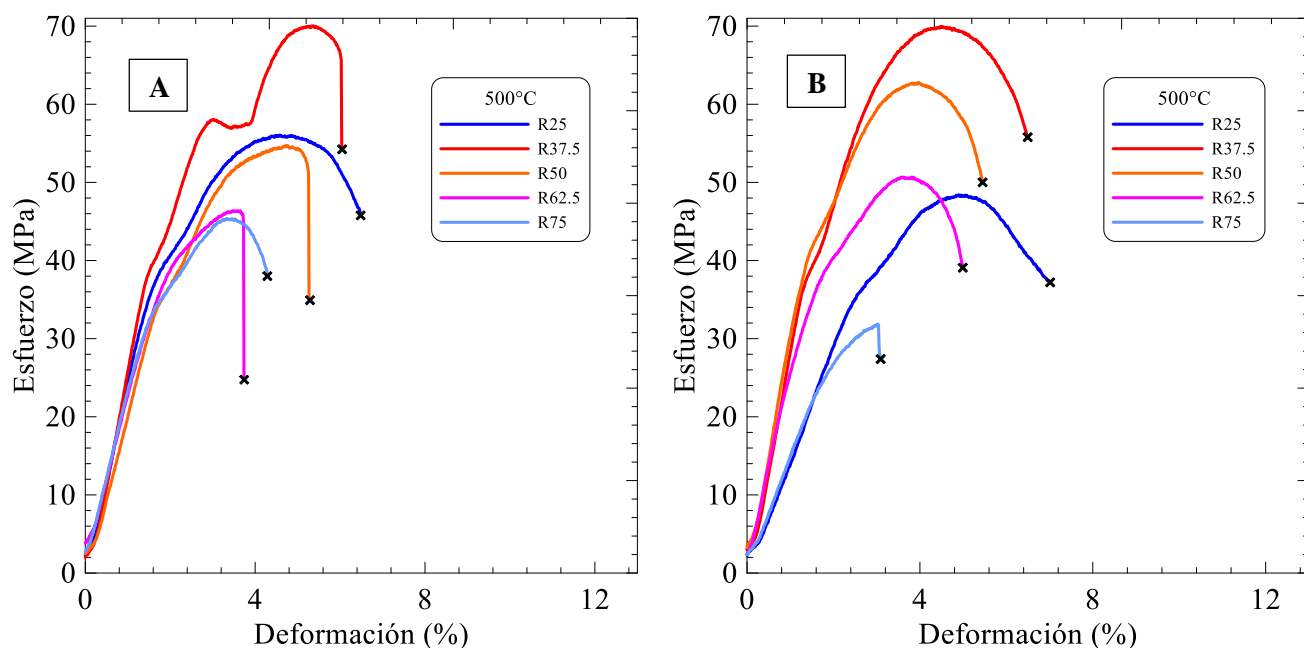


Figura 21. Curvas esfuerzo - deformación a 500°C para las cinco mezclas de mortero geopolimérico (A) lote 1 y (B) lote 2

La figura 21 (A y B) muestra curvas esfuerzo – deformación a 500°C para todos los morteros geopoliméricos estudiados. Todos los morteros geopoliméricos presentaron un incremento sistemático de su resistencia mecánica respecto a la mostrada en los ensayos a 400°C, con valores 74 y 45 MPa aproximadamente para morteros R37.5 y R75, respectivamente, este resultado podría ser explicado con el mismo argumento que el dado para los ensayos a 400°C, en el que comentamos que el incremento de la resistencia mecánica se debe a la adición de un componente resistivo mecánico asociado a la aceleración del proceso de geopolimerización en la fase aligante geopolimérica dentro del mortero, que permite incrementar la resistencia global del mismo.

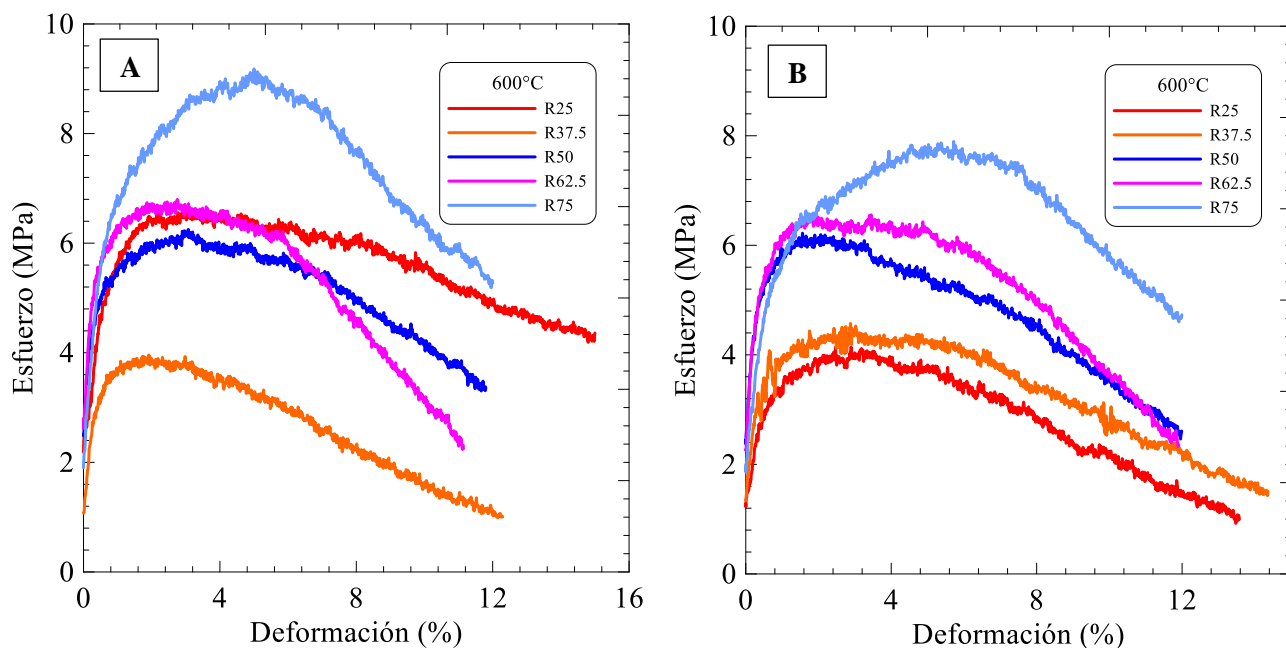


Figura 22. Curvas esfuerzo - deformación a 600°C para las cinco mezclas de mortero geopolimérico (A) lote 1 y (B) lote 2.

En la figura 22 (A y B) se muestran curvas esfuerzo vs. deformación a temperatura de ensayo de 600°C, se observa que la resistencia mecánica de todos los morteros disminuye respecto a sus contrapartes ensayados a 500°C (figura 21). Este resultado se puede atribuir a la pérdida de la resistencia mecánica, por efecto de la temperatura, de la interface aglomerante-arena fina, que conduce a que las dos fases del mortero geopolimérico se desconecten; en términos sencillos los morteros geopoliméricos podrían simular ser monofásicos (una sola fase) de fase aglomerante y las partículas de arena fina podrían ser espacios vacíos, en este escenario a mayor porcentaje de fase aglomerante en el mortero geopolimérico mayor será la resistencia máxima a la compresión, tal como se observa en la figura 22.

A continuación se muestran gráficos esfuerzo vs. deformación ordenados por cada tipo de mezcla y en función de la temperatura de ensayo (figuras 23 a 27).

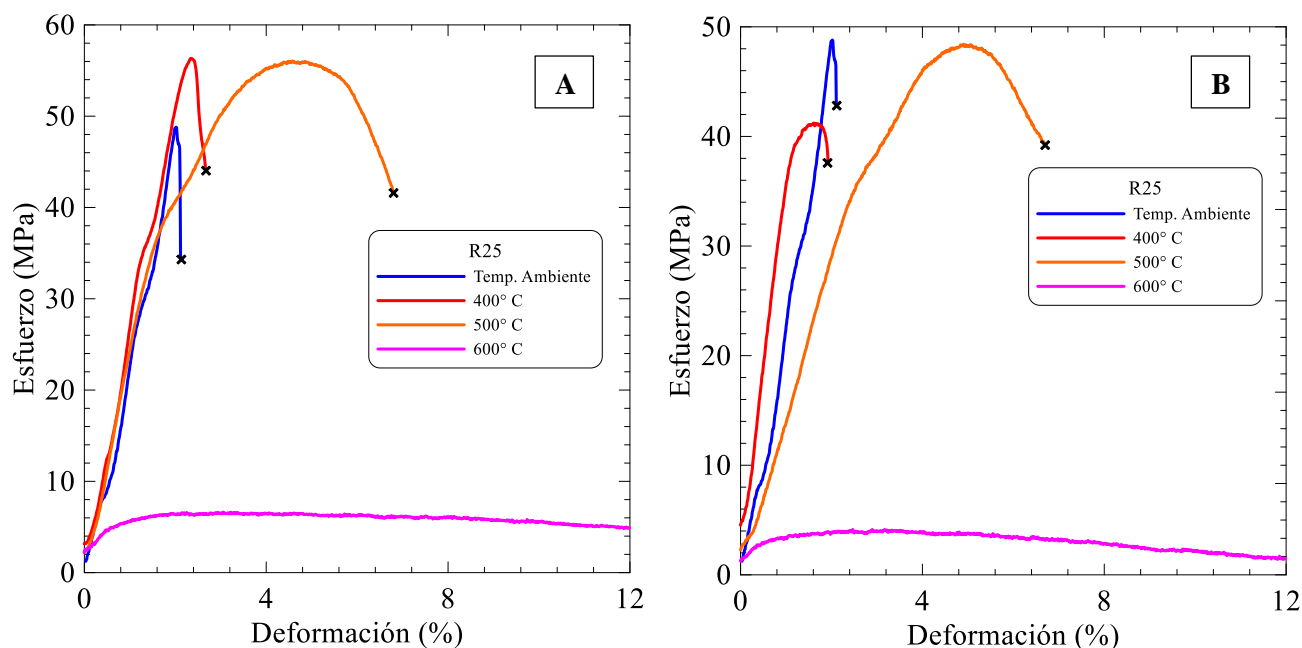


Figura 23. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R25 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2

En las figuras 23 (A y B) se pueden apreciar curvas esfuerzo vs. deformación para el mortero con 25 vol.% de residuo inorgánico mineral y 75vol.% de arena fina. Se observa que a medida que la temperatura aumenta de ambiente a 500 °C el mortero adquiere mayor resistencia mecánica, este resultado se puede atribuir a que la fase de aglomerante geopolimérico aumenta su resistencia mecánica por efecto de la temperatura de ensayo (hasta los 500°C). Resultados similares se pueden apreciar para los morteros geopoliméricos con 37.5, 50, 62.5 y 75 vol.% de residuo inorgánico mineral de las figuras 24, 25, 26 y 27, respectivamente.

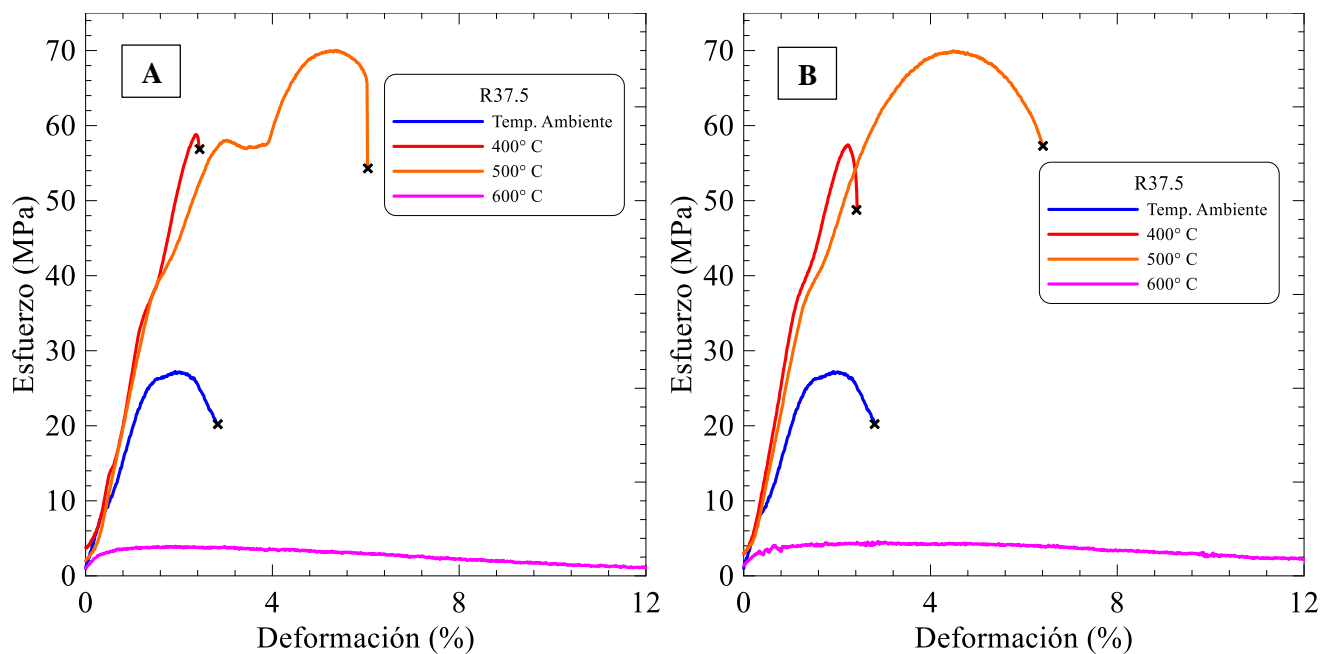


Figura 24. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R37.5 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2

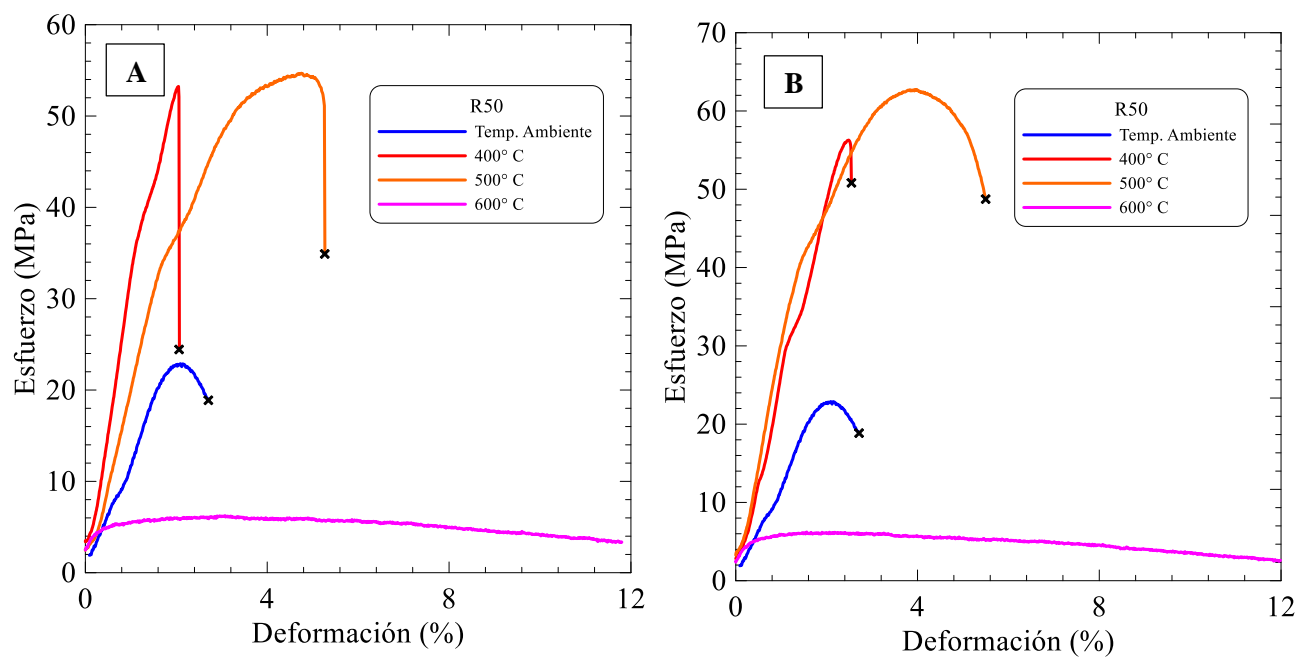


Figura 25. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R50 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2

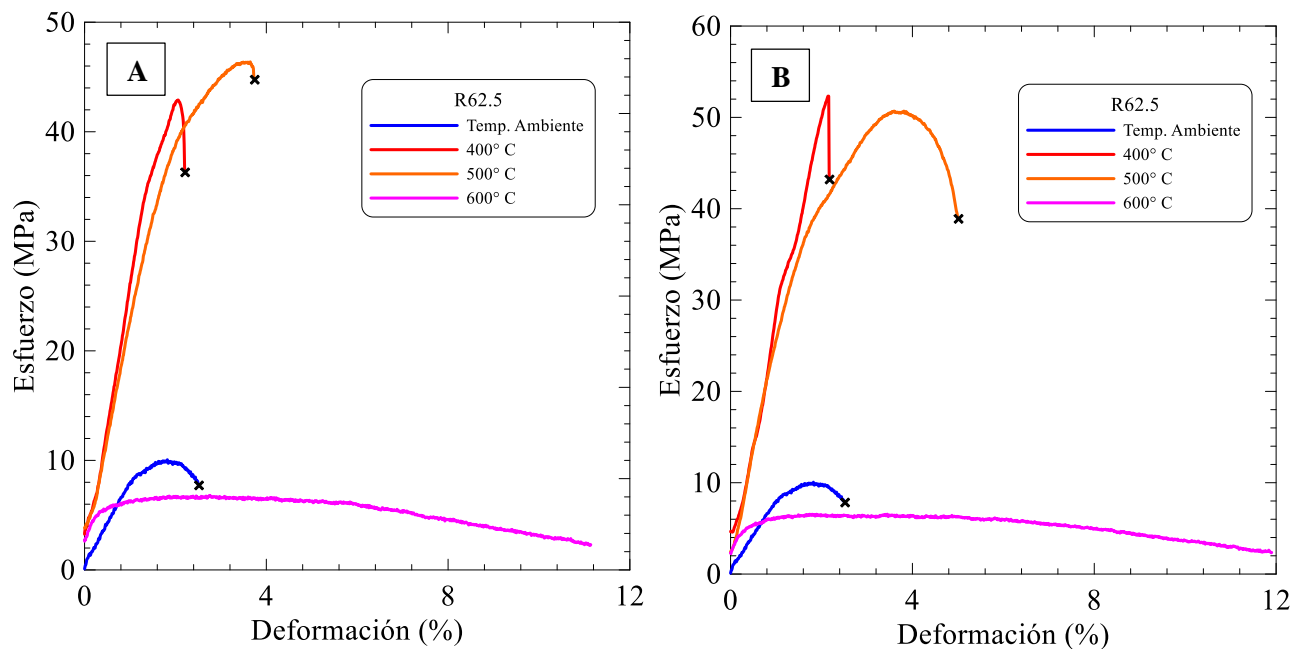


Figura 26. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R62.5 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2

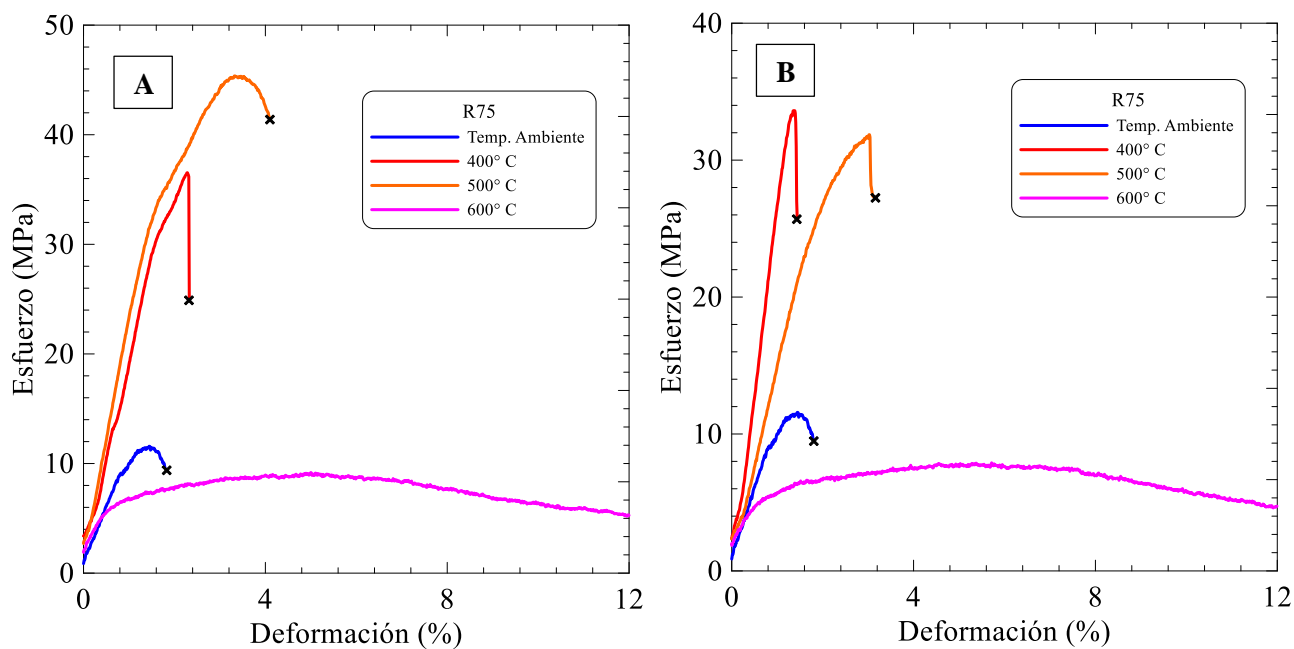


Figura 27. Curvas esfuerzo - deformación para el mortero geopolimérico R75 en función de la temperatura de ensayo. (A) lote 1 y (B) lote 2

A continuación se presenta una tabla resumen con los datos de resistencia máxima obtenidos de las figuras anteriores.

