UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

ESTUDIO TÉCNICO DE PRODUCCIÓN DE GEOPOLÍMEROS

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Carlos Manuel Ramos Batres, Marilia Victoria Sic Chen, Ingrid Malvina Ibarra Pérez, Yazmin Elisa Ortiz García y Pietro Alessandro Pazzetty Ortiz para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química y por Michael Joseph Rocco Cordón para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2014

ESTUDIO TÉCNICO DE PRODUCCIÓN DE GEOPOLÍMEROS

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

ESTUDIO TÉCNICO DE PRODUCCIÓN DE GEOPOLÍMEROS

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Carlos Manuel Ramos Batres, Marilia Victoria Sic Chen, Ingrid Malvina Ibarra Pérez, Yazmin Elisa Ortiz García y Pietro Alessandro Pazzetty Ortiz para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química y por Michael Joseph Rocco Cordón para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2014

Vo. Bo. :

(f)_____

Ingeniero Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Coordinador

Tribunal Examinador:

(f)_____

Ingeniero Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)_____

Ingeniero Roberto Godo Levensen

(f)_____

Ingeniero Cristian Rossi Sosa

(f)_____

Ingeniero José Andrés Hernández Gaitán

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de noviembre de 2014

CONTENIDO

Página

LISTA DE CUADROS ix

LISTA DE IMÁGENES xv

RESUMEN xix

ABSTRACT xx

I. INTRODUCCIÓN 1

II. OBJETIVOS 2

III. MARCO TEÓRICO 3

A. El cemento 3

1. ¿Qué es el cemento? 3

2. Tipos de cemento.. 3

B. Geopolímero 4

1. ¿Qué es?. 4

2. ¿De qué se componen? 4

C. Ceniza volcánica 6

1. ¿Qué es?. 6

D. Arcilla 6

1. ¿Qué es?. 6

2. Tipos de arcilla.. 7

E. Análisis químico por fluorescencia 8

F. Propiedades y tratamiento de partículas sólidas 9

1. Caracterización de partículas sólidas. 9

2. Forma de la partícula. 9

3. Tamaño de las partículas. 9
4. Tamaño de partícula mezclada y análisis de tamaño. 10
5. Análisis por tamizado 11
G. Reducción de tamaño 11
1. Características de productos desintegrados.. 11
2. Equipo de reducción de tamaño.. 12
H. Análisis granulométrico 12
1. ¿Qué es?. 12
I. Densidad 12
1. Densidad de bulto.. 12
2. Densidad de bulto aireada.. 12
3. Densidad de bulto compactada.. 12
J. Plasticidad 13
1. Límites de Atterberg.. 13
K. Propiedades de manejo 15
1. Ángulo de reposo.. 15
L. Agregados para la mezcla del geopolímero 16
M. Soluciones activadoras 16
N. Diseño de mezcla 17
O. Producción de concreto a base de geopolímero 18
P. Descripción del equipo para la producción de geopolímeros 19
1. Balanza.. 19
2. Mezcladora.. 19
3. Equipo para reducción de tamaño 21
Q. Proceso de curado 24
R. Pruebas al concreto 25
1. Asentamiento y contenido de aire.. 25
2. Densidad y rendimiento.. 25
3. Compresión.. 26
4. Revenimiento.. 26
5. Temperatura.. 26
S. Las características de los geopolímeros 26
1. Los geopolímeros como aglutinantes 26

2. Resistencia a la tensión.. ... 27
3. Permeabilidad.. ... 27
4. Durabilidad.. ... 27
5. Resistencia contra ambientes agresivos ... 27
IV. METODOLOGÍA ... 29
A. Metodología del pretratamiento y caracterización de la arcilla para la elaboración del geopolímero. ... 29
B. Metodología del pretratamiento y caracterización de la arena volcánica para la elaboración del geopolímero. ... 33
C. Metodología del proceso y condiciones de operación para la fabricación de geopolímeros. ... 36
D. Metodología para la determinación de la línea de producción a nivel laboratorio. ... 42
E. Metodología para la determinación de la línea de producción a nivel industrial. ... 45
V. RESULTADOS ... 47
A. Pretratamiento y caracterización de arcilla ... 47
B. Pretratamiento y caracterización de arena volcánica ... 49
C. Proceso y condiciones de operación para fabricación de geopolímeros ... 51
D. Evaluación y selección de equipos para la producción de geopolímeros. ... 53
E. Producción de Geopolímero ... 60
F. Estudio de los usos y aplicaciones de los geopolímeros ... 64
VI. DISCUSIÓN ... 67
A. Materia prima: arcilla y arena volcánica. ... 67
B. Selección de equipo ... 71
C. Proceso y condiciones de operación para fabricación de geopolímero ... 75
D. Línea de producción ... 79
E. Aplicación ... 81
VII. CONCLUSIONES ... 84
VIII. RECOMENDACIONES ... 86
IX. BIBLIOGRAFÍA ... 88
X. ANEXOS ... 92
Anexo 1. Resultado de análisis químico mediante fluorescencia por rayos X. ... 92
Anexo 2. Cotización de análisis químico por fluorescencia de rayos X en Centro Tecnológico de Cementos Progreso. ... 96
Anexo 3. Cotización de los reactivos utilizados en la muestra, silicato de sodio e hidróxido de sodio .. 97

Anexo 4. Datos calculados de la muestra de arcilla, realizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 99

Anexo 5. Datos calculados de la muestra de arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 104

Anexo 6. Imágenes de los procedimientos aplicados a la arcilla. 107

Anexo 7. Datos originales de la producción de mezclas de geopolímeros. 111

Anexo 8. Cálculos de la muestra de las mezclas preparadas para la producción de Geopolímero realizado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala..... 114

Anexo 9. Análisis de error de las mezclas de geopolímero a nivel de laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala..... 119

Anexo 10. Datos calculados de las mezclas de geopolímero a nivel de laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala..... 121

Anexo 11. Resultados de los ensayos a compresión de las mezclas y los cuadros de cálculos de costos, para la producción de geopolímero a nivel de laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 123

Anexo 12. Especificaciones del equipo utilizado a nivel laboratorio para la producción de geopolímero a nivel laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala..... 125

Anexo 13. Equipo Extra para la producción de geopolímero a nivel de laboratorio que se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala..... 130

Anexo 14. Datos y descripción de los equipos para la implementación de una planta piloto para la producción de geopolímeros. 131

Anexo 15. Cálculos para la propuesta de planta piloto de producción de Geopolímero. 132

Anexo 16. Tabla 9.50, 9.53 y 9.54 del Manual del Ing. Químico- Perry utilizada para el cálculo de costos del equipo propuesto. 136

Anexo 17. Normas ASTM aplicadas para la producción de geopolímero. 138

Anexo 18. Hoja técnica del cemento UGC 4000 psi de Cementos Progreso..... 148

Anexo 19. Hoja técnica del Concrete patching material: Pyrament 505 150

Anexo 20. Hoja técnica de ladrillos refractarios de RASA..... 154

Anexo 21. Gráfico de temperaturas de cocimiento de cerámicos. 155

Anexo 22. Resultado de la producción de Geopolímero a nivel laboratorio. 156

XI. TERMINOLOGÍA 158

XII. GLOSARIO..... 159

LISTA DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Radio Si:Al en la materia prima y su aplicación correspondiente. 6

Cuadro 2. Límites de clasificación de los agregados finos ASTM C33. 16

Cuadro 3. Asentamiento del concreto. 25

Cuadro 4. Ventajas y desventajas de los geopolímeros frente a otros materiales. 28

Cuadro 5. Análisis cuantitativo de humedad presente en muestra de arcilla. 47

Cuadro 6. Análisis cuantitativo de pérdida por ignición presente en arcilla. 47

Cuadro 7. Análisis cuantitativo de SiO_2 y Al_2O_3 en arcilla por fluorescencia de rayos X. 47

Cuadro 8. Análisis cuantitativo de densidades de bulto, porcentaje de compresibilidad y densidad de trabajo en arcilla. 48

Cuadro 9. Análisis cuantitativo de Límites de Atterberg en arcilla. 48

Cuadro 10. Análisis cuantitativo de material más fino que el tamiz No. 200 por lavado de arcilla. 49

Cuadro 11. Análisis cuantitativo del ángulo de reposo y ángulo de deslizamiento de arcilla. 49

Cuadro 12. Resultados de análisis químico mediante fluorescencia de rayos X. 49

Cuadro 13. Contenido de humedad en arena volcánica. 49

Cuadro 14. Densidad de arena volcánica. 49

Cuadro 15. Pérdida por calcinación de arena volcánica. 50

Cuadro 16. Análisis cuantitativo de ángulo de reposo de arena volcánica. 50

Cuadro 17. Resistencia a compresión de las mezclas realizadas con arcilla como materia prima variando las relaciones másicas de la mezcla. 51

Cuadro 18. Resistencia a compresión de las mezclas realizadas con arcilla como materia prima variando temperatura y tiempo de curado. 52

Cuadro 19. Resistencia a compresión de mezclas realizadas con arena volcánica como materia prima variando las relaciones másicas de la mezcla. 52

Cuadro 20. Resistencia a compresión de las mezclas realizadas con arena volcánica como materia prima variando temperatura y tiempo de curado. 52

Cuadro 21. Equipo seleccionado para el proceso. 53

Cuadro 22. Equipo auxiliar seleccionado. 53

Cuadro 23. Comparación de equipos para el proceso de secado. 54

Cuadro 24. Especificaciones del triturador a utilizar. 54

Cuadro 25. Comparación de equipos para el proceso de molienda. 54

Cuadro 26. Comparación de equipos para el proceso de mezclado. 55

Cuadro 27. Comparación de equipos para el proceso de pesado. 55

Cuadro 28. Comparación de equipos para el proceso de curado. 55

Cuadro 29. Tamizador utilizado. 56

Cuadro 30. Datos técnicos de los moldes utilizados. 56

Cuadro 31. Formulación de geopolímero para procesamiento de arena volcánica. 60

Cuadro 32. Resistencia mecánica y térmica de geopolímero. 60

Cuadro 33. Costo del equipo para elaboración de una línea de producción de geopolímero. 63

Cuadro 34. Inversión inicial para implementación de una línea de producción de geopolímero. 63

Cuadro 35. Pruebas de resistencia de geopolímero a base de arena volcánica. 64

Cuadro 36. Costo soluciones utilizadas para mezclas del geopolímero. 64

Cuadro 37. Cantidad de materia prima por mezcla. 64

Cuadro 38. Costo de solución de hidróxido de sodio. 65

Cuadro 39. Costo solución de silicato de sodio. 65

Cuadro 40. Costo de mezclas en base a su contenido. 66

Cuadro 41. Datos calculados, porcentaje de humedad muestra de arcilla, realizados con mufla del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 99

Cuadro 42. Datos calculados pérdidas por calcinación, realizados con mufla del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 100

Cuadro 43. Datos calculados fineza arcilla, obtenidos con mesh 200 del Laboratorio de Materiales de de la Universidad del Valle de Guatemala. 101

Cuadro 44. Datos calculados ángulo de reposo arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 101

Cuadro 45. Datos calculados ángulo de deslizamiento arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 102

Cuadro 46. Datos calculados densidad de bulto de arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 102

Cuadro 47. Datos calculados densidad de bulto compactada de arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 103

Cuadro 48. Datos calculados densidad de bulto aireada de arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 103

Cuadro 49. Densidad de bulto de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 104

Cuadro 50. Densidad compactada de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 104

Cuadro 51. Densidad aireada de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 104

Cuadro 52. Análisis granulométrico de arena volcánica, realizado en la tamizadora W.S Tyler Ro-Tap del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 105

Cuadro 53. Datos calculados ángulo de reposo de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 105

Cuadro 54. Porcentaje de humedad en arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 105

Cuadro 55. Porcentaje de pérdida por calcinación de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 106

Cuadro 56. Ángulo de reposo de arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 106

Cuadro 57. Datos de mezcla a escala laboratorio para la producción de geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 111

Cuadro 58. Relaciones másicas utilizadas para las mezclas de Geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 111

Cuadro 59. Cantidades de cada componente en las mezclas realizadas con arcillla como materia prima, para la producción de geopolímero realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 112

Cuadro 60. Cantidades de cada componente en las mezclas realizadas con arena volcánica como materia prima para la producción de geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 112

Cuadro 61. Medidas de los cubos compactados con mezclas de arcilla y fuerza aplicada en la prueba de resistencia a compresión para la producción de geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 113

Cuadro 62. Medidas de los cubos compactados con mezclas de arena volcánica y fuerza aplicada en la prueba de resistencia a compresión, para la producción de geopolímero realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 113

Cuadro 63. Áreas y presión de los cubos compactados con arcilla como materia prima. 121

Cuadro 64. Áreas y presión de los cubos compactados con arena volcánica como materia prima. 122

Cuadro 65. Cantidad de sólidos de geopolímero y agua en las mezclas con arcilla y arena volcánica. 122

Cuadro 66. Resultados de los ensayos realizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, para la producción de geopolímero a nivel laboratorio. 123

Cuadro 67. Costo por mezcla de geopolímero realizada. 124

Cuadro 68. Costo de la solución de NaOH en las mezclas. 124

Cuadro 69. Costo de la solución de silicato de socio en las mezclas 124

Cuadro 70. Datos técnicos del horno deshidratador situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 125

Cuadro 71. Datos técnicos del molino de discos, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 126

Cuadro 72. Datos técnicos del molino de bolas utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 126

Cuadro 73. Datos técnicos de la balanza electrónica utilizada, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 127

Cuadro 74. Datos técnicos de los moldes utilizados del Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala 128

Cuadro 76: Datos y descripción del equipo para planta piloto. 131

Cuadro 77: Costos del equipo para propuesta de planta piloto. 131

Cuadro 78: Inversión inicial para línea de producción de geopolímero. 132

LISTA DE IMÁGENES

Página

Imagen 1. Tamaño de partícula contra fracción de masa..... 10

Imagen 2. Estados de consistencia del suelo. 14

Imagen 3. Aparato de Casagrande. 14

Imagen 4. Clasificación del suelo según su índice de plasticidad. 15

Imagen 5. Balanza granataria (a) y balanza digital (b). 19

Imagen 6. Esquema de mezcladora con eje inclinado. 20

Imagen 7. Esquema de mezcladora con eje horizontal. 21

Imagen 8. a) molino de bolas, b) molino de rodillos y c) molino por impacto..... 22

Imagen 9. Esquema de un horno deshidratador. 23

Imagen 10. Molde de cubos para cemento..... 24

Imagen 11. Composición granulométrica de arcilla, tamaño de sólidos presentes. 47

Imagen 12. Composición granulométrica de arcilla, retención entre tamices. 48

Imagen 13. Diámetro de partícula contra porcentaje en masa. 50

Imagen 14. Curva granulométrica de arena volcánica. 51

Imagen 15. Diagrama del proceso de producción de geopolímero..... 57

Imagen 16. Diagrama del equipo para la fabricación de geopolímero. 58

Imagen 17. Balance de masa para la producción de mezclas de geopolímero a base de arena volcánica..... 59

Imagen 18. Balance de masa para la producción de mezclas de geopolímero a base de arcilla..... 59

Imagen 19. Diagrama de flujo de proceso para producción de geopolímero. 60

Imagen 20. Línea de producción para la fabricación de geopolímero a partir de arena volcánica..... 61

Imagen 21. Balance de masa del proceso del geopolímero. 61

Imagen 22. Servicios auxiliares y equipo del proceso de fabricación del geopolímero. 62

Imagen 23. Diagrama de flujo del proceso de fabricación del geopolímero. 62

Imagen 24. Análisis químico de ceniza de madera por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala. 92

Imagen 25. Análisis químico de arcilla por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala. 93

Imagen 26. Análisis químico de arena volcánica por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala. 94

Imagen 27. Análisis químico de feldespato por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala. 95

Imagen 28. Cotización de ensayos realizados por Cementos Progreso Guatemala..... 96

Imagen 29. Cotización solución silicato de sodio por Merck S.A..... 97

Imagen 30. Cotización hidróxido de sodio en lentejas por Merck S.A. 98

Imagen 31. Curva de límite líquido de arcilla..... 100

Imagen 32. Determinación del límite líquido arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 107

Imagen 33. Determinación del límite líquido arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 107

Imagen 34. Determinación de fineza de arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 108

Imagen 35. Determinación de fineza de arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 108

Imagen 36. Determinación ángulo de reposo arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 109

Imagen 37. Determinación ángulo de reposo arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 109

Imagen 38. Determinación límite plástico arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 110

Imagen 39. Determinación límite plástico arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 110

Imagen 40. Horno deshidratador utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 125

Imagen 41. Molino de discos utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 126

Imagen 42. Molino de bolas utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 127

Imagen 43. Balanza electrónica utilizada, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. 127

Imagen 44. Tazones de aceros inoxidables utilizados, situado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 128

Imagen 45. Moldes de cubos para concreto utilizados del Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 128

Imagen 46. Horno utilizado para el proceso de curado, situado en Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 129

Imagen 47. Máquinas universales de carga, en el lado izquierdo esta una máquina para medir cargas pequeñas y en el lado derecho esta una máquina para medir cargas mayores, situadas en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 130

Imagen 48. Exponentes para costo de capital Manual del Ingeniero Químico..... 136

Imagen 49. Geopolímero a base de arena volcánica, obtenido en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 156

Imagen 50. Geopolímero a base de arcilla, obtenido en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 156

Imagen 51. Mezcla No. 7, compactación y cubos después del proceso de curado, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala. 157

RESUMEN

El desarrollo de infraestructura se ha identificado como una alternativa para brindar oportunidades de desarrollo a las comunidades que se encuentran en el territorio de Guatemala. Muchas partes del país no cuentan con vías de comunicación terrestre causando subdesarrollo en la comunidad ya que impide el comercio y crecimiento de la comunidad. El estudio de geopolímeros es un estudio sin precedentes en el país por lo que la investigación y desarrollo es prácticamente nuevo.

El objetivo general fue realizar un estudio técnico de geopolímeros, el cual involucró la investigación de materias primas, diseños de mezclas y proceso de fabricación para el desarrollo de un material de construcción. Para alcanzar este objetivo se analizaron dos materias primas, arena volcánica y arcilla, ya que poseen altos contenidos de sílice y aluminio, y se encuentran en abundancia en nuestro país.

Los resultados obtenidos fueron para la arena volcánica la mayor resistencia a compresión de 580.36 ± 70.32 psi y 151.07 ± 87.04 psi para la arcilla. Ambos resultados se obtuvieron con la composición de la mezcla con una relación másica de "Agua/Sólidos de Geopolímeros" de 0.25 y "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.43. La mezcla de la arena volcánica, mezcla No. 7, se realizó con curado a temperatura ambiente por 3 días y 24 horas a 60 °C. La mezcla de la arcilla, mezcla No. 8, se realizó con curado a 24 horas a 60 °C. De acuerdo a las propiedades del geopolímero puede ser utilizado como mezcla con el concreto hidráulico.

Palabras clave: geopolímero, arena volcánica, arcilla

ABSTRACT

Infrastructure development has been identified as an alternative to provide development opportunities to communities that are in the territory of Guatemala. Many parts of the country do not have roads which are causing underdevelopment in the community and preventing trade and growth. This is a landmark study in the country so the research and development that has been done with geopolymers is practically new.

The overall objective was to carry out a technical study of geopolymers, which involved the investigation of raw materials, mix design and manufacturing process for the develop of a construction material. To achieve this objective two raw materials were analyzed, volcanic ash and clay, because of their high content of silica and aluminum. Both raw materials are found in abundance in our country.

The highest compressive force recorded in the results for the volcanic ash was 580.36 ± 70.32 psi and 151.07 ± 87.04 psi for the clay. Both results were obtained when the mixture had a mass ratio of 0.25 water/geopolymer solids and 0.43 alkaline solution/raw material. The volcanic ash mixture, mixture number 7, was heated at room temperature for 3 days and at 60°C for 24 hours. The clay mixture, mixture number 8, was heated at 60°C for 24 hours only. In accordance with the properties of the geopolymer, it can be used in a mixture with hydraulic concrete.

Key words: geopolymer, volcanic ash, clay.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este trabajo fue realizar un estudio técnico de geopolímeros, el cual involucró la investigación de materias primas, diseños de mezclas y proceso de fabricación para el desarrollo de un material de construcción. La reacción entre un aluminosilicato y una solución concentrada alcalina, la cual está compuesta por hidróxido de sodio y silicato de sodio, produce un material sintético conocido como geopolímero. Se utilizó como materia prima arena volcánica proveniente del volcán Pacaya y arcilla obtenida como desecho en una industria localizada en Antigua Guatemala. Esto debido a la necesidad de encontrar materiales alternos al cemento portland por los costos energéticos que conlleva su proceso en la industria, así como el impacto ambiental asociado al mismo tanto por extracción de materia prima y emisiones elevadas de CO_2.

El alcance de este trabajo fue la caracterización de las materias primas, diseños de mezcla, selección de equipo, propuesta de una línea de producción y aplicación. Para la caracterización se realizó un pretratamiento de la arena volcánica y arcilla. Se seleccionaron las relaciones másicas más relevantes en la mezcla que pueden variar la resistencia de compresión del geopolímero. Se estableció el proceso de fabricación a escala laboratorio para plantear la selección de equipo a nivel industrial que pueda ser implementado en una línea de producción. Realizando pruebas de resistencia de compresión del geopolímero se determinó la aplicación correspondiente en el área de construcción.

Se determinó que la arena volcánica proporcionó mayor resistencia a compresión que las mezclas realizadas con arcilla. Esta propiedad aumentó cuando se aplicó curado por calor a 60 °C y un tamaño de partícula menor a 74 micrómetros. De acuerdo a las propiedades del geopolímero puede ser utilizado como mezcla con el concreto hidráulico.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general del Megaproyecto

Realizar un estudio técnico de geopolímeros que involucre la investigación de materias primas, diseños de mezclas y proceso de fabricación para el desarrollo de un material de construcción.

B. Objetivos específicos del Megaproyecto

1. Determinar la viabilidad en la utilización de arcilla para la elaboración de un geopolímero.
2. Caracterizar y dar pretratamiento a la arena volcánica para la fabricación de un geopolímero.
3. Seleccionar el equipo para la producción del geopolímero conforme a la existencia de ellos en la Universidad del Valle de Guatemala; además, si fuese el caso, sugerir equipos que hagan falta para que la producción se realice.
4. Establecer las etapas del proceso y condiciones de operación en la fabricación de un geopolímero cuya combinación permite potencializar sus propiedades como material de construcción.
5. Encontrar las aplicaciones que se ajusten a las características que tendrán los geopolímeros.
6. Proponer una línea de producción para un geopolímero utilizando la materia prima ya establecida a través del análisis de pruebas experimentales con composiciones variables de mezcla, para señalar las ventajas que posee sobre el cemento Portland.

III. MARCO TEÓRICO

A. El cemento

1. ¿Qué es el cemento? El cemento es cualquier tipo de adhesivo. Cuando es aplicado al ámbito de la ingeniería civil y la construcción, el término se convierte en la sustancia que se utiliza para unir arena, piedrín y otros agregados en una masa sólida (Taylor, 1981).

2. Tipos de cemento. El cemento más conocido es el cemento Portland, también conocido como cemento hidráulico; sin embargo, existen varios tipos de cementos con características diferentes que no actúan exactamente igual al cemento Portland. El cemento Portland se produce al calentar una mezcla de piedra caliza y arcilla hasta que ocurra una fusión parcial de las partículas, a las cuales se les muele en pequeñas partículas y se mezclan con una cantidad de yeso determinada (Taylor, 1981).

Los tipos de cemento que no se agrupan con el cemento Portland se dividen en tres grupos. El primero es el basado en silicatos o aluminatos de calcio. En este grupo hay diferentes tipos de cemento, por ejemplo, está el cemento aluminoso que tiene una alta cantidad de alúmina y se crea calentando una mezcla de calcita y bauxita para completar la fusión de ambos ingredientes (Taylor, 1981).

Otro tipo de cemento es el cemento de escorias, como el subproducto de los hornos, este se funde y luego se templa para lograr una apariencia como el vidrio; a este proceso se le llama granulación de la escoria. Los más importantes son los cementos supersulfáticos, estos tienen altas cantidades de escoria (75%) mezclada con sulfato de calcio que compone aproximadamente el 20% de este tipo de cemento (Taylor, 1981).

El tercer tipo son las puzolanas, las cuales son sustancias que no son cementantes por si solas pero al reaccionar con $Ca(OH)_2$ en la presencia de agua a temperaturas ordinarias, actúan como cementantes. La mayoría son de origen volcánico o de materiales hechos al calcinar ciertas arcillas o esquistos. Los cementos puzolánicos son la mezcla de puzolanas con cemento Portland (Taylor, 1981).

B. Geopolímero

1. ¿Qué es? El término geopolímero fue establecido, en la década de los 70's por el científico e ingeniero francés Joseph Davidovits, y aplicado a materiales sólidos sintetizados por la reacción de material pulverizado rico en aluminosilicatos con una solución alcalina. La aplicación principal para la utilización del geopolímero es en el área de construcción. Los geopolímeros en el ámbito de construcción vienen siendo una alternativa a la utilización del cemento Portland. Las cenizas volantes han sido ampliamente utilizadas para la elaboración del cemento Portland, contribuyendo al mejoramiento de sus propiedades de flujo, características, reducción en la huella de carbono y ayudando así a la utilización de un material abundante (Provis & van Deventer, 2009).

Los geopolímeros generalmente se definen como material sólido y estable rico en aluminosilicatos formado por la activación con soluciones alcalinas. La síntesis de geopolímeros se genera al combinar una solución alcalina con material pulverizado rico en aluminosilicatos, generalmente cenizas volantes o caolinita deshidroxilada (arcilla blanca) (Provis & van Deventer, 2009).

La geopolimerización surge como un proceso viable para transformar residuos en nuevos productos y valorizarlos como materias primas. Los geopolímeros tienen la fórmula empírica general: Mn (-(Si-O_2) z -AlO)n.wH_{-2}O, donde M es un catión alcalino (K, Na, Li o Cs), z vale comúnmente 1, 2 ó 3 y n es el grado de polimerización. Los geopolímeros se forman por la copolimerización del aluminio y especies de silicato que proceden de la disolución de la alúmina y el silicio presentes en la constitución química de los materiales de origen, a valores altos de pH, en presencia de silicatos solubles alcalinos (Hua X., Van Deventer J., 2008).

2. ¿De qué se componen? Teóricamente cualquier material que contenga riqueza en aluminosilicatos puede utilizarse para la síntesis de un geopolímero. Se han realizado estudios e investigaciones para utilizar subproductos como cenizas volantes, escoria (slag), etc., y no así materia virgen para la síntesis de geopolímeros. Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión de materia orgánica. Esencialmente, son ricos en SiO_2 y Al_2O_3 así como otros compuestos en menor porcentaje como lo son CaO, Fe_2O_3, MgO, MnO, etc. Las cenizas volantes se han convertido en la materia prima de interés para la síntesis de geopolímeros debido a su disponibilidad, composición rica en aluminosilicatos, baja demanda de agua y trabajabilidad. Se ha comprobado que geopolímeros sintetizados a partir de cenizas volantes muestran gran resistencia mecánica así como mayor durabilidad. A pesar de ello, una de las desventajas de la utilización de cenizas volantes para la síntesis de geopolímeros es su baja reactividad, ya que ésta genera que el fraguado y resistencia se desarrollen de una manera lenta (Kumar, Kumar, & Mehrotra, 2009).

Las cenizas volantes son un material con alta variabilidad, la materia orgánica cuenta con impurezas así como contaminantes que se generan durante la combustión. Las cenizas volantes que son más utilizadas para la síntesis de geopolímeros son aquellas cuyo contenido de calcio es relativamente bajo, éstas son clasificadas como de Clase F, de acuerdo al procedimiento ASTM C618. Las cenizas cuyo contenido de calcio es significativo son clasificadas como de Clase C (Provis & van Deventer, 2009).

La disponibilidad de aluminio en cenizas volantes es sumamente importante para las características de los geopolímeros. La cantidad de aluminio disponible afecta directamente ciertas características del geopolímero, como por ejemplo, resistencia, características del fraguado, resistencia ácida, microestructuras y el desarrollo en el perfil de resistencia. La geopolimerización es un proceso cinéticamente estable, por lo que es necesario conocer la disponibilidad de aluminio y como esto puede influenciar dicha reacción. La disponibilidad de silicio también es sumamente importante, pero menos crítica ya que puede agregarse durante el proceso. La disponibilidad de aluminio es sumamente importante, ya que mediante la comprensión de la velocidad de liberación de aluminio, es posible predecir y controlar las propiedades del geopolímero a sintetizar (Provis & van Deventer, 2009).

El material a emplear como materia prima en la producción de geopolímeros debe cumplir con el contenido de 70% en masa de óxido de silicio y óxido de aluminio. Según la relación de cantidad entre estos dos componentes presentes en la ceniza a utilizar será la aplicación que pueda darse al geopolímero a obtener. Un radio de Si-Al de 2 en la materia prima es aceptable para construcción. En general, si se utiliza un tipo de ceniza como materia prima es preferible que cumpla con las propiedades de la ceniza baja en calcio regida por la ASTM Clase F (Provis & Denventer, 2009).

Según los resultados obtenidos del contenido en peso de óxidos de silicio y aluminio, utilizando la relación entre estos puede emplearse la siguiente tabla para aplicaciones del geopolímero a obtener (Hardjito & Rangan, 2005).

Cuadro 1. Radio Si:Al en la materia prima y su aplicación correspondiente.

Radio Si:Al	Aplicación
1	- Ladrillos - Cerámicas - Protección para fuego
2	- Cementos y concretos bajos en CO_2 - Encapsulación de desechos tóxicos y radioactivos
3	- Protección contra incendios compuesto de fibra de vidrio - Equipos para fundición - Materiales compuestos resistentes al calor (200 – 1000 ^{o}C) - Herramientas para aeronáutica
>3	- Sellantes para la industria (200 – 600 ^{o}C)
20 – 35	- Compuestos resistentes al calor e incendios

Fuente: (Hardjito & Rangan, 2005)

C. Ceniza volcánica

1. ¿Qué es? La ceniza volcánica es roca que poco a poco se ha ido convirtiendo en polvo o arena por la actividad volcánica. Estas cenizas por lo general tienen un tamaño inferior a 2 mm, cuando ocurren erupciones volcánicas se elevan grandes columnas de cenizas que son arrastradas por el viento a grandes distancias. La ceniza volcánica fresca es arenosa, abrasiva, algunas veces corrosiva y puede causar molestias y enfermedades respiratorias (Bréton G. Mauricio, 2004).