Tabla 06.

*Resumen de las resistencias mecánicas a la compresión uniaxial máximas para morteros geopoliméricos a temperaturas de ensayo entre ambiente y 600°C*

<b>Mezcla/Temperatura</b>	<b>Resistencia a la fuerza de compresión (MPa)</b>			
	<b>15°C - 22°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>R25_1</b>	49.27	57.84	58.72	6.83
<b>R25_2</b>		41.70	50.90	4.26
<b>R37.5_1</b>	26.71	60.48	73.90	3.99
<b>R37.5_2</b>		58.72	73.33	4.70
<b>R50_1</b>	23.34	53.92	57.35	6.46
<b>R50_2</b>		57.43	64.85	6.23
<b>R62.5_1</b>	10.13	43.81	48.08	6.93
<b>R62.5_2</b>		53.41	52.67	6.79
<b>R75_1</b>	11.52	37.38	46.91	9.64
<b>R75_2</b>		34.10	32.83	8.36

Se observa en la tabla 06 que el mortero geopolimérico que presentó mayor resistencia a la compresión uniaxial fue el R37.5, con valores de 60.5 y 73.9 MPa a temperaturas de ensayo de 400 y 500°C, respectivamente, también observamos que a 600°C, este mismo presentó la menor resistencia a la compresión (3.9 MPa) entre todos los morteros geopoliméricos estudiados.

**7.5.2.- Microscopía óptica de las mezclas de mortero geopolimérico luego de realizadas las pruebas mecánicas**

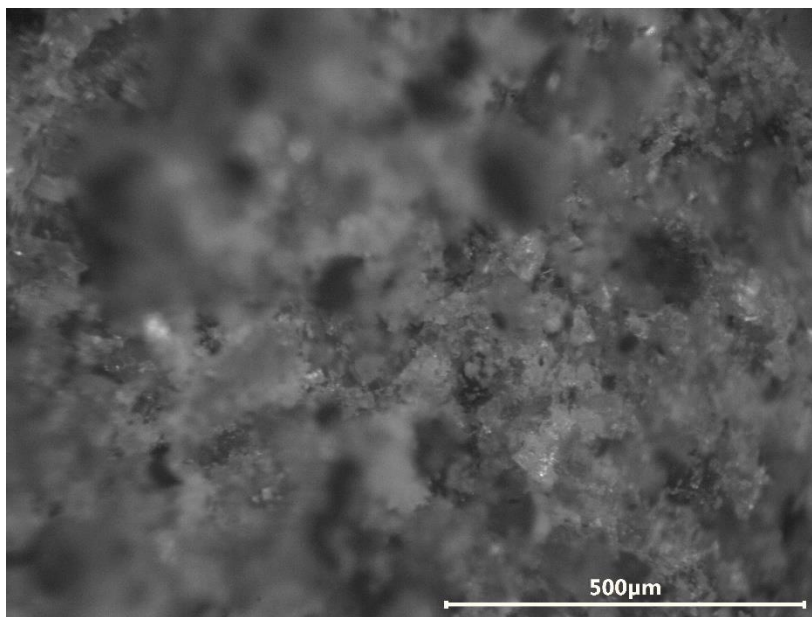


Figura 28. Micrografía por microscopía óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a temperatura ambiente

En la figura 28 se observa una superficie de fractura del mortero geopolimérico R25. Las regiones borrosas se encuentran en un plano diferente a la región enfocada, se observa una fractura frágil típica con aparición y propagación de grietas principalmente dentro de la fase continua del aglomerante geopolimérico y que bordean a las partículas discontinuas de arena fina.

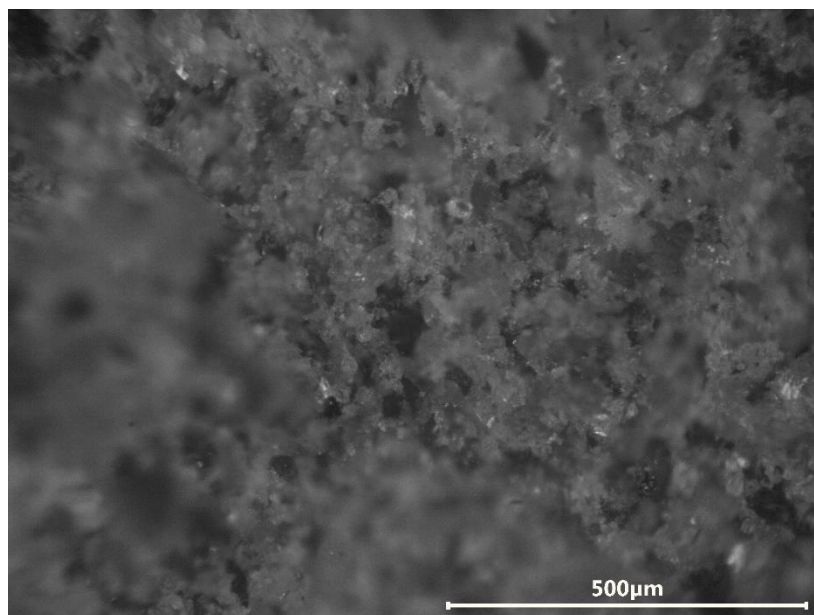


Figura 29. Micrografía por microscopía óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 400°C

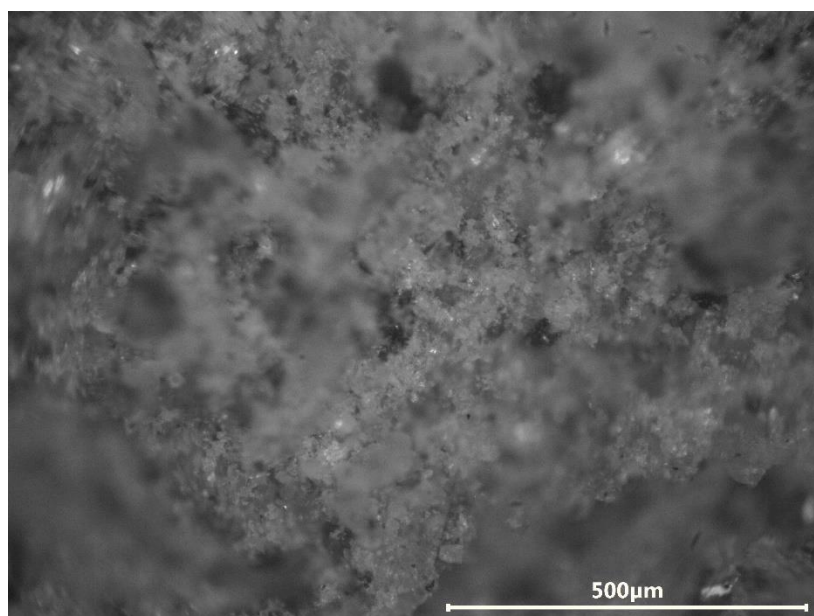


Figura 30. Micrografía por microscopía óptica para el mortero geopolimérico R75 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 400°C



En las figuras 29 y 30 se muestran superficies de fractura de los morteros geopoliméricos R25 y R75, respectivamente, después del ensayo mecánico de compresión uniaxial a 400°C. Se observó que las grietas aparecen y se propagan desde la fase continua de aglomerante geopolimérico y bordean las partículas de arena fina, tal como se observó en los ensayos a temperatura ambiente (figura 27).

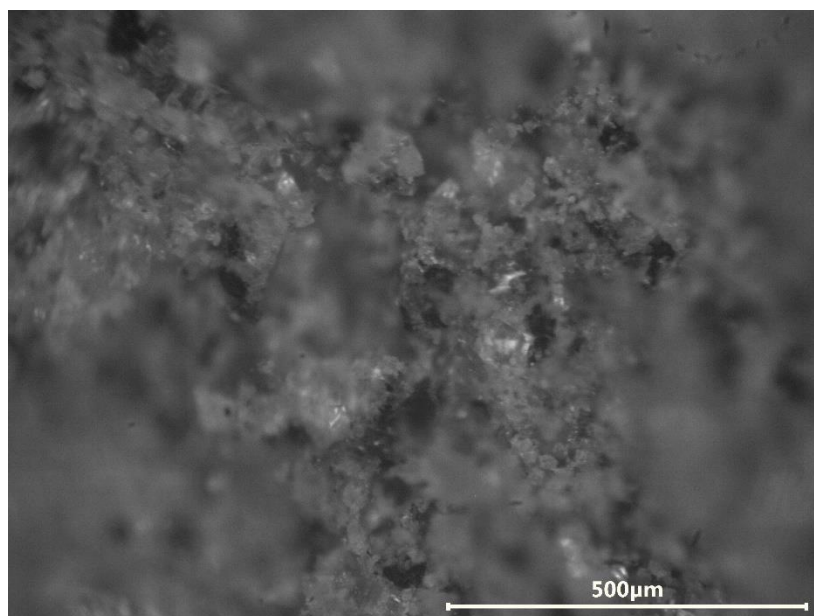


Figura 31. Micrografía por microscopía óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 500°C.

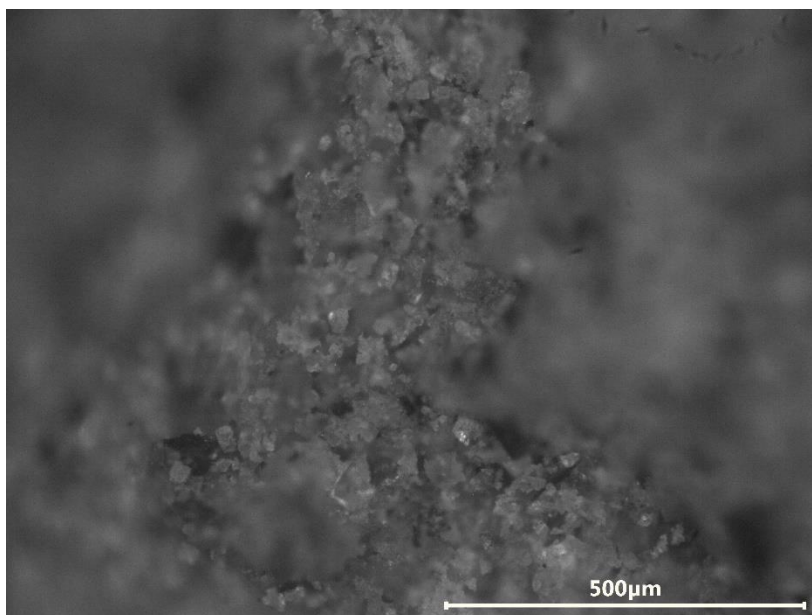


Figura 32. Micrografía por microscopía óptica para el mortero geopolimérico R75 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 500°C.

En aspecto de las micrografías de superficies de fractura de los morteros geopoliméricos R25 y R75 ensayados a 500°C se presentan en las figuras 31 y 32, respectivamente, la aparición y propagación de grietas es similar a lo observada en micrografías de las figuras 28 a 30.

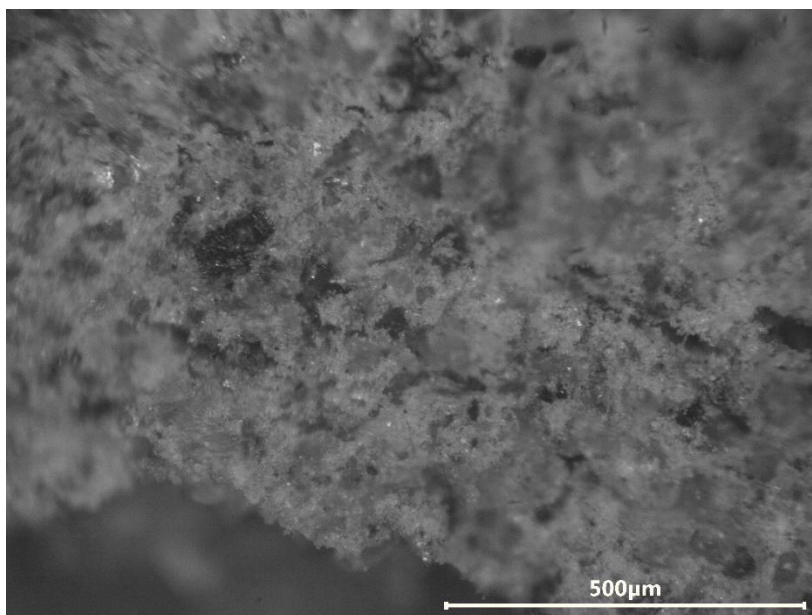


Figura 33. Micrografía por microscopía óptica para el mortero geopolimérico R25 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 600°C

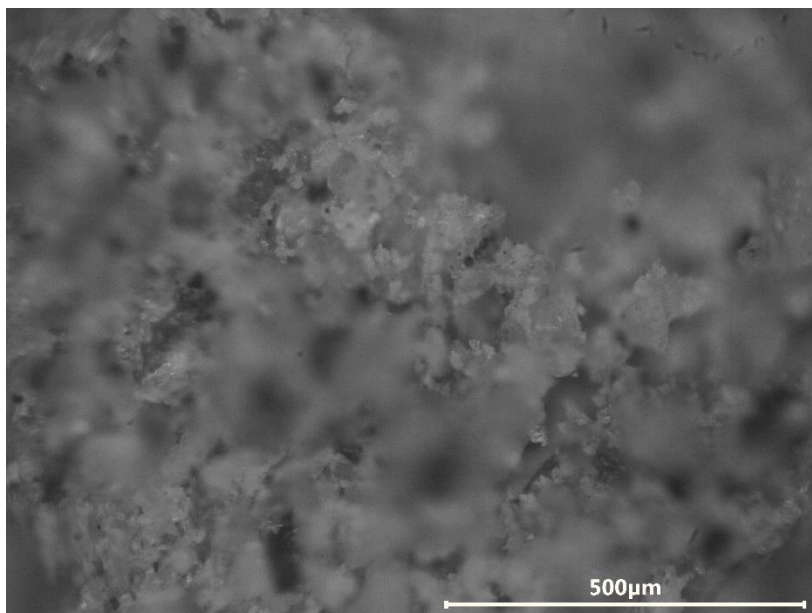


Figura 34. Micrografía por microscopía óptica para el mortero geopolimérico R75 luego de ser ensayada por compresión uniaxial a 600°C

En las figuras 33 y 34 se observan micrografías de los morteros geopoliméricos R25 y R75, respectivamente, ensayados a 600 °C. El comportamiento mecánico de estos morteros cuando son ensayados a 600°C es completamente dúctil, provocada por la

aparición, propagación y acomodación de las grietas en la fase aglomerante, que permite una mayor deformación de los morteros antes de su rotura final.

### 7.5.3.- Microscopía electrónica de barrido (SEM) a las mezclas de mortero geopolimérico luego de realizadas las pruebas mecánicas.

Las fotografías que se muestran en la figura 34 corresponden al mortero geopolimérico R37.5 luego de haberles realizado las pruebas mecánicas a las cuatro temperaturas de estudio.

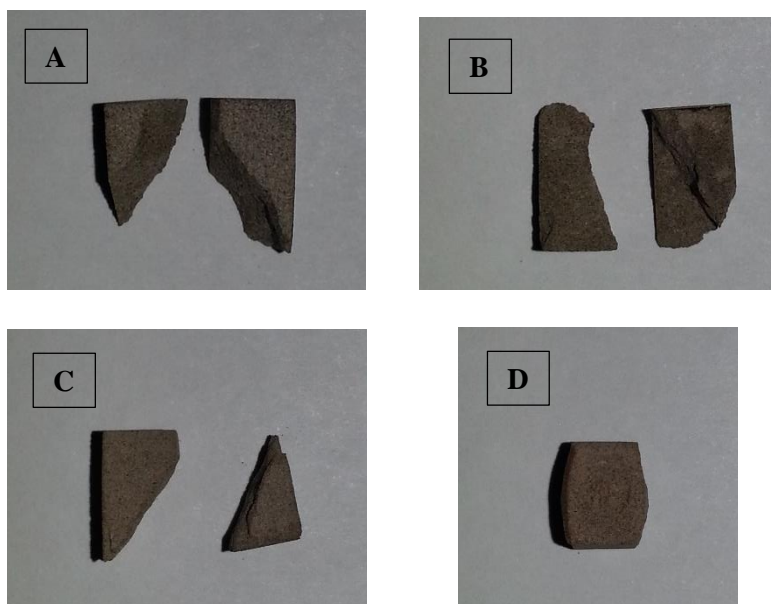


Figura 35. Aspecto macroscópica del mortero geopolimérico R37.5 luego de ser ensayado a temperatura ambiente (A), 400 °C (B), 500 (C) y 600°C (D).

En la figura 35 (A, B y C) se observa una respuesta mecánica con fractura frágil del mortero geopolimérico R37.5, esto quiere decir que al llegar al límite de su resistencia máxima se rompe catastróficamente, en contraste, al ensayar el mismo mortero a 600°C se ha observado un comportamiento completamente dúctil con deformación plástica asociada (figura 35D).