Los tipos de minerales presentes en la ceniza volcánica dependen de la química del magma. Teniendo en cuenta que los elementos más abundantes que se encuentran en el magma son la sílice y el oxígeno. Las erupciones de baja energía de basalto producen una ceniza de color oscuro debido a que contienen 45-55% de sílice que generalmente es rica en hierro y magnesio, Las erupciones más explosivas producen una ceniza félsica que es alta en sílice, mientras que otros tipos de ceniza con una composición intermedia tienen un contenido de sílice entre 55-69% (Bréton G. Mauricio, 2004).

D. Arcilla

1. ¿Qué es? La arcilla, desde hace varios miles de años, sirvió al hombre como materia prima para la construcción de gran cantidad de objetos (Besoain, 1985).

La arcilla generalmente se emplea en las siguientes industrias:

- Industria de cerámica: fabricación de porcelana, lozas, ladrillos y tuberías.
- Industria de cemento
- Industria de papel: papeles transparentes que requieren el uso de bentonita cálcica.
- Industria de aceites: utilizada por sus propiedades absorbentes.
- Agricultura: en problemas de contaminación por pesticidas o insecticidas agrícolas.

- Nutrición animal: alimentación de ganado y alimentación de aves.
- Industria de vino: como clarificante.
- Electrónica: confección de aislantes.
- Industria de petróleo: como catalizador en el proceso de “cracking”, en oxidaciones catalíticas.
- Industria farmacéutica: confección de “pellets”, talcos y pomadas.
- Ingeniería de suelos: factor de determinación de propiedades mecánicas.
- Fabricación de grasas y lubricantes.
- Industria de caucho y plásticos.

Generalmente, se clasifica e identifica como un material heterogéneo, compuesto de materiales propios de la arcilla así como otros componentes; incluyendo fragmentos de roca, geles, óxidos hidratados y compuestos orgánicos. Químicamente, la arcilla se define como una serie de compuestos que se identifican con el caolín y de composición variable, que incluyen silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe), elementos alcalinos y alcalinotérreos (Besoain, 1985).

Es importante tomar en cuenta que la arcilla no cuenta con un significado genético unitario, ya que puede proceder de un depósito sedimentario, un producto de meteorización, un producto hidrotermal o ser el resultado o residuo de una síntesis (Besoain, 1985).

Por lo tanto, el término arcilla se utilizará bajo la aceptación edafológica, como un “producto natural, originado de la meteorización de las rocas, con tamaño de partícula menor a 2μ, compuesto principalmente por aluminosilicatos, compuestos orgánicos, etc. El término arcilla como tal no refiere a una mezcla de compuestos única” (Besoain, 1985).

El término arcilla se relaciona con rocas así como referente al tamaño de partícula en un análisis mecánico de rocas sedimentarias, suelo, etc. Por lo tanto el término arcilla no solo se asigna a un tipo específico de material sino a una gran serie de materiales. En general, el término arcilla se aplica a un material natural, de gránulos finos, proveniente de la tierra que desarrolla plasticidad al mezclarse con una cantidad limitada de agua. Por plasticidad entendemos la propiedad de un material húmedo a ser deformado bajo la aplicación de presión, y cuando la misma se retire la forma generada permanezca. Los análisis químicos realizados en arcilla muestran la presencia de silica, alúmina, agua, apreciables cantidades de hierro y restos de material alcalino (Grim, 1953).

2. Tipos de arcilla. La arcilla natural es aquella que se ha extraído y limpiado y que puede ser empleada sin la adición de aditivos (Midgley, 1993).

La tierra roja o arcilla de alfarero, también conocida como terracota, es una arcilla secundaria que contiene hierro. Es de color rojo, bastante suave al tacto y se conoce por tener una buena plasticidad. Es una arcilla excelente para el moldeado en general (Midgley, 1993).

La arcilla de bola es una arcilla secundaria de color azul o negro y tiene un alto grado de contracción tanto en secado como en cocción. Éstas proporcionan una gran plasticidad y firmeza a los cuerpos de arcilla. Se conoce como cuerpo de arcilla a una mezcla de arcilla (Midgley, 1993).

El caolín o arcilla de China es una arcilla primaria. El caolín procede de la descomposición del granito, que cuenta con baja plasticidad, es menos vítreo que la arcilla de bola y se contrae mínimamente durante la cocción. Es utilizada como fuente de alúmina y sílice en vidriados (Midgley, 1993).

La arcilla refractaria se conoce por su cualidad de resistencia ante el calor. Sus características físicas varían; algunas tienen buena plasticidad, otras son ásperas y granulares. Generalmente contienen alguna porción de hierro y se encuentran en depósitos de carbón. Se emplean para la elaboración de ladrillos refractarios y aislantes, también como aditivos para los cuerpos de arcillas con la finalidad de proveerles plasticidad y que soporten altas temperaturas (Midgley, 1993).

La bentonita es una arcilla plástica muy fina que se origina de cenizas volcánicas. Se añade a los cuerpos de arcilla para mejorar su plasticidad (Midgley, 1993).

E. Análisis químico por fluorescencia

Para la determinación de silicio y aluminio se utilizan métodos analíticos de fluorescencia de rayos X. Éste es un método bastante utilizado para la identificación cualitativa de elementos, cuyo número atómico sea mayor que el del oxígeno. También se utiliza a generalmente para el análisis elemental semicuantitativo y cuantitativo. Este método tiene la ventaja que no destruye la muestra, a diferencia de la mayoría de las demás técnicas de análisis elemental. La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una de las herramientas más poderosas para la determinación cuantitativa más rápida de todos los elementos (Skoog, Holler, & Nieman, 2001).

Los métodos de rayos X se utilizan en el control de calidad dentro de la industria de metales y aleaciones, ya que permite correcciones en la composición de la aleación durante su producción. Este método también se ha adaptado fácilmente a muestras líquidas, como por ejemplo la determinación cualitativa de bromo y plomo en muestras de gasolina para aviación. Otra aplicación es la determinación directa de pigmentos en muestras de pinturas; también se han aplicado para el análisis de contaminantes atmosféricos (Skoog, Holler, & Nieman, 2001).

La fluorescencia de rayos X cuenta con ciertas ventajas y desventajas. Sus ventajas son que los espectros son relativamente sencillos, el método no es destructivo, se pueden utilizar muestras de tamaño grande hasta casi invisibles, el procedimiento de utilización es rápido y cómodo y su exactitud y precisión iguala o supera a otros métodos. Entre sus desventajas, es un método no tan sensible a diferencia de otros métodos ópticos, no son adecuados para elementos ligeros y al elevado costo de los instrumentos (Skoog, Holler, & Nieman, 2001).

F. Propiedades y tratamiento de partículas sólidas

1. Caracterización de partículas sólidas. Las partículas sólidas individuales de definen por su forma, tamaño y densidad. Cuando se habla de un material homogéneo, las partículas cuentan con la misma densidad que la materia prima original. Por lo general las partículas se obtienen del rompimiento de un sólido compuesto, con varias densidades, y diferente a la de la materia prima original. El tamaño y forma en partículas regulares se especifican como esferas o cubos, dependiendo así; en partículas irregulares los términos tamaño y forma se definen de manera arbitraria (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

2. Forma de la partícula. La forma de una partícula individual se puede expresar en términos de esfericidad Φ_s, es importante tomar en cuenta que es independiente del tamaño de la partícula. Para una partícula de diámetro D_p, $\Phi_s = 1$; para una partícula no esférica, la esfericidad se define por la relación (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$\Phi_s = \frac{6/D_p}{S_p/v_p} \, (Ecuación\ 1)$$

Donde:

$$D_p: diámetro\ nominal\ de\ partícula$$
$$S_p: área\ superficial\ de\ una\ partícula$$
$$v_p: volumen\ de\ una\ partícula$$

El diámetro equivalente se define como el de una esfera de igual volumen. En el caso de materiales granulares finos, resulta difícil determinar el volumen exacto y el área de la superficie de una partícula y D_p se toma como el tamaño nominal basado en el análisis granulométrico o de exámenes microscópicos. El área superficial se puede obtener por medio de la caída de presión en un lecho de partículas (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

3. Tamaño de las partículas. Es posible especificar “diámetros” para cualquier partícula equidimensional. Las partículas no equidimensionales, no uniformes, algunas veces se caracterizan por la segunda dimensión de mayor longitud. Por convención, los tamaños de partículas se expresan en diferentes

unidades dependiendo del tamaño que intervienen. Las partículas gruesas son medidas en pulgadas o milímetros, las partículas finas en función de la abertura del tamiz y las partículas ultrafinas en micrómetros o nanómetros (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

4. Tamaño de partícula mezclada y análisis de tamaño. En una muestra uniforme de partículas de diámetro D_p, el volumen se calcula por la relación m/ρ_p, donde ρ_p y m son la masa total de la muestra y la densidad de las partículas. El volumen de una partícula es v_p, el número de partículas N en la muestra es:

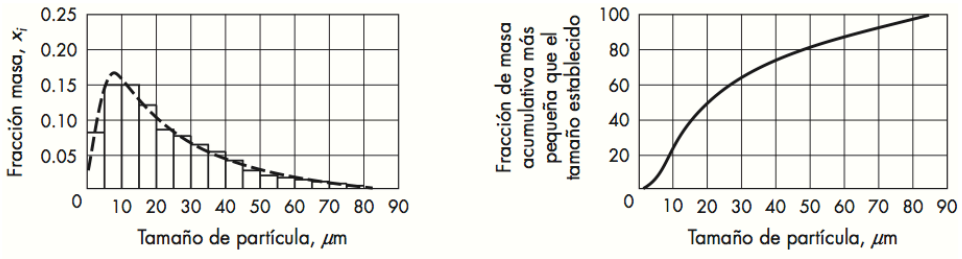
$$N = \frac{m}{\rho_p v_p} \, (Ecuación\ 2)$$

El área de la superficie total de las partículas es:

$$A = Ns_p = \frac{6m}{\Phi_s \rho_p D_p} \, (Ecuación\ 3)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden aplicar a mezclas de partículas que tienen varios tamaños y densidades, la mezcla se divide en fracciones, cada una de ellas de densidad constante y tamaño constante. Cada una de las fracciones se pesa, o bien las partículas individuales. La información del análisis de tamaño de partícula se tabula para mostrar la fracción másica como función del tamaño de partícula en el incremento. Este análisis se conoce como análisis diferencial. Los resultados generalmente se presentan como un histograma. Otra forma de presentar la información es por medio de un análisis acumulativo, obtenido al agregar los incrementos individuales. Explicado de otra forma, se empieza por el que cuenta con las partículas más pequeñas y graficando las sumas acumuladas contra el diámetro máximo de partícula en el incremento. Los métodos respaldados en el análisis acumulativo son más precisos que los que se basan en el análisis diferencial, dado a las asunciones que no se necesita que todas las partículas de una sola sección son iguales en tamaño como lo supone el método diferencial. Ambos análisis se muestran a continuación (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Imagen 1. Tamaño de partícula contra fracción de masa.



Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

5. Análisis por tamizado: serie de tamices estándar. Con la finalidad de medir el tamaño (distribución de tamaños) de las partículas en el intervalo de 3 y 0.0015 in (76 mm y 38 μm), se utilizan tamices estándar. Los tamices se elaboran con telas de alambre, cuyas mediciones han sido cuidadosamente estandarizadas. Las aberturas de las telas de alambre son cuadradas. Cada uno de los tamices se identifica por las mallas por pulgada. Las aberturas reales son menores al número de mallas, debido al espesor de los alambres. Una serie estándar de tamices bastante utilizada es la Tyler. El área de las aberturas de cualquier tamiz de la serie es exactamente el doble que la aberturas del tamiz próximo más pequeño (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Para la realización del análisis, se coloca un conjunto de tamices estandarizados acomodados en serie, el tamiz más pequeño se coloca en el fondo y el de abertura mayor en la parte superior. La muestra a tamizar se coloca en el tamiz superior y la serie de tamices se somete a movimiento rotatorio así como vertical durante un tiempo determinado, generalmente unos 20 minutos. Las partículas retenidas sobre cada uno de los tamices se retiran y se pesan, se determina una fracción másica de la masa total, con la finalidad de determinar la distribución. Las partículas más finas se recogen en el contenedor del fondo de la columna de tamices. Los resultados se tabulan para observar la distribución de las fracciones másicas en los tamices (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

G. Reducción de tamaño

Se entiende como reducción de tamaño a todas las partículas sólidas que pueden ser cortadas o rotas en partículas más pequeñas. En procesos industriales, la reducción de sólidos se lleva a cabo por diferentes métodos y distintos fines. Los sólidos pueden romperse por diferentes métodos, 1) compresión; 2) impacto; 3) frotación o rozamiento, y 4) corte. Como se mencionó anteriormente, la reducción de tamaño se genera mediante la frotación de una partícula con una o más o por medio del esfuerzo cortante. La compresión se utiliza para la reducción de sólidos duros, generando pocos finos; el impacto genera sólidos gruesos, medios o finos; la frotación productos finos a partir de materiales blandos no abrasivos. El corte genera tamaño definido de partícula y a veces una forma definida, con relativamente pocos finos (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

1. Características de productos desintegrados. El objetivo principal de la trituración y molienda es la generación de partículas pequeñas a partir de partículas más grandes. Las partículas más pequeñas son las más deseadas debido a su gran superficie, forma, tamaño y número. La eficiencia de la operación puede medirse por medio de la energía requerida para generar una nueva superficie, ya que el área de superficie de una unidad de masa de partículas aumenta a medida que se reduce el tamaño de partícula (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Los equipos de la realidad no generan un producto uniforme, independientemente que la alimentación sea o no uniforme. El producto constará de una mezcla de partículas, en un intervalo de tamaño variado. Algunos de los equipos, por ejemplo los molinos, están diseñados para controlar el tamaño de las partículas más grandes en sus productos, pero las partículas más finas no se pueden controlar. Algunos molinos logran controlar los finos pero no los reducen totalmente (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

2. Equipo de reducción de tamaño. El equipo para la reducción de tamaño se divide en trituradores, molinos, molinos de ultrafinos y máquinas de corte. Los trituradores quiebran las piezas grandes de material sólido en pequeños pedazos, rompiendo pedazos de 150 a 250 mm. Un triturador secundario reduce pedazos a partículas de tamaño de 6 mm. Los molinos reducen el producto del triturado hasta formar polvo. La compresión es la acción característica de los trituradores; mientras que los molinos emplean impacto, frotación en combinación con compresión (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

H. Análisis granulométrico

1. ¿Qué es? La finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra. Utilizando diversos tamaños de mallas definidos como mesh. Mientras más grande sea el número de mesh existirá una mayor cantidad de espacios por pulgada cuadrada (Perry,1976).

I. Densidad

1. Densidad de bulto. Es la medición de la densidad de un material poroso, toma en cuenta la densidad del material sólido y la cantidad de porosidad. La porosidad es la proporción del volumen ocupado por los poros (incluye el aire y agua) (Ortega-Rivas, Juliano &Yan, 2006).

2. Densidad de bulto aireada. Densidad la cual las partículas se encuentran más libremente. Esto se realiza por verter el sólido en un dispersor, por lo cual se generan partículas individuales que se acomodan en el recipiente de interés. Como dispersor generalmente se utiliza un tamiz para romper o retener las partículas de mayor tamaño y generar partículas individuales (Ortega-Rivas, Juliano &Yan, 2006).

3. Densidad de bulto compactada. Densidad de bulto de un compuesto determinado que se ha colocado en un recipiente y fue sometido a vibraciones. La caja o recipiente donde se encuentra la muestra se sacude con la finalidad de que las partículas se compacten y por ende quepa más material en el recipiente (Ortega-Rivas, Juliano &Yan, 2006).

J. Plasticidad

La plasticidad se refiere a la capacidad de los suelos de deformarse sin llegar a rajarse o romperse. Esta propiedad de los suelos suele determinarse mediante tres límites, los cuales comprenden los límites de Atterberg. Estos tres límites son: límite líquido (LL), límite plástico (LP) y límite de contracción (LC). La importancia de ellos radica en que permiten distinguir los estados en los que el suelo puede encontrarse: sólido, semi-sólido, plástico y líquido En el caso de las arcillas la plasticidad varía mucho (Crespo, 2004).

Se conoce como la capacidad que presentan las arcillas para dejarse moldear y tomar una forma estable que perdure a lo largo de un proceso cerámico. Ésta depende directamente del grado de humedad de la arcilla. La arcilla menos plástica es la caolinita y la más plástica es la montmorillonita. Otros factores que influyen en la plasticidad de una arcilla son la granulometría de sus componentes mineralógicos, así como la presencia de materia orgánica (Melgarejo, 2003).

Según su plasticidad, se consideran dos grupos de arcillas:

- Arcilla grasa: plástica y poco consistente. Si se genera una pérdida de humedad puede llegar a agrietarse fácilmente. Generalmente es necesario agregar un desengrasante para aumentar su consistencia.
- Arcilla magra: poco plástica. Cuando pierde agua su volumen se reduce considerablemente y puede romperse con facilidad. Es necesario añadirle arcilla grasa para aumentar su plasticidad (Melgarejo, 2003).

Los principales desengrasantes son el cuarzo, los feldespatos, fragmentos de rocas silíceas o pequeños fragmentos de cerámica cocida (Melgarejo, 2003).

Las arcillas se distinguen de los demás materiales térreos por su plasticidad. Esta propiedad diferenciadora se pone de manifiesto cuando la arcilla se mezcla con una cantidad determinada de agua (no superior al 20%) y se somete a determinada presión. La presión produce un efecto de deformación, que continúa estable aunque haya desaparecido la presión; por lo tanto es moldeable (Gomá, 1979).

La plasticidad se opone al fenómeno de la elasticidad. Todo material elástico recobra su forma inicial al desaparecer la fuerza cortante que modifica su forma (Gomá, 1979).

1. Límites de Atterberg. Se utilizan para determinar la plasticidad de un suelo. Por medio de este, es posible identifica y comparar distintos suelos entre sí, partiendo que cada uno de las arcillas y limos poseen límites propios, absolutamente distintos. Mediante este estudio es posible establecer una aproximación entre los diferentes estados de la consistencia de los suelos. Los estados se distinguen como (Zanni, 2008).

- Límite de contracción
- Límite plástico
- Límite líquido
- Índice de plasticidad

Imagen 2. Estados de consistencia del suelo.

Fuente: (Zanni, 2008)

a. Límite líquido. Se define como "el límite superior de plasticidad en el que la muestra es tan húmeda que se comporta como un fluido" (Forsythe, 1975). Se puede medir mediante el aparato de Casagrande (Sanz, 1975), mostrado a continuación.

Determina el contenido de humedad, porcentaje de agua en peso en suelo seco, para el cual el suelo empieza a comportarse como un líquido viscoso (Zanni, 2008).

Imagen 3. Aparato de Casagrande.

Fuente: (Zanni, 2008)

Es posible calcular el límite líquido mediante la utilización de la siguiente ecuación.

$$LL = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100\% \ (Ecuación\ 4)$$

Donde

$$LL = Límite\ líquido$$
$$P_h = Peso\ de\ la\ muestra\ húmeda\ en\ gramos$$
$$P_S = Peso\ de\ la\ muestra\ seca\ en\ gramos$$

(Crespo, 2004)

b. Límite plástico. Se conoce como el límite inferior de plasticidad bajo el cual la muestra no puede deformarse sin quebrarse (Forsythe, 1975).

Es el punto inferior del estado plástico. Este indica el contenido de humedad en porcentaje de suelo seco, para el cual el suelo comienza a rajarse al ser amasada en cilindros de pequeño diámetro (Zanni, 2008).

c. Límite de contracción. Marca el punto entre el estado sólido y semis sólido. El suelo tiene una apariencia de sólido pero por estar sometido al secado continúa disminuyendo el volumen (Zanni, 2008).

d. Índice de plasticidad. Se conoce como la diferencia entre el valor del límite líquido y el límite plástico (Zanni, 2008).

Imagen 4. Clasificación del suelo según su índice de plasticidad.

$IP > 20$ suelos muy arcillosos,
$IP > 10$ suelos arcillosos,
$IP < 4$ suelos poco arcillosos,
$IP = 0$ suelos exentos de arcilla.

Fuente: (Zanni, 2008)

K. Propiedades de manejo

1. Ángulo de reposo. El ángulo de reposo estático es el ángulo en el cual el material descansa apilado. Es el ángulo formado entre la pendiente de la pila y la horizontal, esto se da cuando el material se deposita en una plataforma. Cuando un sólido es transportado o almacenado tiende a formar pilas debido a fuerzas internas. Este ángulo dependerá de las condiciones en que fue depositado y cómo el ángulo es medido (Ortega-Rivas, Juliano & Yan, 2006).

L. Agregados para la mezcla del geopolímero

Es importante utilizar el correcto tipo de agregado así como la cantidad correspondiente. Del 70 al 85% en masa del concreto lo conforma los agregados finos y gruesos, además estos influyen en las propiedades del concreto tanto fresco como seco (Kosmatka *et al*, 2003).

Los agregados finos consisten en arena natural o piedras trituradas donde las partículas son menores a 5mm (0.2 in). Los agregados gruesos están conformados de un tipo o combinación de estos de gravas o piedras trituradas con partículas mayores a 5mm. Generalmente los agregados gruesos están comprendidos entre un tamaño de 9.5 mm (3/8 in) y 37.5 mm (1 ½ in) (Kosmatka *et al*, 2003).

Las clasificación de agregados se realiza según la distribución del tamaño de partícula que este contenga (Kosmatka *et al*, 2003).

Cuadro 2. Límites de clasificación de los agregados finos ASTM C33.

Sieve size		Percent passing by mass	
9.5 mm	(⅜ in.)	100	
4.75 mm	(No. 4)	95 to 100	
2.36 mm	(No. 8)	80 to 100	
1.18 mm	(No. 16)	50 to 85	
600 µm	(No. 30)	25 to 60	
300 µm	(No. 50)	5 to 30	(AASHTO 10 to 30)
150 µm	(No. 100)	0 to 10	(AASHTO 2 to 10)

Fuente: (Kosmatka *et al*, 2003)

Los agregados finos y gruesos utilizados por la industria actual de concreto a base de cemento Portland pueden ser utilizados para fabricar geopolímeros. Las curvas existentes para agregados del concreto Portland aplican para las mezclas con geopolímero (Provis & Deventer, 2009).

Para realizar pruebas de resistencia a compresión hay diferentes estándares que pueden utilizarse. En el estándar de la ASTM C 109 se indica una relación de agregados a cantidad de cementante de 2.75 en masa, para compactación de cubos de 50 mm (ASTM Committee C01.27, 2008).

M. Soluciones activadoras

El proceso de geopolimerización requiere este activador alcalino para iniciar la reacción de formación de estructuras minerales poliméricas. Los activadores deben ser álcalis fuertes, sales químicas como NaOH, KOH, Na_2SO_4, K_2SO_4, entre otras. La selección de los diferentes activadores para la disolución del alumino-silicato y su solidificación en su estructura tetraédrica es de vital importancia. La combinación óptima de los diferentes grupos aniónicos activadores con los químicos alcalinos darán como resultado una estructura tetraédrica estable en el alumino-silicato para el desarrollo de su resistencia. Generalmente los químicos que contienen potasio tienen un costo económico mayor, por lo que es recomendable utilizar una solución alcalina a base de sodio (Muduli *et al*, 2013).

Al utilizar un material con alto contenido de óxidos de silicio y aluminio se necesita una solución alcalina para formar el geopolímero, al agregar este líquido se formará una especie de pasta que permitirá la mezcla con los agregados y formar así el concreto. Se necesita un medio básico para la producción de geopolímeros, éste se alcanza al agregar a la mezcla una combinación compuesta de soluciones de silicato de sodio e hidróxido de sodio (Provis & Deventer, 2009).

La solución de silicato de sodio debe contener una relación de SiO_2-Na_2O en masa de 2. Por lo general, ésta solución se comercializa con SiO_2 = 29.4%, Na_2O = 14.7% y agua = 55.9%, en masa. La solución de hidróxido de sodio puede prepararse a través de disolución de los sólidos de éste reactivo en agua (Provis & Deventer, 2009).

Uno de los factores importantes en la resistencia a compresión a obtener de la mezcla se ha identificado como la relación másica de líquido alcalino a materia prima a utilizar. Esta relación por lo tanto conlleva a otra relación másica importante, esta es la relación de agua a sólidos de geopolímero. Estas se relacionan de forma inversa, es decir la un aumento en la cantidad de solución alcalina generalmente da como resultado mayor resistencia a compresión. Por lo contrario, un exceso de agua en la mezcla producirá el efecto contrario (Black, 2012).

A través de diversos estudios se ha determinado que la concentración de la solución de hidróxido de sodio puede encontrarse en el rango de 8M a 16M (Provis & Deventer, 2009).

N. Diseño de mezcla

El contenido de agregados en la mezcla para el concreto a base de geopolímeros es similar al del concreto con cemento Portland (Provis & Deventer, 2009).

La manejabilidad y la resistencia a la compresión del concreto a obtener están relacionados a las proporciones y propiedades de los materiales que constituyen la pasta de geopolímero (Provis & Deventer, 2009).

Experimentalmente se ha encontrado relación entre diferentes variables que afectan las propiedades finales del geopolímero, entre las más importantes están: (Hardjito & Rangan, 2005)

- A mayor concentración molar de la solución de hidróxido de sodio se obtiene una mayor resistencia a la compresión del concreto.
- A mayor relación en masa de solución de silicato de sodio-solución de hidróxido de sodio, se obtiene una mayor resistencia a la compresión del concreto.

- Si se adiciona como súper plastificante naftaleno sulfonado (aproximadamente 4% de la ceniza en masa) mejora la manejabilidad del concreto fresco pero degrada la resistencia a la compresión del concreto endurecido cuando la dosis utilizada es mayor a 2%.
- A mayor relación H_2O-Na_2O la resistencia a la compresión del concreto disminuye.

Para relacionar diversos parámetros a la resistencia a la compresión y manejabilidad del concreto a base de geopolímero puede designarse un nuevo parámetro, este es la relación "agua-sólidos del geopolímero". El contenido de agua está compuesto por la masa de agua en las soluciones que componen el líquido alcalino y la cantidad extra de agua agregada, si aplica. La masa de sólidos del geopolímero será la suma de la masa de ceniza, masa de hidróxido de sodio sólido y masa de Na_2O y SiO_2 en la solución de silicato de sodio (Provis & Deventer, 2009).

O. Producción de concreto a base de geopolímero

Las técnicas utilizadas para producir concreto a base de geopolímero son similares a las utilizadas para el concreto de cemento Portland (Provis & Deventer, 2009).

Se debe realizar primero el mezclado "seco" el cual se realiza en un mezclador forzado. La mezcla estará compuesta por la ceniza de materia prima y los agregados. El tiempo de mezclado es de aproximadamente 3 minutos (Hardjito & Rangan, 2005).

El líquido alcalino debe contener la solución de hidróxido de sodio y la solución de silicato de sodio, obteniendo solamente una solución. Si se agrega agua extra ó un súper plastificante a la mezcla debe añadirse al líquido alcalino (Hardjito & Rangan, 2005).

El segundo mezclado consta de agregar los componentes líquidos descritos anteriormente a los materiales secos. El tiempo de este mezclado es de aproximadamente 4 minutos. El concreto fresco que se obtiene puede ser manipulado por alrededor de 120 minutos sin complicaciones de asentamiento parcial ó degradación de sus propiedades (Hardjito & Rangan, 2005).

Si se desea realizar diferentes pruebas para determinación de temperatura de curado puede compactarse el concreto obtenido con los métodos utilizados en el concreto de cemento Portland (Hardjito & Rangan, 2005).

P. Descripción del equipo para la producción de geopolímeros

1. Balanza. Una balanza es un equipo para la determinación de una masa que la compara con otra masa estandarizada (Dario, 2009).

El propósito de una balanza es determinar la masa de una sustancia o pesar cierta cantidad de la misma. Por lo común el pero de un cuerpo se mide comparando su peso con el de un cuerpo de masa conocida. Dependiendo del trabajo que se quiera realizar se selecciona el tipo de balanza más adecuada, en cuanto a sensibilidad y rapidez de la pesada. La sensibilidad de una balanza depende de su capacidad (Dario, 2009).

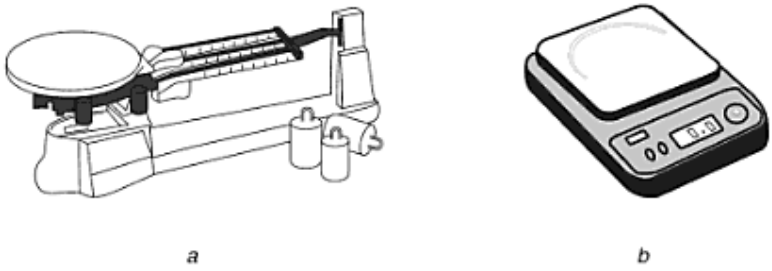
a. Tipos de balanza. Los tipos pueden ser:

- Balanza granataria: tiene una sensibilidad desde ±0.1 g
- Balanza digital: sensibilidad de ±0.01 hasta ±0.0001g

Se debe tomar en cuenta:

- El manejo de la balanza
- No pesar sustancias químicas directamente sobre los platillos
- No derramar líquidos sobre ella
- Pesar el objeto o sustancia a temperatura ambiente
- Limpiar cualquier residuo que podría quedar (Dario, 2009)

Imagen 5. Balanza granataria (a) y balanza digital (b).



a *b*

Fuente: (Osorio, 2009)

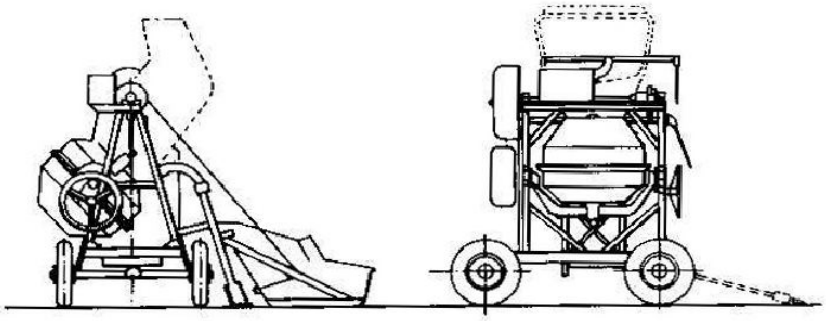
2. Mezcladora. El mezclado del concreto tiene por finalidad cubrir la superficie de los agregados con la pasta de cemento, produciendo una masa homogénea. El mezclado a máquina, en las denominadas mezcladoras, asegura concretos uniformes de manera económica. Las mezcladoras están constituidas, fundamentalmente, por un recipiente metálico denominado tambor o cuba, provisto de paletas en su interior. La mezcla se efectúa, cuando cada una de las partes del concreto es elevada, vuelta a vuelta, por las paletas durante la rotación del tambor, de manera que en un cierto punto, en cada revolución, son

vertidas hacia la parte inferior para mezclarse con las otras porciones, hasta constituir una masa homogénea (G., 2011).

a. Tipos de mezcladoras. Las mezcladoras se clasifican en función de la posición del eje de rotación de la cuba, siendo dos tipos:

- Mezcladoras de eje inclinado, de cuba basculante: pueden adoptar diferentes inclinaciones del eje para cada etapa del trabajo: sea llenado, amasado, o descarga. Esta operación se facilita mediante un volante, que hace pivotar el tambor alrededor de un eje horizontal mediante un sistema de piñones dentados. El tambor, conocido también como "trompo", realiza un movimiento de rotación alrededor de su eje, con una inclinación de 15 a 20 grados aproximadamente. El valor de este ángulo es una característica importante de la mezcladora, pues define su capacidad y la calidad del concreto (G., 2011).