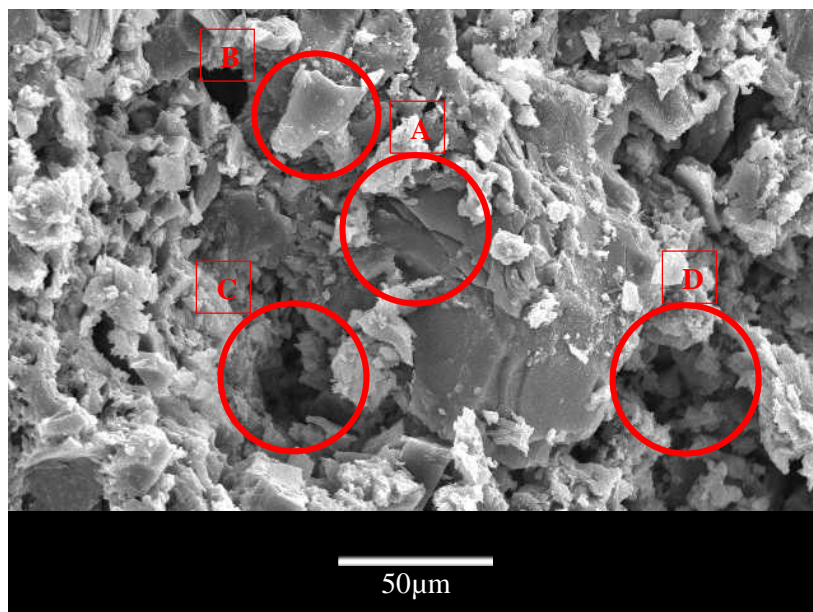


Figura 36. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a temperatura ambiente (A) Grano de arena (B) Fase geopolimérica (C) y (D) Grietas por desgarramiento

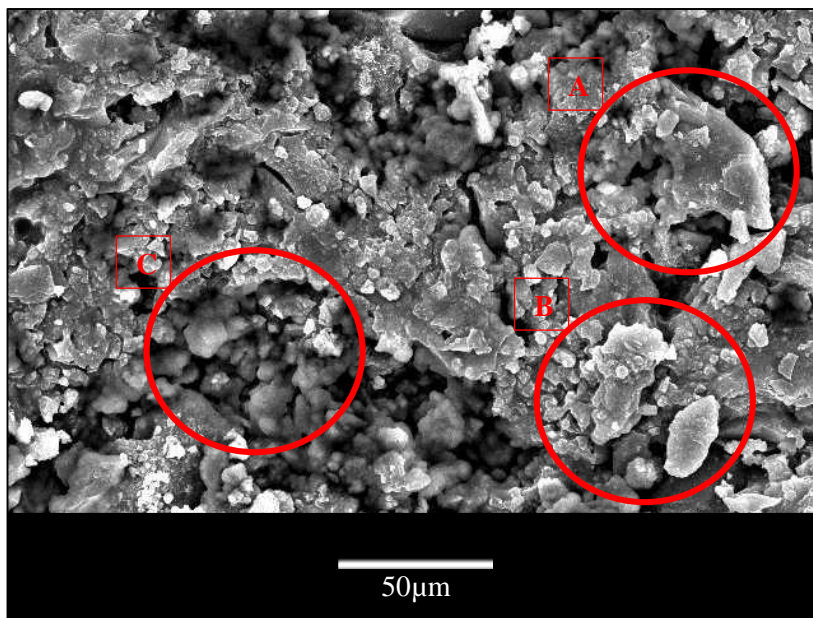


Figura 37. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a temperatura ambiente (A) y (B) Fase geopolimérica, (C) Grieta por desgarramiento

En la figura 36, la zona A de la micrografía muestra un grano de arena y en el mismo se puede ver parte de la fractura del mortero. Las demás partes pequeñas como la que se ve en la zona B de la misma micrografía son el geopolímero y debido a que este es amorfo, al momento de la fractura se produce un tipo de desgarramiento, este se repite también en las zonas C y D de la figura 36, el cual es producido por la naturaleza del geopolímero debido a que este no presenta una forma concreta, muy por el contrario al ser amorfo está entrelazado con los granos de arena y entre sí que produce este desgarramiento al momento de llevar a cabo la compresión.

En la figura 37 se ve mayoritariamente la presencia de la fase de aglomerante geopolimérico, como en las zonas A y B, en forma de pequeños granos y formando estructuras amorfas. La presencia de granos del geopolímero y los espacios entre las estructuras se deben al desgarramiento que se produce en el mortero al momento de realizar el ensayo de compresión, lo que se aprecia en la zona C en forma de espacios generados por la compresión.

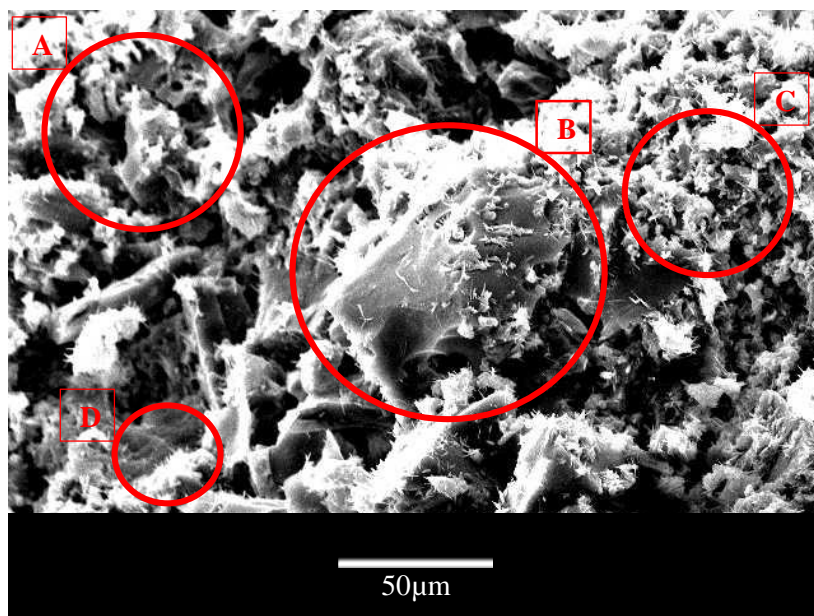


Figura 38. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a 400°C  
(A), (B) y (C) Fase geopolimérica, (D) Sales de sodio

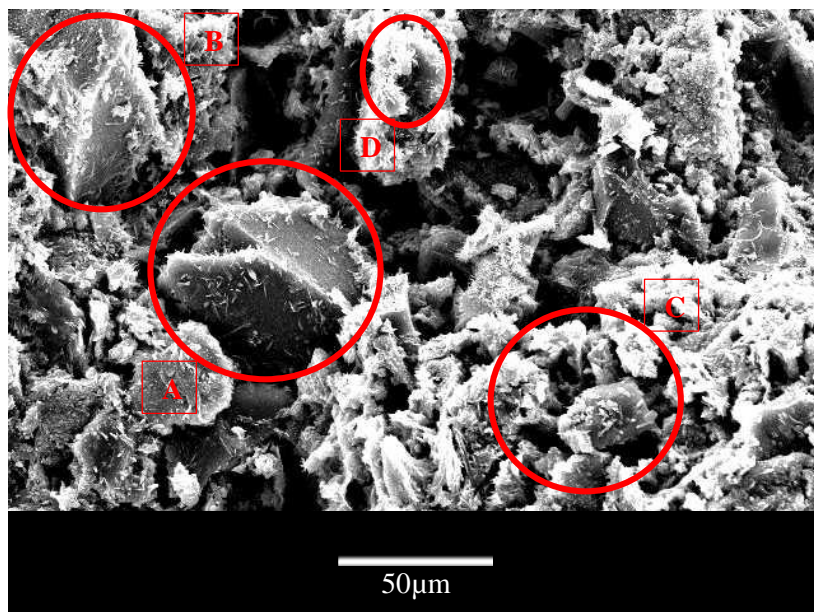


Figura 39. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a 400°C (A) y (B) Grano de arena, (C) Fase geopolimérica, (D) Sales de sodio

En la figura 38 se pueden ver algunos granos de arena en la parte izquierda de la micrografía, específicamente en la zona A y al lado derecho y en la parte central, en la zona B y C de la figura 38 se ve la fase geopolimérica. En algunas partes, como en la zona D, se ve también algo parecido a pequeños “vellos” los cuales son sales que se produjeron debido a la presencia del hidróxido de sodio en el geopolímero.

En la figura 39 se puede ver claramente un grano de arena en la zona A de la micrografía y otro grano en la zona B, el resto de la micrografía presenta la fase geopolimérica del material como en la zona C de la figura 39. En estas micrografías también se identifica el desgarramiento ocasionado por la compresión realizada debido a la presencia de los espacios entre las estructuras y también se ven los vellos de las sales (zona D) mencionadas en la figura 38.

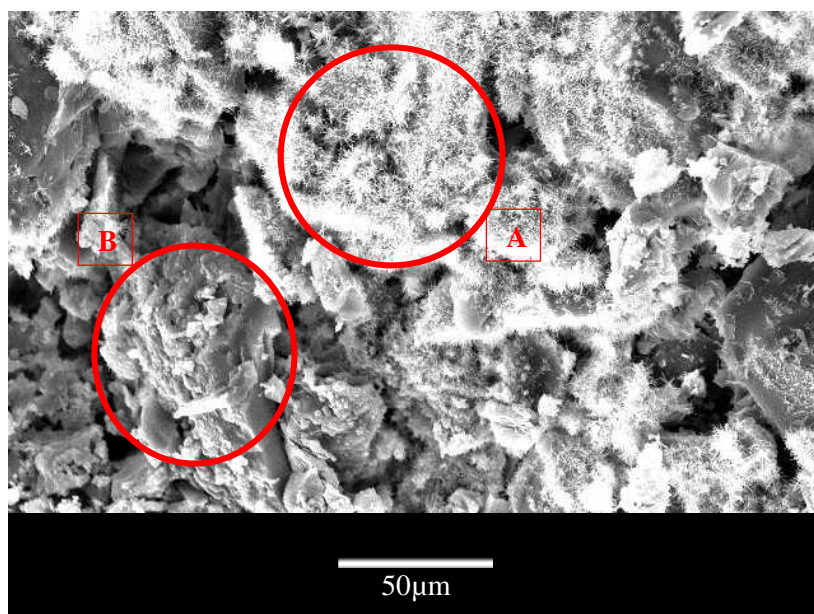


Figura 40. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a 500°C  
(A) Sales de sodio y (B) Fase geopolimérica

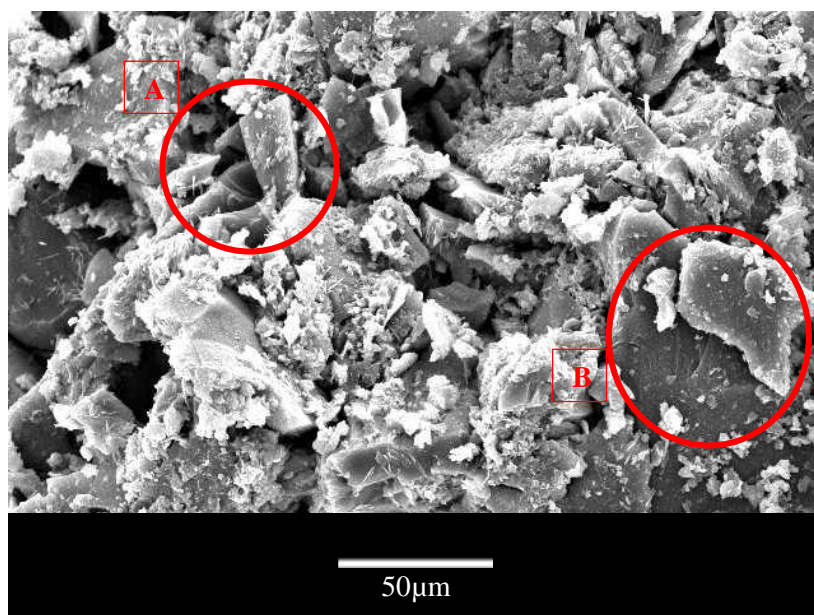


Figura 41. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a 500°C  
(A) y (B) Fase geopolimérica



En la figura 40 se puede ver con mayor claridad las sales que se formaron en el proceso de fabricación del mortero (zona A), y en la zona B se puede ver claramente la fase amorfa del mortero que corresponde al geopolímero. En la figura 40 no se pueden identificar granos de arena, mientras que en la figura 41 estos se identifican mejor en la zona A al igual que la fase geopolimérica presente en la zona B del mortero. Un aspecto repetitivo de la figura 36 a la 41 es que las fases más pequeñas que se observan en las micrografías son la fase geopolimérica, una característica principal de estas es su amorficidad, no poseen caras lisas ni lados longitudinales algo que si ocurre con los granos de arena a parte que estos ultimos son más grandes. Es lógico pensar también que las sales presentes en las figuras 38, 39 y 40 vistas hasta el momento, aparecen en la fase geopolimérica ya que el residuo inorgánico minero reacciona con el hidróxido de sodio formando la fase geopolimérica y el hidróxido es el que produce la aparición de estas sales.

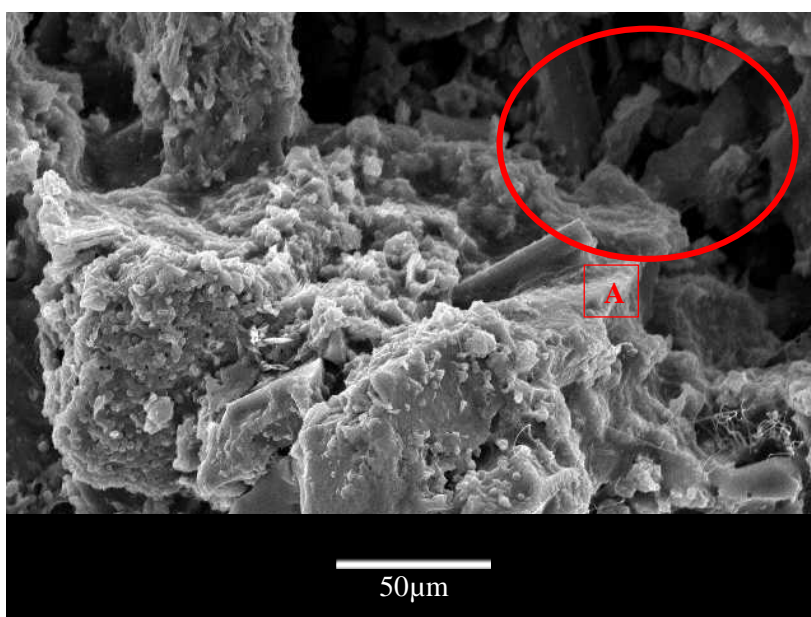


Figura 42. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R25 obtenida luego del ensayo de compresión a 600°C

(A) Grieta por desgarramiento

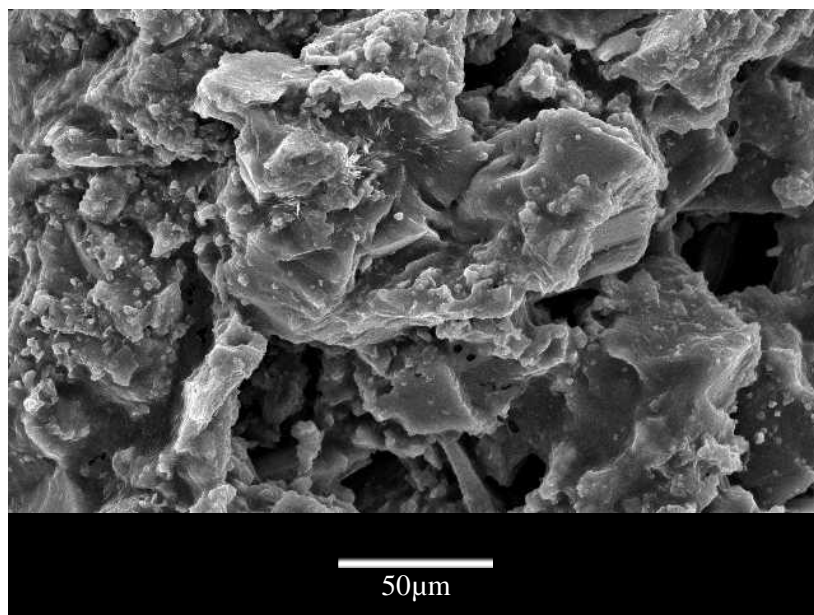


Figura 43. Micrografía por microscopía electrónica de barrido del mortero geopolimérico R75 obtenida luego del ensayo de compresión a 600°C

En la figura 42 se pueden observar grandes espacios debido a alguna grieta generada por el desgarro ocasionado en las pruebas de compresión de los morteros. Tanto en la figura 42 como en la figura 42 es muy complicado distinguir un grano de arena, esto se debe a la diferencia en tamaños de partícula y la escala de la micrografía.

#### **7.5.4.- Resultados mecánicos del mortero convencional**

A continuación podremos ver los resultados obtenidos del mortero convencional elaborado a partir de cemento Portland en las mismas cinco proporciones que las trabajadas en el mortero geopolimérico y con la misma codificación, cambiando únicamente la letra “R” de residuo inorgánico mineral por la letra “C” de cemento Portland.

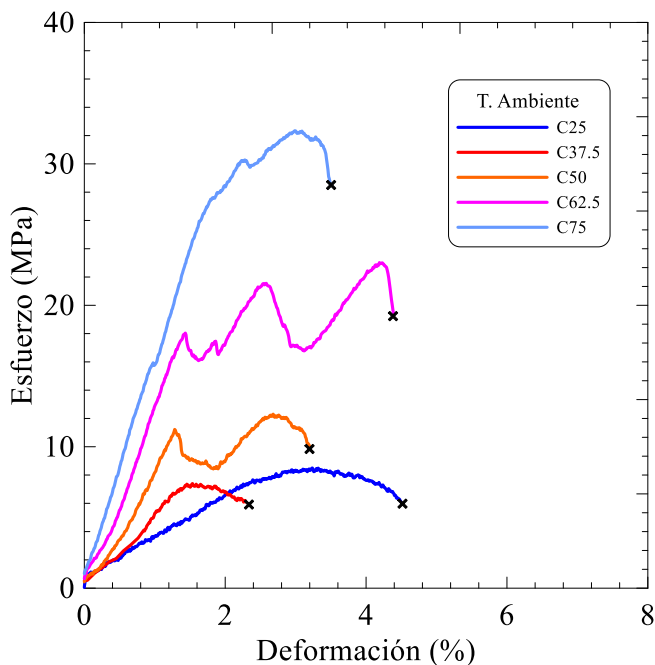


Figura 44. Curvas esfuerzo - deformación a temperatura ambiente ( $15^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ ) para las cinco mezclas de mortero convencional.

En la figura 44 podemos ver a los cinco tipos de mezclas de mortero convencional ensayadas a temperatura ambiente. A diferencia del mortero geopolimérico, el mortero convencional incrementa su resistencia a medida que se incrementa la cantidad de cemento Portland presente en las mezclas, esto quiere decir que quien determina la resistencia del mortero es la arena ya que mientras esta está presente en mayor proporción en la mezcla la resistencia disminuye. Esto se puede comprobar en la figura 44 donde la mayor resistencia a temperatura ambiente corresponde al mortero C75 con 33.3 MPa y la menor resistencia la obtiene la mezcla C37.5 con 7.5 MPa, algo que sucede totalmente por el contrario con el mortero geopolimérico y que vimos en las figuras 19 a la 27.

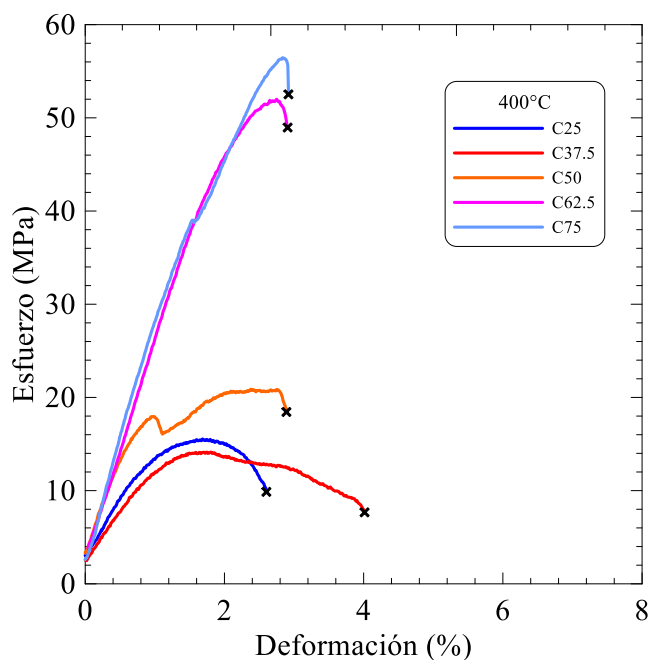


Figura 45. Curva esfuerzo - deformación a 400°C de las cinco mezclas de mortero convencional

La figura 45 presenta los resultados de la resistencia a la compresión uniaxial de mortero convencional cuando este se encuentra sometido a 400 °C de temperatura. La tendencia de la figura 45 continúa ya que las mezclas que poseen mayor cantidad de arena son las que tienen menor resistencia. Nuevamente, al igual que en la figura 44 la mezcla C75 posee la resistencia más alta con 58.1 MPa y la menos resistencia la tiene la mezcla C37.5 con 14.4 MPa. También se repite la tendencia del mortero geopolimérico, a medida que la temperatura se incrementa la resistencia también lo hace en los cinco tipos de mezclas de mortero convencional.

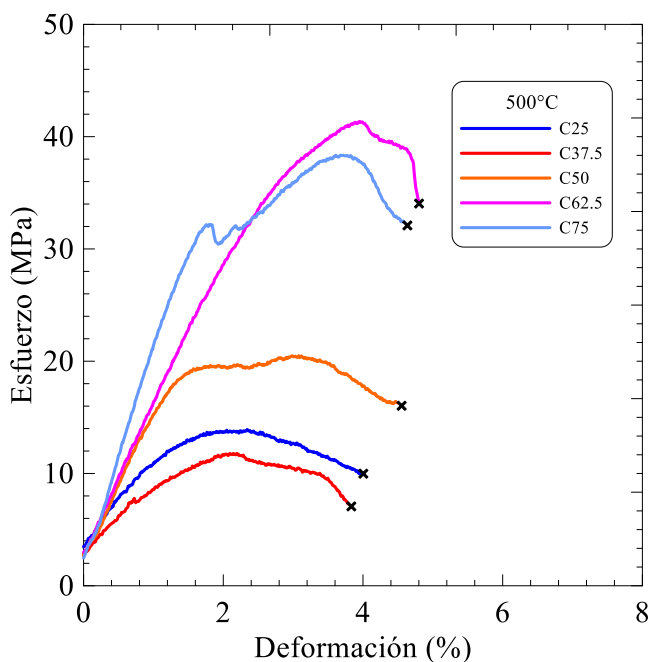


Figura 46. Curva esfuerzo - deformación a 500°C de las cinco mezclas de mortero convencional

La figura 46 presenta los resultados de las pruebas de compresión a morteros convencional sometidos a 500°C. Esta gráfica evidencia que los resultados no varían mucho respecto a los observados en la figura 46, aunque se observa que continúan las tendencias anteriores, incremento de resistencia directamente proporcional al incremento de temperatura y el incremento de resistencia inversamente proporcional al incremento de arena en las mezclas. Hasta el momento los resultados presentan las mismas tendencias que las obtenidas en el mortero geopolimérico y explicadas en puntos anteriores. En la figura 46 se observa nuevamente que la mezcla C75 posee la menor resistencia con 12.1 MPa y la resistencia más elevada la tiene la mezcla C62.5 con 43.0 MPa superando por 4.1 MPa a la mezcla C75.

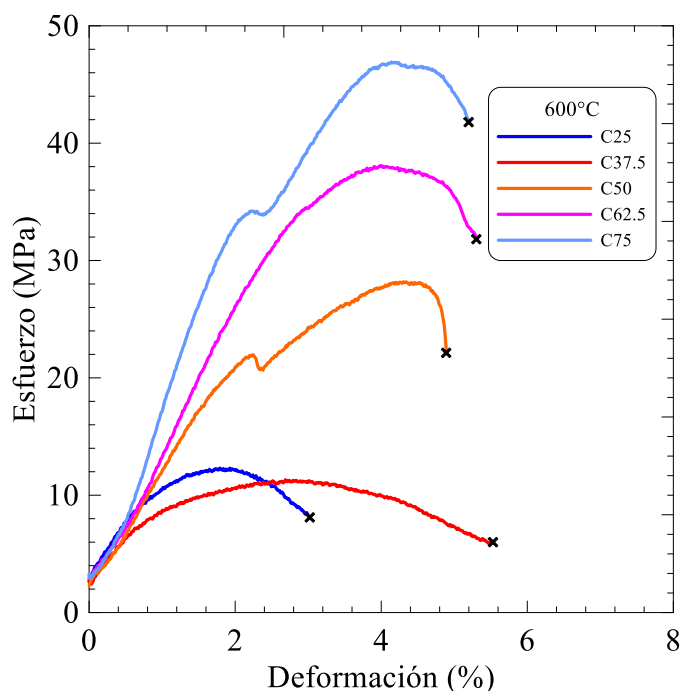


Figura 47. Curva esfuerzo - deformación a 600°C de las cinco mezclas de mortero convencional

En la figura 47 se pueden ver las curvas esfuerzo vs. deformación para el mortero convencional sometido a 600°C. La mayor resistencia la presentó el mortero C75 con 48.9 MPa y la menor el mortero C37.5 con 11.6 MPa. Aquí está la mayor diferencia con el mortero geopolimérico y es que el mortero convencional de la figura 46 comparado con la figura 46 no presenta muchas diferencias entre sí, situación totalmente opuesta al mortero geopolimérico y es que a parecer el cemento Portland no pierde resistencia tan rápidamente como el residuo inorgánico minero, por el contrario continua elevando su resistencia.

A continuación se podrán apreciar curvas esfuerzo vs. deformación por cada tipo de mortero. A partir de cada figura se explicará el comportamiento de un solo tipo de mezcla en las cuatro temperaturas estudiadas.

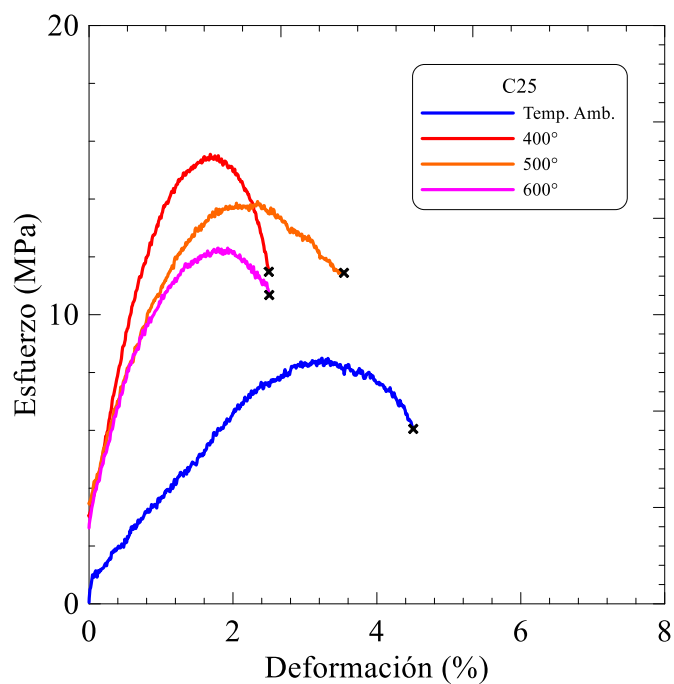


Figura 48. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C25 en las cuatro temperaturas de estudio

En la figura 48 podemos observar que el mortero convencional C25 sufre un aumento de su resistencia mecánica cuando la temperatura de ensayo aumenta de ambiente a 400°C, a partir de esta temperatura la resistencia empieza a disminuir. La mayor resistencia obtenida para este mortero fue de 15.8 MPa a 400°C y la menor 8.78 MPa a temperatura ambiente.

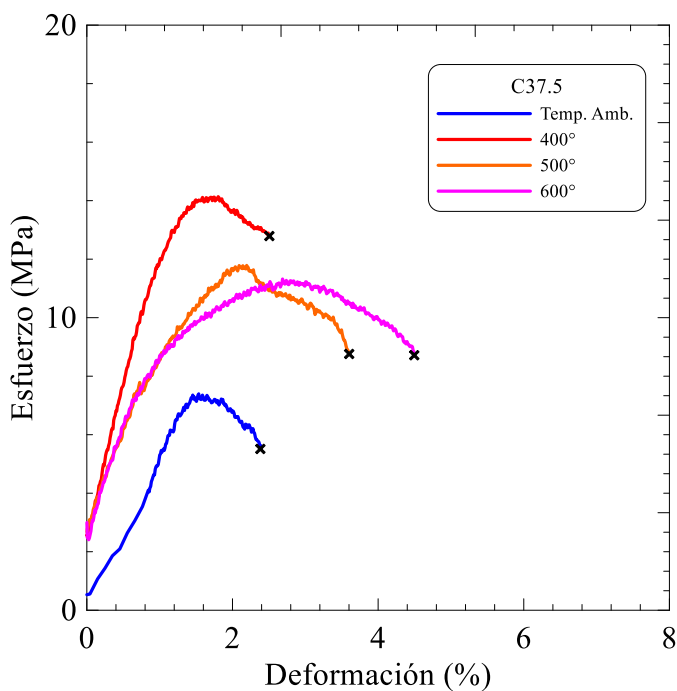


Figura 49. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C37.5 en las cuatro temperaturas de estudio

En la figura 49 se puede apreciar la respuesta mecánica del mortero convencional C37.5 sometido a varias temperaturas de ensayo, el comportamiento observado es similar al del mortero C25 (figura 48) en las mismas condiciones de ensayo, la menor resistencia obtenida fue de 7.5 MPa (temperatura ambiente) y la mayor fue de 14.4 MPa (400°C). A partir de 400°C la resistencia mecánica empieza a disminuir.



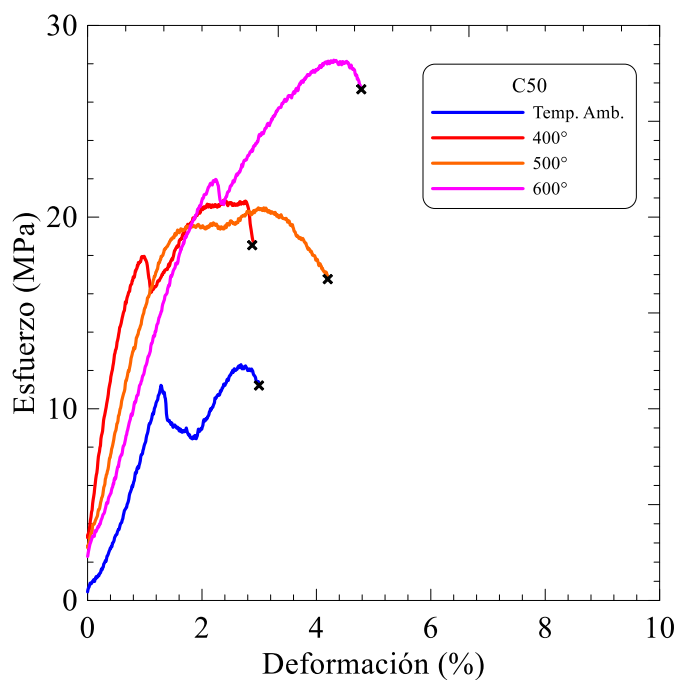


Figura 50. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C50 en las cuatro temperaturas de estudio

En las figuras 50, 51 y 52 se muestran curvas esfuerzo vs. deformación para los morteros convencionales C50, C62.5 y C75, respectivamente, con resultados muy similares a los obtenidos y explicados en las figuras 48 y 49; en todos los casos la resistencia mecánica aumenta con la temperatura cuando los ensayos se realizan desde temperatura ambiente a 400°C, a excepción del mortero C50 en el que aumenta hasta los 600°C, a partir de esta la resistencia disminuye progresivamente. En la figura 50 se observa que la menor resistencia obtenida para el mortero convencional C50 fue a temperatura ambiente (12.7 MPa) y la mayor fue a los 600°C (29.4 MPa).

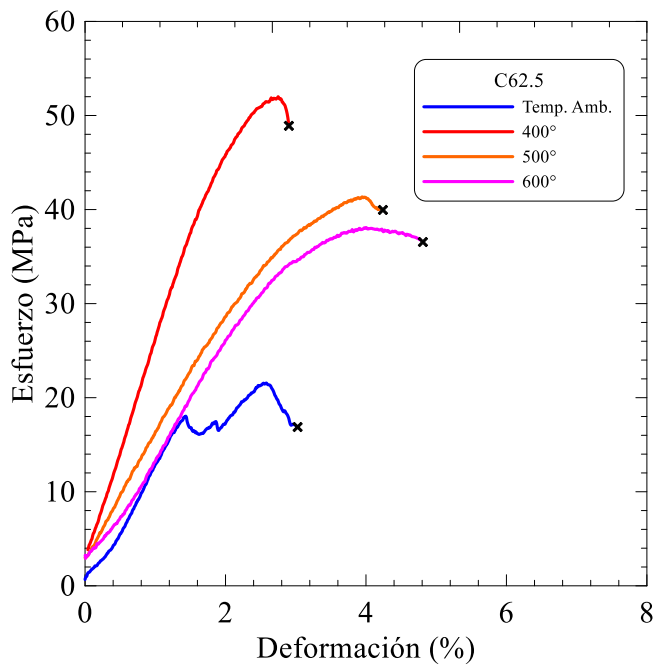


Figura 51. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C62.5 en las cuatro temperaturas de estudio

En la figura 51 correspondiente al mortero convencional C62.5 se observa que la menor resistencia alcanzada fue de 24.01 MPa (temperatura ambiente) y la mayor 53.4 MPa (400°C).

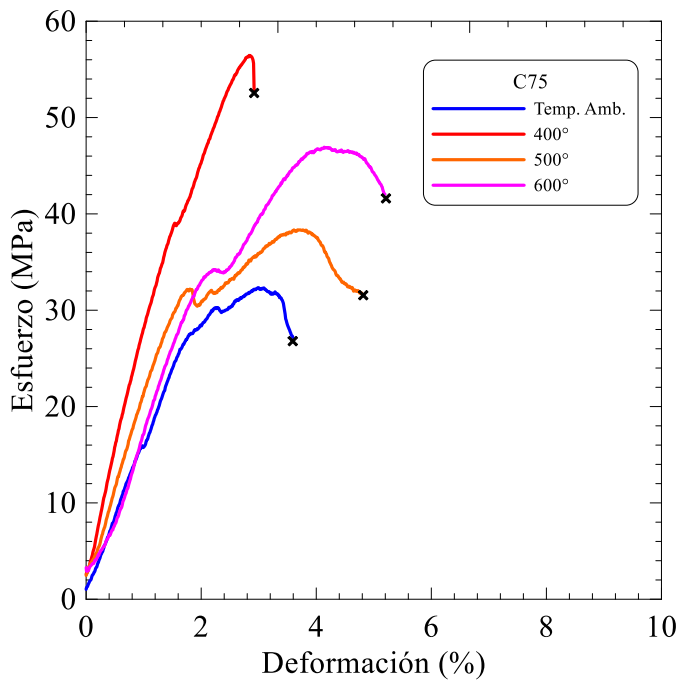


Figura 52. Curva esfuerzo - deformación de la mezcla C75 en las cuatro temperaturas de estudio

La figura 52 presenta los mejores resultados del mortero convencional C75. Aquí los resultados mostraron que a 400°C se obtiene la resistencia más alta (58.1 MPa) y a temperatura ambiente la menor (33.3 MPa).

En la tabla 7 se resumen los resultados de las pruebas termo-mecánicas para el mortero convencional de cemento Portland.

Tabla 07.

*Resultados termo-mecánicos del mortero convencional evaluado desde temperatura ambiente (15°C – 22°C) hasta 600°C*

<b>Resistencia a la Fuerza de Compresión (MPa)</b>				
<b>Mezcla/Temperatura</b>	<b>15°C - 22°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>C25</b>	8.77	15.79	14.23	12.53
<b>C37.5</b>	7.52	14.38	12.06	11.60
<b>C50</b>	12.65	21.43	21.12	29.42
<b>C62.5</b>	24.01	53.44	43.00	39.65
<b>C75</b>	33.29	58.05	38.99	48.91

#### **7.5.5.- Microscopía óptica de las mezclas de mortero convencional luego de realizadas las pruebas mecánicas**

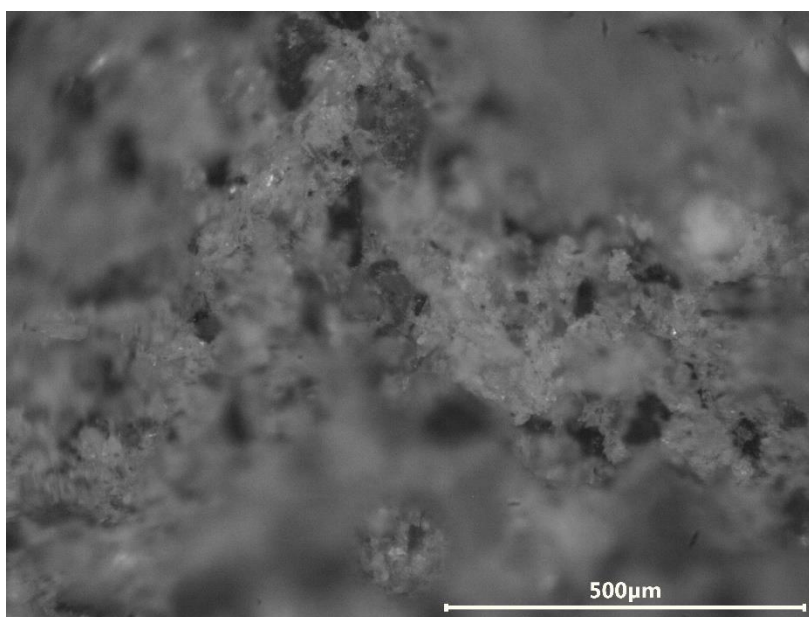


Figura 53. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C25 luego de ser comprimida a temperatura ambiente

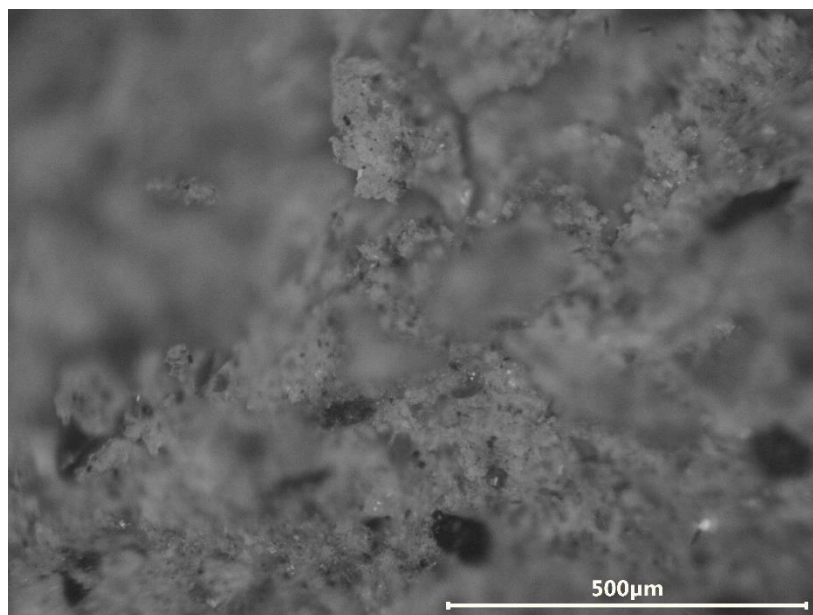


Figura 54. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C75 luego de ser comprimida a temperatura ambiente

En las figuras 53 y 54 se muestran micrografías para los morteros C25 y C75 luego de la prueba de compresión a temperatura ambiente. Es clara la diferencia en la proporción de arena ya que la figura 53 presenta muchos más granos de arena que la figura 54. Algo muy importante que se observa es que la parte en la que aparecen las grietas y finalmente la rotura de las probetas es en la zona correspondiente a la fase de cemento Portland y esta grietas luego bordean a los granos de arena fina, esto quiere decir que la fase de cemento Portland es menos resistente que la de la arena fina.

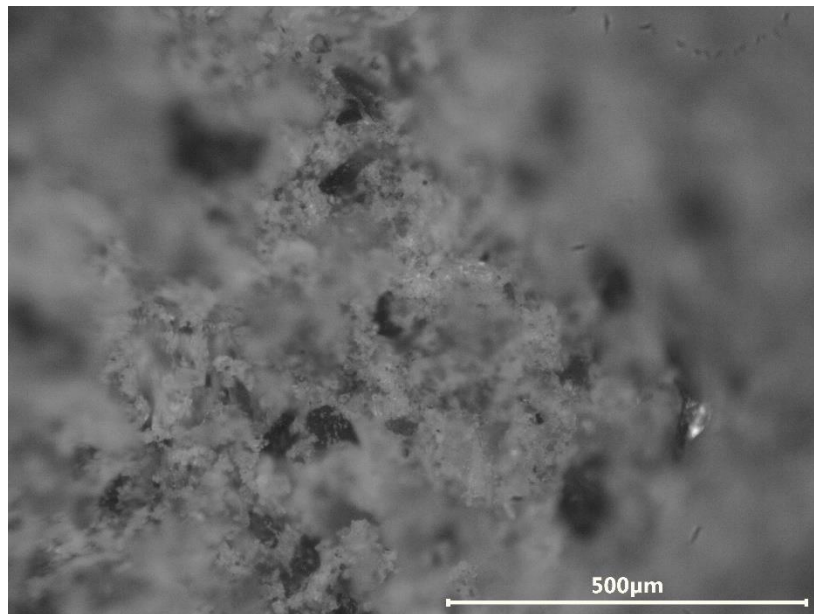


Figura 55. Micrografía de la mezcla C25 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 400°C

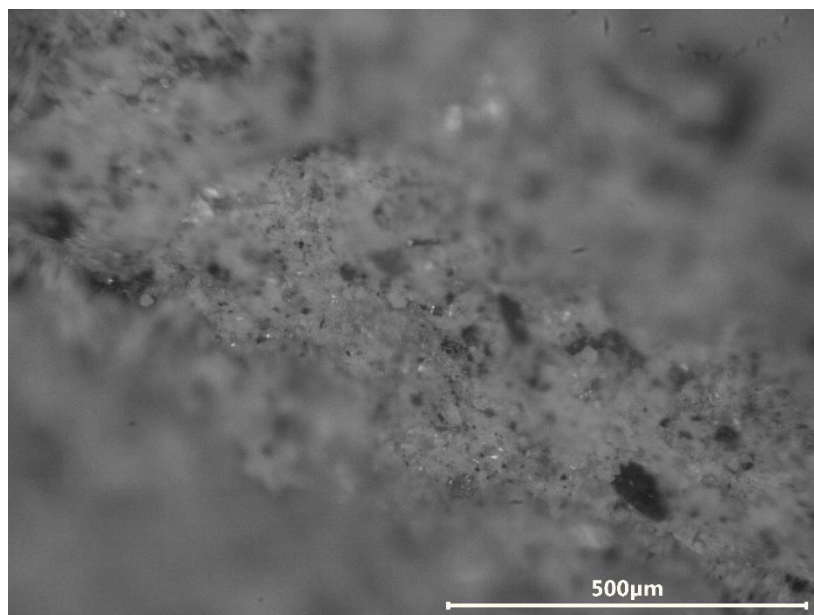


Figura 56. Micrografía de la mezcla C75 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 400°C

En las figuras 55 y 56 se observan superficies de fractura de los mortero C25 y C75, respectivamente, luego de ser ensayados en compresión uniaxial a 400°C, de la misma forma que las figuras 53 y 54 las grietas se forman y propagan a través de la fase del cemento Portland y durante su crecimiento y propagación bordean los granos de arena fina.