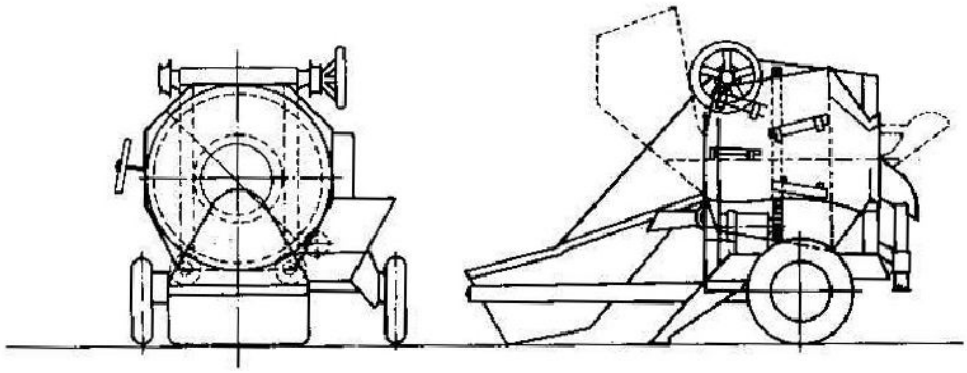
Imagen 6. Esquema de mezcladora con eje inclinado.



Fuente: (Julio G, 2011)

- Mezcladoras de eje horizontal: se caracterizan por el tambor, de forma cilindro-cónica, que actúa girando alrededor de un eje horizontal con una o dos aspas o paletas que giran alrededor de un eje no coincidente con el eje del tambor. Disponen, en la mayoría de los casos, de dos aberturas, una para cargar el material y la otra para descargar el concreto (G., 2011).

Imagen 7. Esquema de mezcladora con eje horizontal.



Fuente: (Julio G, 2011)

Al operar este tipo de mezcladoras debe cuidarse que, luego de cargadas, no quede material en la tolva; y al descargar, que no se produzca segregación o quede en el interior de la mezcladora agregado grueso. Las mezcladoras de eje horizontal son favorables para grandes volúmenes de concretado (G., 2011).

b. Duración del mezclado. El tiempo requerido para producir de manera continua una mezcla homogénea es una característica de cada tipo de mezcladora. La duración del mezclado se establece a partir del instante en que los componentes del concreto, incluyendo el agua, se introducen en la cuba, hasta la descarga de la misma (G., 2011).

Los factores intrínsecos que modifican los requerimientos del amasado son:

- El tipo y tamaño del agregado
- La cantidad de agua de mezcla.
- El porcentaje de finos de la arena (G., 2011)

3. Equipo para reducción de tamaño

a. Molinos. El término molino es utilizado para describir a máquinas de reducción de tamaño para servicio intermedio. Generalmente, el producto proveniente de un triturador y se introduce como la alimentación de un molino, en el que se reduce a polvo o finos. Los molinos más utilizados son los de martillos o impactadores, de rodadura-compresión, molinos de frotación y molinos de volteo (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Los molinos de volteo se caracterizan por una carcasa cilíndrica que gira lentamente alrededor de un eje horizontal; éste se encuentra aproximadamente hasta la mitad de su volumen con el sólido de molienda. La

carcasa está hecha de acero con recubrimiento de acero al carbón, porcelana, roca de sílice o caucho (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

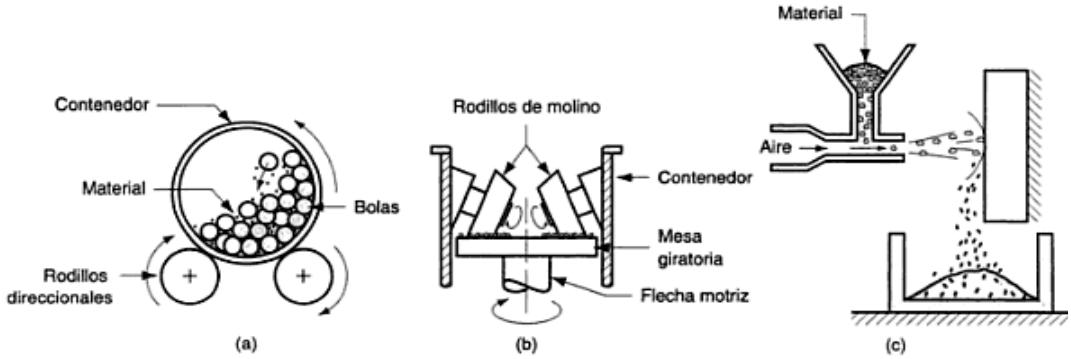
El medio de molienda consiste en barras metálicas en un molino de barras, tramos de cadenas o bolas de metal, caucho o madera en un molino de bolas. Los molinos de volteo no son adecuados para la reducción inmediata de materiales abrasivos (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

En algunos molinos de volteo como el molino de barras, la mayor parte de la reducción se realiza por compresión rodante y por frotación a medida que las barras se deslizan y ruedan entre si. Los molinos de barras son sistemas de reducción intermedia, pues son capaces de reducir una alimentación de 20 mm hasta 10 mallas (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

En un molino de bolas, la mayor parte de la reducción se realiza por impacto de la caída de las bolas. Los molinos de bolas son utilizados para generar la reducción final (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

En un molino de rodillos, el material se comprime contra la mesa horizontal del molino mediante rodillos que giran sobre la superficie de la mesa. En la molienda por impacto, las partículas del material se proyectan contra una superficie plana dura, ya sea por corriente de aire a alta velocidad o mediante un chorro de una pasta muy fluida a alta velocidad (Groover, 1997).

Imagen 8. a) molino de bolas, b) molino de rodillos y c) molino por impacto.



Fuente: (Groover, 1997)

b. Trituradores. Los trituradores son máquinas de baja velocidad para la reducción de grandes cantidades de sólidos. Los principales trituradores son los de mandíbulas, giratorios, de rodillos lisos y de rodillos dentados. Los primeros tres trabajan mediante el principio de compresión, ya que pueden quebrar piezas grandes de materiales muy duros, como en las reducciones primarias y secundarias de materiales metálicos y rocas. Los trituradores primarios se utilizan generalmente en aplicaciones de minería y fabricación de cemento (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

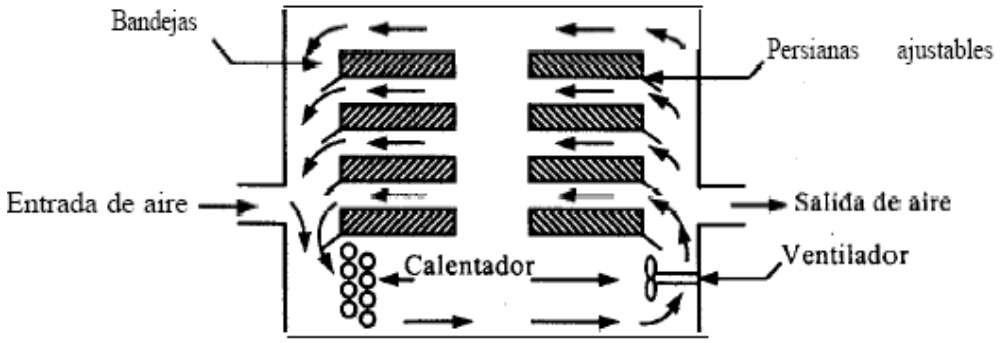
c. Horno deshidratador. También llamado secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimientos, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad (Pontiles De Hernandez, 2010).

Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se remplazan por otras con más material para secado (Pontiles De Hernandez, 2010).

Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador (Pontiles De Hernandez, 2010).

En el caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire (Pontiles De Hernandez, 2010).

Imagen 9. Esquema de un horno deshidratador.



Fuente: (Pontiles, 2010)

La eficiencia de este equipo es muy alta, debido a que es un sistema que sostiene su funcionamiento en el tiempo de secado ininterrumpidamente, y esto hace que los procesos de secado sean cortos; además el aire es filtrado para el ingreso del horno, así que no hay partículas, ni polvo, y la manipulación del producto por parte de personal, es controlada y bajo normas de seguridad alimentaria (Pontiles De Hernandez, 2010).

Las ventajas de este sistema son mejores, porque todos los parámetros pueden ser controlados. La corriente de aire es de alta velocidad y caudal, siempre constante, la temperatura es seleccionable y puede variar a gusto del operador (Pontiles De Hernandez, 2010).

d. Moldes de cubos para cemento. Los moldes constan tres cubos según las especificaciones ASTM, se utilizan para formar muestras cúbicas de 50.8 mm (2 in) en tanda de tres para ensayos de resistencia a la compresión de cemento Portland, mortero, cal, yeso y compuestos de refrenado (Humboldt, 2014).

Imagen 10. Molde de cubos para cemento.

Fuente: (Humboldt, 2014)

Q. Proceso de curado

Si se utiliza una ceniza baja en calcio para producir concreto a base de geopolímero el curado puede realizarse a condiciones ambientales, sin embargo se recomienda realizar un curado por calor. Esto debido a que el curado con calor asiste la reacción química que ocurre en la pasta ó mezcla de geopolímero (Hardjito & Rangan, 2005).

Se ha determinado que tanto el tiempo de curado como la temperatura empleada influye en las propiedades del geopolímero, principalmente en la resistencia a la compresión del concreto (Hardjito & Rangan, 2005).

Para obtener el efecto del tiempo de proceso de curado puede compactarse en moldes la mezcla de geopolímero y realizar pruebas a diferentes temperaturas y diferente tiempo de curado. Se recomienda que el tiempo de curado se encuentre entre 4 a 96 horas, debido a que la resistencia a la compresión aumenta rápidamente hasta 24 horas de curado transcurrido este tiempo el aumento de esta propiedad es muy baja. El curado mejora el proceso de polimerización lo que ocasiona el aumento de resistencia a la compresión (Hardjito & Rangan, 2005).

A pesar de que el curado a temperatura ambiente se ha realizado en diferentes experimentaciones no se recomienda esta condición, ya que la reacción de polimerización es muy lenta y conduce a obtener menor resistencia a compresión. Además, el curado por calor a temperaturas mayores de 60 ^{o}C no aumenta

considerablemente la resistencia a compresión. Cuando la temperatura es demasiado elevada se da perdida de humedad, la cual se requiere para la reacción del geopolímero para desarrollar mayor fuerza (Mustafa *et al*, 2012).

El curado por calor puede realizarse de dos formas diferentes, curado por vapor ó curado en seco. Sin embargo, se ha demostrado que el curado en seco del concreto a base de geopolímero obtiene un 15% más de resistencia a la compresión que con un curado por vapor (Hardjito & Rangan, 2005).

La temperatura de curado se ha realizado desde 30°C a 90°C, para efectos prácticos en laboratorio se ha utilizado una temperatura de 60°C con un tiempo de 24 horas (Hardjito & Rangan, 2005).

R. Pruebas al concreto

1. Asentamiento y contenido de aire. El asentamiento del concreto se mide de acuerdo con la norma ASTM C 143. La tolerancia para esta norma, varía de acuerdo al nivel de asentamiento ordenado o especificado. Las tolerancias para el asentamiento se muestran en la siguiente tabla de la norma ASTM C 94. No se establecen tolerancias para el flujo del concreto auto compactable, cuya medición se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C 1611 (Bondar *et al*, 2011).

Cuadro 3. Asentamiento del concreto.

Asentamiento Especificado	Tolerance
Especificación Asentamiento Máximo	
<3 in. (75 mm)	+0 to -1½ in. (40 mm)
>3 in. (75 mm)	+0 to -2½ in. (65 mm)
Especificación Asentamiento Mínimo	
<2 in. (50 mm)	±½ in. (15 mm)
2- 4 in. (50 - 100 mm)	±1 in. (25 mm)
>4 in. (50 mm)	±1½ in. (40 mm)

El contenido de aire se mide de acuerdo al Método de Ensayo Estándar, para determinar por el método de presión, el contenido de aire del concreto recién mezclado ASTM C 143 o por el Método de Ensayo Estándar, para determinar por el método volumétrico el contenido de aire del concreto recién mezclado, para agregados livianos o para agregados con altas absorciones. Para el contenido de aire del concreto, la tolerancia especificada está en el orden de ±1.5% (Najafi & Allahverdi, 2009).

2. Densidad y rendimiento. Se requiere medir la densidad (peso unitario) del concreto de acuerdo con la norma ASTM C 138. Esto se puede hacer determinando el peso del aire contenido después de que la muestra ha sido preparada. Se debe utilizar un tamaño mínimo del recipiente, basado en el tamaño máximo nominal del agregado en la mezcla de concreto. La densidad, se puede correlacionar con la

medición del contenido de aire, lo cual puede ser un indicador del contenido de agua en la mezcla. Cuando se determina el rendimiento mediante la norma ASTM C 94, se requiere que la densidad sea determinada en muestras separadas de tres diferentes coladas de concreto de conformidad con el volumen de concreto ordenado sobre esa base (Najafi & Allahverdi, 2009).

3. Compresión. La prueba de compresión muestra la resistencia a compresión del concreto endurecido. Las pruebas se hacen en un laboratorio fuera del lugar de la obra. El único trabajo que en la obra es hacer un cilindro de concreto para la prueba de compresión (Pacheco *et al*, 2012).

La resistencia se mide en kg/cm^2 Megapascales (MPa) y comúnmente se especifica como una resistencia característica del concreto medido a los 28 días después del mezclado. La resistencia a compresión es una medida de la capacidad del concreto para resistir cargas que tienden a aplastarlo (Pacheco *et al*, 2012).

4. Revenimiento. Se hace para asegurar que una mezcla de concreto sea trabajable. La muestra medida debe de estar dentro de un rango establecido, o tolerancia, del revenimiento pretendido (Pacheco *et al*, 2012).

5. Temperatura. La temperatura del concreto, es medida de acuerdo con la norma ASTM C 1064. La temperatura es medida para determinar la conformidad con los límites de temperatura en una especificación y es una prueba requisito para preparar los especímenes. Es permitido medir la temperatura de concreto en el lugar cuando no se mide en relación con pruebas de resistencia (Najafi & Allahverdi, 2009).

S. Las características de los geopolímeros

Por ser un tipo específico de polímero, un geopolímero tiene características específicas que pueden ser estudiadas. Los geopolímeros tienen características similares al cemento Portland en ciertos puntos pero también tienen características que los diferencian.

1. Los geopolímeros como aglutinantes. Pueden actuar como cementos que ligan partículas y reaccionan para formar materiales compuestos. La mayoría de los cementos hechos de geopolímero tienen como materia prima cenizas volantes que se producen al quemar carbón mineral en una carbonera. La otra materia prima utilizada generalmente es la escoria de hornos ya que estas dos tienen la composición necesaria para producir geopolímeros de alta calidad. Dependiendo de la materia prima que se utiliza, las características de los geopolímeros puede cambiar drásticamente. En muchos aspectos, los geopolímeros son muy parecidos al cemento Portland y sus características. Esto se debe a que son

productos que crean masas frágiles, con alta capacidad de resistir a la compresión, pero baja resistencia a la tensión (Davidovits, 2002).

2. Resistencia a la tensión. El geopolímero no es tan débil a la tensión como es el cemento Portland. La relación resistencia a la compresión-tensión del cemento Portland está en el rango de 10:1 a 10:1.5 donde la relación del geopolímero está en el rango de 10:5.5. Este punto juega un gran rol en la resistencia del geopolímero (Škvára *et al*, 2006).

3. Permeabilidad. Al igual que el cemento Portland, la permeabilidad del geopolímero es muy baja. Esto presenta una capacidad para evitar que líquidos como el agua, lo atraviesen. Esta propiedad se mide en cm/s (Davidovits, 1994).

4. Durabilidad. En el Instituto de Geopolímeros de Francia, Joseph Davidovits y su equipo ha propuesto que las pirámides se construyeron con un geopolímero antiguo, esto refleja la durabilidad que tiene este producto si se aplica en una construcción que utiliza todas sus ventajas (Davidovits, 1984). Los romanos utilizaban concretos que han durado mayor cantidad de años que el concreto común utilizado en la actualidad, por esto se cree que incorporaban algún aspecto de la tecnología de los geopolímeros en sus materiales de construcción. Esto se puede notar cuando uno estudia las construcciones romanas, las reparaciones hechas en la actualidad no han logrado mantenerse como se mantienen las estructuras antiguas (Provis & van Deventer, 2009).

5. Resistencia contra ambientes agresivos

a. Ambientes ácidos. La resistencia del cemento hidráulico no es muy alta cuando se refiere a sustancias ácidas. En cambio, el geopolímero, como su origen no es de base caliza, tiene una alta resistencia a las sustancias ácidas. En ambientes ácidos, el cemento portland deja de ser efectivo y cuando se utilizan cementos de aluminatos de calcio, los resultados siguen siendo insatisfactorios entre el 30 al 60% de pérdidas por peso o destrucción del material. El geopolímero tiende a quedarse entre 5 y 8% de pérdidas por peso, y se mantiene estable. Esto presenta una gran gama de aplicaciones donde el cemento convencional no podría ser trabajado (Davidovits, 1994).

b. Congelamiento. La resistencia al congelamiento y a los ciclos de congelamiento y descongelamiento es una propiedad que tiene el geopolímero. La resistencia que contiene un bloque de geopolímero luego de haber pasado 150 ciclos de congelamiento y descongelamiento en un ambiente húmedo fue de 70% de la resistencia sin congelamiento en la misma cantidad de tiempo (Škvára *et al*, 2006).

c. Velocidad de aumento de resistencia. Uno de los rasgos más importantes que diferencia el geopolímero del cemento, es la velocidad en que gana resistencia. Un cemento de geopolímero puede ganar gran resistencia después de solo horas desde que se aplicó. Esto quiere decir que en cuatro horas ya puede estar alcanzando entre 20 y 30% de su resistencia máxima (Davidovits, 1994). Tomando en cuenta que para que el cemento Portland llegue a este punto debe haber pasado aproximadamente un día (Monjurul & Kabir, 2011).

d. El geopolímero aumenta su resistencia rápidamente. Tiene varias ventajas para el geopolímero poder aumentar su resistencia rápidamente, es importante notar que el curado juega una parte muy grande en este aspecto. En el siguiente cuadro elaborado por Michael Rocco puede observarse las ventajas y desventajas del geopolímero comparado con otros materiales.

Cuadro 4. Ventajas y desventajas de los geopolímeros frente a otros materiales.

Ventajas	Desventajas
La producción de un geopolímero libera menor cantidad de CO2 que el cemento Portland.	Necesita el proceso de curación para ganar la resistencia rápidamente por lo que curar la mezcla a temperatura ambiente puede tardarse.
La resistencia a medios agresivos; como congelamiento, medios ácidos y cerca del océano; de un geopolímero puede llegar a ser mayor a la del cemento Portland.	El proceso de curación puede ser complicado aplicárselo al geopolímero para uso en obra.
La resistencia a la tensión del geopolímero es mayor que la del cemento Portland.	Los reactivos utilizados para la creación del geopolímero no son tan fáciles de obtener como el agua utilizada en el cemento Portland.
La permeabilidad del geopolímero es cercana a la del cemento Portland.	Dependiendo de la materia prima utilizada, puede tener propiedades inferiores a las óptimas.
Puede ganar resistencia más rápido que el cemento Portland sin aditivos químicos.	
Tienen alta durabilidad.	
Al endurecerse, el geopolímero no se encoge como el cemento Portland.	

IV. METODOLOGÍA

A. Metodología del pretratamiento y caracterización de la arcilla para la elaboración del geopolímero.

- Determinación del contenido de humedad en arcilla.

1. El procedimiento especificado a continuación se basó en el método ASTM C311-94a.
2. La muestra de arcilla utilizada poseía un diámetro de partícula menor a 0.075 mm (Mesh No. 200).
3. Se pesó el crisol completo y se obtuvo de la tara del mismo.
4. Se colocó la muestra de arcilla en un crisol, previamente tarado, y se llevó a peso constante. La muestra de arcilla se sometió a temperatura 110 ºC.
5. Se monitoreó el peso periódicamente, se obtuvieron resultados parciales hasta llegar a peso constante.
6. Por último se procedió a calcular el porcentaje de humedad en la muestra de arcilla.

- Determinación de materia orgánica en arcilla por calcinación (Loss on ignition).

1. El procedimiento especificado a continuación se basó en el método ASTM C311-94a
2. Se utilizó la muestra de la determinación del contenido de humedad, previamente realizada.
3. La muestra de arcilla utilizada poseía un diámetro de partícula menor a 0.075 mm (Mesh No. 200).
4. Se pesó el crisol con la muestra de arcilla de la determinación anterior.
5. La muestra de arcilla se sometió a temperatura 750 ºC y se llevó a peso constante.
6. Se monitoreó el peso periódicamente, se obtuvieron resultados parciales hasta llegar a peso constante.
7. Por último se procedió a calcular el porcentaje de humedad en la muestra de arcilla.

- Determinación de óxidos de silicio y aluminio (SiO_2 y Al_2O_3) en arcilla.

1. La determinación de óxido de silicio y aluminio se realizó en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso.
2. De ser necesario, si el tamaño de partícula es mayor a la abertura de 0.85 mm (Mesh No. 20), se debe triturar o moler.
3. Se tamizó 1 kg de la muestra de arcilla, la muestra debe tener un diámetro de partícula menor a 0.075 mm (Mesh No. 200).
4. Las pruebas realizadas fueron por análisis químico por fluorescencia de rayos X, procedimiento interno SAC-SM-ME-01 (Sílice SiO_2 y Aluminio Al_2O_3).

- Determinación de la distribución de tamaño de partícula de arcilla mediante análisis granulométrico.

1. Se pesó un aproximado de 400 g de arcilla.
2. Cada uno de los tamices y tapadera fueron pesados para obtener su tara.
3. La muestra de arcilla se colocó en el tamiz superior, el de menor numeración (Mesh No. 20).
4. La muestra se tamizó durante 15 min.
5. Se procedió a pesar cada uno de los tamices con la muestra.
6. Se obtuvo la masa de arcilla retenida en cada uno de los tamices.
7. Con las masas de arcilla recabadas se procedió a generar una curva para observar la distribución y comportamiento de la muestra.

- Determinación de arcilla más fino que el tamiz No. 200 (75 μm) por lavado.

1. El procedimiento especificado a continuación se basó en el método ASTM C117-95.
2. La muestra de arcilla fue sometió a secado a temperatura de 110 ºC.
3. Se pesaron aproximadamente 500 g de arcilla, también se tararon los recipientes para la recepción de los finos.
4. La muestra se colocó en el tamiz No. 200.
5. Bajo el tamiz se colocó un recipiente para recibir las partículas menores a la apertura del tamiz No. 200.
6. Se adicionó agua al tamiz No. 200 y se agitó vigorosamente para generar una separación completa.
7. Se lavó nuevamente con agua, hasta que el agua que atravesaba el tamiz quedó clara.

8. Se separó la masa de arcilla retenida en el tamiz No. 200 y se colocó en un recipiente. Se realizó lo mismo con los recipientes con finos, en primera instancia se separó el exceso de agua por decantación y se colocaron en un horno a 110 ºC durante 1 día.
9. Al día siguiente, se pesaron cada uno de los recipientes y se procedió a calcular el porcentaje de finos y partículas retenidas en el tamiz.

- Determinación de los límites de Atterberg de la arcilla.

1. El procedimiento especificado a continuación se basó en el método ASTM D4318-05.
2. Determinación del límite líquido
    a. Se tomó una muestra de 200g
    b. La muestra se colocó en una vasija de evaporación y se añadió una pequeña cantidad de agua destilada, se midió el agua añadida. Dejar que la muestra se humedezca.
    c. Se mezcló con una espátula hasta que el color fue uniforme y se homogenizó la muestra. La pasta tomó una textura pegajosa.
    d. Una parte de masa húmeda se colocó en la parte central de la copa (del aparato Casagrande) y se niveló la superficie.
    e. Se pasó el acanalador por el centro de la copa y se dividió en dos la pasta de arcilla.
    f. La división o ranura se apreció claramente y se aseguró que hubieran dos partes.
    g. La mayor profundidad de la muestra en la copa debe ser igual a la altura de la cabeza del acanalador.
    h. El aparato de Casagrande se mantuvo firmemente perpendicular a la superficie de la copa, de forma que la profundidad de la ranura sea homogénea.
    i. Se puso en movimiento con la ayuda de la manivela y se suministró los golpes necesarios para cerrar la ranura en 12.7 mm (0.5 in).
    j. Cuando se cerró la ranura en 0.5 in, se registró la cantidad de golpes y se tomó una muestra de la parte central para la determinación del contenido de humedad.
    k. El proceso se repitió con 3 muestras más para lograr 4 puntos a distinto contenido de humedad, y se deben realizar con los siguientes rangos de golpes.
        i. 30 a 40 golpes
        ii. 25 a 30 golpes
        iii. 20 a 25 golpes
        iv. 15 a 20 golpes
3. Determinación del límite plástico

a. Se trabajó con 20 g de la muestra preparada para la determinación del límite líquido.
b. Se amasó el suelo y se deja que pierda humedad hasta una consistencia a la cuál pueda enrollarse sin que se pegue en las manos esparciéndolo y mezclándolo sobre la placa de vidrio.
c. El cilindro debía ser adelgazado hasta que su diámetro fuese de 3.2 mm (1/8 in).
d. La prueba continuó hasta que el cilindro empezó a rajarse y se desmoronó.
e. Se tomaron los pedazos del cilindro roto.
f. Se pesaron los pedazos en un contenedor previamente tarado y se colocaron en un horno a 110 ºC hasta que llegó a peso constante.
g. Se pesaron y se determinó el porcentaje de humedad.

- Determinación de la densidad de bulto de arcilla.

1. Densidad de bulto
    a. Se pesó el recipiente y se taró la pieza.
    b. Se colocaron varias capas de material hasta sobrepasar el límite del contenedor. Es importante no agitar, ni compactar el material.
    c. El material se niveló con una espátula, se pasó al ras de los bordes superiores del contenedor.
    d. La muestra y el contenedor fueron pesados.
    e. Se obtuvo la masa total del material.
    f. Se determinó la densidad de bulto con la masa del material y el volumen del contenedor.
2. Densidad de bulto aireada
    a. Se pesó el recipiente y se taró la pieza.
    b. Se colocó el tamiz o cedazo sobre el recipiente.
    c. El sólido se trasladó cuidadosamente y se tamizó el material hasta llenar el contenedor completamente.
    d. El material fue nivelado con una espátula y se pasó al ras de los bordes superiores del contenedor.
    e. Se pesó el recipiente y se determinó la masa del material.
    f. Se determinó la densidad de bulto aireada con la masa del material y el volumen del contenedor.
3. Densidad de bulto compacta
    a. Se pesó el recipiente y se taró la pieza.
    b. El recipiente se llenó con el sólido por encima de su nivel superior.

c. El recipiente se levantó 1.5 cm.
d. Se dejó caer el recipiente con la muestra.
e. Se repitieron los pasos 4, 5 y 6; las veces necesarias.
f. Se niveló el material utilizando una espátula.
g. La muestra se pesó.
h. Se determinó la densidad de bulto compactada con la masa del material y el volumen del contenedor.

- Determinación del ángulo de reposo y ángulo de desplazamiento de arcilla.

1. Ángulo de reposo
    a. Se tomó una muestra de aproximadamente 30 g.
    b. La muestra se hizo pasar por un embudo, se dejó caer en la superficie y se procuró que se formara un cono.
    c. Una vez formado el cono, se midió el ángulo del cono con respecto a la horizontal.
2. Ángulo de desplazamiento
    a. Se tomó una muestra de aproximadamente 30 g.
    b. La muestra se hizo pasar por un embudo, se dejó caer en la superficie y se procuró que se formara un cono.
    c. Una vez formado el cono, se tomó una esquina de la superficie y se empezó a elevar.
    d. Se midió el ángulo de inclinación (sobre la horizontal) a la cual una porción del material comenzó a moverse sobre la superficie.

B. Metodología del pretratamiento y caracterización de la arena volcánica para la elaboración del geopolímero.

1. El equipo, cristalería e instrumentación utilizados fueron: horno “Fischer Cientific” modelo 280A con rango de 10-200 ºC, crisol de porcelana “Coors”, espátula, balanza analítica “BOECO Germany” con rango de 0-220 g.
2. El procedimiento especificado se basó en el método ASTM C311-94a.
3. La muestra de arena volcánica utilizada poseía un diámetro de partícula menor a 0.075 mm (Mesh No. 200).
4. Se pesó el crisol completo y se obtuvo de la tara del mismo.