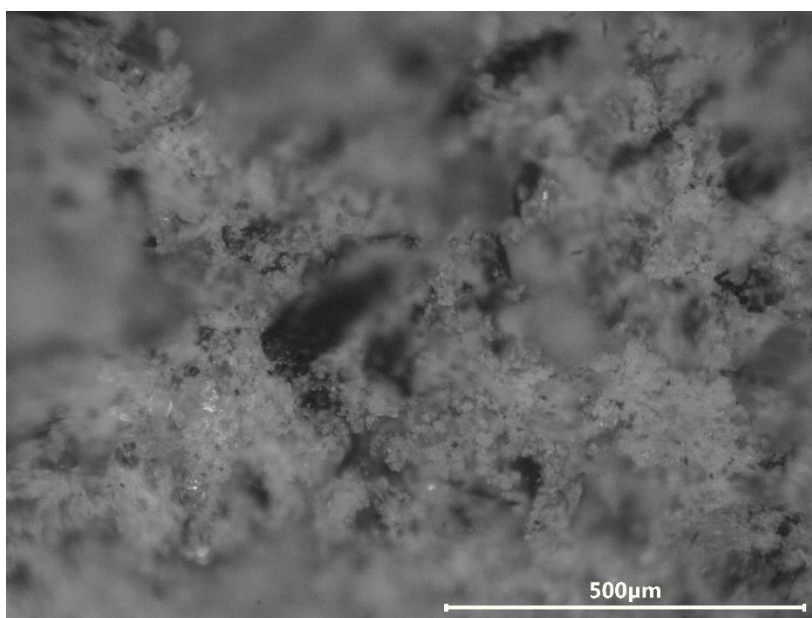


Figura 57. Micrografía de la mezcla C25 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 500°C

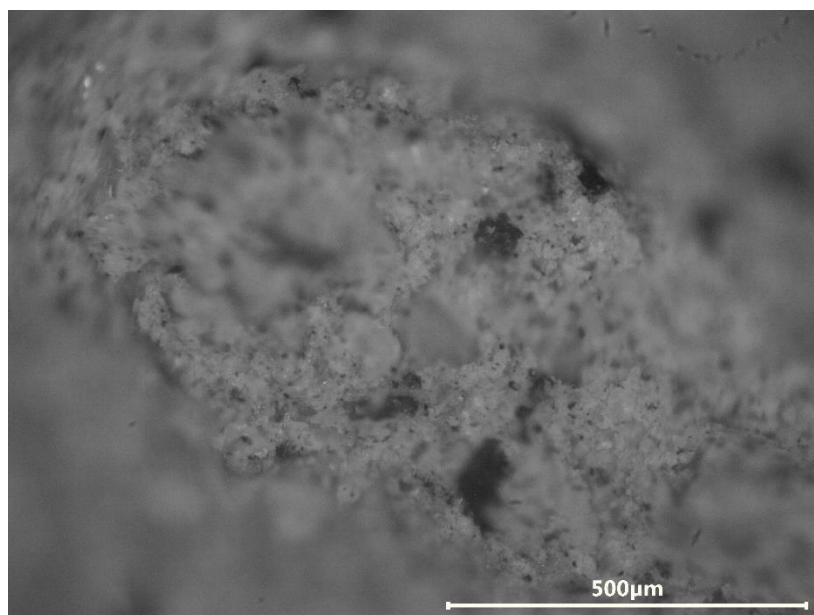


Figura 58. Micrografía de la mezcla C75 obtenida por microscopía óptica luego de ser comprimida a 500°C

Las figuras 57 y 58 corresponden a morteros convencionales C25 y C75, respectivamente, ensayados a 500°C; se observan los mismos mecanismos de aparición, crecimiento y propagación de grietas observado en las figuras 53 a 56 y se repiten en las figuras 59 y 60 de los morteros convencionales C25 y C75 ensayados a 600°C.



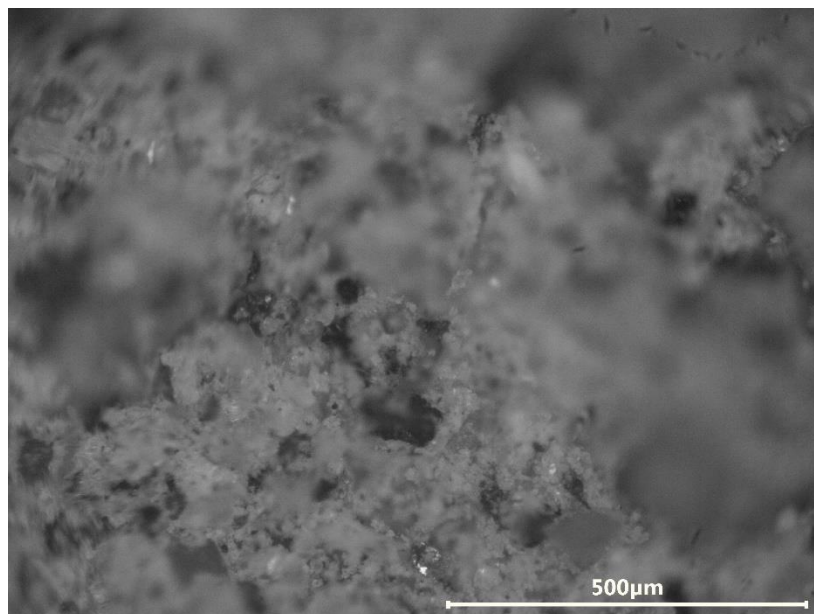


Figura 59. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C25 luego de ser comprimida a 600°C

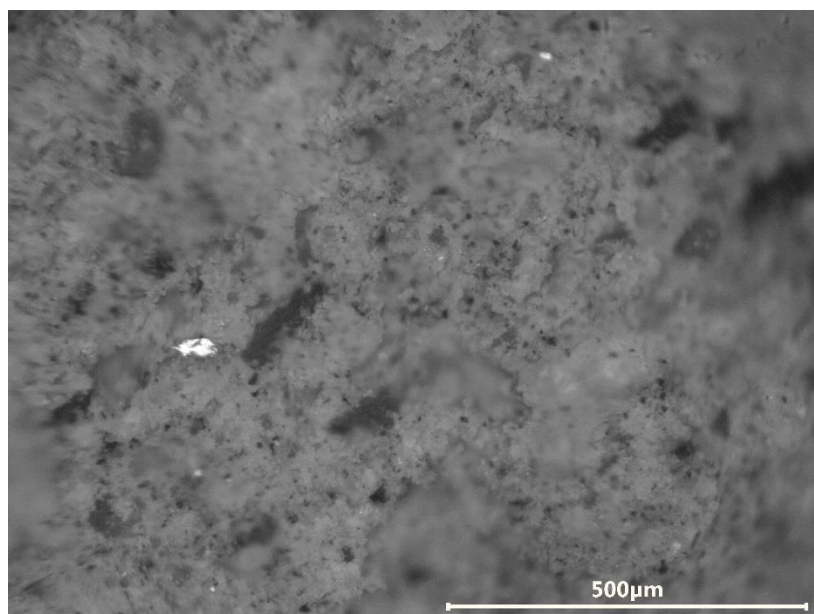


Figura 60. Micrografía por microscopía óptica del mortero convencional C75 luego de ser comprimida a 600°C.

## 8.- Análisis de datos

En esta sección se presentarán tablas comparativas y explicativas para el mejor entendimiento de los resultados obtenidos, luego se compararán los resultados obtenidos por el mortero geopolimérico y el mortero convencional, de la misma forma con los resultados obtenidos de otros geopolímeros de investigaciones similares.

Después de lo mencionado y debido a que la presente investigación busca que el mortero geopolimérico se presente como una alternativa al mortero convencional elaborado a base de cemento Portland, se realizó un análisis estadístico, el cual comprendió un análisis de varianza (ANOVA), que será reforzado con una prueba de Tukey, con lo que se buscó determinar cuál de las proporciones elaboradas del material es la mejor y que puede representar la alternativa que se buscó.

### 8.1. Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional

Para poder realizar una comparación entre el mortero geopolimérico a partir de residuo inorgánico minero y el mortero convencional a base de cemento Portland, se elaboró la siguiente tabla en la cual se puede ver la diferencia porcentual de la resistencia a la compresión de ambos productos, tomando como base los datos del mortero convencional, esto quiere decir que en la tabla se ve en los datos porcentuales positivos y negativos si el mortero geopolimérico presenta resistencias mayores o menores, respectivamente, al mortero convencional.

Tabla 08.

*Tabla comparativa entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional*

<b>Diferencia de las Resistencias a la Fuerza de Compresión</b>				
<b>Mezcla/Temperatura</b>	<b>15°C - 22°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>R25 - C25</b>	461.85%	266.17%	312.76%	-45.48%
<b>R37.5 - C37.5</b>	255.27%	320.63%	512.94%	-59.45%
<b>R50 - C50</b>	84.47%	168.05%	207.09%	-78.05%
<b>R62.5 - C62.5</b>	-57.80%	-0.05%	22.51%	-82.52%
<b>R75 - C75</b>	-65.39%	-35.62%	20.30%	-80.28%

Se puede apreciar en la tabla 08 que el mortero geopolimérico tiene a 500 °C sus mejores resistencias respecto del mortero convencional ya que lo supera en las cinco mezclas elaboradas y lo contrario sucede a la temperatura de 600°C ya que aquí es superado en las cinco mezclas elaboradas. También podemos darnos cuenta que los mejores resultados del mortero geopolimérico respecto del mortero convencional se encuentran en las primeras tres proporciones estudiadas (R25, R37.5 y R50), lo contrario sucede en las proporciones restantes donde el mortero convencional tiene mejores resultados. Esto se debe a que la resistencia del mortero geopolimérico depende del residuo inorgánico minero y del mortero convencional depende de la arena.

## **8.2. Comparación entre el mortero geopolimérico y morteros en otras investigaciones**

En las comparaciones que veremos a continuación, compararemos los mejores resultados mecánicos de cada investigación en contraste con los mejores resultados de nuestra investigación. El dato que se comparará será la resistencia a la compresión uniaxial en las diferentes condiciones que se den dependiendo de las investigaciones comparables. Luego de haber realizado la búsqueda de fuentes para tener base en la presente investigación, se encontraron investigaciones que brindaban resultados con los cuales se podrían comparar los resultados obtenidos. Las investigaciones que compararemos a continuación tienen metodologías similares a la trabajada en la presente investigación, pero el principal objetivo de esta sección de la tesis es comparar los resultados mecánicos obtenidos entre las investigaciones y determinar de esta manera si nuestro producto puede competir con otros elaborados. En estas comparaciones únicamente se utilizaron los resultados obtenidos en las mismas condiciones que los datos obtenidos en la presente investigación, siendo estas de porcentaje de arena y temperaturas evaluadas, los resultados detallados obtenidos en las investigaciones se pueden ver en el anexo 1.

Haoyang Su y col. en su investigación “Mechanical properties of geopolymers concrete exposed to dynamic compression under elevated temperatures” (Propiedades mecánicas del mortero geopolimérico expuesto a compresión dinámica bajo temperaturas elevadas), estudiaron concreto geopolimérico con diferentes proporciones de arena,

escoria, ceniza volante, piedra caliza y como solución activante utilizaron silicato de sodio e hidróxido de sodio. Una vez elaborado su producto analizaron su resistencia a la compresión uniaxial a diferentes temperaturas.

Tabla 09.

*Comparación del mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero con un mortero geopolimérico elaborado a base de escoria, ceniza volante y piedra caliza.*

<b>Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)</b>		
<b>Temperatura</b>	<b>Mortero geopolimérico R37.5</b>	<b>Otro</b>
<b>15°C - 22°C</b>	26.71	88.6
<b>400°C</b>	60.48	107.3
<b>600°C</b>	4.7	95.9

La comparación realizada en la tabla 09 se realizó debido a que el autor utiliza una proporción aluminosilicato/arena de 60% el cual es similar al ratio de 60% utilizado en la mezcla R37.5 de mortero geopolimérico es por esa razón que en la tabla 08 se presentan los resultados de esta mezcla comparados con los datos del autor. La mezcla analizada por el autor a temperatura ambiente supera a nuestra similar en 231%, a 400°C supera al mejor resultado de nuestra investigación en 77% y el mejor resultado a 600°C es aproximadamente 20 veces mayor a la presente investigación. Esto se debe principalmente a la diferencia en el material utilizado, nos podemos dar cuenta que el residuo inorgánico minero tiene una gran diferencia con la ceniza volante.

Omar A. Abdulkareem y col. realizaron una investigación en el año 2013, titulada “Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete” (Efectos de temperaturas elevadas en el comportamiento térmico y desenvolvimiento mecánico de pasta geopolimérica, mortero y concreto ligero fabricados a partir de ceniza volante) en la que elaboraron tres tipos de mezcla, una pasta de geopolímero la cual solo constaba de solución activante y ceniza, mortero el cual tenía a parte de los componentes anteriores arena fina y uno último el cual poseía un agregado liviano. La solución activante constaba de silicato de sodio e hidróxido de sodio.

Tabla 10.

*Comparación del mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero con un mortero geopolimérico elaborado a base de ceniza volante.*

<b>Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)</b>		
<b>Temperatura</b>	<b>Mortero geopolimérico R25</b>	<b>Otro</b>
<b>400°C</b>	57.84	39
<b>600°C</b>	6.83	28

La comparación realizada con el presente autor se realizó debido a que este utilizó un ratio de aluminosilicato/arena de 40% el cual es semejante al ratio 33% que es utilizado en la mezcla R25, por esta razón los datos de la tabla 10 son de la mezcla R25 comparados con los resultados del autor. A la temperatura de 400°C el mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero supera la resistencia a la compresión del mortero geopolimérico elaborado por el autor en 33%. Lo contrario sucede a 600°C ya que aquí el mortero geopolimérico del autor supera al mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero en 310%.

Ernesto J. Guades realizó el año 2016 una investigación titulada “Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymer mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio” (Investigación experimental de las fuerzas de compresión y tensión de mortero geopolimérico: El efecto del ratio arena/ceniza volante) comparando diferentes ratios de arena/ceniza volante, para determinar cuál de los evaluados tenían mayor resistencia. El autor utilizó una solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio como solución activadora. La evaluación que el autor realizó a sus mezclas fue únicamente a temperatura ambiente.

Tabla 11.

*Comparación del mortero geopolimérico elaborado a partir de residuo inorgánico minero con un mortero geopolimérico elaborado a base de ceniza volante.*

<b>Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)</b>		
<b>Ratio aluminosilicato/arena</b>	<b>Mortero geopolimérico</b>	<b>Otro</b>
3.33	49.27	11.48
1.67	26.71	10.84

Los datos que se compararon entre ambas investigaciones fueron únicamente los de los ratios aluminosilicato/arena de 3.33 y 1.67 que son similares a las mezclas R75 y R62.5 respectivamente ya que los demás ratios de aluminosilicato/arena evaluados en la investigación del autor no fueron evaluados en la presente investigación. En la tabla 11 se presentan los resultados a temperatura ambiente de las mezclas R75 y R62.5 con sus semejantes de la investigación del autor mencionado. Al comparar los mejores resultados obtenidos a temperatura ambiente podemos ver que el mortero geopolimérico elaborado en la presente investigación supera ampliamente en 297% al material geopolimérico elaborado por el autor.

### **8.3.- Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional según la norma NTP 366.610**

Esta comparación se llevó a cabo entre los datos obtenidos del mortero geopolimérico y la norma NTP 399.610, la cual pertenece a las unidades de albañilería, titulada “Especificación normalizada de morteros” se aplica en la elaboración de morteros destinados a obras de albañilería. En esta norma se presenta la resistencia del mortero elaborado a base de cemento, así como también aquel que tiene agregados de cal y de cemento de albañilería.

La especificación de las propiedades del mortero de cemento se presenta en la tabla 12.

Tabla 12.

*Resistencia de mortero convencional según NTP 399.610*

*Fuente: Norma técnica peruana 399.610*

<b>Mortero</b>	<b>Tipo</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>
<b>Mortero Cemento</b>	M	17.2
	S	12.4
	N	5.2
	O	2.4

En la tabla 12 se puede apreciar la resistencia a la fuerza de compresión de 4 tipos de mortero de cemento distintos. Los 4 tipos de mortero poseen proporciones distintas de sus materiales (arena y cemento) y están divididos de acuerdo a su resistencia. Las pruebas de compresión que obtuvieron estos resultados fueron realizadas a temperatura ambiente y en el laboratorio.

El mejor resultado obtenido en el mortero geopolimérico a temperatura ambiente fue de 49.27 MPa de la mezcla R25. Como se puede ver en la tabla 12 el mejor resultado del mortero según la norma es 17.2 MPa, este dato comparado con los 49.27 MPa del mortero geopolimérico se puede ver que los resultados del mortero de cemento son bastante bajos en comparación con el producto elaborado en la presente investigación, tanto que la resistencia a la compresión de nuestro mortero geopolimérico supera al mejor mortero convencional en 186%.

#### **8.4.- Comparación entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional en base a aspectos de importancia social**

En el siguiente cuadro comparativo se tomarán en cuenta factores de importancia social como son: el impacto ambiental de ambos productos, el costo de fabricación y complejidad en la fabricación de los productos.

Tabla 13.

*Comparación en base a factores de importancia social entre el mortero geopolimérico y el mortero convencional*

Factores	Peso relativo (%)	Calificación	
		Mortero geopolimérico	Mortero convencional
<b>Impacto ambiental</b>	50	8	2
<b>Costos de fabricación</b>	30	2	9
<b>Complejidad de fabricación</b>	20	5	8
	<b>Puntuación total</b>	5.6	5.3

En cuanto al primer factor, impacto ambiental, se determinó esas calificaciones debido a que el mortero geopolimérico no solo contribuye a la disminución de las emisiones de dióxido de carbono al no usar cemento Portland sino que también le da un uso al residuo inorgánico minero el cual hasta el momento no tiene ninguno y su disposición resulta

contaminante para las fuentes de agua y también para las tierras agrícolas cercanas a la zona en la que se almacena. Por el contrario el mortero convencional emite gran cantidad de dióxido de carbono durante su proceso de fabricación. Se sabe que para fabricar el clinker necesario para el cemento se utilizan hornos que llegan hasta los 1400°C y para generar esta temperatura para la producción de una tonelada de cemento Portland se necesitan producir 100kWh de energía la cual es generada por combustibles fósiles y por cada kwh de energía producida se emiten entre 650 y 850g de dióxido de carbono (dependiendo del combustible utilizado); quiere decir que para producir 1 tonelada de cemento se emiten entre 65 y 85kg de dióxido de carbono. Por otro lado para fabricar el cemento Portland se utiliza cal ( $\text{CaCO}_3$ ) de la cual solo se necesita el calcio, por esta razón se calienta la cal separado la cal viva ( $\text{CaO}$ ) del dióxido de carbono emitiéndolo al ambiente (por cada kg de cal se producen aproximadamente 500g de  $\text{CO}_2$ ). Y por último para eliminar los desechos de la fabricación del cemento estos se incineran emitiendo también dióxido de carbono. Por las razones explicadas se dice que por cada tonelada de dióxido de carbono se emiten al ambiente aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono. (Ávila Arrastía, 2010)

En cuanto a los costos de fabricación se presenta la siguiente tabla en la cual se muestran los costos relacionados a la fabricación de 10 kg de producto para ambos casos:

Tabla 14.

*Costo de las materias primas para la fabricación de ambos tipos de mortero*

<b>Materiales</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo</b>
Hidróxido de sodio	Kg	S/. 76.00
Relave minero	Kg	S/. 8.00
Agua	m <sup>3</sup>	S/. 4.50
Arena	m <sup>3</sup>	S/. 45.00
Cemento Portland	Kg	S/. 0.52

Fuente: Diproquim, Cepromet, Sedapar y Supermix



Tabla 15.  
*Cantidad y costo de las materias primas para la fabricación de ambos tipos de mortero*

<b>Materiales</b>	<b>Unidades</b>	<b>Mortero geopolimérico R37.5</b>		<b>Mortero convencional</b>	
Hidróxido de sodio	kg	1.8			
Relave minero	kg	3.57			
Agua	L	5		7	
Arena	kg	6.43		6.44	
Cemento Portland	kg			3.57	
	<b>Costo unitario (unidades anteriores)</b>	<b>Costo mortero geopolimérico R37.5</b>		<b>Costo mortero convencional</b>	
Hidróxido de sodio	S/ 76.0000	S/ 136.8000			
Relave minero	S/ 8.0000	S/ 28.5600			
Agua	S/ 0.0045	S/ 0.0225		S/ 0.0315	
Arena	S/ 0.0468	S/ 0.3014		S/ 0.3014	
Cemento Portland	S/ 0.5200			S/ 1.8564	
<b>Costo total para 10kg de mortero</b>		S/ 165.6839		S/ 2.1893	

En cuanto al tercer factor, complejidad de fabricación, como también ya se vio en capítulos anteriores, el mortero geopolimérico requiere de cuidados especiales en el manejo del hidróxido de sodio y del residuo inorgánico minero ya que serían ambos perjudiciales para la salud de las personas que los manipulen y también debido a que los materiales al ser costosos requieren de especial cuidado para evitar su desperdicio, a su vez se tienen que hacer dos mezclas para obtener el producto y el fraguado requiere de condiciones de temperatura específicas. Por el contrario con el cemento Portland convencional el proceso es más sencillo ya que solamente se deberá realizar la mezcla de los componentes en una mezcladora durante un tiempo determinado para tener a disposición el producto final elaborado y su fraguado no necesita mayor cuidado únicamente estar pendiente de mojar el mortero cada cierto tiempo para asegurar un buen fraguado de la mezcla.

De esta manera podemos concluir que el mortero geopolimérico tiene en sí mismo la característica principal que lo distingue del mortero convencional y es que su impacto ambiental es mucho menor y esta es la característica que le permite tener un mejor puntaje en el cuadro comparativo a pesar de ser más complicado y más costoso que el mortero convencional.

## **9.- Resumen de la operacionalización de las variables del modelo conceptual**

Las bases de datos Science Direct y Scopus fueron de gran utilidad para recolectar la información explicada anteriormente como fuente secundaria (investigaciones similares). Una vez fabricados los morteros geopoliméricos, y a través del software de adquisición de datos SCM3000, se pudo determinar la resistencia a la compresión uniaxial de los morteros geopoliméricos (fuente primaria de información). De esta manera y mediante el proceso definido podremos validar la hipótesis establecida.

## **10.- Limitaciones de la investigación**

- El prototipo de la máquina utilizada para medir la resistencia a la fuerza de compresión a una temperatura determinada es único en su especie ya que los pistones de la máquina original fueron cambiados por pistones de alúmina un material que resiste altas temperaturas, así como también un horno que fue acoplado con su respectivo sistema de enfriamiento. Al ser este un prototipo único en su especie, necesita mucho mantenimiento y cambios constantes de piezas que se degradan rápidamente con el calor, por esta razón la máquina necesita estar el suficiente tiempo inutilizada para poder realizar estos cambios. Por la razón anteriormente explicada y debido a que para cada prueba realizada a temperatura se necesita de tiempo de calentamiento, tiempo de estabilidad de la temperatura, tiempo de realización de la prueba y tiempo posterior de enfriamiento, solo se realizó una prueba por día; es debido a esto que solo se obtuvieron 2 resultados por tipo de mezcla.

## Capítulo IV

### Análisis de Resultados

#### 1.- Análisis Estadístico

Para realizar el análisis estadístico de las mezclas elaboradas y probadas en el laboratorio, se determinó realizar un análisis estadístico exploratorio en base a resultados de estadísticos descriptivos, una prueba de análisis de varianza (ANOVA) y reforzarla con una prueba de Tukey para obtener mejores resultados con los cuales se pueda elaborar conclusiones que sean determinantes para la investigación. Por esta razón se desarrollaron dos formas en las pruebas ANOVA y Tukey, una manual con las fórmulas que se explicarán en los siguientes puntos, y otra en el software Minitab donde se comprobaron los resultados y se reforzó la información.

#### 2.- Análisis estadístico previo

El análisis previo se realizó en los grupos de cada tratamiento, quiere decir que para cada temperatura se realizó este tipo de análisis.

Tabla 16.

*Análisis estadístico previo para las mezclas tratadas a 400°C*

Mezcla	Media	Error estándar de la media	Desviación estándar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
<b>R25</b>	49.10	3.74	7.47	41.70	42.33	48.43	56.54	57.84
<b>R37.5</b>	59.22	1.45	2.91	55.43	56.25	59.60	61.81	62.25
<b>R50</b>	54.73	1.94	3.88	49.57	50.66	55.68	57.84	57.98
<b>R62.5</b>	48.63	2.01	4.03	43.81	44.74	48.66	52.50	53.41
<b>R75</b>	34.86	1.24	2.47	31.76	32.35	35.15	37.08	37.38

Tabla 17.

*Análisis estadístico previo para las mezclas tratadas a 500°C*

Mezcla	Media	Error estándar de la media	Desviación estándar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
<b>R25</b>	53.76	2.18	4.37	49.38	49.76	53.48	58.05	58.72
<b>R37.5</b>	72.51	0.793	1.585	70.290	70.85	72.931	73.76	73.902
<b>R50</b>	62.03	2.09	4.18	57.35	57.95	62.29	65.86	66.19
<b>R62.5</b>	50.84	1.58	3.16	48.08	48.12	50.46	53.93	54.35
<b>R75</b>	37.89	3.80	7.59	30.51	31.09	37.07	45.50	46.91

Tabla 18.

*Análisis estadístico previo para las mezclas tratadas a 600°C*

Mezcla	Media	Error estándar de la media	Desviación estándar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
<b>R25</b>	5.37	0.54	1.08	4.26	4.44	5.19	6.47	6.83
<b>R37.5</b>	4.31	0.34	0.68	3.52	3.64	4.35	4.95	5.03
<b>R50</b>	6.25	0.08	0.15	6.09	6.12	6.22	6.40	6.46
<b>R62.5</b>	6.98	0.09	0.18	6.79	6.83	6.96	7.16	7.22
<b>R75</b>	9.24	0.33	0.65	8.36	8.55	9.39	9.77	9.81

### 3.- El análisis de varianza

El análisis de varianza o ANOVA es una prueba de hipótesis que se usa para comparar si las medias de dos o más poblaciones son iguales entre sí o no lo son. Se basa en que el procedimiento utiliza las varianzas para de esta manera poder determinar si las medias difieren entre sí. El procedimiento se lleva a cabo comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como una forma para determinar si los grupos son parte de una población más grande o si son parte de poblaciones separadas con características diferentes. (Minitab, 2016)

ANOVA se realizó ya que al ser esta una prueba de hipótesis, queremos saber si los resultados de los cinco tipos de mezclas elaborados presentan grandes diferencias entre sí en las 4 temperaturas a las que se realizaron las pruebas o si los resultados son similares y no hay gran diferencia entre los resultados encontrados.

La prueba de ANOVA tiene un requisito primordial y es que esta funciona si y solo si los datos utilizados siguen una distribución normal. Por esta razón, a continuación presentaremos las gráficas de una prueba de normalidad realizada a cada grupo de datos para determinar si cumplen con el requisito. La prueba de normalidad utilizada fue la Anderson-Darling, la cual otorga un valor “p”, el cual si fuese menor al nivel de significancia que se está trabajando (en este caso 0.05), los datos no seguirían una distribución normal. Quiere decir que para la presente investigación es importante que el valor “p” sea mayor al nivel de significancia 0.05 para poder realizar la prueba de ANOVA. (Minitab, 2016) Los siguientes gráficos fueron obtenidos mediante el software Minitab.