5. Se colocó la muestra de arena volcánica en un crisol, previamente tarado, y se llevó a peso constante. La muestra de arena volcánica se sometió a temperatura de 110ºC.
6. Se monitoreó el peso periódicamente, se obtuvieron resultados parciales hasta llegar a peso constante.
7. Se procedió a calcular el porcentaje de humedad en la muestra de arena volcánica.
8. Se realizó la determinación de materia orgánica en arena volcánica por calcinación (Loss on ignition).
9. El equipo, cristalería e instrumentación utilizados fueron: crisol de porcelana "Coors", mufla "Termoline" tipo FB 1315M con rango de 100-1100 ºC, espátula y balanza analítica "BOECO Germany" con rango de 0-220 g.
10. El procedimiento especificado se basó en el método ASTM C311-94a.
11. Se utilizó la muestra de la determinación del contenido de humedad, previamente realizada.
12. La muestra de arena volcánica utilizada poseía un diámetro de partícula menor a 0.075 mm (Mesh No. 200).
13. Se pesó el crisol con la muestra de arena volcánica de la determinación anterior.
14. La muestra de arena volcánica se sometió a temperatura de 750 ºC y se llevó a peso constante.
15. Se monitoreó el peso periódicamente, se obtuvieron resultados parciales hasta llegar a peso constante.
16. Se procedió a calcular el porcentaje de humedad en la muestra de arena volcánica.
17. Se realizó la determinación de contenido de óxidos de silicio y aluminio (SiO_2 y Al_2O_3) en la arena volcánica.
18. La determinación de óxido de silicio y aluminio se realizó en el "Centro Tecnológico de Cementos Progreso".
19. Se realizó la preparación de la muestra de arena volcánica.
20. De ser necesario, si el tamaño de partícula era mayor a la abertura de 0.85 mm (Mesh No. 20), se trituró o realizó la molienda de la muestra.
21. Se tamizó la muestra hasta recolectar 1 kg de arena volcánica con un diámetro de partícula menor a 0.075 mm (Mesh No. 200).
22. Las pruebas realizadas fueron por análisis químico por fluorescencia de rayos X, procedimiento interno SAC-SM-ME-01 (Sílice SiO_2 y Aluminio Al_2O_3).
23. Se realizó la determinación de la distribución de tamaño de partícula de arena volcánica mediante análisis granulométrico.
24. El equipo, cristalería e instrumentación utilizados fueron: tamizadora "ROTAP" modelo RX-29, serie de tamices (Mesh No. 20, 30, 45, 60, 80, 100, 140, 200, 400), espátula y balanza semianalítica "OHAUS" modelo Scout-Pro con rango de 0-2000 g.

25. Se pesó un aproximado de 400 g de arena volcánica.
26. Cada uno de los tamices y tapadera fueron pesados para obtener su tara.
27. La muestra de arena volcánica se colocó en el tamiz superior, el de menor numeración (Mesh No. 20).
28. La muestra se tamizó durante 15 minutos.
29. Se procedió a pesar cada uno de los tamices con la muestra.
30. Se obtuvo la masa de arena volcánica retenida en cada uno de los tamices.
31. Con las masas de arena volcánica recabadas se procedió a generar una curva para observar la distribución y comportamiento de la muestra.
32. Se realizó la determinación de la densidad de bulto de arena volcánica.
33. El equipo, cristalería e instrumentación utilizados fueron: recipiente de volumen conocido y espátula de metal.
34. Se pesó el recipiente y se taró la pieza.
35. Se colocaron varias capas de material hasta sobrepasar el límite del contenedor. Es importante no agitar, ni compactar el material.
36. El material se niveló con una espátula, se pasó al ras de los bordes superiores del contenedor.
37. La muestra y el contenedor fueron pesados obteniendo la masa total del material.
38. Se determinó la densidad de bulto con la masa del material y el volumen del contenedor.
39. Se procedió a determinar la densidad de bulto aireada.
40. Se pesó el recipiente y se taró la pieza.
41. Se colocó el tamiz o cedazo sobre el recipiente.
42. El sólido se trasladó cuidadosamente y se tamizó el material hasta llenar el contenedor completamente.
43. El material fue nivelado con una espátula y se pasó al ras de los bordes superiores del contenedor.
44. Se pesó el recipiente y se determinó la masa del material.
45. Se determinó la densidad de bulto aireada con la masa del material y el volumen del contenedor.
46. Se procedió a determinar la densidad de bulto compacta
47. Se pesó el recipiente y se taró la pieza.
48. El recipiente se llenó con el sólido por encima de su nivel superior.
49. El recipiente se levantó 1.5 cm.
50. Se dejó caer el recipiente con la muestra.
51. Se niveló el material utilizando una espátula.
52. La muestra se pesó.

53. Se determinó la densidad de bulto compactada con la masa del material y el volumen del contenedor.
54. Se procedió a realizar la determinación del ángulo de reposo de arena volcánica.
55. El equipo, cristalería e instrumentación utilizados fueron: transportador, superficie metálica y embudo.
56. Se tomó una muestra de aproximadamente 30 g de arena volcánica.
57. La muestra se hizo pasar por un embudo, se dejó caer en la superficie y se procuró que se formara un cono.
58. Una vez formado el cono, se midió el ángulo del cono con respecto a la horizontal.

C. Metodología del proceso y condiciones de operación para la fabricación de geopolímeros.

1. Se realizó la preparación del agregado y materia prima confirmada con contenido alto de óxidos de sílice y aluminio.
2. Se realizó el secado de arena volcánica, arcilla y agregado fino por 24 horas a 60 ^{o}C, utilizando el equipo "Deshidratador de Gabinete" del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
3. Se utilizaron 4 bandejas de 0.80 m de largo y 0.48 m de ancho, para cada materia prima y el agregado fino.
4. En cada bandeja se agregó el material hasta alcanzar un espesor de 0.015 m.
5. Se colocaron las bandejas con los materiales en los gabinetes del secador.
6. Transcurrido el tiempo de secado se apagó el deshidratador de gabinete, se retiraron las bandejas del equipo y se almacenó cada material en una bolsa diferente.
7. Se tamizó la arcilla por lotes de 1 Kg en una batería de tamices por 15 minutos para separar los sólidos que pasaran mesh No. 200 ó tamaño de partícula menor a 74 micrómetros. Este equipo se encuentra en el área de sólidos del "Laboratorio de Operaciones Unitarias" de la Universidad del Valle de Guatemala.
8. Se almacenó la arcilla que pasó mesh No. 200 en bolsas cerradas hasta el día de elaboración de mezcla.
9. En un molino de discos se realizó en lotes de 1 Kg la primer reducción de tamaño de partícula de la arena volcánica.
10. Cada lote de arena volcánica fue sometido a 3 moliendas para asegurar la máxima reducción de partícula. El equipo se encuentra en el área de sólidos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
11. La segunda molienda de la arena volcánica se realizó en lotes de 3 Kg con un tiempo de 10 minutos.

12. Se realizaron dos moliendas a cada lote de arena volcánica para obtener una reducción mayor de tamaño de partícula. Para este proceso se utilizó un molino de bolas tipo "Abrasión de Los Angeles" el cual se encuentra en el área de Carpintería de la Universidad del Valle de Guatemala.
13. La arena volcánica se colocó por lotes de 1 Kg en una batería de tamices por 15 minutos para separar los sólidos que pasaron por mesh No. 100. Se utilizó el equipo empleado para tamizar la arcilla.
14. Se almacenó la arena volcánica que pasó mesh No. 100 en bolsas plásticas identificadas.
15. Se tamizó por lotes de 1 Kg la cantidad de arena volcánica que pasó tamiz No. 100 hasta obtener 1 Kg de arena volcánica que pasara mesh No. 200.
16. Se almacenó la arena volcánica que pasó mesh No. 200 en una bolsa plástica identificada.
17. Se realizó el tamizaje del agregado fino, se colocó por lotes de 1 Kg el material en una batería de tamices empleándose un tiempo de 10 minutos por lote y se separaron los sólidos que pasaron mesh No. 30 ó tamaño de partícula menor a 595 micrómetros. El equipo utilizado fue el mismo empleado para tamizar la arcilla y la arena volcánica.
18. Se realizó la preparación de las soluciones empleadas para las diferentes mezclas.
19. Se determinó la cantidad de reactivo necesario para preparar las soluciones de hidróxido de sodio (NaOH).
20. Se utilizó la molaridad requerida de la solución, 8 Molar ó 14 Molar, multiplicándola por el peso molecular del NaOH de 40 g/mol y por la cantidad volumétrica a preparar de 0.50 L.
21. Se realizó la corrección por la pureza del reactivo de 98%.
22. Se preparó 0.50 L de solución de NaOH de concentración 8 Molar. Se pesaron 163.25 g de NaOH, en una balanza semianalítica tarando previamente el peso del beaker donde se agregarían las lentejas de NaOH.
23. Se disolvieron las lentejas de NaOH pesadas en 300 mL de agua destilada y se aforó la solución en un balón volumétrico de 500 mL.
24. Se trasladó la solución de NaOH 8 Molar a un recipiente plástico identificado y se almacenó.
25. Se preparó 0.50 L de solución de NaOH de concentración 14 Molar. Se pesaron 285.69 g de NaOH, en una balanza semianalítica tarando previamente el peso del beaker donde se agregarían las lentejas de NaOH.
26. Se disolvieron las lentejas de NaOH pesadas en 300 mL de agua destilada y se aforó la solución en un balón volumétrico de 500 mL.
27. Se trasladó la solución de NaOH 14 Molar a un recipiente plástico identificado y se almacenó.

28. Se preparó la solución alcalina 24 horas antes de realizar cada mezcla utilizada en la experimentación.
29. Se utilizó una relación másica constante de "Solución de Silicato de Sodio/Solución de Hidróxido de Sodio" de 2.5 para preparar la solución alcalina.
30. Esta relación fue la misma para la solución de NaOH de concentración 8 Molar y 14 Molar.
31. Se utilizaron relaciones másicas de "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.35, 0.43, 0.69 y 0.70.
32. Para preparar la solución con relación másica "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.35, se utilizó 31.43 g de solución de NaOH 8 Molar y 78.56 g de solución de silicato de sodio. Siendo la materia prima a utilizar de 314.26 g.
33. Para preparar las soluciones alcalinas restantes se realizó de forma similar a la solución descrita en el numeral 32, sustituyendo la relación másica de "Solución Alcalina/Materia Prima" por la correspondiente.
34. Se utilizó la densidad de la solución de NaOH 8 Molar de 1.30 g/L ó de la solución de NaOH 14 Molar de 1.34 g/L y la densidad de la solución de silicato de sodio de 1.30 g/L para obtener en volumen la cantidad para preparar la solución alcalina.
35. Se realizó la conversión de masa necesaria a volumen de la solución de NaOH de concentración 8 Molar ó 14 Molar y de la solución de silicato de sodio dividiendo la cantidad en gramos necesarios entre la densidad de cada solución.
36. En una probeta de capacidad de 100 mL se midió la cantidad de volumen necesario de solución de silicato de sodio y se trasladó a un recipiente plástico.
37. En otra probeta de capacidad de 100 mL se midió la cantidad de volumen necesario de solución de NaOH de concentración 8 Molar ó 14 Molar.
38. Se agregó el volumen medido de la solución de NaOH en la probeta al recipiente plástico que contenía el volumen de silicato de sodio.
39. Se cerró el recipiente con la solución alcalina, se agitó para homogenizar la solución y se almacenó hasta el día de preparación de la mezcla.
40. Se procedió a realizar la preparación de las mezclas.
41. La mezcla No. 1 se realizó utilizando arcilla como materia prima, no se realizó tamizaje para esta mezcla ya que se pretendía comparar la importancia del tamaño de partícula de la materia prima con la resistencia a compresión.
42. Se determinaron las relaciones másicas iniciales correspondientes a la mezcla No. 1 como "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.35, "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.21, por literatura consultada.

43. Se utilizó como relación másica “Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero” de 2.75 indicado por el ASTM C109. Esta relación fue la misma para todas las mezclas realizadas donde se utilizó agregado fino.
44. La cantidad de materia prima inicial se determinó en base al ASTM C109, el cual indica 500 g de cemento para compactar 6 cubos. Se utilizó una base de cálculo de 350 g de sólidos de geopolímero.
45. Los sólidos de geopolímero se calcularon como la cantidad de materia prima, cantidad de NaOH en la solución a 8 Molar ó 14 Molar y cantidad de SiO_2 y Na_2O en la solución de silicato de sodio.
46. Se pesó para la mezcla No. 1, 314.26 g de arcilla y 962.50 g de agregado fino en una balanza mecánica en recipientes separados y tarados previamente.
47. Se preparó la solución alcalina de la mezcla No. 1 con 25.76 mL de solución de NaOH 8 Molar y 60.43 mL de solución de silicato de sodio.
48. En un recipiente se agregó la arcilla y el agregado fino, se realizó la mezcla por 5 minutos aproximadamente con una espátula hasta observar homogeneidad.
49. Se agregó a la mezcla de sólidos la solución alcalina preparada previamente y se mezcló nuevamente hasta que la mezcla fuera homogénea y no se observara diferencia en la textura.
50. Se realizó el mismo procedimiento para las mezclas No. 2, No. 3, No. 4, No. 5 y No. 6 descritas a continuación, variando las relaciones másicas de los componentes y la materia prima.
51. La mezcla No. 2 se realizó con arcilla no tamizada como materia prima y se utilizaron relaciones másicas de “Solución Alcalina/Materia Prima” de 0.35, “Agua/Sólidos de Geopolímero” de 0.20, “Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero” de 2.75.
52. Para la mezcla No. 2 se utilizó 310.30 g de arcilla, 962.50 g de agregado fino. La solución alcalina se realizó con 23.16 mL de solución de NaOH 14 M y 59.67 mL de solución de silicato de sodio.
53. La mezcla No. 3 se realizó con arena volcánica utilizando el material tamizado que pasaba mesh No. 100 como materia prima y se utilizaron relaciones másicas de “Solución Alcalina/Materia Prima” de 0.70, “Agua/Sólidos de Geopolímero” de 0.38, “Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero” de 2.75.
54. Para la mezcla No. 3 se utilizó 157.13 g de arena volcánica, 530.39 g de agregado fino. La solución alcalina se realizó con 25.76 mL de solución de NaOH 8 M y 60.43 mL de solución de silicato de sodio.
55. La mezcla No. 4 se realizó con arena volcánica utilizando el material tamizado que pasaba mesh No. 100 como materia prima y se utilizaron relaciones másicas de “Solución

Alcalina/Materia Prima" de 0.69, "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.35, "Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero" de 2.75.

56. Para la mezcla No. 4 se utilizó 157.13 g de arena volcánica, 541.27 g de agregado fino. La solución alcalina se realizó con 23.16 mL de solución de NaOH 14 M y 59.67 mL de solución de silicato de sodio.
57. La mezcla No. 5 se realizó con arcilla utilizando el material tamizado que pasaba mesh No. 200 como materia prima y se utilizaron relaciones másicas de "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.69, "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.73, "Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero" de 2.75.
58. Para la mezcla No. 5 se utilizó 157.13 g de arcilla, 541.27 g de agregado fino. La solución alcalina se realizó con 23.16 mL de solución de NaOH 14 M y 59.67 mL de solución de silicato de sodio. Se añadieron 75 mL de agua extra a la mezcla.
59. La mezcla No. 6 se realizó con arcilla sin tamizar como materia prima y se utilizaron relaciones másicas de "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.69, "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.73, "Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero" de 2.75.
60. Para la mezcla No. 6 se utilizó 157.13 g de arcilla, 541.27 g de agregado fino. La solución alcalina se realizó con 23.16 mL de solución de NaOH 14 M y 59.67 mL de solución de silicato de sodio. Se añadieron 75 mL de agua extra a la mezcla.
61. La mezcla No. 7 se realizó con arena volcánica, utilizando el material que pasaba mesh No. 200.
62. Las relaciones másicas correspondientes a la mezcla No. 7 fueron "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.43, "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.25.
63. No se utilizó agregados finos para esta mezcla.
64. Se pesó para la mezcla No. 7, 814.81 g de arena volcánica en una balanza mecánica en un recipiente tarado previamente.
65. Se preparó la solución alcalina de la mezcla No. 7 con 88.76 mL de solución de NaOH 14 Molar y 228.74 mL de solución de silicato de sodio.
66. Se agregó al recipiente con la arena volcánica la solución alcalina y se mezcló con una espátula por aproximadamente 5 minutos, hasta que se observó homogeneidad.
67. Se agregó 15 mL de agua para mejorar la manejabilidad de la mezcla y se mezcló por 5 minutos más con la espátula.
68. Para realizar la mezcla No. 8 se utilizó el mismo procedimiento empleado para la mezcla No. 7.
69. La mezcla No. 8 se realizó con arcilla tamizada que pasaba mesh No. 200 como materia prima y se utilizaron relaciones másicas de "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.43, "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.25.

70. Para la mezcla No. 8 se utilizó 814.81 g de arcilla. La solución alcalina se realizó con 88.76 mL de solución de NaOH 14 M y 228.74 mL de solución de silicato de sodio. Se añadieron 15 mL de agua extra a la mezcla.
71. Se realizó la preparación de los cubos de 50x50x50 mm para los ensayos de compresión.
72. Se utilizaron 2 moldes de 3 cubos de 50x50x50 mm para realizar la compactación de las mezclas en el "Laboratorio de Materiales 1" de la Universidad del Valle de Guatemala.
73. Se aplicó solvente en el interior de los moldes para facilitar la extracción de los cubos después del tiempo de curado.
74. Se compactó en uno de los moldes la mezcla No. 1, se agregó en 2 capas y se utilizó una barra para compactación para evitar que existieran espacios vacíos dentro del molde.
75. Se retiró el material sobrante en la superficie de los cubos del molde con una espátula.
76. Se compactó en el segundo molde la mezcla No. 2 realizando el mismo procedimiento empleado en la compactación de la mezcla No. 1.
77. Se realizó el proceso de secado y curado de los cubos compactados.
78. El curado de la mezcla No. 1 y No. 2 se realizó a temperatura ambiente.
79. Se retiraron los cubos del molde transcurridas 24 horas después de haberse compactado la mezcla.
80. Se dejaron los cubos realizados con la mezcla No. 1 y No. 2 por 72 horas en condiciones ambientales en el "Laborarodio de Materiales 1".
81. Se midió la longitud, ancho y altura de los cubos de ambas mezclas y se registraron los datos utilizando pulgadas como unidad de medida.
82. Se colocó un cubo en el equipo "Soiltest LC-2 Dial Indicator" para resistencia a compresión y se inició la medición, se registró la lectura dada en libras fuerza.
83. Se realizó el mismo procedimiento con todos los cubos.
84. Se realizó el mismo procedimiento de compactación, curado y medición de resistencia a compresión para las mezclas No. 3 y No. 4.
85. Se realizó la compactación de la mezcla No. 5 y No. 6 siguiendo el procedimiento de las mezclas anteriores.
86. Se colocaron los moldes con los cubos de las mezclas No. 5 y No. 6 a 60°C por 24 horas en un horno.
87. Transcurrido el tiempo de curado se retiraron los moldes del horno, se dejaron enfriar por 30 minutos y se retiraron los cubos de ambas mezclas.
88. Se realizó el procedimiento para los ensayos de compresión.
89. Se procedió con la medición y prueba de resistencia a compresión de los cubos de la mezcla No. 5 y No. 6 con el procedimiento empleado con las mezclas No. 1 a No. 4.
90. Se realizó la compactación de la mezcla No. 7 y No. 8 siguiendo el procedimiento de compactación de las mezclas anteriores.

91. Se colocaron los moldes con los cubos de las mezclas No. 7 y No. 8 a 60°C por 24 horas en un horno.
92. Transcurrido el tiempo de curado se retiraron los moldes del horno, se dejaron enfriar por 30 minutos y se retiraron los cubos de ambas mezclas.
93. Se procedió con la medición y prueba de resistencia a compresión de los cubos de la mezcla No. 7 y No. 8.
94. Con las mediciones de los cubos se determinó el área sobre la cual el equipo aplicó la fuerza para romper los cubos.
95. La lectura en libras fuerza dada por el equipo se dividió entre el área calculada.
96. El resultado obtenido fue la resistencia a compresión proporcionada por la mezcla utilizada y las condiciones de curado empleadas en el proceso.
97. Se determinó la aplicación del geopolímero en construcción analizando los resultados obtenidos de resistencia a compresión.

D. Metodología para la determinación de la línea de producción a nivel laboratorio.

1. Una vez establecido el procedimiento detallado a seguir para la producción de geopolímeros, por medio de las características que éste requiere, se definieron las materias primas, arena volcánica y arcilla.
2. Las materias primas debieron cumplir parámetros específicos establecidos, tales como la cantidad de óxidos de sílice y aluminio dentro de su composición química para poder ser útiles en la producción de geopolímeros.
3. A partir del procedimiento establecido para la preparación de la materia prima, la producción del geopolímero y las pruebas de resistencia, se definieron las operaciones unitarias de la producción y las operaciones físicas complementarias requeridas.
4. Las operaciones unitarias requeridas para el proceso de producción del geopolímero y las operaciones físicas complementarias requeridas fueron:
    i. Secado
    ii. Trituración
    iii. Molienda
    iv. Separación por tamaño de partícula
    v. Pesado
    vi. Mezclado
    vii. Curado del geopolímero

5. Para el proceso de selección del equipo se realizó una matriz de selección en donde se comparaban los requerimientos de los procesos contra los parámetros de operación de los equipos.
6. A cada requerimiento se le asignó una puntuación de importancia de 1 hasta 10, siendo 1 el menos importante y 10 más importante.
7. Los parámetros de cada equipo se evaluaron, para determinar cuántos de ellos cumplían con los requerimientos del proceso.
8. En base al mayor porcentaje de los de parámetros que cumpliera un equipo con los requerimientos; en especial con el requerimiento más importante, éste se elige como el equipo adecuado para la producción de geopolímeros.
9. El porcentaje aceptable para esta evaluación debe de ser mayor al 75%.
10. Si existiera un empate entre los porcentajes de los parámetros se debe elegir el equipo que cumpla con los requerimientos de mayor importancia, es decir, con los que tengan un valor de 8 a 10.
11. Esto se realizó para cada operación unitaria y para cada operación física.
12. Procedimiento establecido y clasificación de equipo:
    i. Preparación de la materia prima, agregados y producción del geopolímero.
    ii. Se estableció 1kg de material como base de cálculo para todas las operaciones. Este proceso se realizó para todas las operaciones unitarias y las operaciones físicas necesarias para la producción.
    iii. Operación de Secado, para la reducción del porcentaje de humedad de la materia prima a utilizar.
13. Requerimientos del proceso:
    i. Bajo Porcentaje de humedad
    ii. Capacidad a trabajar
    iii. Localización del equipo dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG, edificio E.
14. Parámetros de operación del equipo:
    i. Temperatura
    ii. Capacidad
    iii. Tiempo de secado
15. El tamaño de partícula de la materia prima debe ser menor a 45μm, por lo que se requiere la operación unitaria de la trituración y molienda para obtener este tamaño de partícula.
16. Los requerimientos del proceso son:
    i. Tamaño de partícula fina
    ii. Capacidad a trabajar
    iii. Localización del equipo

17. Los parámetros de operación del equipo son:
    i. Tamaño de partícula
    ii. Capacidad del equipo
    iii. Potencia
    iv. Revoluciones por minuto
18. Para la operación unitaria de mezclado se identificaron los siguientes requerimientos y parámetros a tomar en cuenta para la producción.
19. Los requerimientos del proceso son:
    i. Capacidad a trabajar
    ii. Tiempo de mezclado
    iii. Localización del equipo
20. Los parámetros de operación del equipo son:
    i. Capacidad del equipo
    ii. Potencia
    iii. Velocidad
    iv. Dimensiones
21. A partir de estos requerimientos y parámetros se buscó el equipo adecuado para esta operación dentro y fuera del Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle.
22. Después de encontrar los equipos que cumplen con la operación unitaria, éstos se compararon por medio de una matriz de selección y así poder elegir el equipo adecuado.
23. Equipo complementario para las operaciones físicas de la producción. Al igual que con las operaciones unitarias, se realizaron matrices de comparación para los diferentes equipos complementarios.
24. Según la producción de geopolímeros se debió realizar un análisis granulométrico e identificar el tamaño de partícula.
25. Los requerimientos del proceso son:
    i. Clasificación de los diferentes tamaños de partícula en la muestra
    ii. Capacidad a trabajar
    iii. Tiempo de trabajo
    iv. Localización del equipo
26. Los parámetros de operación del equipo son:
    i. Capacidad del equipo
    ii. Potencia
    iii. Velocidad
    iv. Dimensiones
    v. Localización

27. Debido a que se requerían diferentes cantidades de materiales, se realizó el proceso de pesado. Los parámetros para esta operación según el procedimiento son:
28. Los requerimientos del proceso son:
    i. Capacidad a trabajar
    ii. Localización del equipo
29. Los parámetros de operación del equipo son:
    i. Capacidad del equipo
    ii. Incertidumbre
    iii. Dimensiones
    iv. Localización
30. Para el proceso de curado era necesario un horno, para este proceso se identificaron los siguientes requerimientos y parámetros.
31. Los requerimientos del proceso son:
    i. Temperatura de operación
    ii. Capacidad a trabajar
    iii. Localización del equipo
32. Los parámetros de operación del equipo son:
    i. Capacidad del equipo
    ii. Material del equipo
    iii. Localización
33. Al igual que en los equipos de las operaciones unitarias, en estos equipos de las operaciones físicas se buscó el equipo adecuado para esta operación dentro y fuera del Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle.
34. Después de encontrar los equipos que cumplen con la operación unitaria, éstos se compararon por medio de una matriz de selección y así poder elegir el equipo adecuado.

E. Metodología para la determinación de la línea de producción a nivel industrial.

1. Determinación de las condiciones de operación para la propuesta de la línea de producción, a través de las pruebas de las mezclas a nivel laboratorio.
2. Se toman en cuenta las cantidades, temperaturas y tiempo en que se llevo a cabo la parte experimental de la mezcla seleccionada para llevar la producción a una mayor escala.
3. Determinación de la capacidad del equipo, en esta etapa se considera el tamaño del equipo a utilizar, de acuerdo a la producción de la línea a nivel industrial a utilizar. Se define a partir de la información técnica de sitios web de los proveedores de equipos.

4. Selección del equipo y planteamiento de línea de producción. Dado que se definió el proceso se establece el equipo a utilizar en cada etapa.
5. Una vez establecidas las condiciones de operación y la capacidad, se elige el equipo de acuerdo a los requerimientos del proceso. Para esto se realizó una revisión bibliográfica y consulta de fuentes de información
6. Se realizó una evaluación económica de la propuesta de la línea de producción.
7. En esta etapa se cotiza y analizan alternativas económicas de los equipos de producción en el mercado a través de los sitios web de los proveedores.
8. Se realizó un estudio económico sobre el costo de inversión del equipo seleccionado a través de cálculos basados en el manual del Ingeniero Químico e índices del año vigente.

V. RESULTADOS

A. Pretratamiento y caracterización de arcilla

Cuadro 5. Análisis cuantitativo de humedad presente en muestra de arcilla.

Medición	*Resultado*
% de humedad promedio	7.0521
Desviación estándar	0.0293

Cuadro 6. Análisis cuantitativo de pérdida por ignición presente en arcilla.

Medición	*Resultado*
% de materia orgánica	13.8946
Desviación estándar	0.0336

Cuadro 7. Análisis cuantitativo de SiO_2 y Al_2O_3 en arcilla por fluorescencia de rayos X.

Compuesto	*Composición (% p/p)*
SiO_2	45.42
Al_2O_3	21.41

* El ensayo se realizó en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso S.A.

Imagen 11. Composición granulométrica de arcilla, tamaño de sólidos presentes.

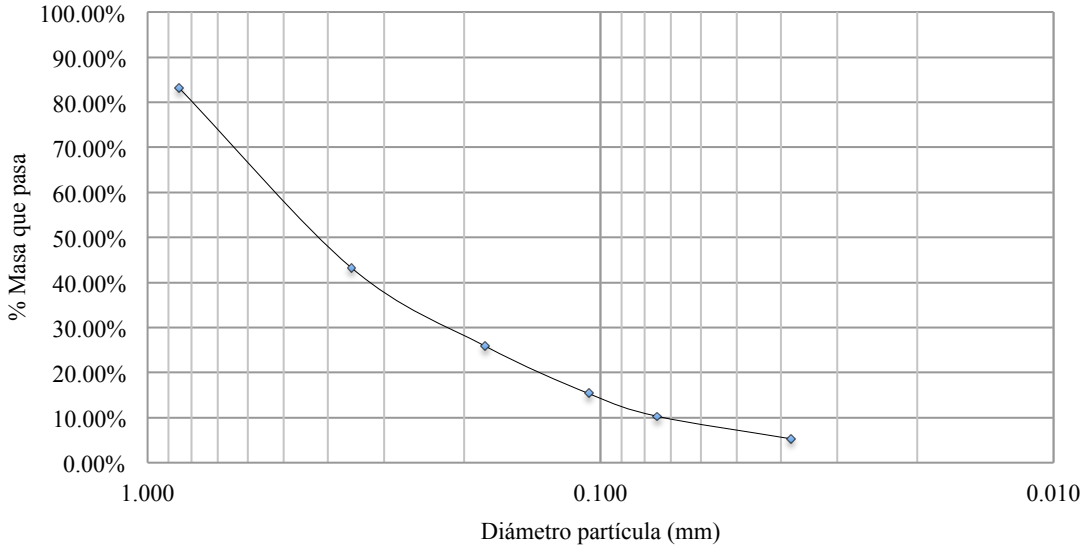
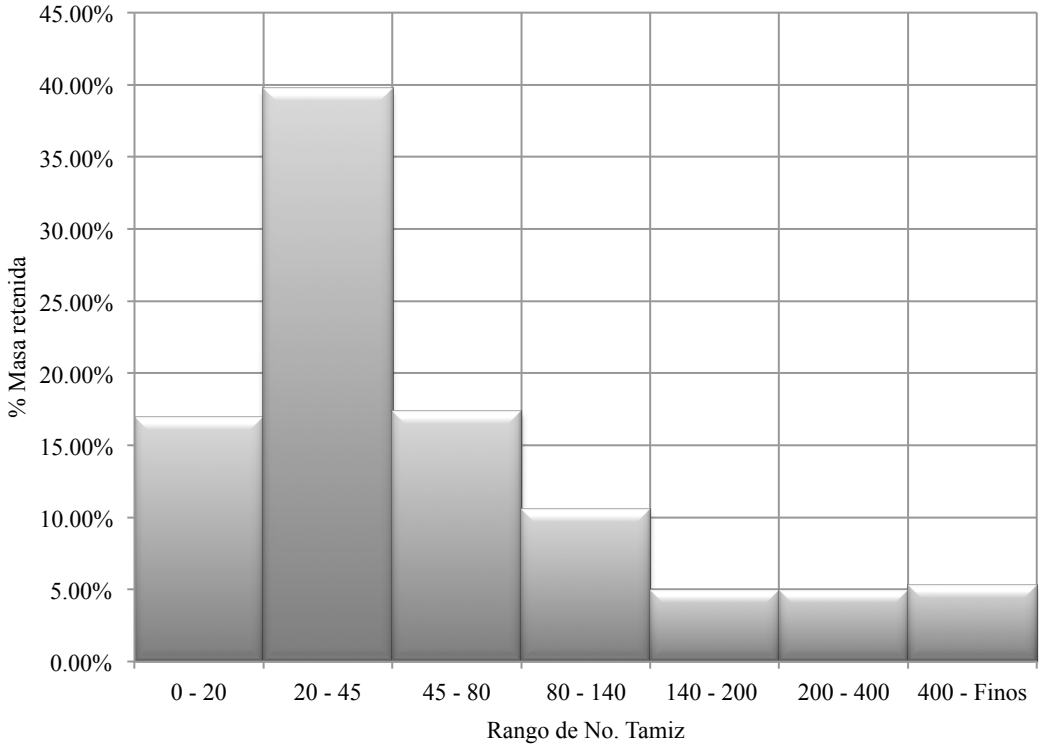


Imagen 12. Composición granulométrica de arcilla, retención entre tamices.



Cuadro 8. Análisis cuantitativo de densidades de bulto, porcentaje de compresibilidad y densidad de trabajo en arcilla.

Medición	*Resultado*
Densidad de bulto promedio (g/cm^3)	0.6815
Desviación estándar	0.0106
Densidad de bulto aireada promedio (g/cm^3)	0.7043
Desviación estándar	0.0188
Densidad de bulto compactada (g/cm^3)	0.7990
Desviación estándar	0.0207
% Compresibilidad promedio	11.8542
Densidad de trabajo promedio (g/cm^3)	0.7155

Cuadro 9. Análisis cuantitativo de Límites de Atterberg en arcilla.

Medición	*Resultado*
Límite líquido de Atterberg	23.56
Límite plástico de Atterberg	11.70
Índice de plasticidad de Atterberg	11.86

Cuadro 10. Análisis cuantitativo de material más fino que el tamiz No. 200 por lavado de arcilla.

Medición	*Resultado*
% retenido tamiz No. 200	40.40
% finos	59.60

Cuadro 11. Análisis cuantitativo del ángulo de reposo y ángulo de deslizamiento de arcilla.

Medición	*Resultado*
Ángulo de reposo promedio (º)	45.00
Desviación estándar	1.7580
Ángulo de deslizamiento promedio (º)	20.50
Desviación estándar	1.8340

Cuadro 12. Resultados de análisis químico mediante fluorescencia de rayos X.

Compuesto	*% (p/p)*
SiO_2	50.70
Al_2O_3	18.55

B. Pretratamiento y caracterización de arena volcánica

Cuadro 13. Contenido de humedad en arena volcánica.

Muestra Inicial	5.0 g
Muestra Final	4.8 g
Porcentaje de humedad	4.07%

Cuadro 14. Densidad de arena volcánica.

Densidad compactada	1.5085 g/cm^3
Desviación estándar	0.086
Densidad de bulto	1.5107 g/cm^3
Desviación estándar	0.371
Densidad aireada	1.5810 g/cm^3
Desviación estándar	0.233

Cuadro 15. Pérdida por calcinación de arena volcánica.

Muestra Inicial	4.8 g
Muestra Final	4.7 g
Porcentaje de calcinación	2.08%

Cuadro 16. Análisis cuantitativo de ángulo de reposo de arena volcánica.

Angulo de reposo promedio (º)	*Desviación estándar*
41.2	1.3038

Imagen 13. Diámetro de partícula contra porcentaje en masa.

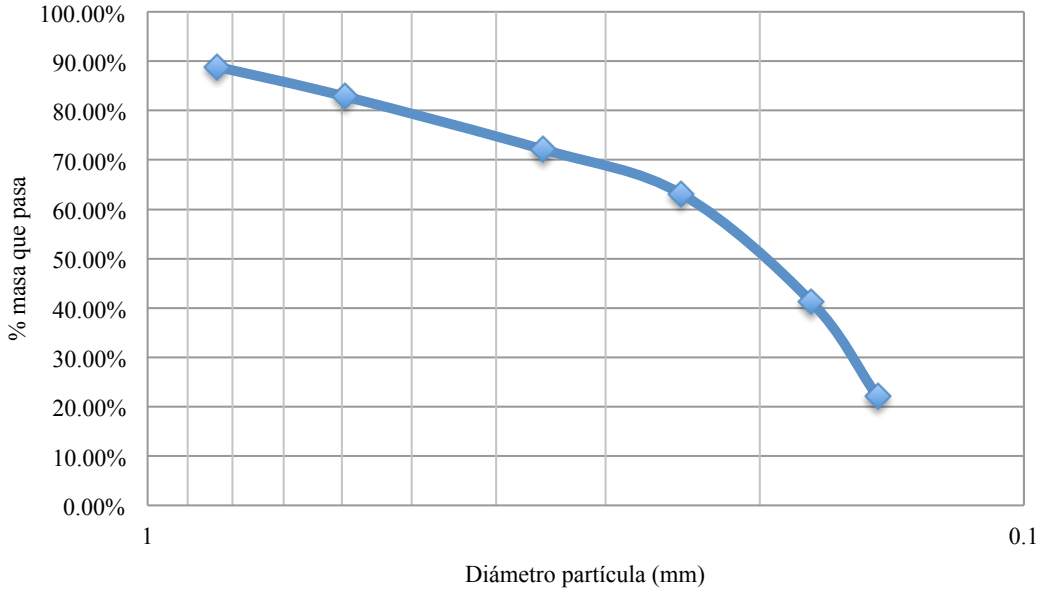
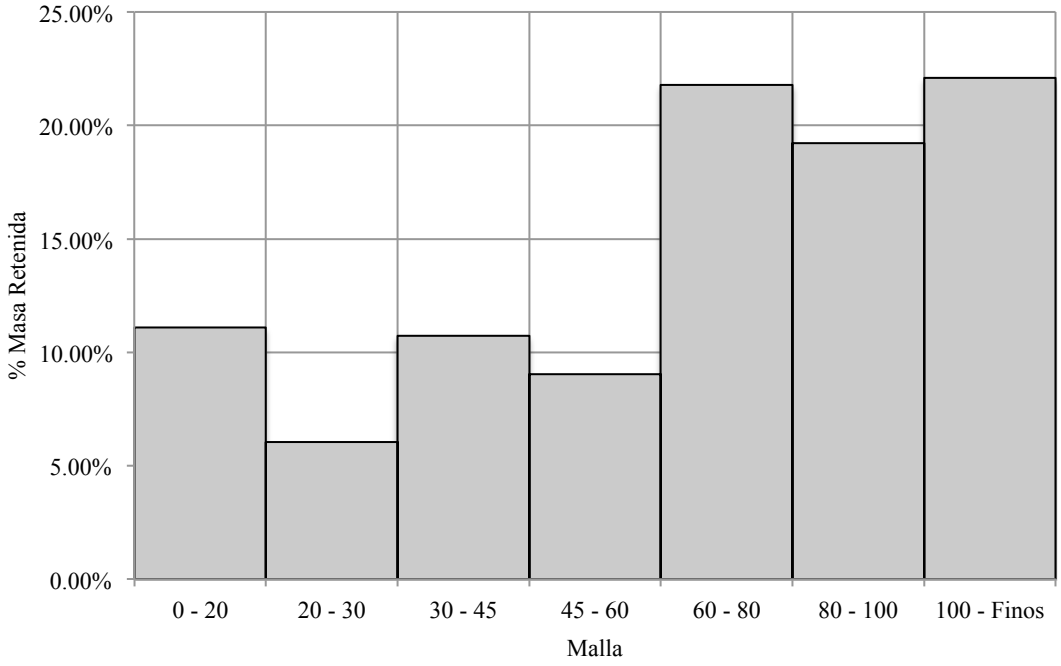


Imagen 14. Curva granulométrica de arena volcánica.



C. Proceso y condiciones de operación para fabricación de geopolímeros

Cuadro 17. Resistencia a compresión de las mezclas realizadas con arcilla como materia prima variando las relaciones másicas de la mezcla.

Mezcla	*Tamaño de particula*	*Concentración Solución NaOH*	*Solución Alcalina Materia Prima*	*Agua Sólidos de Geopolímero*	*Agregado Fino Sólido de Geopolímero*	*Resistencia a compresión (psi)*
1	Sin Tamizar	8 M	0.35	0.21	2.75	-
2	Sin Tamizar	14 M	0.35	0.20	2.75	13.94 ± 1.12
5	Menor a 149 micrones	14 M	0.69	0.73	2.75	60.51 ± 5.58
6	Sin Tamizar	14 M	0.69	0.73	2.75	110.93 ± 4.32
8	Menor a 74 micrones	14 M	0.43	0.25	0.00	151.07 ± 87.04

Cuadro 18. Resistencia a compresión de las mezclas realizadas con arcilla como materia prima variando temperatura y tiempo de curado.

Mezcla	*Temperatura de Curado*	*Tiempo de Curado*	*Resistencia a Compresión (psi)*
1	Ambiente	3 días	-
2	Ambiente	3 días	13.94 ± 1.12
5	60 ^{o}C	1 día	60.51 ± 5.58
6	60 ^{o}C	1 día	110.93 ± 4.32
	Ambiente	6 días	
8	60 ^{o}C	1 día	151.07 ± 87.04

Cuadro 19. Resistencia a compresión de mezclas realizadas con arena volcánica como materia prima variando las relaciones másicas de la mezcla.

Mezcla	*Tamaño de partícula*	*Concentración Solución NaOH*	*Solución Alcalina Materia Prima*	*Agua Sólidos de Geopolímero*	*Agregado Fino Sólidos de Geopolímero*	*Resistencia a Compresión (psi)*
3	Menor a 149 micrones	8 M	0.70	0.38	2.75	-
4	Menor a 149 micrones	14 M	0.69	0.35	2.75	549.2 ±178.07
7	Menor a 74 micrones	14 M	0.43	0.25	0.00	580.36 ±70.32

Cuadro 20. Resistencia a compresión de las mezclas realizadas con arena volcánica como materia prima variando temperatura y tiempo de curado.

Mezcla	*Temperatura de Curado*	*Tiempo de Curado*	*Resistencia a Compresión (psi)*
3	Ambiente	3 días	-
4	Ambiente	7 días	549.22 ± 178.07
7	60 ^{o}C	1 día	580.36 ± 70.32
	Ambiente	3 días	

D. Evaluación y selección de equipos para la producción de geopolímeros.

Cuadro 21. Equipo seleccionado para el proceso.

Equipo	*Variable a Medir*	*Impacto en el proceso*
Horno deshidratador AISI 204L EC-404-6, No. De serie 12805	Reducción de humedad	Evita dañar el equipo siguiente
Triturador de mandíbulas del Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química de la UVG	Reducción de tamaño	Mejorar la reacción entre los agregados sólidos y líquidos.
Molino de discos y de bolas, (máquina de los ángeles) del Departamento de Ingeniería Civil de la UVG	Reducción de tamaño	Mejorar la reacción entre los agregados sólidos y líquidos.
Tazón de acero inoxidable, del Departamento de Ingeniería Civil de la UVG	Mezcla	Homogeneizar las mezclas
Horno Blue M, modelo OV-409-2	Curado del producto	Obtener el producto para pruebas de resistencia

Cuadro 22. Equipo auxiliar seleccionado.

Equipo	*Variable a Medir*	*Impacto en el proceso*
Tamizadora W.S Tyler Ro-Tap RX-29, serie I9I83	Tamaños de partículas	Elección de los tamaños de partículas de las muestras menores
Balanza electrónica OHAUS	Peso de las cantidades a utilizar	Producción de un buen geopolímero
Moldes de cubos para concreto Humboldt, modelo H-2810 y H-2820 con moldes para 3 cubos	Formación de cubos	Facilitar las pruebas del geopolímero.

Cuadro 23. Comparación de equipos para el proceso de secado.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*			
		Horno Deshidratador		Mufla	
Capacidad de 1 kW	9	0 - 500 kg	×	1 kg	-
Temperatura máxima según el proceso (60 °C)	8	0 - 280 °C	×	0 - 1100 °C	-
Localización	2	Edificio E UVG	×	Edificio C UVG	-
Total	19		19		0
Porcentaje	100%	100%		0%	

Cuadro 24. Especificaciones del triturador a utilizar.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*	
		Triturador	
Tamaño de partícula (100 µm)	10	80 mm	×
Cap. De producción	8	960 kg/h	×
Velocidad	7	600 RPM	×
Potencia	5	2.2 HP	×
Localización	2	Edificio E UVG	×
Total	32		32
Porcentaje	100%	100%	

Cuadro 25. Comparación de equipos para el proceso de molienda.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*					
		Molino de discos		Molino de martillo		Molino de bolas	
Tamaño de partícula (100 µm)	10	50 µm		70-50 µm		10 µm	×
Cap. De producción	8	100 kg/h		50-65 kg/h		50 kg/h	×
Velocidad	7	660 RPM	×	----		30-33 RPM	
Potencia	5	2 HP		2.3 HP		1 HP	×
Localización	2	Edificio E UVG	×	Edificio E UVG	×	Edificio E UVG	×
Total	32		9		2		25
Porcentaje	100%	28%		6%		78%	

Cuadro 26. Comparación de equipos para el proceso de mezclado.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*			
		Mezclador rotatorio		Tazón mezclador	
Capacidad (1500 g)	8	50 kg		2 kg	×
Potencia	5	1.1 HP		0 HP	×
Velocidad	6	46 rpm	×	Definido por usuario	
Localización	2	Edificio E UVG	×	Edificio E UVG	×
Total	21				25
Porcentaje	100%	38%		72%	

Cuadro 27. Comparación de equipos para el proceso de pesado.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*			
		Balanza analítica		Balanza eléctrica	
Capacidad (1500 g)	8	210 g		2100 g	×
Incertidumbre	7	± 0.1g		± 0.1g	×
Dimensiones	5	19.6 x 32 x 28.7 cm		22 x 8.5 x 30 cm	×
Localización	2	Edificio E UVG	×	Edificio E UVG	×
Total	22		2		22
Porcentaje	100%	9%		100%	

Cuadro 28. Comparación de equipos para el proceso de curado.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*			
		Horno deshidratador		Horno	
Capacidad (1 kg)	8	0 - 500 kg		200 kg	×
Temperatura (60 °C)	9	280 °C		260 °C	×
Potencia	6	1 HP		1/6 HP	×
Localización	2	Laboratorio de O. Unitarias	×	Dep. de ingeniería Civil	
Total	25		2		32
Porcentaje	100%	8%		92%	

Cuadro 29. Tamizador utilizado.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*	
		Tamizador	
Tamaño de particula (45 µm)	10	75 µm	×
Capacidad 1kg	8	960 kg/h	×
Velocidad	7	600 RPM	×
Potencia	5	2.2 HP	×
Dimensiones	2	710 x 540 x 640 mm	×
Localización	2	Edificio E UVG	×
Total	24		24
Porcentaje	100%	100%	

Cuadro 30. Datos técnicos de los moldes utilizados.

Requerimientos del proceso	*Importancia*	*Parámetros del Equipos*	
		Moldes	
Materiales	7	Acero inoxidable y bronce forjado	×
Capacidad	6	3 cubos de 2”	×
Peso de embarque	1	15 lb	×
Localización	2	Dep. de ingeniería Civil	×
Total	16		16
porcentaje	100%	100%	

Imagen 15. Diagrama del proceso de producción de geopolímero.

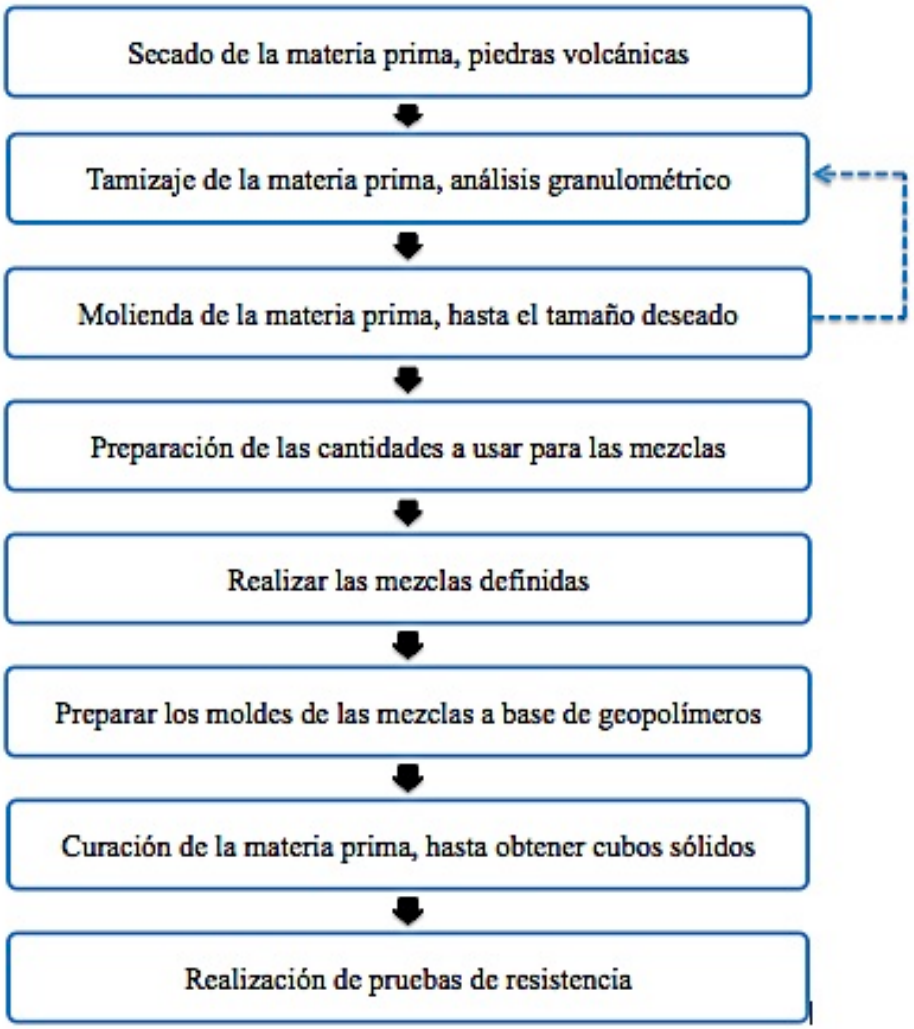
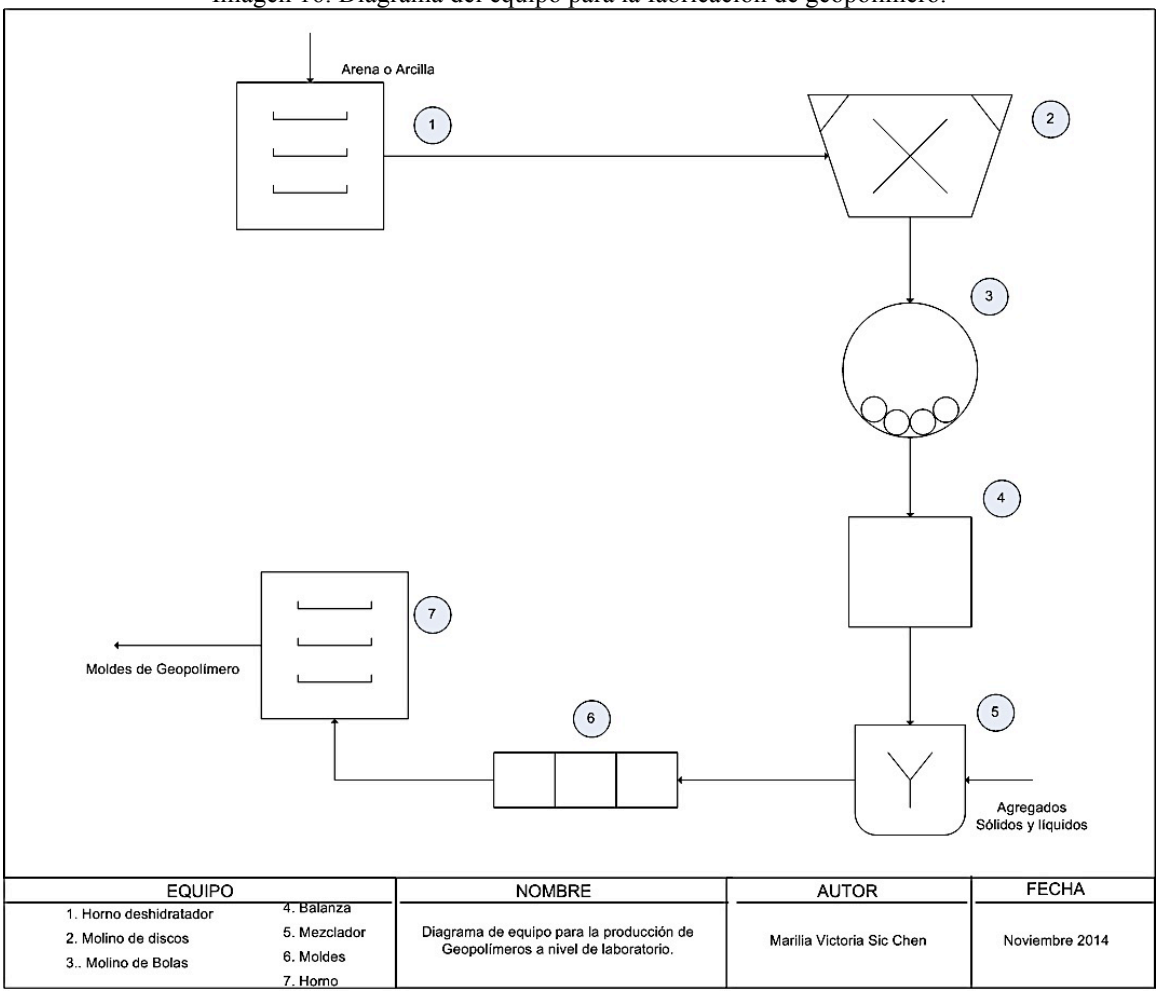


Imagen 16. Diagrama del equipo para la fabricación de geopolímero.



EQUIPO		NOMBRE	AUTOR	FECHA
1. Horno deshidratador 2. Molino de discos 3.. Molino de Bolas	4. Balanza 5. Mezclador 6. Moldes 7. Horno	Diagrama de equipo para la producción de Geopolímeros a nivel de laboratorio.	Marilia Victoria Sic Chen	Noviembre 2014

Imagen 17. Balance de masa para la producción de mezclas de geopolímero a base de arena volcánica.

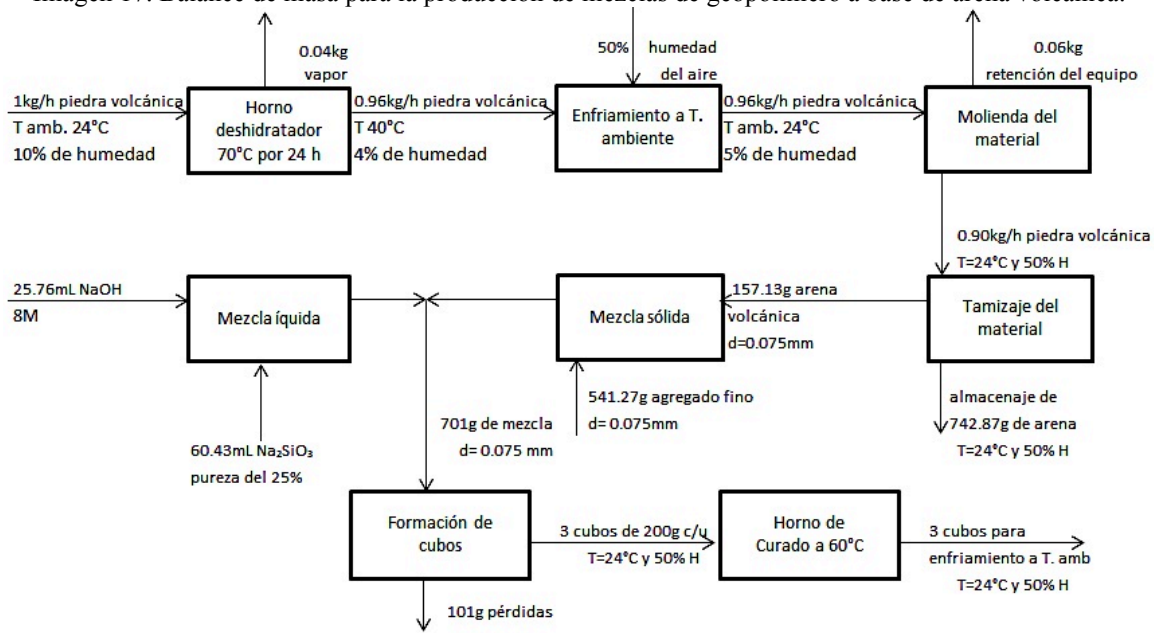
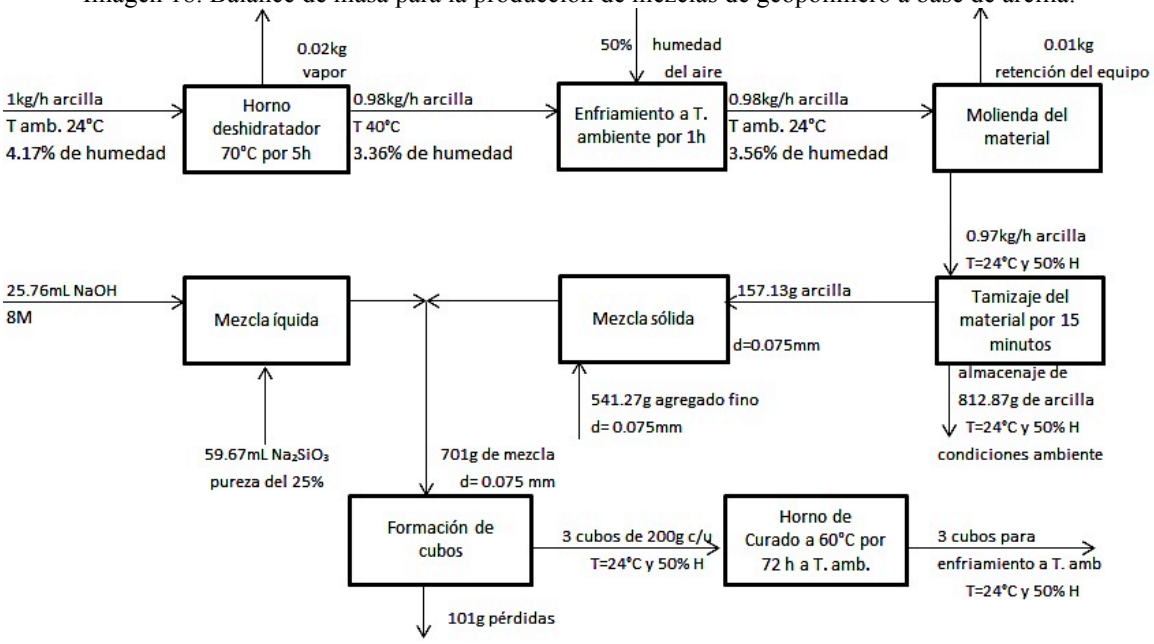


Imagen 18. Balance de masa para la producción de mezclas de geopolímero a base de arcilla.



E. Producción de Geopolímero

Cuadro 31. Formulación de geopolímero para procesamiento de arena volcánica.

Materia Prima	*Cantidad de Materia Prima (Kg)*	*Solución de NaOH 14 M (L)*	*Solución de Silicato de Sodio (L)*	*Agregado Fino (Kg)*
Arena Volcánica	1000	147.39	531.65	3444.73

Cuadro 32. Resistencia mecánica y térmica de geopolímero.

Materia Prima	*Resistencia a la compresión (psi)*	*Resistencia térmica (°C)*
Arena Volcánica	570.69	60

Imagen 19. Diagrama de flujo de proceso para producción de geopolímero.

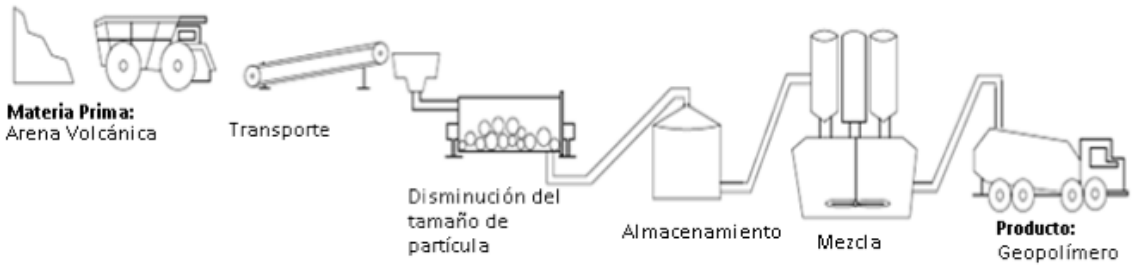


Imagen 20. Línea de producción para la fabricación de geopolímero a partir de arena volcánica.

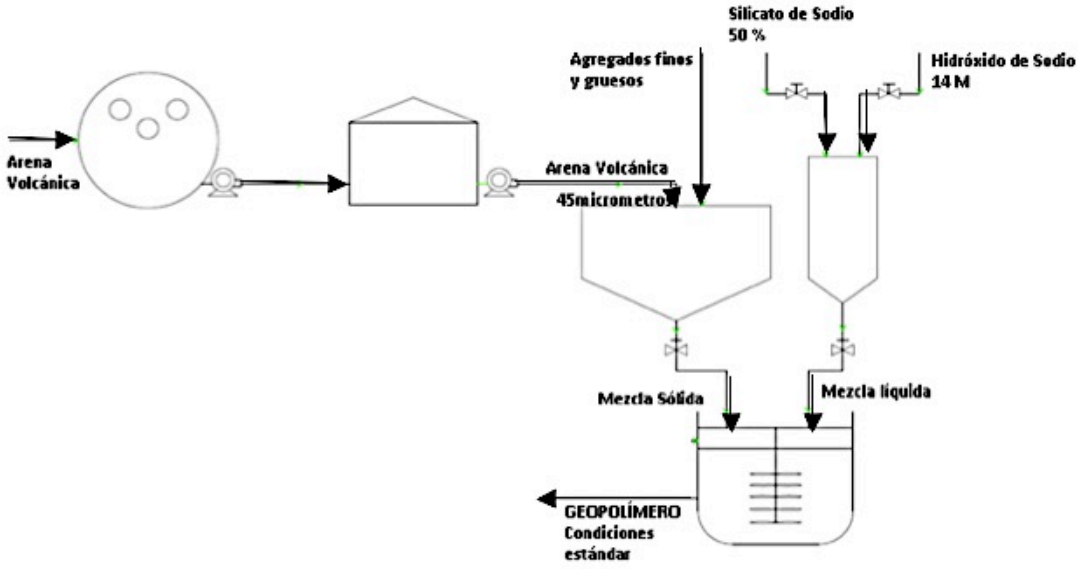


Imagen 21. Balance de masa del proceso del geopolímero.

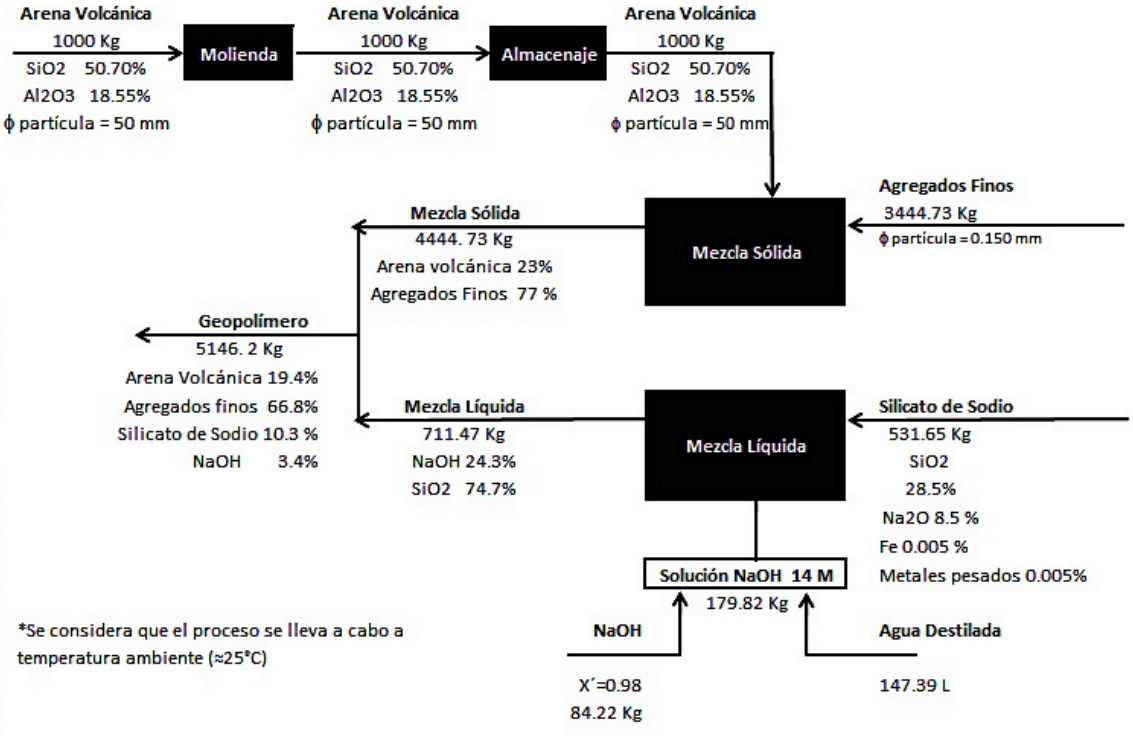


Imagen 22. Servicios auxiliares y equipo del proceso de fabricación del geopolímero.

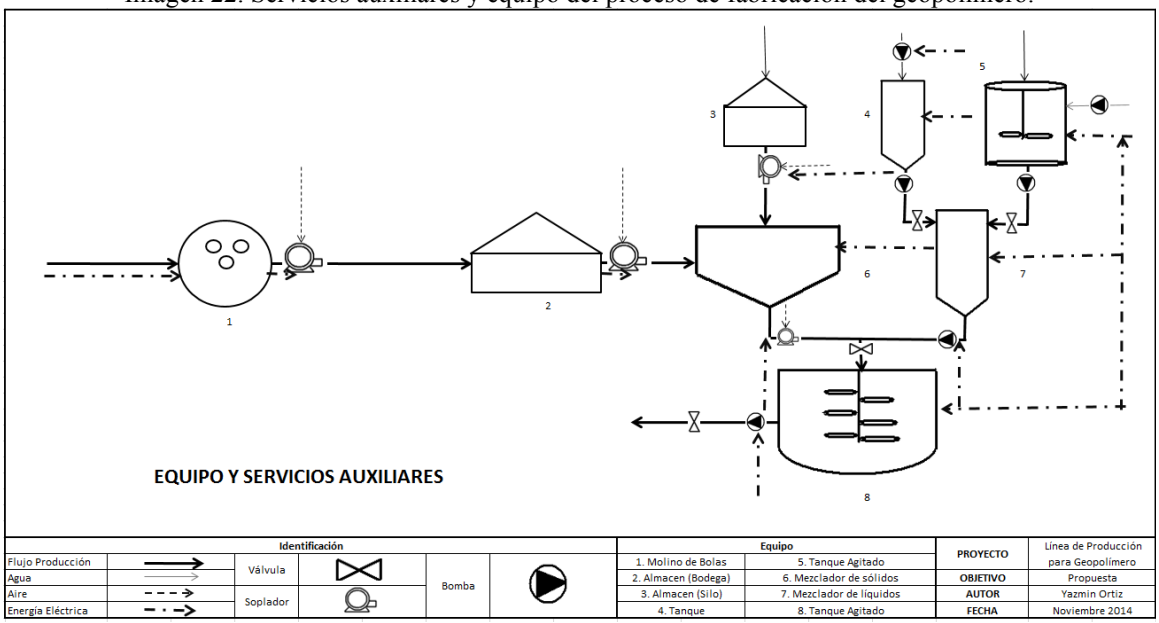
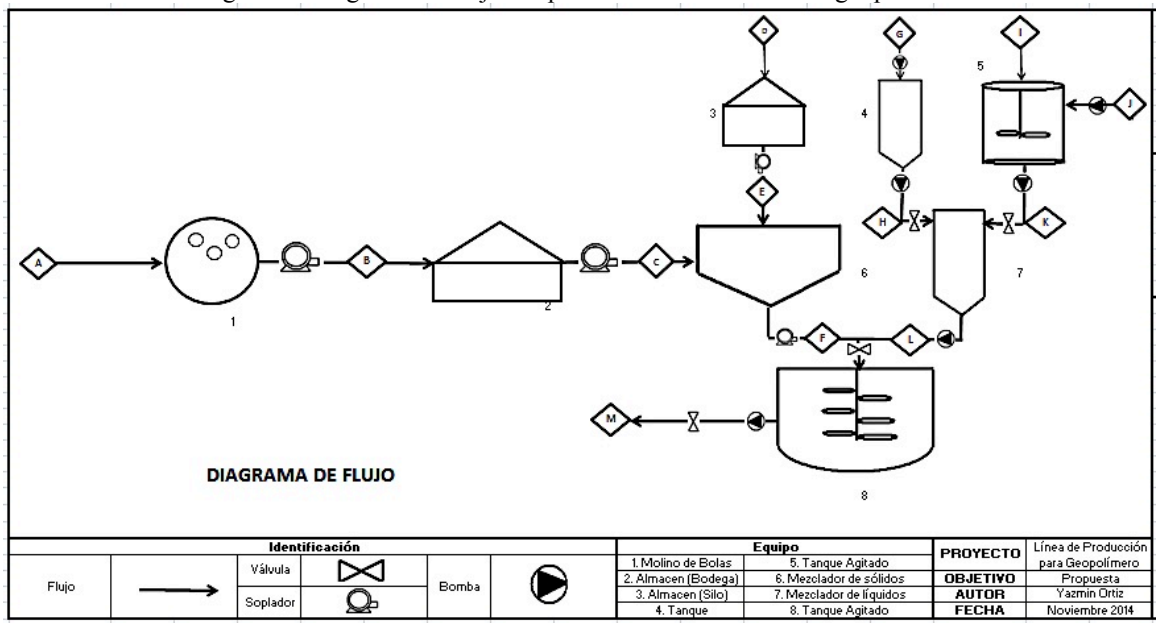


Imagen 23. Diagrama de flujo del proceso de fabricación del geopolímero.



Cuadro 33. Costo del equipo para elaboración de una línea de producción de geopolímero.

Descripción	*Capacidad*	*Unidad*	*Material*	*Unidades*	*Corrección material*
Molino de Bolas c/motor	74.6	kW	Acero	1	Q 1,749,150.00 ($ 224,250.00)
Dosificador de sólidos	3.8	m^3	Acero	2	Q 248,648.40 ($ 31,878.00)
Mezclador agitado	3.8	m^3	Acero	2	Q 430,290.9 ($ 55,165.50
Camión Mixer	8	m^3	Acero	1	Q800,572.50 ($ 102,637.50)
Silo	10	m^3	Acero Galvanizado	1	Q11,452.90 ($ 1,468.32)
Bodega de almacenamiento	3	m^3	Acero	3	Q4,601,610.00 ($ 589,950.00)
				Total	$ 1,005,349.32 Q7,841,724.70

*Tasa de $: a Q 7.80 (octubre 2014)

Cuadro 34. Inversión inicial para implementación de una línea de producción de geopolímero.

Descripción	*Costo*
Entrega del Equipo	Q7,841,724.70
Instalación	Q3,215,107.13
Tubería	Q2,666,186.40
Servicios eléctricos	Q1,019,424.21
Instrumentación	Q1,019,424.21
Infraestructura	Q2,352,517.41
Excavación y preparación del sitio	Q1,176,258.70
Auxiliares	Q4,077,696.84
Ingeniería	Q3,058,272.63
Contratistas	Q1,019,424.21
Contingencia	Q3,058,272.63
Inversión Aproximada (sin impuestos)	Q30,504,309.07

F. Estudio de los usos y aplicaciones de los geopolímeros

Cuadro 35. Pruebas de resistencia de geopolímero a base de arena volcánica.

Mezcla	*Cubos Ensayados*	*Área Promedio (in^2)*	*Fuerza Promedio (lb)*	*Resistencia a la compresión (psi)*	*Días hasta ensayo*
1	-	-	-	-	-
2	3.00	3.90	54.33	13.93	3.00
3	3.00	1.13	645.00	570.69	7.00
4					
5	3.00	3.83	231.33	60.46	1.00
6	3.00	3.81	422.67	110.93	7.00
7	3.00	3.54	2,053.33	579.83	4.00
8	3.00	3.58	494.45	142.21	1.00

Cuadro 36. Costo soluciones utilizadas para mezclas del geopolímero.

Solución	*Precio por L*
NaOH 8M	Q. 14.99
NaOH 14M	Q. 26.23
Silicato de Sodio Puro	Q. 189.28
Silicato de Sodio a 35.00%	Q. 66.25

Cuadro 37. Cantidad de materia prima por mezcla.

Mezcla	*Cantidad de Materia Prima (g)*
1	314.26
2	310.30
3	157.13
4	157.13
5	157.13
6	157.13
7	814.81
8	814.81

Cuadro 38. Costo de solución de hidróxido de sodio.

Mezcla	*Solución de NaOH (mL)*	*Densidad Solución (g/mL)*	*Concentración Molar*	*Costo de NaOH (Q/L)*	*Costo de NaOH (Q)*
1	25.76	1.22	8 M	14.99	0.39
2	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
3	25.76	1.22	8 M	14.99	0.39
4	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
5	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
6	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
7	88.76	1.34	14 M	26.23	2.33
8	88.76	1.34	14 M	26.23	2.33

Cuadro 39. Costo solución de silicato de sodio.

Mezcla	*Solución de Silicato de Sodio (mL)*	*Densidad Solución (g/mL)*	*Costo de Silicato de Sodio (Q/L)*	*Costo de Silicato de Sodio (Q)*
1	60.43	1.30	66.25	4.00
2	59.67	1.30	66.25	3.95
3	60.43	1.30	66.25	4.00
4	59.67	1.30	66.25	3.95
5	59.67	1.30	66.25	3.95
6	59.67	1.30	66.25	3.95
7	228.74	1.30	66.25	15.15
8	228.74	1.30	66.25	15.15

Cuadro 40. Costo de mezclas en base a su contenido.

Mezcla	*Costo Total por kg (Q/kg)*	*Costo de 42.5 kg (Q)*
1	10.35	439.72
2	10.89	462.68
3	16.43	698.39
4	17.16	729.37
5	17.16	729.37
6	17.16	729.37
7	14.20	603.49
8	14.20	603.49

VI. DISCUSIÓN

El objetivo general fue realizar un estudio técnico de geopolímeros, el cual involucró la investigación de materias primas (arcilla y arena volcánica), diseños de mezclas y proceso de fabricación para el desarrollo de un material de construcción. Para alcanzar este objetivo se trabajaron 6 bloques. El objetivo se cumplió ya que se obtuvo un geopolímero a base de arena volcánica con mayor resistencia de compresión que el realizado con arcilla, siendo esta de 580.36 ± 70.32 psi en un tiempo de 4 días. Este puede ser utilizado como mezcla con el concreto hidráulico según la literatura.

A. Materia prima: arcilla y arena volcánica.

Para la elaboración del geopolímero se decidió trabajar como materia prima arcilla, procedente de El Tejar departamento de Chimaltenango, debido a su abundancia en el territorio guatemalteco que generalmente es utilizada para la elaboración de ladrillo, tejas, artesanías, etc. La arcilla no es una materia prima estándar, varía según su procedencia y por ende sus propiedades químicas, físicas y composición granulométrica son distintas. Además, se trabajó con arena volcánica proveniente del volcán de Pacaya; esta arena fue obtenida de las faldas de dicho volcán.

Se decidió someter dichas materias primas a una serie de pruebas y análisis con la finalidad determinar las características y propiedades de mayor relevancia y formular la caracterización más adecuada para su posible utilización en un geopolímero.

Para realizar los análisis físicos y químicos fue necesario realizar un pretratamiento de la materia prima, bajo tres operaciones: molienda, tamizaje y secado. La primera operación de pretratamiento realizada fue el secado. Ambas materias primas son higroscópicas, como se mencionará posteriormente ésta es afectada al estar en contacto con el medio ambiente por las condiciones atmosféricas. La arcilla y la arena volcánica se secaron previamente a la molienda con la finalidad de evitar que la humedad dañe las partes metálicas. Se debe secar principalmente debido a que se ha comprobado que los materiales no fluyen adecuadamente si contienen humedad en un rango aproximado de 5-50%, debido a que el material tiende a aglomerarse. Claramente si el material posee un porcentaje de humedad menor al del límite inferior, generalmente la molienda puede llevarse a cabo satisfactoriamente. Cuando un material no fluye se generan problemas para un eventual traslado de un área a otra, la finalidad del secado es romper la cohesión formada por la humedad en las partículas y forzar a que el material pueda fluir con mayor facilidad.

La molienda es la segunda operación necesaria para realizar el pretratamiento de la muestra. La elección del molino está en función de la naturaleza y características del producto requerido, así como la cantidad y

tamaño del material a tratar. Se tomó en cuenta ciertas características, entre ellas la dureza, humedad, estructura, tensión de rotura y pegajosidad. La dureza del material afecta proporcionalmente el desgaste del equipo y el consumo de potencia. Los materiales más duros y abrasivos necesitan de equipos que trabajen a baja velocidad con la finalidad de proteger sus partes de la abrasión. Su estructura determina que tipo de fuerza debe emplearse para su eventual rompimiento, por ejemplo fuerzas de compresión e impacto. Y por último la humedad, como se mencionó anteriormente, en cierto rango evita que el material fluya adecuadamente, además que debe considerarse para mantenimiento de las partes del equipo.

El proceso de pretratamiento culmina con la operación de tamizaje. El tamizaje es una operación posterior a la molienda. El proceso de molienda debe producir un material con tamaño de partícula menor a la abertura del Mesh No. 200. La operación de tamizado es utilizada para la separación de material según su tamaño de partícula, para el análisis y producción del geopolímero es necesario contar con un tamaño de partícula inferior a la abertura del Mesh No. 200. Es importante llegar a determinado tamaño de partícula debido a que cuanto más fino es el material, éste cuenta con mayor área superficial. En un proceso posterior como podría ser la compresión del producto final, al tener un tamaño de partícula fina la compresión del material será sumamente superior al de una partícula de mayor tamaño. El material poroso al ser sometido a una compresión considerable será propenso a rajarse o quebrarse, mientras que si este cuenta con menor espacio en sus partículas el material soportará una mayor carga de esfuerzo y sus propiedades y rendimiento será óptimo. Es por ello que debe tamizarse y asegurarse que su tamaño de partícula cumpla con este estándar que posteriormente garantizará un mejor desempeño en el producto final.

La arcilla no es un material único, es una mezcla heterogénea compuesta por aluminosilicatos cristalinos o amorfos definidos propios de la arcilla, compuestos orgánicos y humedad; es por ello que deben considerarse varios métodos para obtener la caracterización más adecuada. Así como la composición de la arena volcánica es determinada por el lugar de origen.

Se realizó un análisis cuantitativo del contenido de humedad presente en la arcilla. Como se muestra en el Cuadro 5 de la sección de resultados, la humedad promedio es de 7.0521%. Para la arena volcánica se obtuvo una humedad del 4.07%. La cuantificación de la humedad fue sumamente importante para determinar si debía aplicarse la operación de secado en el pretratamiento de los materiales.

Otra prueba que se hizo fue el análisis de pérdidas por ignición presentado en el Cuadro 6 de la sección de resultados. Se cuantificó una pérdida promedio por ignición de la arcilla de 13.8946%; las pérdidas por ignición cuantifican la cantidad de materia orgánica presente en el suelo. Es importante mencionar que esta prueba precede a la cuantificación de humedad. La prueba de cuantificación de humedad se realizó a temperatura de 105-110 ºC con la finalidad de evaporar el agua, hasta que la muestra llegara a peso constante. La muestra utilizada para la determinación de pérdidas por ignición se sometió a 750 ºC de

temperatura y generó los resultados citados anteriormente, y que son presentados en el Cuadro 6 de la sección de resultados, estos representa el contendido de materia orgánica removida de la muestra, pero también podrían incluir un porcentaje de trazas o una cantidad representativa de humedad ligada.

Por lo tanto la arcilla posee 20.9467% de humedad y material orgánico, siendo el porcentaje restante material inorgánico. La temperatura durante la ignición no debe exceder los 900 ºC, debido a que el óxido férrico se transforma en magnetita y los silicatos empiezan a fundirse.

La tercera prueba que se llevó a cabo fue la cuantificación de óxido de silicio y aluminio en arcilla por fluorescencia de rayos X, los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 7 de la sección de resultados. La composición de la arcilla fue de 45.42% de SiO_2 y 21.41% de Al_2O_3, mientras la composición de la arena volcánica fue de 75.44% de SiO_2 y 15.26% de Al_2O_3. El análisis realizado en el laboratorio de Cementos Progreso únicamente contempló la determinación de estos óxidos ya que son los de mayor importancia. El contendido obtenido en la muestra de arcilla es bastante elevado, por lo que se garantiza la abundancia de silicio y aluminio para la reacción de geopolimerización mediante activadores alcalinos. La cantidad de aluminio disponible y la velocidad de liberación a lo largo de la reacción, afecta la resistencia mecánica, fraguado, resistencia a la acidez, microestructura y el control en el perfil de desarrollo de su resistencia mecánica. Hay una correlación bastante grande entre la proporción Si/Al y la resistencia del geopolímero. La resistencia mecánica de un geopolímero está relacionada con la composición y la nanoestructura del geopolímero. Teóricamente, hay una relación directa entre la resistencia mecánica y el contenido de silicio, al incrementar la cantidad de silicio (presente como dióxido de silicio) se incrementa la cantidad de enlaces Si-O-Si, que son más fuertes que los enlaces Si-O-Al y Al-O-Al.

La arcilla analizada, físicamente poseía una coloración rojiza y con granulometría bastante uniforme, su tamaño de partícula generalmente era un poco mayor a la abertura del tamiz No. 20 por lo que no contenía otro tipo de material o entiéndase suciedad.

El análisis de plasticidad se realizó para determinar la consistencia de los suelos. Los resultados obtenidos se pueden observar en el Cuadro 9 de la sección de resultados. Se obtuvo que el límite líquido fue de 23.56, límite plástico de 11.7 y un índice de plasticidad de 11.86. Estos límites indican el comportamiento de un suelo según la cantidad de agua que posean, dicha consistencia puede ser variada con la humedad. El contenido de humedad que produce la transición de un estado a otro dependerá del suelo a analizar. Como se puede apreciar en la Imagen 11 el índice plástico calculado para dicha arcilla se encuentra dentro del rubro de suelo arcilloso, debido a que el índice plástico excede el límite inferior de 10. Por lo tanto se puede concluir que la arcilla analizada se clasifica como un material arcilloso según la Imagen 11. Entre las posibles fuentes de error se tiene la determinación del límite plástico, esta prueba es sumamente subjetiva ya que depende del criterio del operador para la determinación del suelo quebradizo.

Además se realizó un análisis para determinar la fineza de la arcilla, los resultados se presentan en el Cuadro 10 de la sección de resultados. La arcilla presentó una retención del 40.40% en el tamiz No. 200 y el 59.60% pasó por dicho tamiz.

Se hicieron varias determinaciones de densidad, las cuales se presentan en el Cuadro 8 de la sección de resultados. Se determinó la densidad de bulto promedio de 0.6815 g/cm^3 con una desviación estándar de 0.0106, densidad de bulto aireada promedio de 0.7043 g/cm^3 con una desviación estándar de 0.0188, densidad de bulto compactada de 0.7990 g/cm^3 con desviación estándar de 0.0207. La densidad de bulto compacta presenta una mayor masa por unidad de volumen, esto se debe a que la masa dentro del contenedor esta compactada por lo que la cantidad de espacio libre o porosidad es sumamente bajo. La densidad aireada presenta una menor cantidad de masa por unidad de volumen, en comparación con la densidad de bulto compactada, debido a que las partículas se hacen pasar por una rejilla cuya función es ordenar las partículas y que exista la menor interacción posible entre partículas. Por lo tanto el espacio entre partículas es bastante amplio y por lo tanto hay una mayor porosidad.

Para la caracterización de la arena volcánica se determinó la densidad de bulto, densidad compactada y densidad aireada. La densidad compactada fue de 1.5085 g/cm^{3}con una desviación estándar de 0.086, la densidad compactada fue de 1.5107 g/cm^{3}con una desviación estándar de 0.371 y la densidad aireada fue de 1.5810 g/cm^3 con una desviación estándar de 0.233.

La relación entre la densidad del bulto aireada y compactada se puede observar por medio del porcentaje de compresibilidad promedio. Se contabiliza un espacio del 11.8542% libre entre la densidad de bulto aireada y la compactada, de compactarse la densidad aireada se obtendría la misma masa por unidad de volumen de la densidad de bulto compactada. La compresibilidad o también llamado Índice de Carr nos indica la capacidad que tiene un sólido de fluir. Si la compresibilidad es menor a 15, se dice que el sólido es muy bueno para fluir tal es el caso de la arcilla caracterizada. A su vez, se calculó la densidad de trabajo promedio que es de 0.7155 g/cm^3. Con los valores de compresibilidad, densidades de bulto aireada y compactada, se obtienen los dos límites inferior y superior y la habilidad o el porcentaje de compresibilidad que posee el sólido, y son una buena aproximación que se debe tomar en cuenta para su adecuación dentro de un contenedor.

Por último en la caracterización de la arcilla se realizó la determinación del ángulo de reposo y deslizamiento, sus resultados son presentados en el Cuadro 11 en la sección de resultados. El ángulo de reposo promedio es de 45º con una desviación estándar de 1.6832 y un ángulo de deslizamiento promedio de 20.5000 con una desviación estándar de 1.7559. El ángulo de reposo de la arcilla se encuentra en el orden de 40º, tal como se puede observar el resultado está cercano a la teoría. Entre mayor sea el ángulo de

reposo menor será el área superficial que ocupará el cono de material. Este ángulo es sumamente importante para el cálculo de espacio, siempre y cuando el material se almacene en conos ya sea en una bodega o a la intemperie. El ángulo de deslizamiento es importante para determinar si el sólido va a fluir. Entre mayor sea el ángulo de deslizamiento el sólido es menos propenso a fluir. Este ángulo es importante para la determinación del tipo de transporte para el traslado del sólido.

El ángulo de reposo de la arena volcánica fue de 41.2º por lo que concuerda con la literatura para este material. Esto puede indicar la forma de transportar la arena volcánica dentro de una planta, ya sea por transporte mecánico o por transporte neumático. Nos puede indicar la mejor forma de almacenar este material ya sean en grandes patios o en algún silo especial. Son características importantes que deben ser consideradas para crear la planta de producción.

Un radio de Si-Al de 2 en la materia prima es aceptable para construcción. Es importante utilizar el correcto tipo de agregado así como la cantidad correspondiente. Del 70% al 85% en masa del agregado finos y gruesos, además estos influyen en las propiedades del concreto tanto fresco como seco. Por lo que repercuten directamente en las características del producto final tanto en calidad, durabilidad y resistencia.

La arena de madera de un horno de café fue sometida a pre tratamiento y a caracterización. Al realizar la molienda de la arena de madera en el molino de discos se obtuvo el tamaño de partícula deseado, mesh No. 200, para realizar el análisis químico por fluorescencia de rayos X. Al obtener los resultados esos mostraron que la cantidad de oxido de silicio de 0.89% y 0% de oxido de aluminio. Por lo que esta muestra no contaba con las propiedades y contenido de óxidos necesarios para la fabricación del geopolímero. Por lo que esta muestra fue descartada.

B. Selección de equipo

La clasificación de los equipos se basó en el estudio del procedimiento utilizado para la producción del geopolímero; el cual consiste en la caracterización de la materia prima, en la determinación de los parámetros de operación, y la preparación de las mezclas. La selección se realizó por medio de comparaciones de parámetros entre cada equipo y los requerimientos de la producción. La producción del geopolímero sigue la secuencia de la Imagen 15 la cual se llevó a cabo a nivel laboratorio.

La selección del equipo adecuado para la producción del geopolímero se realizó por medio de una matriz comparativa de los diferentes equipos que cumplieran la función de la operación unitaria a realizar; se establecieron los requerimientos de cada operación dándoles un valor del 1 al 10 según la importancia de los mismos. Con base al mayor porcentaje de los parámetros que cumpliera un equipo con los

requerimientos; en especial con el requerimiento más importante, éste se elige como el equipo adecuado para la producción de geopolímeros, el porcentaje aceptable para esta evaluación fue mayor al 75%. Si existiera un empate entre los porcentajes de los parámetros se debe elegir el equipo que cumpla con los requerimientos de mayor importancia, es decir, con los que tengan un valor de 8 a 10. Esto se realizó para cada operación unitaria y para cada operación física.

La primera operación describe el secado de la materia prima; tanto las piedras volcánicas como la arcilla fueron sometidas a este proceso, ya que para mantener las condiciones de los siguientes equipos (tamizadora y molinos) era necesario que el porcentaje de humedad de los materiales fuera bajo. El parámetro más importante de ésta operación fue el porcentaje de humedad de la materia prima.

El dióxido de azufre reacciona con agua para formar ácido sulfuroso (H_2SO_3), el dióxido de azufre puede ser oxidado en el aire para formar SO_3, cuando éste se combina con el agua produce ácido sulfúrico (H_2SO_4), estos ácidos son altamente corrosivos y son muy reactivos. Una deshidroxilación forma grupos hidroxilos, los cuales pueden llegar a reaccionar con los dióxidos de azufre que contiene la arena volcánica. Por esta razón es importante reducir el porcentaje de humedad de la arena volcánica, para no formar estos ácidos corrosivos que dañen el siguiente equipo a utilizar, tal como el molino de discos y la malla de los tamices. Teóricamente el secado en horno involucra la evaporación del agua si la temperatura de secado es inferior a 100°C, es decir, aproximadamente se librea el 70% de agua sin que existan riesgos de deshidratación y esto garantiza bajos niveles de deshidroxilación, que es básicamente lo que se pretende con el secado de la arena volcánica.

Para esta operación de secado, los requerimientos del proceso fueron: el porcentaje de humedad, entre 10% y 3%; la capacidad a trabajar, 1 kg; y la localización del equipo la cual debe estar dentro del laboratorio de Operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química, el parámetro más importante fue el porcentaje de humedad debido a que como se mencionó anteriormente la arena volcánica tiene propiedades corrosivas y abrasivas que pueden dañar el equipo. Dentro del campus de la universidad se encontró un horno deshidratador, perteneciente al Departamento de Ingeniería Química, y una mufla, la cual pertenece a los laboratorios de la UVG. Al realizar la tabla comparativa de ambos equipos se puede observar la inclinación hacia el horno deshidratador, ya que la carga máxima a la que trabaja es mayor a la requerida, en comparación con el parámetro de temperatura, la mufla tiene un amplio rango, es decir, hasta 1100°C; mientras que el horno deshidratador llega a 280°C, sin embargo el parámetro en esta operación son 60°C por lo que el equipo más adecuado sigue siendo el horno deshidratador. La desventaja del horno deshidratador es que su capacidad son 500 kg, y el procedimiento indica lotes de 1 kg, sin embargo sus dimensiones permiten el uso de bandejas, en las cuales puede ir 1 kg del material y secar 6 lotes a la misma vez.

La arcilla inicialmente tenía un porcentaje de humedad promedio de 4.17% y se redujo a 3.36% en un tiempo aproximado de 5 horas, la reducción de humedad no fue tan significativo comparado con el porcentaje de humedad de las piedras volcánicas, ya que inicialmente tenía un porcentaje de humedad del 10% y se redujo hasta 4%. Para poder utilizar la arena volcánica como materia prima para la fabricación de geopolímero fue necesario determinar los tamaños de partícula ya que dependiendo del tamaño de partícula puede existir una mejor área superficial para mejorar la reacción de la arena con los agregados sólidos y la solución alcalina. El tamaño de partícula puede afectar directamente en la dureza, resistencia, durabilidad y calidad del geopolímero final.

El Laboratorio de Operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala cuenta con una trituradora y dos molinos; un molino de martillo y un molino de discos, el departamento de Ingeniería Civil cuenta con el molino de bolas evaluado. Entre estos equipos se tuvo que determinar cuál era el mejor para obtener una mayor reducción de partículas.

Tanto para la trituración como para la molienda se trabajaron con los requerimientos de tamaño de partícula, capacidad de producción, velocidad, potencia y la localización, siendo el más importante el tamaño de partícula. Para la trituración se trabajó con lotes de 1 kg y una reducción de partícula hasta 80 µm, un tamaño adecuado para empezar el proceso de molienda. La molienda consistió en reducir aún más el tamaño de partícula obtenida del triturador, hasta obtener un tamaño de partícula menor al 75 µm.

Se debe mencionar que para la reducción de tamaños, en este caso, el mejor equipo que se debe utilizar es un molino de bolas, tal y como se muestra en el cuadro comparativo de los parámetros de estos equipos, debido a que este es específicamente para la pulverización, es decir, tamaños de partículas de 10 µm o menos.

Para el proceso de mezclado se identificaron dos equipos, un mezclador rotatorio y un tazón mezclador, entre los parámetros a evaluar esta la capacidad, la potencia, la velocidad y las dimensiones. El requerimiento más importante es la capacidad de 1 kg con un valor de 8 sobre 10. La capacidad del mezclador rotatorio es de 50 kg, sobrepasando la cantidad del material de cada lote, sin embargo el tazón cumple con este parámetro, ya que las mezclas son menores de 2 kg. A pesar de que el mezclador rotatorio proporcione una mejor homogenización de modo automático se elige el tazón debido a las cargas para mezclar, tal y como se muestran en los balances de masa, Imágenes 17 y 18.

En la mayoría de materiales o sistemas particulados existen partículas de diferentes tamaños; por tal razón se realizó la operación física de medición de tamaño de partículas. Este método se realizó por medio de un tamizador, el requerimiento de este proceso fue el tamaño de partícula, con valor de importancia de 10. La batería tamizadora tiene como función separa los diversos tipos de tamaños que tiene una partícula

por medio de tamices con medidas estándares, es decir, realiza un estudio granulométrico. Esto ayuda a definir si es necesario el proceso de molienda del material o no. La función de este equipo es únicamente control de calidad. El equipo se encuentra en el laboratorio de Operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala.

Otro proceso físico complementario son las mediciones de los agregados sólidos (arena de mar) y líquidos (NaOH y Na_2SiO_3) a utilizar para la producción del geopolímero y las diferentes mezclas que se establecieron. Para las mediciones de estos materiales se identificaron dos equipos disponibles dentro del laboratorio de operaciones unitarias; una balanza eléctrica y una balanza analítica, como se observa en la tabla de comparación los requerimientos del proceso son la capacidad, la incertidumbre, las dimensiones y la localización, el requerimiento más importante es la capacidad y la incertidumbre. El mejor equipo es una balanza eléctrica ya que su carga máxima es de 2100 g, y el parámetro de operación está entre 1500 y 2000 g; la balanza analítica no logra cubrir esta demanda, por lo cual se excluye del proceso. El equipo se encuentra en el laboratorio de Operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala

Al completar las mezclas se hicieron moldes cúbicos para así poder determinar la resistencia del geopolímero y de las diversas mesclas establecidas. Los moldes que se utilizaron fueron del laboratorio de materiales del departamento de Ingeniería Civil.

Con el fin de caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los materiales, se observó el comportamiento de estas mezclas después de ser sometidos al proceso de curado, se trabajó con temperaturas entre 60 y 70°C y con un periodo de 1 y 3 días máximos de curado, se utilizaron estas temperaturas de operación ya que el objetivo era deshidratar. Para este proceso se compararon un horno normal y un horno deshidratador, la diferencia entre ambos equipos es la capacidad de carga, se eligió el equipo con menor capacidad, debido a que los cubos de geopolímero eran menores a 250 g.

Además de la selección de equipos se definieron diagramas de procesos y diagramas de equipos para la producción del geopolímero y sus mezclas establecidas; tales diagramas se muestran en las Imágenes 17 y 18. Esto se realizó con el fin de definir los equipos necesarios en cada fase de la producción, a tal manera de facilitar la selección de los mismos.

Los balances de masa que se encuentran en las Imágenes 17 y 18 son específicamente de una de tantas mezclas que se realizaron, debido a que el proceso que se siguió fue idéntico para cada material y para cada mezcla se definieron estos diagramas. Las mezclas establecidas y realizadas se encuentran en el apéndice.

C. Proceso y condiciones de operación para fabricación de geopolímero

Para elegir los parámetros a variar entre las diferentes mezclas se realizó en base a la literatura, por lo que el diseño de mezcla varió respecto a las relaciones másicas definidas como “Solución Alcalina/Materia Prima”, “Agua/Sólidos de Geopolímero”, “Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero”. Se trabajó con otra relación másica siendo esta “Solución de Silicato de Sodio/Solución de Hidróxido de Sodio” con un valor de 2.5, esta relación se utilizó constante en todas las mezclas realizadas con ambas materias primas. La razón para no variar esta última relación fue económica, ya que el costo del reactivo de hidróxido de sodio (NaOH) es más elevado que el de la solución de silicato de sodio.

La relación “Solución Alcalina/Materia Prima” es la más importante respecto al grado de reacción alcanzado, ya que la solución alcalina es la activadora de la reacción de polimerización, relacionándose de forma directamente proporcional con la resistencia a compresión de la mezcla. Es decir, a mayor cantidad de solución alcalina se obtuvo una mayor resistencia a compresión. Por lo que se realizaron mezclas con ambas materias primas variando estas dos relaciones másicas, obteniendo el mejor resultado cuando la relación másica “Solución Alcalina/Materia Prima” fue de 0.43 y la relación másica “Agua/Sólidos de Geopolímero” de 0.25. La cantidad de agua mejoró la manejabilidad de la mezcla, pero disminuyó la resistencia a compresión de los cubos compactados con las diferentes mezclas cuando esta relación másica fue mayor a 0.35.

La cantidad de agregado fino en la mezcla es importante ya que estos son utilizados para disminuir la cantidad de cementante a utilizar. Sin embargo, a mayor cantidad de agregados se obtiene una menor resistencia a compresión. Por lo que se eligió la relación “Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero” dada por la ASTM C109 para pruebas de resistencia a compresión con cubos de cementante de 50x50x50 mm.

La temperatura fue otro parámetro seleccionado para comparación de resistencia a compresión de las mezclas, ya que esta asiste la reacción de polimerización aumentando la velocidad de reacción obteniéndose una mayor ganancia de resistencia a compresión en menor tiempo de curado.

Para que se de la reacción de polimerización debe existir un medio básico, la solución alcalina esta compuesta por solución de Na_2O_3Si y solución de NaOH. Se utilizaron dos diferentes concentraciones de solución de NaOH para la solución alacalina siendo estas 8 Molar y 14 Molar, de esta forma comparar el cambio de la resistencia a compresión de la mezcla cuando se variaba la cantidad de hidróxido en el medio. Se obtuvo que a una concentración de solución de NaOH 8 Molar, la resistencia a compresión no fue medible, ya que la consistencia de los cubos compactados fue baja y no permitía la manipulación de los mismos. Cuando se utilizó una concentración de solución de NaOH 14 Molar los cubos compactados con

las diferentes mezclas ganaron resistencia a compresión con el tiempo de curado empleado y pudo efectuarse la prueba de resistencia a compresión de los cubos.

La prueba de resistencia a compresión se realizó utilizando el equipo “Soiltest LC-2 Dial Indicator”. Se obtuvo como resultado en la mezcla No. 1 utilizando arcilla una muy baja resistencia, ya que los cubos compactados se deformaron al ser manipulados y no pudo utilizarse el equipo indicado para realizar la medición. En cambio, los cubos compactados con la mezcla No. 2 realizados con arcilla si pudieron someterse a la prueba de resistencia a compresión obteniendo 13.94 ± 1.12 psi. Al ser la diferencia entre mezclas la concentración de la solución de NaOH puede observarse que una mayor concentración de esta proporciona una mejor resistencia a compresión, sin embargo se necesitarían más pruebas para encontrar una concentración máxima ó comportamiento que relacione ambos factores.

La mezcla No. 3 y mezcla No. 4 se realizaron con arena volcánica como materia prima. Los resultados obtenidos de la mezcla No. 3 fueron similares a la mezcla No. 1 realizada con arcilla, a pesar de realizarse con diferente materia prima pero con la misma concentración de solución de NaOH de 8 Molar los cubos se rompieron al retirarlos del molde de compactación. Esto provocó que no pudiera realizarse el proceso de curado por 3 días a temperatura ambiente. Por lo que se confirmó el efecto de la concentración de la solución de NaOH en la solución alcalina a emplear para fabricar el geopolímero. Las mezclas realizadas posteriormente con ambas materias primas se restringieron a una concentración de NaOH de 14 Molar, al obtener mejores resultados en las mezclas No. 2 y No. 4.

Para los cubos realizados con la mezcla No. 4 se obtuvo el mismo resultado al retirar el molde de compactación que en los cubos de la mezcla No. 3, pero con menor grado de rompimiento siendo a la mitad de los mismos. Esto pudo deberse al exceso de agua en la mezcla, ya que en la literatura consultada con otras materias primas se recomienda no un máximo de 0.29 como relación “Agua/Sólidos de Geopolímero”. El exceso de agua disminuyó considerablemente la resistencia a compresión del geopolímero, aunque la manejabilidad de la mezcla aumentó comparada con las mezclas No. 1 y No. 2. Se decidió realizar la prueba de resistencia a compresión al séptimo día de curado a temperatura ambiente, ya que se monitoreo el estado de los fragmentos de los cubos y se observó mayor consistencia y dureza al transcurrir 24 horas. El resultado de resistencia a compresión fue de 549.22 ± 178.07 psi. Esto indica que si hubo un aumento en la resistencia a pesar del alto contenido de agua en la mezcla utilizada, esto pudo compensarse debido al tamaño de partícula empleado en esta mezcla ya que la adherencia fue mayor que en la mezcla No. 2 donde no se realizó separación por tamizaje de materia prima.

Con los diferentes resultados obtenidos en las mezclas No. 1, No. 2, No. 3 y No. 4 se observó la importancia de la concentración de la solución de NaOH, la cual proporciona una mayor resistencia de compresión cuando se utiliza una concentración de 14 Molar comparada con la solución de NaOH 8 Molar.

Además, se observó la importancia del contenido de agua en la mezcla y su impacto negativo en la resistencia a compresión y compactación de la mezcla cuando esta se encuentra en exceso. Otro factor importante fue el tamaño de partícula empleado, ya que se obtuvo una resistencia a compresión considerablemente mayor cuando el tamaño de partícula era menor. El proceso de curado de estas mezclas se realizó a temperatura ambiente, y en todas se observó una lenta ganancia de dureza y adherencia por lo que se determinó realizar curado por calor para comparar el efecto de la temperatura en la reacción de polimerización.

Partiendo de las observaciones anteriores obtenidas experimentalmente se realizó la mezcla No. 5 y mezcla No. 6 utilizando arcilla como materia prima. En estas mezclas se quería observar la importancia del tamaño de partícula de la materia prima al emplear las mismas condiciones de mezcla y curado. Se utilizaron como relaciones másicas "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.69, la relación de "Agregado Fino/Sólidos de Geopolímero" de 2.75 y "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.73. La mezcla No. 5 se realizó con arcilla tamizada con material que pasaba mesh No. 100 y la mezcla No. 6 con arcilla sin tamizar.

Los resultados obtenidos fueron para la mezcla No. 5 una resistencia a compresión de 60.51 ± 5.58 psi. Comparada con la mezcla No. 2 de arcilla, en donde no se realizó curado por calor la resistencia a compresión aumentó ya que esta fue de 13.94 ± 1.12 psi. Por lo que en menor tiempo se obtuvo una mayor resistencia a compresión, cuando se aplicó curado por calor y se utilizó un tamaño de partícula menor.

En la mezcla No. 6 tras el proceso de curado por calor por 24 horas se observó que los cubos se encontraban con humedad y presentaban menor dureza que los cubos realizados con arcilla de menor tamaño de partícula. Se dejaron los cubos de esta mezcla a condiciones ambientales por 6 días para que mejoraran su consistencia y se diera un aumento en su dureza. Al séptimo día de haber sido compactada la mezcla se realizó la prueba de resistencia a compresión obteniéndose como resultado 110.93 ± 4.32 psi. El resultado fue mayor que el de la mezcla No. 5 debido al tiempo de curado a temperatura ambiente extra que tuvieron los cubos de la mezcla No. 6, lo cual permitió que ganaran más resistencia a compresión.

En las mezclas No. 1 a No. 6 se utilizó agregado fino en relación dada por la ASTM C109, siendo esta 2.75 la cantidad de cementante, por lo que se aplicó a su equivalente en sólidos de geopolímero. Sin embargo, se observó que la cantidad de agregados respecto a la cantidad de geopolímero era excesivo. Por lo que al realizar el mezclado final se obtenía una apariencia seca y manejabilidad baja de la mezcla. Esto pudo interferir con la reacción de polimerización provocando que la solución alcalina no pudiera reaccionar con los óxidos de sílice y aluminio de la materia prima.

La mezcla No. 7 se elaboró con arena volcánica y la mezcla No. 8 con arcilla como materia prima, se determinaron las relaciones másicas empleadas en base a lo observado en la experimentación y diseño de mezclas anteriores.

En la mezcla No. 7 al añadir la solución alcalina a la materia prima y realizar el mezclado se observó una apariencia de gel, esta poseía una cohesión y viscosidad alta. La mezcla no se observaba seca, en comparación con las otras mezclas realizadas, además poseía brillantez en la superficie. Al mantener el mezclado constante esta podía manejarse, sin embargo al no existir movimiento en la misma por un periodo corto de tiempo la manejabilidad disminuía considerablemente. Esto puede deberse a un posible contenido alto de calcio en la materia prima, ya que este puede reaccionar con los monómeros de silicato ó aluminato que se disuelven de la materia prima, formando hidratos de silicato de calcio y aluminatos de calcio. Por esta razón es importante utilizar una materia prima que contenga un bajo porcentaje de calcio, ya que de lo contrario existe una deficiencia de agua lo que provoca un aumento en la alcalinidad de la mezcla y por lo tanto una mayor y más rápida disolución de las especies de silicato y aluminato aumentando la velocidad de geopolimerización. Sin embargo, esto no es deseable porque puede provocar que la mezcla gane dureza rápidamente y pierda manejabilidad. El resultado obtenido de la prueba a resistencia a compresión fue de 580.36 ± 70.32 psi. Esta fue la resistencia a compresión más alta obtenida en todas las mezclas de ambas materias primas. Este resultado confirma la necesidad de aplicar calor en una reacción de geopolimerización, ya que la velocidad de reacción es muy lenta a temperatura ambiente por lo que resulta en aumentos bajos de resistencia y consistencia.

La mezcla No. 8 realizada con arcilla presentó características diferentes al mezclar la solución alcalina con la materia prima, a pesar de emplear las mismas relaciones másicas que en la mezcla No. 7. La apariencia fue diferente a la mezcla anterior, ya que la maleabilidad de esta era similar al de una pasta y no al de una gel. El proceso de curado fue a una temperatura de 60 ^{o}C por 24 horas. Se observó al retirar los cubos compactados fracturas en los mismos en diferentes partes lo que afectó la medición de la resistencia a compresión. Sin embargo, las fracturas no se encontraban de una forma uniforme en los cubos por lo que puede atribuirse a una mala compactación de la mezcla. Al existir espacios vacíos en los cubos y realizar el curado por calor esto pudo llevar a la separación por fragmentos del cubo, existiendo pequeñas uniones temporales que se rompieron al retirar el molde. El resultado obtenido de la mezcla No. 8 fue de 151.07 ± 87.04 psi, esta fue considerablemente menor a la resistencia a compresión obtenida cuando la materia prima fue arena volcánica.

Por lo tanto, las condiciones de operación que proporcionan mayor resistencia a compresión son un mezclado efectivo que proporcione homogeneidad y consistencia, por lo que se recomienda utilizar un equipo de mezclado forzado. También debe emplearse un curado por calor para asistir la reacción de geopolimerización para obtener mejores propiedades del geopolímero en menor tiempo. La compactación

de la mezcla debe asistirse con un equipo de vibración para evitar espacios vacíos y posteriores daños y degradación del concreto.

D. Línea de producción

Se determinó la formulación del geopolímero (Cuadro 31) a partir de las muestras experimentales realizadas a diferentes composiciones para determinar y observar las variaciones de propiedades del compuesto según los agregados utilizados.

A través de las pruebas experimentales se identifican las etapas para la producción del geopolímero y los procesos industriales involucrados para poder llevarlas a cabo (Imagen 19).

La identificación de los procesos involucrados, facilitó la selección de equipo debido a la materia que se está tratando (Imagen 20), previamente identificada y caracterizada. Se define el nivel de producción según la cantidad de producto que se desea entregar, que en este caso es la capacidad de un camión mezclador de 8 m^3, el cual es un tamaño altamente usado en las industrias constructoras.

El desarrollo de la línea de producción se inició con el diagrama de flujo del proceso, el diagrama de equipo y el balance de masa para conocer las entradas y salidas, estos diagramas son principios básicos para el desarrollo del diseño de una planta ó línea de producción, ya que nos dan una visión más clara del proceso que se pretende llevar a cabo.

Inicialmente se plantea como proceso de pretratamiento el secado de los diferentes materiales, esto para disminuir el porcentaje de humedad de cada uno.

La primera etapa en la producción de geopolímero es la disminución del tamaño de partícula, asumiendo que se cuenta con la disposición de la arena volcánica como materia prima en línea. Este proceso es esencial para llevar a cabo una reacción de activación favorable, puesto que entre más disminuya el tamaño de la arena, poseerá mayor facilidad de reaccionar, debido a que el silicio y el aluminio en el proceso de geopolimerización se situarán con mayor facilidad al entrar en contacto con la solución alcalina. Posteriormente, se pasa a una etapa de almacenamiento, la cual se plantea por la cantidad de arena a trabajar en el proceso anterior (Imagen 21).

La etapa de homogenización de la mezcla seca, involucra la arena volcánica y los agregados finos la cual se realiza previo al contacto con la solución alcalina, para asegurar la reacción.

Se plantea una etapa de distribución en donde el producto continúa mezclándose, de lo contrario esté comenzará su etapa de curado adquiriendo resistencia, perdiendo su maleabilidad que impedirá su utilización.

Se realizó un balance de masa para el proceso, utilizando una base de 1000 Kg de la materia prima "arena volcánica" (Imagen 21) a procesar; se realizó de esta forma para fines prácticos del módulo, a partir de este balance se toma referencia para realizar el diagrama de flujo del proceso de geopolimerización. En el diagrama de flujo (Imagen 22) se asume una operación estacionaria, es decir, que las condiciones de operación no varían con el tiempo, los flujos se mantienen constantes y las reacciones son irreversibles, es importante mencionar que los flujos se determinaron en función de suplir una flota de 9 camiones mixer diarios con capacidad de 8 m^3 y un tiempo de llenado de 40 minutos cada uno, se toma referencia de una industria cementera posicionada en Guatemala sobre este dato.

El equipo presentado en los Cuadros 33 y 34 se buscó en diferentes fuentes de información con proveedores dedicados a la industria cementera o manejo de sólidos. Se adapta equipo industrial para que cumpla con el balance de masa de la Imagen 21. Cabe mencionar que se seleccionó solamente el equipo principal para formar una línea de producción, partiendo del diagrama de flujo del proceso (Imagen 22) donde se definen las operaciones principales para formar un geopolímero. Debido a que se toma a la industria cementera como referencia y a la vez se compara contra esta, se analizan los equipos que utilizan para llevar a cabo las operaciones similares, identificando sus ventajas y desventajas para definir el equipo planteado. Además, se compara el equipo con los de la industria minera, debido a su manejo de sólidos, los cuales coinciden en algunas partes del proceso.

Para la disminución de tamaño de partícula de la arena volcánica se opta por utilizar un molino de bolas con capacidad de 0.65-3.5 t/h (Cuadro 33), el cual nos da pauta a no trabajar a su capacidad máxima sin desaprovechar su potencial. Se elige este molino presenta la ventaja de disminuir el tamaño de partícula por la fuerza y fricción que forman las bolas; las cuales tendrán un tiempo de vida mayor que rodillos o barras en contacto con la arena que se caracteriza por ser un material abrasivo. Además, la malla que posee en su interior permite obtener el tamaño deseado del material, sin desperdiciar lo que aún no se ha molido, que queda en recirculación dentro del molino.

El silo es una forma fácil y adecuada para el almacenamiento de sólidos, y resulta viable para esta propuesta en la parte de agregados finos previos a realizar la mezcla sólida, por la cantidad a trabajar. Para el almacenamiento de la arena volcánica se opta por una bodega por la cantidad de sólidos a trabajar en el molino y necesarias para la fabricación del geopolímero para cubrir una demanda de una flotilla de 9 camiones mixer de 8 m^3 por día. Para la homogenización del proceso se utilizarán dosificadores de acero al carbón por los materiales a tratar. La mezcla se realizará en un tanque agitado, para llevar a cabo la

reacción de activación, de la cual pasará a la etapa de distribución en donde se mantendrá el mezclado para retardar el proceso de curado del geopolímero, el cual se desea que inicie luego de su uso. Cabe mencionar que los equipos están sobredimensionados por el 10% de lo que se requiere para el proceso.

Se realiza un análisis económico de inversión para la línea de producción de geopolímero con el fin de conocer el costo de implementación de dicha línea. Se calculó una inversión inicial aproximada de Q30,504,309.07 sin impuestos, se calcula libre de impuestos debido a que este valor sólo es una referencia.

El análisis se realizó con herramientas estadísticas, utilizando el Índice de Marshall y datos de referencia obtenidos del Manual para Ingenieros Químicos (Perry, 7ª edición), que proporcionan un dato confiable de referencia pero que manejan una desviación aproximada del 20%, lo cual es aceptable para este módulo.

El Manual para Ingenieros Químicos proporciona factores para cada equipo, que posteriormente multiplicados por el índice de Marshall, unidades de equipo y factores de corrección por material nos proporcionan los valores monetarios (Imágenes 48 y 49); estos factores se encuentran por medio de los Cuadros 33 y 34 según los requerimientos y especificaciones de cada equipo. Para fines de este módulo se calculó únicamente el costo del equipo principal para el funcionamiento de la línea de producción de geopolímero, y el resto como: bombas, sopladores. Se incluyen en el costo de instrumentación y contingencia de la inversión; ya que solamente se pretende dar referencia de un costo a una propuesta que puede variar con el tiempo y mejoras posteriores a la propuesta.

E. Aplicación

Las características, que hacen tan parecido al geopolímero con el cemento común y las que lo hacen tan diferente, pueden utilizarse de maneras distintas para crear productos que llenen vacíos en el mercado actual o reemplacen los productos que comúnmente se utilizan. Los usos más comunes que se pueden encontrar son los siguientes.

El concreto a base de geopolímero es la aplicación más común en que se podría utilizar. Las propiedades del geopolímero son, en muchos casos, parecidas a las del cemento. Tiene el trabajo de aglutinante en la mezcla por lo que es un cemento y es lo que crea el concreto. Este concreto puede ser utilizado en varios ámbitos como se va a explorar a continuación.

Para agilizar el proceso de construcción en obra, especialmente en losas, se podría utilizar algún tipo de calentamiento para espacios abiertos para aumentar la temperatura ambiente y acelerar el proceso. Para cumplir esto, se propone utilizar aire caliente impulsado sobre la losa por un ventilador que cree una capa

distribuida y caliente la superficie de manera uniforme. Cuando el curado se realiza, la velocidad de endurecimiento es más rápida y se puede avanzar más rápido en la construcción de un edificio de concreto.

Otra forma en que se puede lograr este calentamiento es por tuberías dentro de la masa que conduzcan agua caliente. Estas pueden luego utilizarse para la plomería de la construcción finalizada. Este paso requeriría de mucha planeación previa, pero para casas en serie podría ayudar a reducir el tiempo de producción. Este sistema fue utilizado de forma inversa a gran escala en la presa Hoover en los Estados Unidos de América para enfriar el concreto hidráulico que produce calor cuando se fragua.

Mezcla de concreto hidráulico y concreto a base de geopolímero. Conseguir propiedades de ambos cementos puede ser un gran beneficio para cualquier concreto. De esta aplicación, existe un producto, *pyrament 505*, y se utiliza en varios lugares como en los Estados Unidos para el área de pavimentos. Se utiliza para reducir el tiempo de fraguado del concreto en pavimentos de concreto ya que, comparado con el asfalto, el concreto hidráulico toma mucho más tiempo en dejar que el tráfico pueda pasar sobre él. Con esto se puede lograr un endurecimiento del concreto en horas en lugar de días para que el tráfico no se detenga tanto como cuando se utiliza concreto hidráulico sin aditivos. Consultar la hoja técnica del producto en el anexo (REMR).

El geopolímero como concreto con poca contracción. La diferencia que esto provee es que la cantidad de grietas y microgrietas que se crean en el concreto de geopolímero es mucho menor que en el concreto de cemento Portland. En la industria, esta característica se puede utilizar para la creación de pisos en áreas industriales. Para que el geopolímero sustituya al concreto hidráulico, la barrera financiera sería la mayor a vencer. Si se lograra realizar un curado para un contrapiso, la resistencia podría ser mayor por lo que se podrían usar espesores menores y el tiempo de fabricación se reduciría.

Las propiedades de un geopolímero estarían muy bien adaptadas si se utilizara como un sellador. Esto se debe a que en el área de contacto de un geopolímero con un agregado, incluyendo los refuerzos metálicos, no existe un cambio físico del mismo. Esto implica una mayor adherencia que un concreto hidráulico basado en el cemento Portland. Siendo un líquido al principio de su proceso, se podría aplicar como cobertura a muchas superficies diferentes y crearle una protección a los elementos a los que se les aplicó el geopolímero. En las pruebas realizadas se notó que al estar en forma líquida, la adherencia del geopolímero a base de arena volcánica era elevada. Al lavar los moldes, las partes que se quedaron adjuntas fueron muy difíciles de remover. Esta característica es interesante por sus implicaciones en cómo se desarrolla el proceso de geopolimerización.

Siendo un elemento que tiene baja permeabilidad, podría utilizarse como impermeabilizante para diferentes superficies porosas que necesitan protección contra el medio ambiente y los elementos exteriores

que se encuentran en la atmosfera terrestres. En el área de construcción se utilizan mucho los impermeabilizantes a base de asfalto. La mampostería tiene como base elementos altamente porosos, los bloques de concreto. Por esto, es importante utilizar un sellador o impermeabilizante para evitar que el agua entre a la casa a través de las paredes y las esquinas. El sellador de geopolímero sería ideal por su alta durabilidad. En el caso de techos, esto también se podría utilizar ya que los asfaltos tienden a degenerarse con la luz solar.

El proceso de fabricación de un bloque, prefabricado o ladrillo tiene la ventaja de utilizar procesos en planta para el curado del geopolímero y así aumentar su resistencia y velocidad de fraguado. Las temperaturas utilizadas en este proceso son bajas porque solo acelera la reacción química, no como en el proceso de cocimiento de cerámicos donde las temperaturas deben ser altas para inducir un cambio químico en la materia prima.

En el área de los ladrillos, la alta resistencia a las temperaturas altas y su resistencia a los ciclos de calentamiento, tiene un punto donde la temperatura ya no le afecta a la estructura. La cantidad de sílice de la materia prima es directamente proporcional a la calidad final del ladrillo terminado. Las características de este producto se pueden comparar con los ladrillos especificados en el, un ladrillo de alta durabilidad que resiste hasta 1,753˚C de temperatura, y utilizar la norma ASTM C419-97(2013) *Standard Classification of Silica Refractory Brick* para evaluar el ladrillo conforme a estándares internacionales.

VII. CONCLUSIONES

1. El análisis cuantitativo de óxido de silicio y aluminio por fluorescencia de rayos X determinó que la arcilla posee una composición de 45.42% de SiO_2 y 21.41% de Al_2O_3.

2. El análisis de fineza se determinó el material más fino que atraviesa el tamiz No. 200 por lavado de arcilla. La arcilla presentó una retención en el tamiz No. 200 del 40.40% y 59.60% de finos que es toda partícula que pasa por el tamiz No. 200.

3. El análisis químico por fluorescencia de rayos X determinó que la arena volcánica del volcán de Pacaya posee una composición de 50.70% de óxido de silicio y 18.55% de óxido de aluminio. Por lo que indica una relación en la cual según Davidovits tendrá una alta resistencia a compresión.

4. Para la selección de equipos se realizó un diagrama del proceso y un diagrama del equipo para la producción del geopolímero y sus mezclas. Esto para el proceso de preparación de la materia prima, producción del geopolímero y las pruebas de resistencia.

5. Los cuadros comparativos para cada operación unitaria se emplearon para seleccionar el equipo adecuado para el proceso, según los parámetros de operación.

6. Se obtuvo mayor resistencia a compresión de la mezcla de geopolímero cuando la concentración de la solución de NaOH en la solución alcalina fue de 14 Molar.

7. La menor resistencia a compresión utilizando arcilla y arena volcánica se obtuvo cuando la solución alcalina contenía solución de NaOH de concentración 8 Molar.

8. La resistencia a compresión disminuye considerablemente cuando la relación másica de "Agua/Sólidos de Geopolímero" es mayor a 0.35.

9. Con las relaciones másicas "Agua/Sólidos de Geopolímero" de 0.25 y "Solución Alcalina/Materia Prima" de 0.43 se obtuvo la mayor resistencia a compresión en ambas materias primas, siendo 580.36 ± 70.32 psi para la arena volcánica y 151.07 ± 87.04 psi para la arcilla.

10. La resistencia a compresión fue mayor cuando la temperatura de curado empleada fue de 60 ºC y no a temperatura ambiente.

11. La arena volcánica obtuvo una mayor resistencia a compresión que las mezclas realizadas con arcilla.

12. Se calculó una inversión inicial aproximada de Q30,504,309.07, sin impuestos para la implementación de la propuesta de la línea de producción de geopolímero.

13. La ceniza de madera para leña no posee un alto porcentaje de SiO_2 y Al_2O_3 requeridos para la producción de geopolímeros, por lo tanto no es una materia prima que pueda funcionar para producir geopolímeros.

14. Los geopolímeros pueden ser utilizados para hacer construcciones de concreto en donde la velocidad puede ser acelerada. Utilizarse como mezcla con el concreto hidráulico para realizar pavimentos y reparación de estos. Utilizarse para la producción de elementos prefabricados, adoquines y ladrillos refractarios dentro de hornos y reducir el consumo de energía en la producción de cerámicos.

VIII. RECOMENDACIONES

1. Continuar con la investigación utilizando feldespato para la posterior síntesis del geopolímero ya que posee una composición de 75.44% de SiO_2 y 15.26% de Al_2O_3 por lo que se obtendría una mayor resistencia a compresión.

2. Implementación de una mesa vibratoria como parte del equipo de producción, ya que con la misma se podría distribuir adecuadamente el material y eliminar las burbujas atrapadas de aire en los moldes llenos con el material analizado, obteniendo mejores resultados en la homogeneización debido a que provoca una interacción dinámica entre la pared del molde y su relleno.

3. Realizar el análisis de contenido de calcio en la materia prima a utilizar, ya puede provocar dificultades.

4. Utiliza materia prima con tamaño de partítula menor a 45 micrómetros. Con los resultados obtenidos en las diferentes mezclas a menor tamaño de partícula aumenta la resistencia a compresión del geopolímero.

5. Utilizar una concentración mayor de 8 Molar en la solución de NaOH en las mezclas a realizar, ya que la resistencia a compresión es muy baja así como la consistencia de la mezcla después del proceso de curado.

6. Desarrollar los planos de distribución de una planta de producción de geopolímero, para conocer el dimensionamiento del proyecto.

7. Investigar sobre aditivos retardantes a utilizar en el proceso de mezclado y activación del geopolímero, y encontrar alternativas de distribución del producto que permitan una mayor facilidad de manejo.

8. No se recomienda utilizar subproductos de materias orgánicas como la madera para leña ya que posee una composición de 0.89% de SiO_2 y 0.00% de Al_2O_3.

9. Es recomendable revisar otras opciones de materias primas que se pueden encontrar en Guatemala, con altos porcentajes de de SiO_2 y Al_2O_3, para ver otras posibles fuentes de geopolímero que pueden llegar a ser más eficientes, resistentes o menos costosas.

10. Es importante llevar un control y un orden al hacer las pruebas por lo que se recomienda crear un estándar para comprobar si las muestras son compatibles con el proceso de geopolimerización.

11. Se recomienda retomar la arena volcánica triturada utilizada como materia prima ya que fue la que dio mejores resultados en las pruebas.

12. Se recomienda comparar resistencia-costo económico del geopolímero, cemento portland y de la mezcla de ambos. Esto para obtener una reducción de costos con una mayor resistencia.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. ACI Committee 211. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* (ACI 211.1-91) (Reapproved 2002). American Concrete Institute.
2. ACI Committee 302. (2004). ACI 302.1R-04 *Guide for Concrete Floor and Slab Construction*. American Concrete Institute.
3. ACI Committee E-701. (2007). *Aggregates for Concrete*. Miami, USA: American Concrete Institute.
4. Al Bakri, M. M., Mohammed, H., Kamarudin, H., Khairul Niza, I., & Zarina, Y. (2011). *Review on fly ash-based geopolymer concrete without*. Journal of Engineering and Technology Research, 3(1), 1-4.
5. American Society for Testing and Materials International. 2005. ASTM C311: *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use in Portland-Cement Concrete*. United States
6. American Society for Testing and Materials International. (2008). ASTM C157: *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. UnitedStates.
7. A. Ettorre y A. Angeletti (2012) *Balanza analítica*- Buenos Aires, Argentina : Universidad Tecnológica Nacional.
8. A. Neville M. (2010) *Tecnología del Concreto, Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria*. Mantilla Hernando A.. - Bucaramanga, Colombia : Universidad Industrial de Santander.
9. ASTM Committee C01.27. (2008). C 109/C 109M-07: *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars* (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Pennsilvania, EE.UU.: ASTM International. 9 págs.
10. ASTM Committee C01.10. (2007). ASTM C150 *Standard Specification for Portland Cement*. Pennsilvania, EE. UU.: ASTM International.

11. Besoain, Eduardo. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José: Bib.Orton IICA/CATIE. 1205 págs.
12. Breton, M. (2004). *Caída de cenizas*. Mexico: Universidad de Colima.
13. Bondar D., milestone N.B., Hassani N., Ramezanianpoura.A., (2011). *Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans, construction and building materials*.
14. Black, J. (2012). *Mix Design Process for Alkaline-Activated Class F Fly Ash Geopolymer Concrete*. Australia, Curtin University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy. 20 págs.
15. Crespo, Carlos. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 5ª ed. México: Limusa. 650 págs.
16. Cementos Progreso. (s.f.). *UGC con puzolana*. Guatemala: Cementos Progreso. Obtenido de http://cempro.recetasparatodos.com/servicios-y-productos/productos/cemento/77-cemento-ugc
17. COGUANOR. (21 de Mayo de 2012). *Catalogo de Normas*. Obtenido de Comisión Guatemalteca de Normas: http://www.coguanor.gob.gt/normas/Cat%C3%A1logo%20de%20Normas%20T%C3%A9cnicas%20Guatemaltecas%20(2).pdf
18. Comisión Guatemalteca de Normas. (2010). *Método de ensayo*. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Comisión Guatemalteca de Normas.
19. Comisión Guatemalteca de Normas, (2012). *Método de Ensayo*. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado. Ciudad de Guatemala, Guatemala : Comisión Guatemalteca de Normas.
20. Davidovits, J. (1984). *X-Ray Analysis and X-Ray Diffraction of Casing Stones from the pyramids of Egypt, and the Limestone of the Associated Quarries*. Science in Egyptology Symposia (págs. 511-520). Manchester, U.K.: Manchester University Press.
21. Davidovits, J. (1994). *GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. J. Materials Education*, 16 (2&3), 91-139.
22. Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements*. First International Confrence on Alkaline Cements and Concretes (págs. 131-149). Kiev, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials.
23. Davidovits, J. (2002). *30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications, Market Trends and Potential Breakthroughs*. Geopolymer 2002 Cofrence. Melbourne, Australia.
24. Ebewele, R. O. (1996). *Polymer Science and Technology*. New York: CRC Press.
25. Forsythe, Warren. (1975). *Manual de laboratorio: Física de suelos*. San José: Bib.Orton IICA/CATIE. 211 págs.

26. Fernández Jiménez, A.; Monzó, M.; Vicent, M.; Barba, A.; Palomo, A. 2008. *Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: obtain of zeoceramics and zeocements*. Microporousmesoporousmat., 108, 41-49.
27. Glukhovsky, V.D. 1959. *The soil silicates*. Kiev: gosstroy. [tesis doctoral]. (en ruso).
28. Gomá, F. 1979. *El cemento Portland y otros aglomerantes*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A. 232 págs.
29. Grim, Ralph. 1953. *Clay Mineralogy*. United States of America: McGraw-Hill Book Company, Inc.
30. G. Julio Montenegro (2011) *Consideraciones en el mezclado de contrato*. - Perú : Asociación de productores de cemento, ASOCEM.
31. Groover Mikell P. (1997) *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas*. [Libro]. - México : Prentice-Hall, inc..
32. Hardjito, D. &Rangan, B. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Perth, CurtinUniversity of Technology. 103 págs.
33. He, C.; Osbaeck, B.; Makovicky, E. (1995). *Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects*. Cem. Concr. Res.25 (8), 1691-1702.
34. Hua X., Van Deventer J. (2008) *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, Geopolymerization of lightweight aggregate waste* / aut. libro P. Soares A. Pinto, V. Ferreira y J. Labrincha. – España.
35. Humboldt (2014) www.runco.com.ar Humboldt, 14 de Agosto de 2014. www.humboldtmgf.com.
36. Ika Rwerkegmbh& co. Kg. 1998. Staufen-alemania. Link: http://www.ikaprocess.com.es/_appl-6.html
37. Joseph B. Mathew G., *Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete*, july 2012.
38. Kaps, C.; Buchwald, A. (2002). *Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay*. En: geopolymers 2002: turning potential into profit.
39. Kosmatka, S.; Kerkhoff, B. &Panarese, W. (2003). *Design and Control of Concrete Mixtures*.14ª ed.Illinois, Portland Cement Association. 360 págs.
40. Kumar, Sanjay; R. Kumar y S. Mehrotra. 2009. *Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer*. Journal of Material Science [Alemania]. 45(3): 607-615.
41. Mackenzie, K.J.D.; Brew, D.R.M.; Fletcher, R.A.; Nicholson, C.L.; Vagana, r.; schmücker, m. (2005). *Towards an understanding of synthesis mechanisms of geopolymer materials*. En: proceeding of the 4th international conference on geopolymers. St. Quentin: institutgéopolymère. Pp. 41-44.
42. McCabe, Warren; J. Smith y P. Harriott. 2007. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana. 1189 págs.

43. MICIVI (2014) *Ministerio de Comunicación, infraestructura y viviendas*. Guatemala.
44. Muduli, S.; Sadangi, J.; Nayak, B. & Mishra, B. 2013. *Effect of NaOH Concentration in Manufacture of Geopolymer Fly Ash Building Brick*. GreenerJournal of PhysicalSciences(India). 3 (6): 204 - 211.
45. Mustafa, A.; Kamarudin, H.; Binhussain, M.; Khairul, I.; Rafiza, A. &Zarina, Y. 2012. *Microstructure study on optimization of high strength fly ash based geopolymer. AdvancedMaterialsResearch* (Suiza). 476 - 478: 2173 – 2180.
46. Muciño, R. Castañeda. 2001. *Concrete technician manual*. Metricedition editorial imcyc.
47. Najafijani E., Allahverdiali. 2009. *Effects of curing time and temperatura on stregth development of inorganic polymeric bunderbase don natural pozzolan*.
48. Pacheco Torgal T. Abdollahnejad Z. Camoes Z. Ding Y. 2012. *Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement an unproven issue, construction and building materials*.
49. Palomo, A.; Grutzeck, M.W.; Blanco, M.T. (1999). *Alkali-activated fly ashes: a cement for the future*. Cem. Concr. Res., 29, 1323-1329.
50. Perry. (1976). *Chemical Engineers Handbook*. Mexico: McGraw-Hill
51. Pontiles De Hernandez Zoila. *Equipos, máquinas e instalaciones industriales* [Publicación periódica]. - México : [s.n.], 2010. - Guía 3.
52. Provis, J., & van Deventer, J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Boca Raton, Florida, United States of America: CRC Press LLC .
53. R. Dario O. *Manual de técnicas de laboratorio Químico* [Libro]. - Colombia : Universidad de Antioquia, 2009.
54. Reyes Fredy A. *Diseño racional de pavimentos* [Libro]. - Bogotá : CEJA, 2003. - 1ra. Edición
55. Skoog, D., Holler, J., & Nieman, T. (2001). *Principios de análisis instrumental*. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana.
56. Skoog, D. A. (2005). *Fundamentos de Química Análitica*. Mexico: Thomson.
57. Weil, M.; Gasafi, E.; Buchwald, A.; Dombrowski, K. 2005. Helsinki/finlandia. *Sustainable design of geopolymers – integration of economic and environmental aspects in the early stages of material development*. 11th anual sustainable development research conference.

X. ANEXOS

Anexo 1. Resultado de análisis químico mediante fluorescencia por rayos X.

Imagen 24. Análisis químico de ceniza de madera por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala.

CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLOGICO

15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera

Tel: 22864178 Fax: 22864181 laboratorioCETEC@cempro.com

OT	22374
FECHA	2014-03-04
PÁGINA	1 DE 2
ÁREA DE LAB.	QC

Cliente	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección / Teléfono	11 C. 15-79 Z.15 VISTA HERMOSA 3 / 5699-73-35	Muestra	CENIZA DE MADERA
Contacto	MARILIA VICTORIA SIC CHE	Analista(s)	GUILLLERMO TOCAY
Proyecto	CONTROL DE CALIDAD DE CENIZAS	Fecha de Ensayo	2014-03-06

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X*

COMPOSICIÓN QUÍMICA**	
SiO_2, %	0.89
Fe_2O_3, %	--
Al_2O_3, %	0.00
CaO, %	--
MgO, %	--
K_2O, %	--
Na_2O, %	--
SO_3, %	--
P_2O_5, %	--
TiO_2, %	--
Cr_2O_3, %	--
MnO, %	--
LOI (950 °C), %	--
Total, %	--

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.
** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

Analista

Ing. Mario de León.
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.

SGL-CT-QC-IE-01/Rev. 03

Imagen 25. Análisis químico de arcilla por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala.

CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLOGICO

15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera

Tel: 22864178 Fax: 22864181 laboratorioCETEC@cempro.com

OT	22942
FECHA	2014-05-09
PÁGINA	1 DE 1
ÁREA DE LAB.	QC

Cliente	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección / Teléfono	11 C. 15-79 Z. 15 VISTA HERMOSA 3 / 5699-73-35	Muestra	ARCILLA
Contacto	MARILIA VICTORIA SIC CHE	Analista(s)	JOSÉ LAZARO
Proyecto	MONITOREO DE ARCILLA	Fecha de Ensayo	2014-05-13

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X*

COMPOSICIÓN QUÍMICA**	
SiO_2, %	45.42
Fe_2O_3, %	--
Al_2O_3, %	21.41
CaO, %	--
MgO, %	--
K_2O, %	--
Na_2O, %	--
SO_3, %	--
P_2O_5, %	--
TiO_2, %	--
Cr_2O_3, %	--
MnO, %	--
LOI (950 °C), %	--
Total, %	--

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.
** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

Analista

Ing. Mario de León.
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.

Imagen 26. Análisis químico de arena volcánica por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala.

CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLOGICO

15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera

Tel: 22864178 Fax: 22864181 laboratorioCETEC@cempro.com

OT	22941
FECHA	2014-05-09
PÁGINA	1 DE 1
ÁREA DE LAB.	QC

Cliente	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección / Teléfono	11 C. 15-79 Z. 15 VISTA HERMOSA 3 / 5699-73-35	Muestra	CENIZA VOLCANICA
Contacto	MARILIA VICTORIA SIC CHE	Analista(s)	JOSÉ LAZARO
Proyecto	MONITOREO DE CENIZA VOLCANICA	Fecha de Ensayo	2014-05-12

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X*

COMPOSICIÓN QUÍMICA**	
SiO_2, %	50.70
Fe_2O_3, %	--
Al_2O_3, %	18.55
CaO, %	--
MgO, %	--
K_2O, %	--
Na_2O, %	--
SO_3, %	--
P_2O_5, %	--
TiO_2, %	--
Cr_2O_3, %	--
MnO, %	--
LOI (950 °C), %	--
Total, %	--

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.
** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

Analista

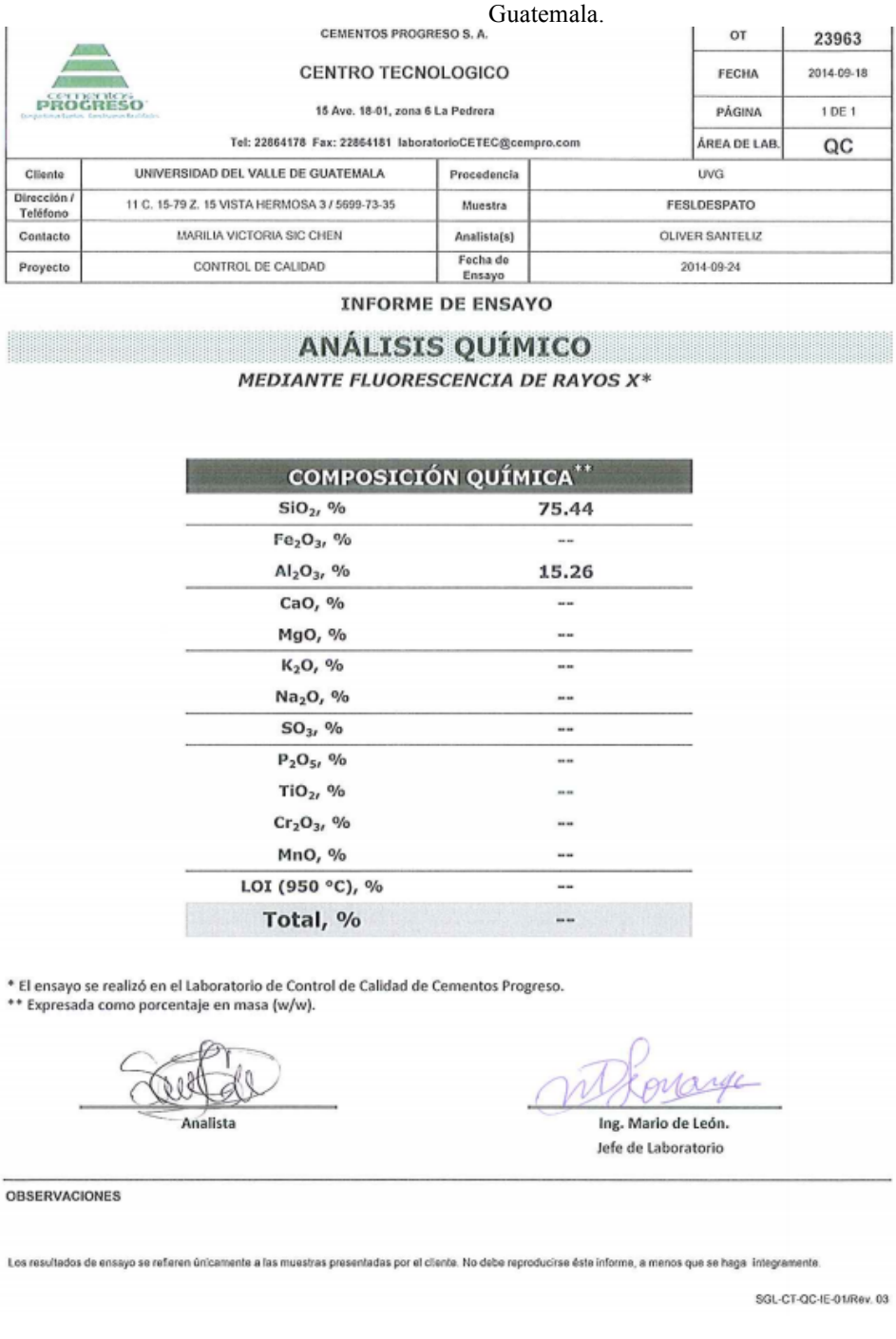
Ing. Mario de León.
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.

SGL-CT-QC-IE-01/Rev. 03

Imagen 27. Análisis químico de feldespato por fluorescencia de rayos X, realizado por Cementos Progreso Guatemala.



CEMENTOS PROGRESO S. A.

CENTRO TECNOLOGICO

15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera

Tel: 22864178 Fax: 22864181 laboratorioCETEC@cempro.com

OT	23963
FECHA	2014-09-18
PÁGINA	1 DE 1
ÁREA DE LAB.	QC

Cliente	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	Procedencia	UVG
Dirección / Teléfono	11 C. 15-79 Z. 15 VISTA HERMOSA 3 / 5699-73-35	Muestra	FESLDESPATO
Contacto	MARILIA VICTORIA SIC CHEN	Analista(s)	OLIVER SANTELIZ
Proyecto	CONTROL DE CALIDAD	Fecha de Ensayo	2014-09-24

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS QUÍMICO

MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X*

COMPOSICIÓN QUÍMICA**	
SiO_2, %	75.44
Fe_2O_3, %	--
Al_2O_3, %	15.26
CaO, %	--
MgO, %	--
K_2O, %	--
Na_2O, %	--
SO_3, %	--
P_2O_5, %	--
TiO_2, %	--
Cr_2O_3, %	--
MnO, %	--
LOI (950 °C), %	--
Total, %	--

* El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso.
** Expresada como porcentaje en masa (w/w).

Analista

Ing. Mario de León.
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, a menos que se haga íntegramente.

SGL-CT-QC-IE-01/Rev. 03

Anexo 2. Cotización de análisis químico por fluorescencia de rayos X en Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

Imagen 28. Cotización de ensayos realizados por Cementos Progreso Guatemala.

CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO
15 Ave. 18 - 01, zona 6 Planta La Pedrera
Tel.: 2286 4178 - Fax: 2286 4181
e-mail: cetec@cempro.com

Cotización No.	**118.13**
Fecha:	**2013.12.16**
No. Orden de Pago:	**-**
Página(s):	**1 DE 1**

Cotización de Ensayos

Nombre de la Empresa:	**Pietro Pazzetti**	**Nit:**	-
Representante o Contacto:	**Pietro Pazzetti**		
Dirección:	pietropazzetti@gmail.com	**Teléfono:**	4219-8103
Proyecto:	**CONTROL DE CALIDAD**		

No.	Ensayo	Tipo de Muestrta	Cantidad Solicitada	Precio Unitario (Q)	Precio Total (Q)
1	Análisis Químico Por Fluorescencia de Rayos X, Procedimiento interno SAC-SM-CC-ME-01 (Aluminio Al2O3, Silice SiO2)	-	2	Q300.00	Q600.00
2	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA (MOLIENDA Y TRITURACIÓN)	-	2	Q300.00	Q600.00
___	_____ ULTIMA LINEA _____	___	___	___	___
				Total (Q):	Q1,200.00

Atentamente,

VIVIAN CASTILLO
Asistente Administrativo
Centro Tecnológico
Cementos Progreso
vcastillo@cempro.com

SGL-CT-AA-FO-02/Rev .01

Anexo 3. Cotización de los reactivos utilizados en la muestra, silicato de sodio e hidróxido de sodio

Imagen 29. Cotización solución silicato de sodio por Merck S.A.

40028954 **No.:** 20140428.145716
Universidad del Vallede Guatemala

11 calle 15-79 Zona 15
Ciudad Guatemala

NIT: 1751758-3
TEL: 23688303
FAX:
Atención:

FECHA
28/04/2014

REPRESENTANTE
Ashly, Sandoval

CONDICIONES DE PAGO
30 DIAS

MONEDA: GTQ
Tipo de Cambio 1.00

FO-VT-04 v1

Merck, S.A.

12 ave. 0-33 zona 2 de Mixco
Tel PBX: (502)2410-2300
Fax Quimicos: (502)2250-5193
Directo: (502)2410-2312
Celular: (502)5765-5115
e-mail: ashly.sandoval@merckgroup.com

nit: 95304-0

COTIZACIÓN

CODIGO	DESCRIPCIÓN	U. VENTA	ENVASE	CANTIDAD	PRECIO/U.V	TOTAL	Disponibilidad...
1056212500	Sodio silicato en solución puris.	2,5 L	2.500 L	1	473.20	473.20	60 DIAS
**** Oferta válida por 15 dias. Disponibilidad sujeta a Existencias ****					Total GTQ	473.20	

CUATROCIENTOS SETENTA Y TRES CON 20/100

Imagen 30. Cotización hidróxido de sodio en lentejas por Merck S.A.

40028954 **No.:** 20141001.111716

Universidad del Vallede Guatemala

11 calle 15-79 Zona 15
Ciudad Guatemala

NIT: 1751758-3
TEL: 23688303
FAX:
Atención: Michael Rocco

COTIZACIÓN

FECHA
01/10/2014

REPRESENTANTE
Ashly, Sandoval

CONDICIONES DE PAGO
30 DIAS

MONEDA: GTQ
Tipo de Cambio 1.00

FO-VT-04 v1

Merck, S.A.

12 ave. 0-33 zona 2 de Mixco
Tel PBX: (502)2410-2300
Fax Quimicos: (502)2250-5193
Directo: (502)2410-2312
Celular: (502)5765-5115
e-mail: ashly.sandoval@merckgroup.com

nit: 95304-0

CODIGO	DESCRIPCIÓN	U. VENTA	ENVASE	CANTIDAD	PRECIO/U.V	TOTAL	Disponibilidad...
1064981000	Sodio hidróxido en lentejas. p.a. EMSURE® ISO	1 KG	1.000 KG	1	175.00	175.00	INMEDIATA
**** **Oferta válida por 15 dias. Disponibilidad sujeta a Existencias** ****					Total GTQ	175.00	

CIENTO SETENTA Y CINCO CON 00/100

Anexo 4. Datos calculados de la muestra de arcilla, realizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

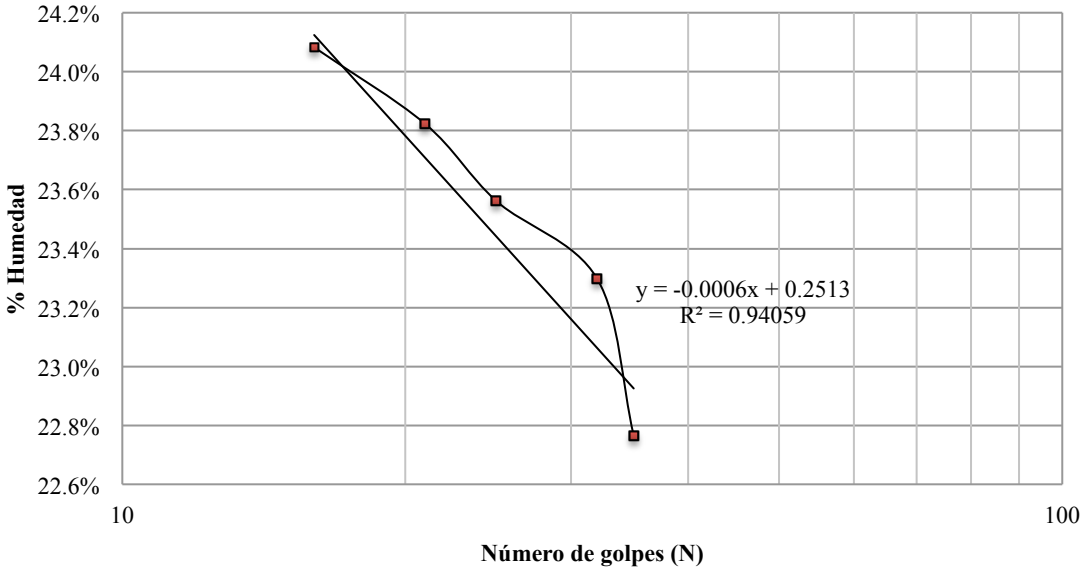
Cuadro 41. Datos calculados, porcentaje de humedad muestra de arcilla, realizados con mufla del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Medición	*Corrida 1*	*Incert.*	*Corrida 2*	*Incert.*	*Corrida 3*	*Incert.*
Peso crisol (g)	20.6392	0.0001	20.1111	0.0001	22.2031	0.0001
Peso muestra (g)	1.0936	0.0001	1.0228	0.0001	1.1431	0.0001
Peso 1 h calentamiento (g)	21.6589	0.0001	21.0652	0.0001	23.2688	0.0001
Peso muestra (g)	1.0197	0.0001	0.9541	0.0001	1.0657	0.0001
% pérdida	6.7575	0.0006	6.7169	0.0006	6.7711	0.0005
Peso 2 h calentamiento (g)	21.6561	0.0001	21.0638	0.0001	23.2673	0.0001
Peso muestra (g)	1.0169	0.0001	0.9527	0.0001	1.0642	0.0001
% pérdida	7.0135	0.0008	6.8537	0.0008	6.9023	0.0007
Peso 3 h calentamiento (g)	21.6586	0.0001	21.0638	0.0001	23.2688	0.0001
Peso muestra (g)	1.0194	0.0001	0.9527	0.0001	1.0657	0.0001
% pérdida	6.7849	0.0009	6.8537	0.0009	6.7711	0.0008
Peso 4 h calentamiento (g)	21.6568	0.0001	21.0621	0.0001	23.2669	0.0001
Peso muestra (g)	1.0176	0.0001	0.9510	0.0001	1.0638	0.0001
% pérdida	6.9495	0.0010	7.0199	0.0011	6.9373	0.0010
Peso 5 h calentamiento (g)	21.6556	0.0001	21.0621	0.0001	23.2653	0.0001
Peso muestra (g)	1.0164	0.0001	0.9510	0.0001	1.0622	0.0001
% pérdida	7.0593	0.0011	7.0199	0.0012	7.0772	0.0011
% pérdida promedio	7.0521	0.0020				

Cuadro 42. Datos calculados pérdidas por calcinación, realizados con mufla del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Medición	Corrida 1	Incert.	Corrida 2	Incert.	Corrida 3	Incert.
Peso crisol (g)	37.4288	0.0001	35.6802	0.0001	38.6737	0.0001
Peso muestra (g)	1.0712	0.0001	0.9985	0.0001	1.0108	0.0001
Peso 1 h calentamiento (g)	38.3509	0.0001	36.5401	0.0001	39.5450	0.0001
Peso muestra (g)	0.9221	0.0001	0.8599	0.0001	0.8713	0.0001
% pérdida	13.9190	0.0012	13.8808	0.0013	13.8009	0.0013
Peso 2 h calentamiento (g)	38.3498	0.0001	36.5400	0.0001	39.5453	0.0001
Peso muestra (g)	0.9210	0.0001	0.8598	0.0001	0.8716	0.0001
% pérdida	14.0217	0.0017	13.8908	0.0018	13.7713	0.0017
% pérdida promedio	13.8946	0.0030				

Imagen 31. Curva de límite líquido de arcilla.



Cuadro 43. Datos calculados fineza arcilla, obtenidos con mesh 200 del Laboratorio de Materiales de de la Universidad del Valle de Guatemala.

Medición	Corrida 1	Incert.	Corrida 2	Incert.	Corrida 3	Incert.
Tara (g)	220.70	0.50	220.70	0.50	220.70	0.50
Masa (g)	501.20	0.50	505.80	0.50	503.60	0.50
Masa retenida Mesh 200 (g)	202.50	0.50	208.30	0.50	204.70	0.50
% retenido	40.40	0.11	41.18	0.11	40.65	0.11
% finos	59.60	0.12	58.82	0.11	59.35	0.12

Cuadro 44. Datos calculados ángulo de reposo arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Ángulo (º)	Incertidumbre
1	42	0.5
2	44	0.5
3	47	0.5
4	47	0.5
5	46	0.5
6	43	0.5
7	45	0.5
8	46	0.5
9	43	0.5
10	44	0.5
11	47	0.5
12	46	0.5
Promedio	45	1.75

Cuadro 45. Datos calculados ángulo de deslizamiento arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Ángulo (º)	Incertidumbre
1	21	0.5
2	22	0.5
3	21	0.5
4	19	0.5
5	22	0.5
6	18	0.5
7	24	0.5
8	22	0.5
9	20	0.5
10	20	0.5
11	18	0.5
12	19	0.5
Promedio	20.5	1.83

Cuadro 46. Datos calculados densidad de bulto de arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Masa (g)	Incertidumbre	Densidad (g/cm3)	Incertidumbre
1	7.2606	0.00005	0.6731	0.03120
2	7.3007	0.00005	0.6768	0.03137
3	7.2427	0.00005	0.6714	0.03112
4	7.3394	0.00005	0.6804	0.03153
5	7.4762	0.00005	0.6930	0.03212
6	7.3058	0.00005	0.6772	0.03139
7	7.3842	0.00005	0.6845	0.03173
8	7.2034	0.00005	0.6677	0.03095
9	7.5737	0.00005	0.7021	0.03254
10	7.4275	0.00005	0.6885	0.03191
Promedio			0.6815	0.01064

Cuadro 47. Datos calculados densidad de bulto compactada de arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Masa (g)	Incertidumbre	Densidad (g/cm^3)	Incertidumbre
1	8.36610	0.00005	0.77559	0.03595
2	8.66120	0.00005	0.80295	0.03722
3	8.68410	0.00005	0.80507	0.03732
4	8.37090	0.00005	0.77603	0.03597
5	8.86400	0.00005	0.82175	0.03809
6	8.55310	0.00005	0.79292	0.03675
7	8.56020	0.00005	0.79358	0.03679
8	8.95050	0.00005	0.82977	0.03846
9	8.32460	0.00005	0.77174	0.03577
10	8.85030	0.00005	0.82048	0.03803
Promedio			0.79899	0.02072

Cuadro 48. Datos calculados densidad de bulto aireada de arcilla, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Masa (g)	Incertidumbre	Densidad (g/cm^3)	Incertidumbre
1	10.63620	0.00005	0.67688	0.03138
2	10.72570	0.00005	