### 3.1.- Pruebas de normalidad para todas las mezclas en el tratamiento a 400°C

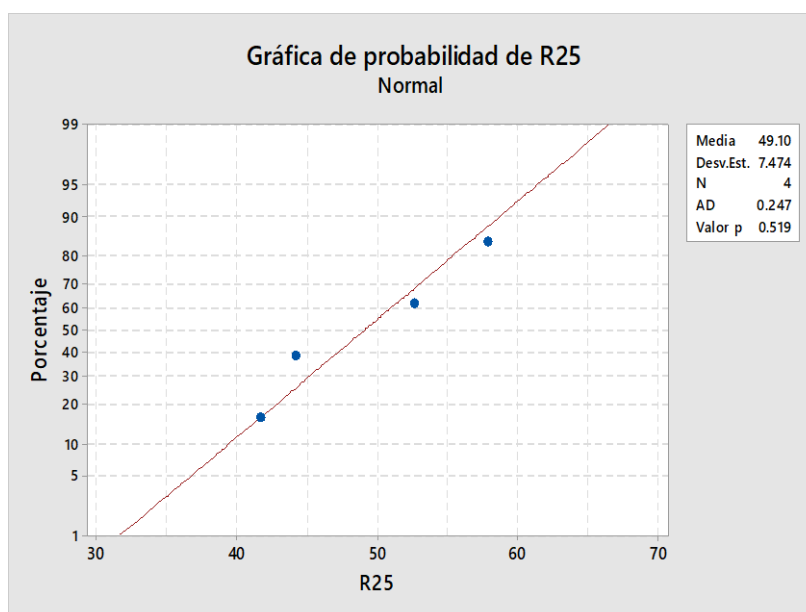


Figura 61. Prueba de normalidad para la mezcla R25 en el tratamiento a 400°C

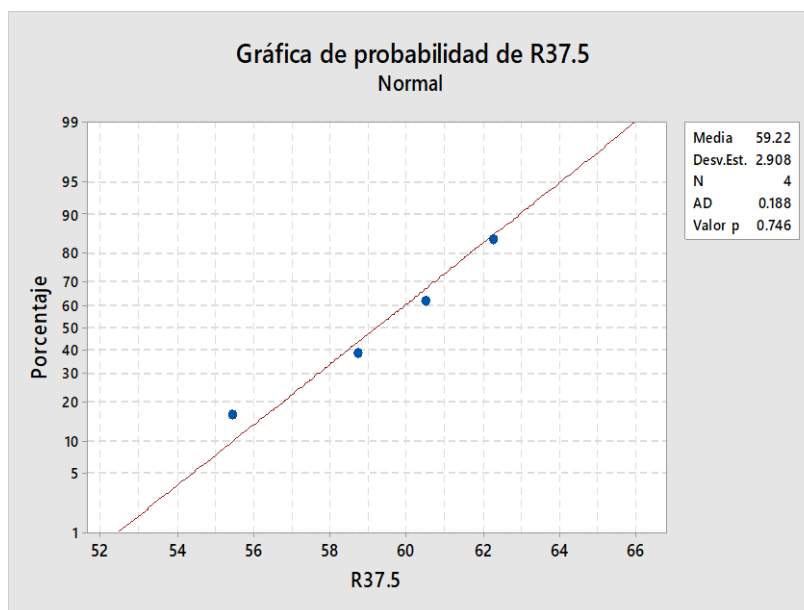


Figura 62. Prueba de normalidad para la mezcla R37.5 en el tratamiento a 400°C

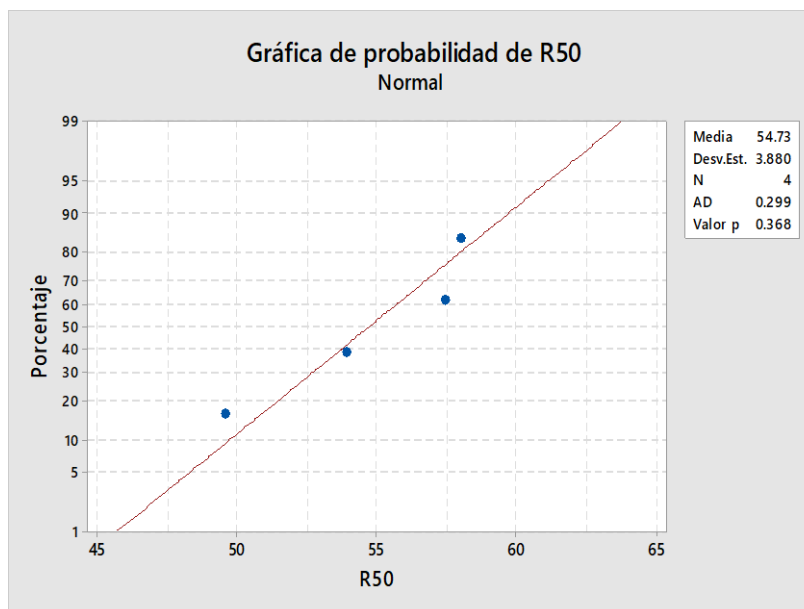


Figura 63. Prueba de normalidad para la mezcla R50 en el tratamiento a 400°C

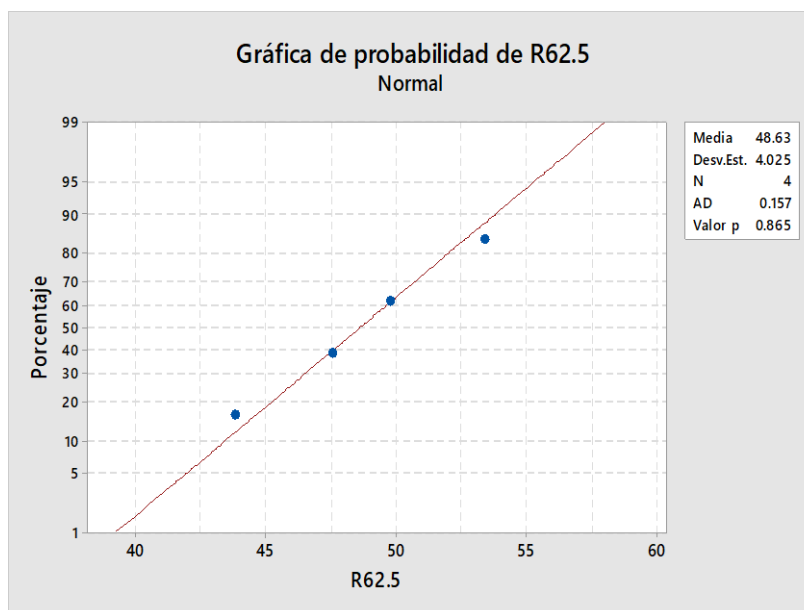


Figura 64. Prueba de normalidad para la mezcla R62.5 en el tratamiento a 400°C

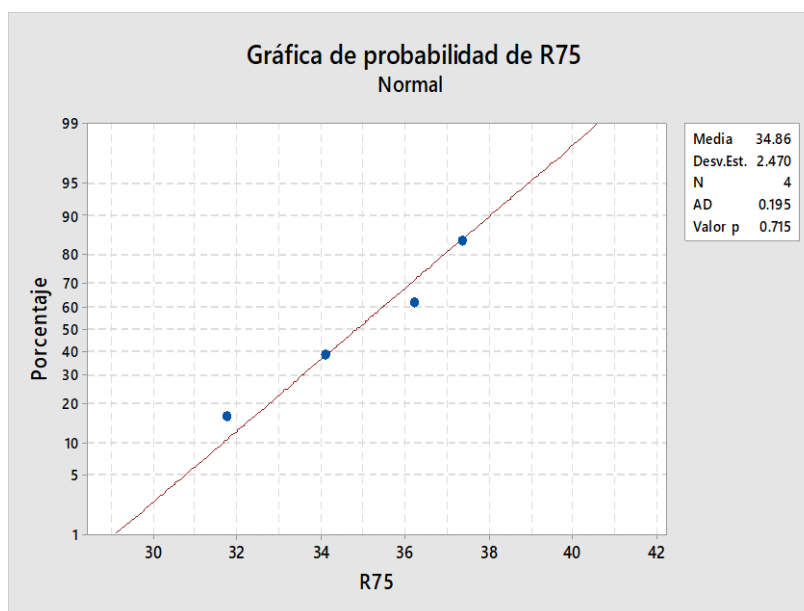


Figura 65. Prueba de normalidad para la mezcla R75 en el tratamiento a 400°C

### 3.2.- Pruebas de normalidad para todas las mezclas en el tratamiento a 500°C

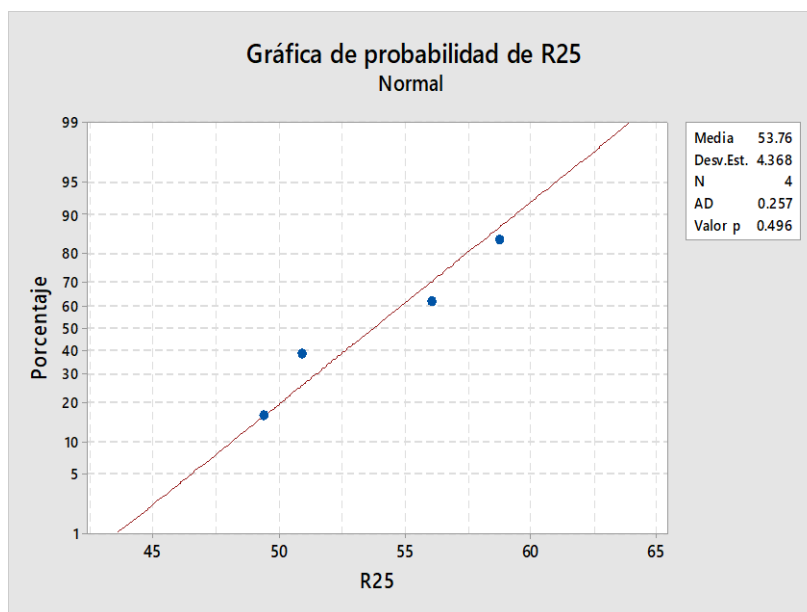


Figura 66. Prueba de normalidad para la mezcla R25 en el tratamiento a 500°C

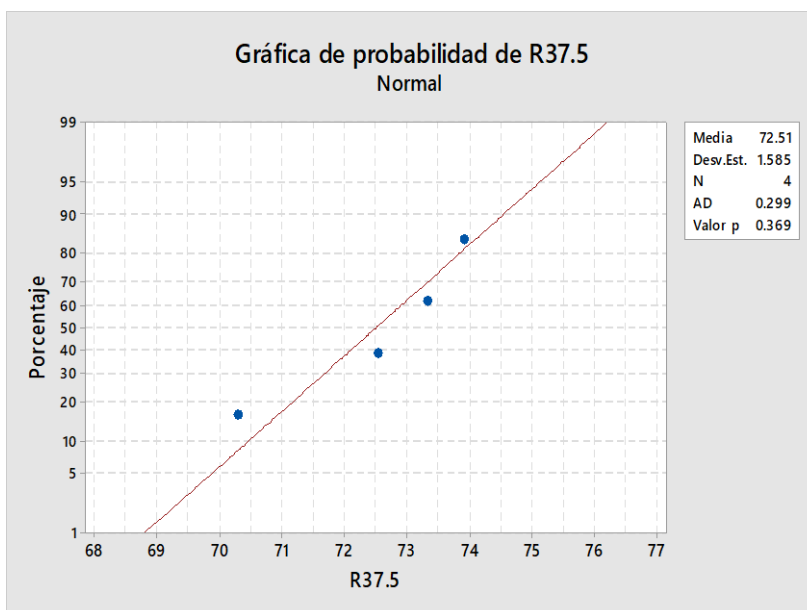


Figura 67. Prueba de normalidad para la mezcla R37.5 en el tratamiento a 500°C



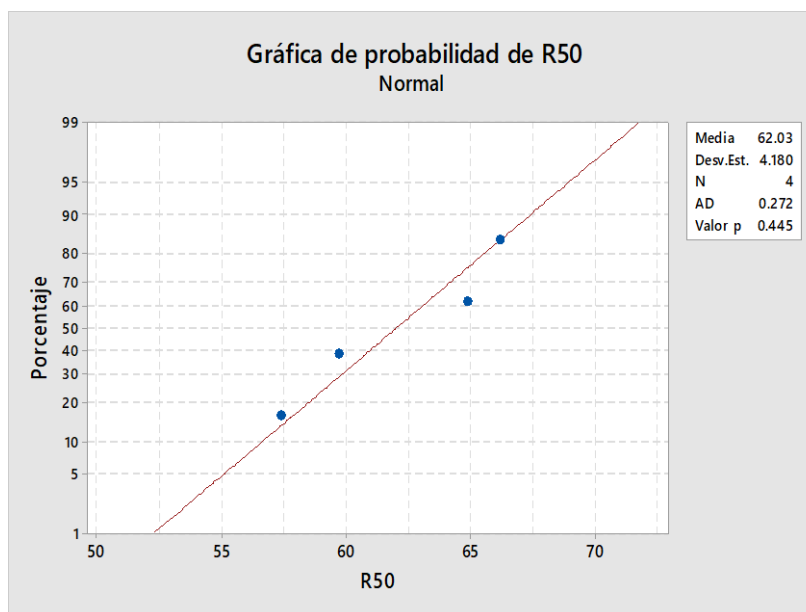


Figura 68. Prueba de normalidad para la mezcla R50 en el tratamiento a 500°C

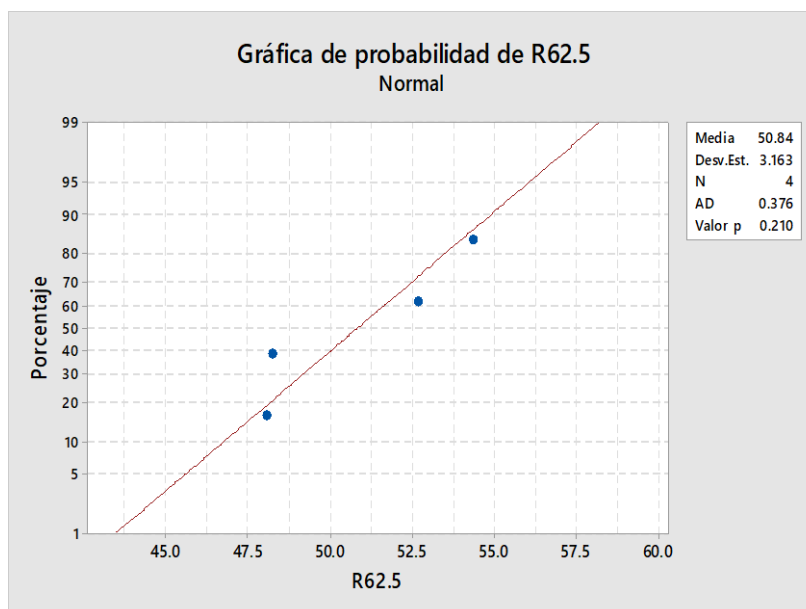


Figura 69. Prueba de normalidad para la mezcla R62.5 en el tratamiento a 500°C

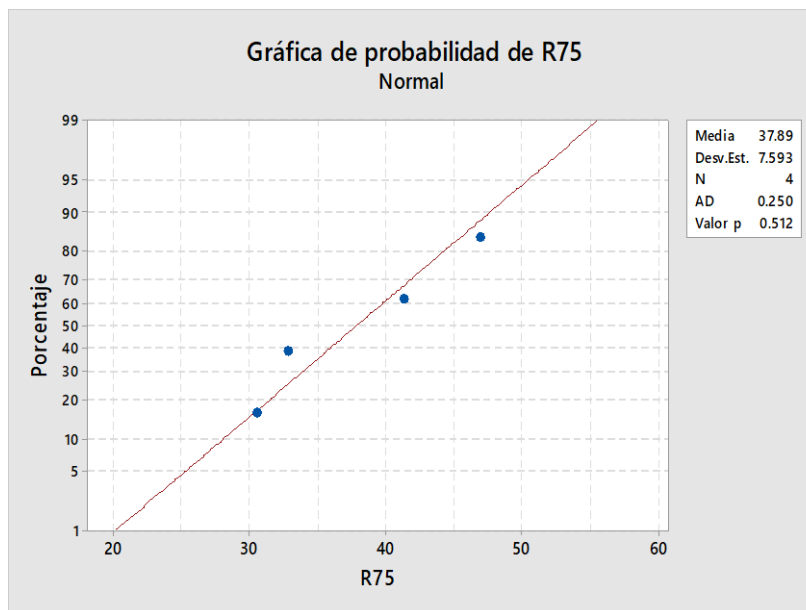


Figura 70. Prueba de normalidad para la mezcla R75 en el tratamiento a 500°C

### 3.3.- Pruebas de normalidad para todas las mezclas en el tratamiento a 600°C

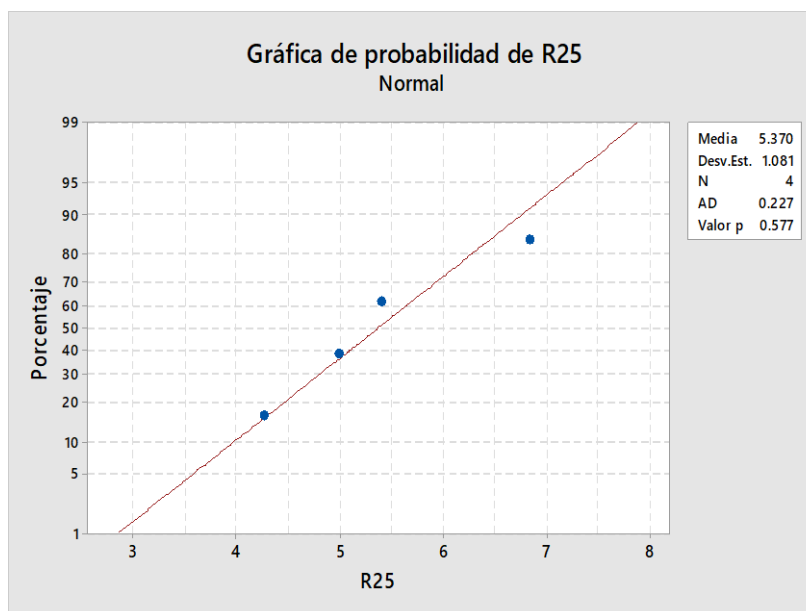


Figura 71. Prueba de normalidad para la mezcla R25 en el tratamiento a 600°C

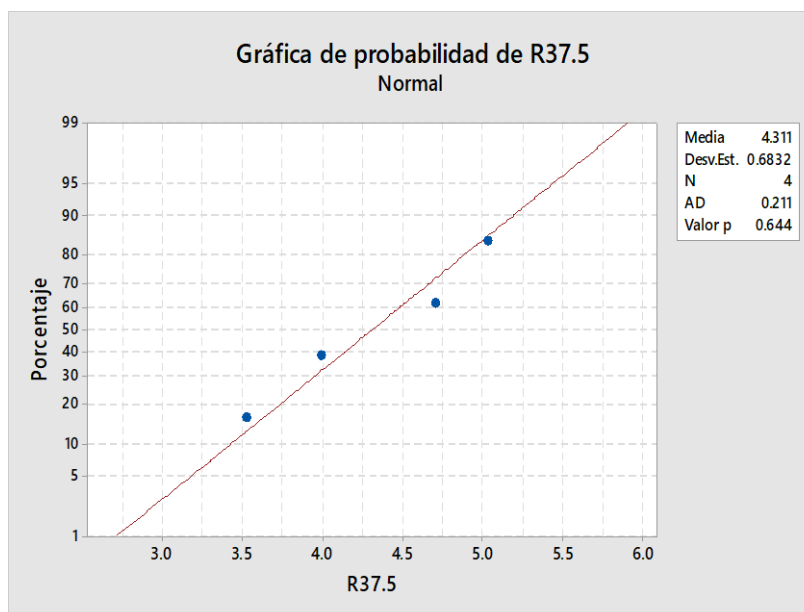


Figura 72. Prueba de normalidad para la mezcla R37.5 en el tratamiento a 600°C

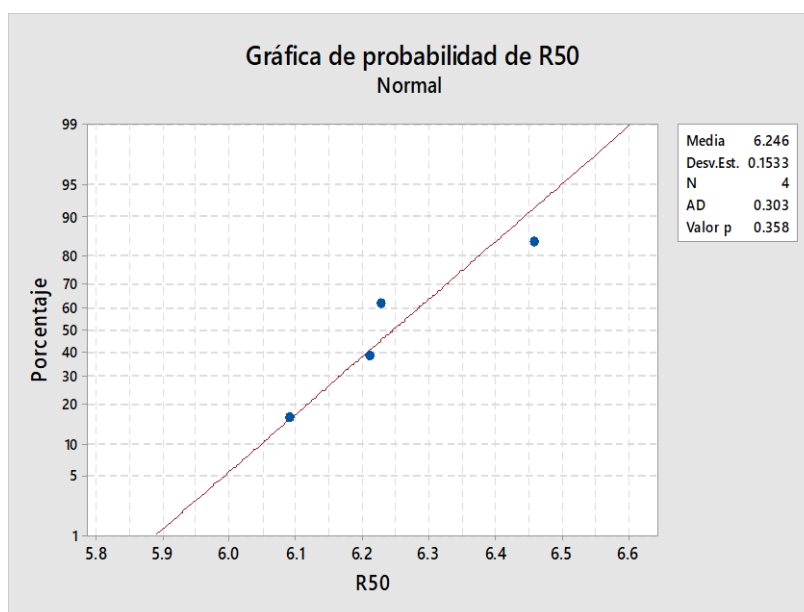


Figura 73. Prueba de normalidad para la mezcla R50 en el tratamiento a 600°C

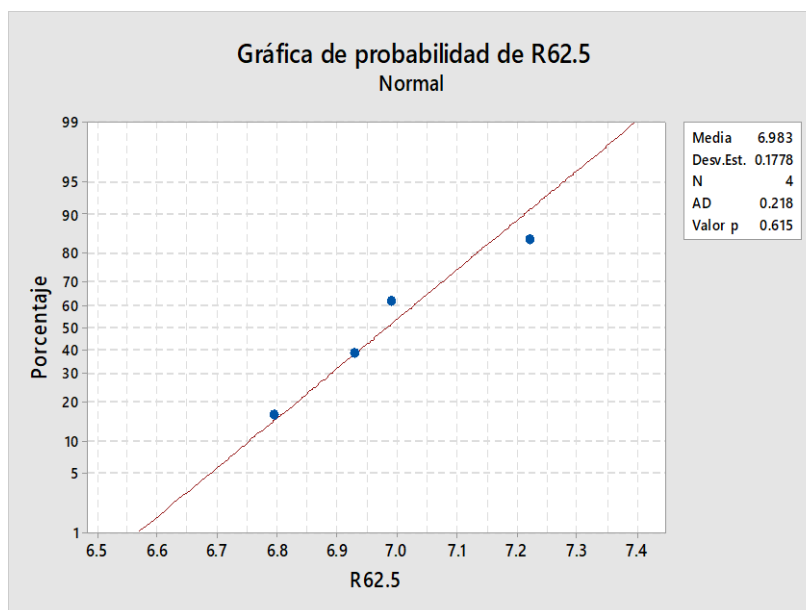


Figura 74. Prueba de normalidad para la mezcla R62.5 en el tratamiento a 600°C

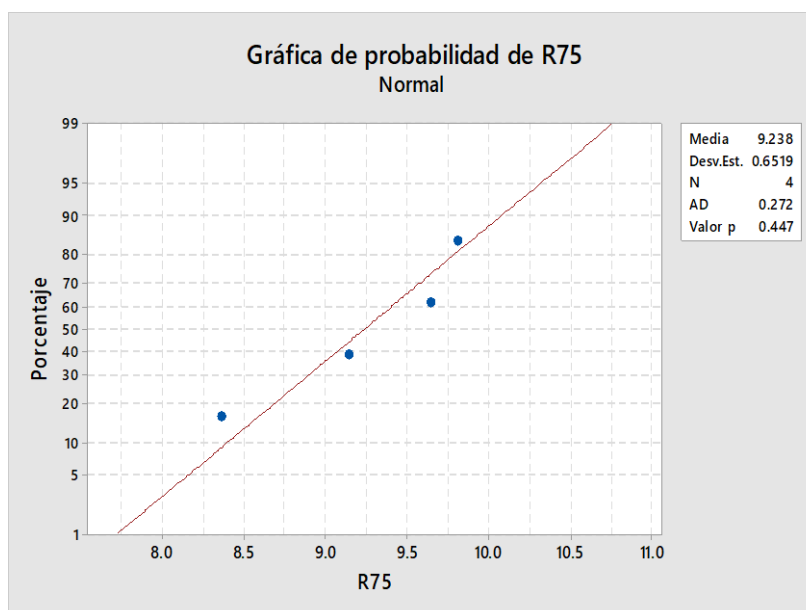


Figura 75. Prueba de normalidad para la mezcla R75 en el tratamiento a 600°C

Como se puede ver de la figura 61 a la figura 75, en todos los caso el valor “p” es mayor al grado de significancia 0.05, esto quiere decir que los datos obtenidos de los tres tratamientos (400°C, 500°C y 600°C) de los cinco tipos de muestras (R25, R37.5, R50, R62.5 y R75) tienen una distribución normal y por lo tanto se puede aplicar el análisis ANOVA.

#### 4.- La prueba de Tukey

La prueba de Tukey es una prueba de medias que complementa al ANOVA. Si bien en el ANOVA se determina si las medias de diferentes poblaciones poseen o no diferencia significativa, el objetivo al realizar una prueba estadística es el de determinar cuál de las poblaciones obtiene mejores resultados, es por esta razón que se utiliza la prueba de Tukey ya que ANOVA por sí misma no nos da ese tipo de resultados.

La prueba de tukey fue realizada como complemento para saber entre que datos hubo diferencia y entre cuáles no. De esta manera podemos obtener información más exacta de los datos de las pruebas para poder tomar decisiones.

A continuación se presentan los pasos seguidos para realizar la prueba ANOVA:

Tabla 19.

*Fórmulas para análisis ANOVA*

<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>
<b>Mezclas</b>	k-1	SSM	MSM = SSM/(k-1)	MSM/MSE
<b>Error</b>	N-k	SSE	MSE = SSE/(N-k)	
<b>Total</b>	N-1	SST		

“k” es la cantidad de tipos de mezclas elaboradas.

“N” es el número total de tratamientos realizados.

Suma de cuadrados de las mezclas,

$$SSM = \frac{\sum_{i=1}^k y_i^2}{n} - \frac{y^2}{N} \quad (\text{ecuación 4})$$

Suma de cuadrados del error,

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_j^2}{n} \quad (\text{ecuación 5})$$

Suma de cuadrados totales,

$$SST = SSM + SSE \quad (\text{ecuación 6})$$

“n” es el número de tratamientos por tipo de mezcla.

“y<sub>i</sub>” es el dato por tratamiento.

“y<sub>j</sub>” es la sumatoria total de los “y<sub>ij</sub>”

“y<sub>ij</sub>” es la suma de tratamientos por tipo de mezcla.

Para realizar ANOVA se definió la siguiente hipótesis, la cual se repetirá en todas las pruebas que se realicen en la presente tesis, la única diferencia estará en que cada prueba será para una temperatura distinta:

Tabla 20.

*Hipótesis y nivel de significancia para ANOVA*

<b>Hipótesis nula</b>	Todas las medias son iguales
<b>Hipótesis alterna</b>	No todas las medias son iguales
<b>Nivel de significancia</b>	$\alpha = 0.05$

$$\begin{cases} H_0, u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 \\ H_1, \exists i, j; i \neq j; u_1 \neq u_2 \end{cases}$$

A continuación presentaremos el ANOVA realizado para los tratamientos térmicos a 400°C, 500°C y 600°C efectuados en los cinco tipos de mezcla fabricados.

Tabla 21.

*Resumen de los resultados de las cinco mezclas a 400 °C*

<b>Resistencia a 400 °C</b>						
	<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>	
	57.84	60.48	53.92	43.81	37.38	
	41.70	58.72	57.43	53.41	34.10	
	52.65	55.43	49.57	47.54	36.20	
	44.21	62.25	57.98	49.77	31.76	<b>Gran Total</b>
<b>Suma</b>	<b>196.40</b>	<b>236.88</b>	<b>218.90</b>	<b>194.53</b>	<b>139.44</b>	<b>986.14</b>

Tabla 22.

*Fórmulas de ANOVA aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 400 °C*

<b>Fuente de Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>
<b>Mezclas</b>	4	1347.4	336.86	16.57
<b>Error</b>	15	305.0	20.33	
<b>Total</b>	19	1652.5		

Luego de realizar la tabla 14 es necesario buscar en las tablas de la distribución de Fisher el valor de “F” para poder comparar con el dato “F” calculado en la tabla 14. Se obtiene el dato “F” de la tabla buscando con los grados de libertad de las mezclas de manera horizontal y con los grados de libertad del error de manera vertical. Para el presente análisis estadístico se utilizó un nivel de confianza de 95%, el dato “F” de la tabla es el siguiente:

Tabla 23.

*Dato “F” para 95% de confianza obtenido de la tabla de Fisher*

<b>F-Tabla</b>	3.478
----------------	-------

Al comparar el dato “F” de tabla (tabla 18) con el dato “F” calculado (tabla 17) nos damos cuenta de que el dato de tabla es menor al dato calculado, por ello se rechaza la

hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa indicando que las medias de los cinco tipos de mezclas poseen diferencia. Por ello después de realizar la prueba ANOVA a los cinco grupos de mezclas sometidas a 400°C podemos concluir que poseen diferencia significativa entre ellos. Debido a la diferencia existente entre los resultados se realizó la prueba de tukey para poder determinar entre que grupos existe diferencia. Mediante una prueba de tukey se determinará entre que datos existe diferencia significativa.

Para realizar la prueba de tukey se necesitan los siguientes datos

- Multiplicador, el cual se encuentra en las tablas de los valores críticos para la prueba de tukey; el dato se encuentra buscando verticalmente el número de grupos y horizontalmente los grados de libertad del error.
- Cuadrado medio del error, “MSE”, dato que viene del análisis de varianza realizado anteriormente.
- Número de tratamientos por tipo de mezcla, “n”, el cuál es el número de pruebas realizadas a cada grupo diferente.
- Diferencia honestamente significativa, “HSD” por sus siglas en inglés. Para calcular este dato se utiliza la siguiente fórmula.

$$\text{HSD} = \text{Multiplicador} \times \sqrt{\frac{\text{MSE}}{n}} \quad (\text{ecuación 7})$$

Tabla 24.

*Fórmulas de prueba de Tukey aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 400 °C*

<b>HSD</b>	9.85
<b>Multiplicador</b>	4.37
<b>MSE</b>	20.33
<b>N</b>	4

Luego de haber encontrado los datos anteriores presentados en la tabla 16, necesitamos el promedio de los tratamientos efectuados por grupo.



Tabla 25.

*Promedio de los resultados obtenidos a las cinco tipos de mezclas a 400 °C*

<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>
49.10	59.22	54.73	48.63	34.86

Luego se colocaron las diferencias entre los promedios anteriores.

Tabla 26.

*Diferencia de los promedios obtenidos de los cinco tipos de mezclas a 400 °C*

	<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>
<b>R25</b>		-10.12	-5.63	0.47	14.24
<b>R37.5</b>			4.49	10.59	24.36
<b>R50</b>				6.09	19.87
<b>R62.5</b>					13.77
<b>R75</b>					

Inmediatamente después se compara la diferencia honestamente significativa “HSD” con los datos de la tabla 19 y se eligen los que sean mayores sin importar el signo que tengan. En este caso se eligieron los datos 23.86 y 19.94 porque son mayores a 15.43 que es el “HSD”, esto significa que la mezcla R75 posee diferencia significativa con las mezclas R37.5 y R50 a la temperatura de 400 °C. Si revisamos la tabla 05 nos podemos dar cuenta de que las mezclas R37.5 y R50 poseen datos superiores a los de R75; entonces a la temperatura de 400°C los mejores resultados los tienen las mezclas R37.5 y R50.

Tabla 27.

*Cuadro comparativo de Minitab*

<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
<b>R37.5</b>	4	59.22	A	
<b>R50</b>	4	54.73	A	B
<b>R25</b>	4	49.10	B	
<b>R62.5</b>	4	48.63	B	
<b>R75</b>	4	34.86	C	

Los datos fueron tratados también en el programa Minitab, el cual otorga como conclusión de tukey la tabla 19. En esta tabla se puede ver en la última columna (agrupación) que hay letras, estas letras son las que distinguen a las muestras que poseen diferencia significativa una de otras, aquellas que poseen letras iguales no poseen diferencia significativa y las que poseen letras diferentes entre ellas si poseen diferencia significativa.

Los resultados estadísticos para la temperatura de 500 °C se presentan a continuación:

Tabla 28.

*Resumen de los resultados de las cinco mezclas a 500 °C*

<b>Resistencia a 500°</b>						
	<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>	
	58.72	73.90	57.35	48.08	46.91	
	50.90	73.33	64.85	52.67	32.83	
	49.38	72.53	66.19	54.35	41.30	
	56.06	70.29	59.73	48.25	30.51	<b>Gran Total</b>
<b>Suma</b>	<b>215.06</b>	<b>290.05</b>	<b>248.13</b>	<b>203.35</b>	<b>151.55</b>	<b>1108.14</b>

Tabla 29.

*Fórmulas de ANOVA aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 500 °C*

<b>Fuente de Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>
Mezclas	4	2668.1	667.03	31.25
Error	15	320.2	21.34	
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>2988.3</b>		

**F Tabla**

3.478

Aquí la el dato “F” de tabla es el misma que en el caso anterior ya que los grados de libertad para ambas pruebas son los mismos. De igual manera el dato “F” calculado es mayor al dato “F” de tabla, por esta razón se rechaza la hipótesis nula y se acepta la

hipótesis alternativa que los resultados obtenidos de las pruebas a 500 °C poseen una diferencia significativa entre ellos. Mediante la prueba de Tukey se determinará entre que datos existe diferencia.

Para la prueba de Tukey antes explicada, a continuación se presentan los datos calculados para realizarla:

Tabla 30.

*Fórmulas de prueba de Tukey aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 500 °C*

<b>HSD</b>	10.09
<b>Multiplicador</b>	4.37
<b>Mse</b>	21.34
<b>N</b>	4

Tabla 31.

*Promedio de los resultados obtenidos a las cinco tipos de mezclas a 500 °C*

<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>
53.76	72.51	62.03	50.84	37.89

Tabla 32.

*Diferencia de los promedios obtenidos de los cinco tipos de mezclas a 500 °C*

	<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>
<b>R25</b>		-18.75	-8.27	2.93	15.88
<b>R37.5</b>			10.48	21.68	34.63
<b>R50</b>				11.19	24.14
<b>R62.5</b>					12.95
<b>R75</b>					

Inmediatamente después comparamos la diferencia honestamente significativa “HSD” con los datos de la tabla 24 y se eligen los que sean mayores sin importar el signo que tengan. En este caso se eligieron los datos -18.81, 23.24, 14.94, 33.75 y 21.23 porque son mayores a 14.55 que es el “HSD”, esto significa que existe diferencia significativa

entre las mezclas R25 y R37.5, R37.5 y R62.5, y las mezclas R25, R37.5, R50 con la mezcla R75. Ya que la mezcla R75 tiene diferencia con tres de los otros cuatro grupos de mezclas. Podemos concluir que es la que tiene los menores resultados, dato que es confirmado con la tabla 05. La mezcla R37.5 a su vez tiene diferencia con tres grupos debido a que posee los mejores resultados a 500 °C.

Tabla 33.

*Cuadro comparativo de Minitab*

<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
<b>R37.5</b>	4	72.513	A
<b>R50</b>	4	62.03	B
<b>R25</b>	4	53.76	B C
<b>R62.5</b>	4	50.84	C
<b>R75</b>	4	37.89	D

Al igual que en los tratamientos anteriores, los datos fueron procesados en el software Minitab y se obtuvo la tabla anterior en la cual se ve que las mezclas poseen diferencia significativa entre ellas siendo R37.5 la que obtiene la resistencia a la fuerza de compresión más alta, al igual que en el tratamiento a 400°C.

Los resultados estadísticos para la temperatura de 600 °C se presentan a continuación:

Tabla 34.

*Resumen de los resultados de las cinco mezclas a 600 °C*

<b>Resistencia a 600°</b>						
	<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>	
	6.83	3.99	6.46	6.93	9.64	
	4.26	4.70	6.23	6.79	8.36	
	4.99	3.52	6.09	7.22	9.81	
	5.40	5.03	6.21	6.99	9.14	<b>Gran Total</b>
<b>Suma</b>	<b>21.48</b>	<b>17.24</b>	<b>24.98</b>	<b>27.93</b>	<b>36.95</b>	<b>128.59</b>

Tabla 35.

*Fórmulas de ANOVA aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 600 °C*

<b>Fuente de Variación</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F</b>
Mezclas	4	55.364	13.8411	32.70
Error	15	6.349	0.4233	
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>61.714</b>		

<b>F-Tabla</b>	3.478
----------------	-------

Igual que en los casos anteriores el dato “F” de tabla es el mismo ya que los grados de libertad para las pruebas realizadas son los mismos. En este caso el dato “F” calculado es mayor al dato “F” de tabla, por esta razón se rechaza la hipótesis nula, de manera que los resultados obtenidos de las pruebas a 600°C poseen una diferencia significativa entre ellos. Mediante la prueba de Tukey se determinará entre que datos existe diferencia. Para la prueba de Tukey antes explicada, a continuación se presentan los datos calculados para realizarla:

Tabla 36.

*Fórmulas de prueba de Tukey aplicadas a los datos de los cinco tipos de mezclas a 600 °C*

<b>HSD</b>	1.42
<b>Multiplicador</b>	4.37
<b>Mse</b>	0.42
<b>N</b>	4

Tabla 37.

*Promedio de los resultados obtenidos a las cinco tipos de mezclas a 600 °C*

<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>
5.37	4.31	6.25	6.98	9.24

Tabla 38.

*Diferencia de promedios obtenidos de los cinco tipos de mezclas a 600 °C*

	<b>R25</b>	<b>R37.5</b>	<b>R50</b>	<b>R62.5</b>	<b>R75</b>
<b>R25</b>		1.06	-0.88	-1.61	-3.87
<b>R37.5</b>			-1.94	-2.67	-4.93
<b>R50</b>				-0.74	-2.99
<b>R62.5</b>					-2.25
<b>R75</b>					

Inmediatamente después comparamos la diferencia honestamente significativa “HSD” con los datos de la tabla 29 y se eligen los que sean mayores sin importar el signo que tengan. En este caso se eligieron los datos -2.52, -3.46, -4.65 y -2.66 porque son mayores a 2.36 que es el “HSD”, esto quiere decir que existe diferencia significativa entre las mezclas R37.5 y R62.5, así como también entre R25, R37.5 y R50 con la mezcla R75. En este caso esto significa que el grupo de mezclas R75 tienen los mejores resultados a 600°C, dato que se puede corroborar en la tabla 06.

Tabla 39.

*Cuadro comparativo de Minitab*

<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
<b>R75</b>	4	9.238	A
<b>R62.5</b>	4	6.9834	B
<b>R50</b>	4	6.2462	B C
<b>R25</b>	4	5.370	C D
<b>R37.5</b>	4	4.311	D

Como se vio anteriormente en el presente capítulo, la mezcla R37.5 poseía los mejores resultados cuando se le realizaron las pruebas a las temperaturas intermedias, y esto se ve reflejado en las pruebas estadísticas que se realizaron. Podemos concluir que a las temperaturas de 400 °C y 500 °C la mezcla R37.5 se destaca de las demás cuando se

realiza la prueba y por último que la mezcla R75 tiene los mejores resultados a la temperatura de 600 °C.

El análisis estadístico realizado en el presente capítulo sirvió para determinar cuál de las mezclas elaboradas tiene los mejores resultados en las pruebas realizadas a temperaturas intermedias (400°C, 500°C y 600°C), siendo la mezcla que obtuvo el mejor resultado la R37.5, destacando en las dos primeras temperaturas y R75 a 600°C. En la prueba realizada a temperatura ambiente se obtuvo que la mezcla R25 superó ampliamente a las demás mezclas con 49.27 MPa.

En ingeniería esta estadística sirve para que se lleve a cabo un proyecto de fabricación de mortero a partir de residuos inorgánicos mineros y arena el cual tendría mejores propiedades de resistencia que el mortero convencional como se vio en la comparación realizada en el capítulo anterior. Las mezclas R25, R37.5 y R75 son los mejores morteros fabricados en la presente investigación y cada uno de ellos posee aplicaciones específicas de acuerdo a los resultados obtenidos. La mezcla R25 tendría aplicaciones a temperatura ambiente como de mampostería en edificaciones, para construcciones menores y también para recubrimientos o en su defecto reparaciones menores en edificaciones deterioradas. La mezcla R37.5 podría usarse como recubrimiento de algunos hornos que alcancen los 500°C o para ciertos lugares en plantas productivas los cuales trabajen constantemente con temperaturas para de esta manera poder asegurar el tiempo de vida de la infraestructura y de la misma forma la mezcla R75 hasta temperaturas de 600°C.

Una de las principales metas que posee la presente tesis de investigación es generar un punto de partida en el uso de los residuos inorgánicos mineros como materia prima para la fabricación de materiales de construcción que pueda sustituir a los ya existentes. Otra de las metas que posee esta tesis es la de demostrar la factibilidad del uso de este residuo en la industria de la construcción, lo cual fue comprobado con el análisis estadístico efectuado.

## **Capítulo V**

### **Conclusiones y Recomendaciones**

#### **1.- Conclusiones**

- Se encontró una metodología adecuada para la fabricación de mortero geopolimérico a partir de residuo inorgánico minero la cual consiste en triturar el agregado fino y el residuo inorgánico minero, elaborar una solución activadora la cual es hidróxido de sodio y mezclar los polvos con la solución activadora hasta obtener el mortero geopolimérico. Posteriormente se determinó la matriz de mezclas con el software Statistgraphics Centurion XV y el diseño experimental Simplex Lattice, la cual nos permitió definir las proporciones de materia prima (las cuales se codificaron en las cinco mezclas utilizadas R25, R37.5, R50, R62.5 y R75) que se utilizarían para elaborar el mortero geopolimérico.
- Se determinaron las propiedades estructurales y microestructurales de la materia prima utilizada para la fabricación del geopolímero con la realización de las técnicas de caracterización que se llevaron a cabo. Podemos decir que al tener la arena un grano más grande, otorga mayor resistencia al geopolímero y también debido a la presencia de sílice en ambos materiales es que se forma el geopolímero.
- Se fabricó mortero geopolimérico ecoamigable utilizando un material de desecho y contaminante para las corrientes de agua cercanas a sus depósitos y para el suelo como es el residuo inorgánico minero. Las investigaciones existentes realizadas para fabricar un material que sustituya a los elaborados a partir de cemento Portland utilizan materiales de desecho a los cuales les dan un nuevo uso, ya sea ceniza volante, papel o desechos orgánicos.
- Se caracterizó el mortero geopolimérico mediante pruebas de resistencia a la fuerza de compresión uniaxial en 4 temperaturas diferentes (temperatura



ambiente, 400°C, 500°C y 600°C) realizadas en una máquina multiensayos, estos resultados fueron analizados en gráficas de esfuerzo vs deformación. El geopolímero R25 tiene sus mejores resultados a temperatura ambiente, con lo cual podemos concluir que esta proporción de geopolímero puede ser utilizada en aplicaciones en las que la temperatura no exceda la ambiente, como por ejemplo en estuque, decoraciones en una casa, y demás aplicaciones de mampostería. El geopolímero R37.5 tiene sus mejores resultados a las temperaturas de 400 °C y 500 °C, con esto podemos concluir que esta proporción de geopolímero puede ser utilizada en aplicaciones a las temperaturas intermedias mencionadas, como recubrimientos para hornos.

- Se validó estadísticamente los resultados mecánicos obtenidos de los morteros geopoliméricos, de manera manual como con el software Minitab. Las dos conclusiones anteriores pueden ser corroboradas con el análisis estadístico realizado en el capítulo anterior. Se puede ver en el análisis estadístico desarrollado que cuando se realizan pruebas a las temperaturas intermedias de 400°C y 500°C, la mezcla R37.5 tiene diferencia significativa con el resto de mezclas, y si analizamos el anexo 1 podemos ver la diferencia. Lo mismo con la mezcla R75 a 600°C, donde obtuvo su mejor resultado.

## **2.- Recomendaciones**

- La presente investigación representa un paso en el desarrollo de productos a base de residuo inorgánico minero. El siguiente paso es continuar investigando, tanto en el producto elaborado en la presente tesis como también en demás productos, para de esta manera contribuir a la disminución de la emisión de dióxido de carbono y a la disminución del desecho y mantenimiento de residuo inorgánico minero en depósitos. Por esta razón es que la principal recomendación es continuar investigando en temas relacionados a este para poder ayudar a la mejora de nuestro medio ambiente.
- Investigar temas específicos de la presente investigación como son la cantidad exacta óptima de solución activadora, la mejor solución activadora, el desecho

que genera la más alta resistencia, así como también la proporción exacta entre residuo inorgánico minero y arena la cual posee la más alta resistencia y el comportamiento de los geopolímeros en más condiciones.

- Investigar también si el producto final (mortero geopolimérico) resulta contaminante para el ser humano debido a que uno de sus componentes principales es el residuo inorgánico minero, el cual posee materiales que resultan perjudiciales al ser humano. Entonces dependiendo de las aplicaciones que se le den al geopolímero es necesario conocer si pueden ser utilizados en lugares con los que el ser humano tenga contacto directo.

## Bibliografía

- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundya, A., & Meikle, S. (2016). Development of geopolymers mortar under ambient temperature for in situ applications. *Construction and Building Material*.
- Arthur B. Robinson, N. E. (2010). *Efectos Ambientales de los Incrementos Atmosféricos de Dióxido de Carbono*. Oregon.
- Asociación de Productores de Cemento - ASOCEM. (15 de Noviembre de 2016). *ASOCEM*. Obtenido de <http://www.asocem.org.pe/estadisticas-nacionales/indicadores-economicos---al-31-de-diciembre-del-2015>
- Banco Mundial - Departamento de Medio Ambiente. (1994). *Libro de Consulta para Evaluación Ambiental*. Washington D. C.
- Barrachina, A. A., Carbonell, F. M., & Beneyto, J. J. (1995). *Arsénico en el sistema suelo planta. Significado ambiental*. Alicante, España: Universidad de Alicante.
- Calderón, D. M. (2012). *Modelado del comportamiento ambiental en base al diseño estadístico de experimentos de mezclas de tres productos cerámicos incorporando dos materiales residuales, arena de fundición y escoria férrica*. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Chi, M., & Huang, R. (2013). Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, 291-298.
- Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. Saint-Quentin, France.
- Dirección de Promoción Minera. (2017). *Cartera Estimada de Proyectos Mineros*.
- El Comercio. (25 de Noviembre de 2014). *CO2 que Perú emite a diario equivale a 380 mil globos de una tonelada*. Obtenido de <http://elcomercio.pe/sociedad/lima/co2-que-peru-emite-diario-equivale-380-mil-globos-como-este-noticia-1774086>
- F. Pacheco-Torgal, D. M. (2011). Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Construction and Building Materials*, 3732-3745.

- La República. (19 de Diciembre de 2016). *Diario La República*. Obtenido de Economía: <http://larepublica.pe/economia/832051-sector-inmobiliario-y-construccion-crecera-4-en-el-2017-segun-capeco>
- Martin, A., Pastor, J. Y., Palomo, A., & Jiménez, A. F. (2015). Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers). *Construction and Building Materials*, 1188-1196.
- Medina, E. C., & Alarcón, F. B. (2010). *Impacto de los relaves mineros en el Perú*. Lima: DIDP.
- Minitab. (2016). *SopORTE de Minitab*. Obtenido de ¿Qué es ANOVA?: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: A review. *Construction and Building Materials*, 252-263.
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. (10 de Octubre de 2013). *Process improvement*. Obtenido de Simplex - lattice designs: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section5/pri542.htm>
- Peruana, N. T. (2013). *Unidades de albañilería. Especificación normalizada para morteros NTP 399.610*. Lima: INDECOPI.
- PHYSORG. (25 de Noviembre de 2008). *Engineering: Physorg*. Obtenido de Physorg website: <http://phys.org/news/2008-11-strong-lightweight-green-material-concrete.html>
- Provis, J. L., & Deventer, J. S. (2009). *Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications*. USA, Florida: Woodhead Publishing Limited.
- R.R. Lloyd, J. L. (2009). *Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements*. J. Mater. Sci.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: McGraw Hill.
- Su, H., Xu, J., & Ren, W. (2015). Mechanical properties of geopolymer concrete exposed to dynamic compression under elevated temperatures. *Ceramics International*, 3887-3898.

- Temuujin, J., Riessen, A. v., & MacKenzie, K. (2010). Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 1906-1910.
- Ueng, T., Lyu, S., Chu, H., Lee, H., & Wang, T. (2012). Adhesion at interface of geopolymer and cement mortar under compression: an experimental study. *Construction and Building Materials*, 204-210.
- Vélez, A. D. (2014). *El papercrete como material alternativo ecológico para la construcción de proyectos arquitectónicos turísticos*. Portoviejo: Universidad San Gregorio de Portoviejo.
- Villalonca, A. E. (1977). La Industria del Cemento dentro de la Problemática de la Contaminación Atmosférica. *Materiales de Construcción*.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 49-54.
- Zhang, H. Y., KodurM, V., Cao, B. L., & Wang, F. (2016). Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*.

## Anexo 1

Base de datos completa de las pruebas realizadas a los cinco tipos de muestras en los tratamientos evaluados estadísticamente.

Tabla A1.1.

*Base de datos para el análisis estadístico*

<b>Resistencia a la Fuerza de Compresión (MPa)</b>			
<b>Muestra/Temperatura</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
<b>R25_1</b>	57.84	58.72	6.83
<b>R25_2</b>	41.70	50.90	4.26
<b>R25_3</b>	52.65	49.38	4.99
<b>R25_4</b>	44.21	56.06	5.40
<b>R37.5_1</b>	60.48	73.90	3.99
<b>R37.5_2</b>	58.72	73.33	4.70
<b>R37.5_3</b>	55.43	72.53	3.52
<b>R37.5_4</b>	62.25	70.29	5.03
<b>R50_1</b>	53.92	57.35	6.46
<b>R50_2</b>	57.43	64.85	6.23
<b>R50_3</b>	49.57	66.19	6.09
<b>R50_4</b>	57.98	59.73	6.21
<b>R62.5_1</b>	43.81	48.08	6.93
<b>R62.5_2</b>	53.41	52.67	6.79
<b>R62.5_3</b>	47.54	54.35	7.22
<b>R62.5_4</b>	49.77	48.25	6.99
<b>R75_1</b>	37.38	46.91	9.64
<b>R75_2</b>	34.10	32.83	8.36
<b>R75_3</b>	36.20	41.30	9.81
<b>R75_4</b>	31.76	30.51	9.14

## Anexo 2

Resultados de morteros geopoliméricos obtenidos en otras investigaciones comparadas en el punto 8.2 de la presente tesis.

Tabla A2.1.

*Resultados de la investigación de Haoyang Su y otros autores*

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Resistencia a la Fuerza de Compresión (MPa)</b>
TA	86.6
TA	88.6
200	100.5
200	104.8
400	97.2
400	107.3
600	89.8
600	95.9
800	29
800	36.7

Fuente: Mechanical properties of geopolymer concrete exposed to dynamic compression under elevated temperatures

Tabla A2.2.

*Resultados de la investigación de Omar A. Abdulkareem y otros autores*

		<b>Resistencia a la Fuerza de Compresión (MPa)</b>		
		<b>Pasta</b>	<b>Mortero</b>	<b>Agregado Liviano</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	70	45	47	17
	400	28	39	16
	600	19	28	14
	800	-	23	12

Fuente: Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete.

Tabla A2.3.

*Resultados de la investigación de Ernesto J. Guades*

		<b>Resistencia a la Fuerza de Compresión (MPa)</b>		
		<b>Tiempo de curado (días)</b>		
		<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>Tipo de mezcla</b>	M0	8.32	9.37	12.41
	M0.3	5.61	6.79	11.48
	M0.6	3.10	4.92	10.84
	M0.9	1.75	3.34	7.34
	M1.2	1.62	1.81	4.40
	M1.5	0.77	1.22	4.11
	M2	0.51	1.11	2.46
	M4	0.00	0.00	1.25
	M6	0.00	0.00	0.68
	Cemento	2.27	2.88	5.92

Fuente: Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymer mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio.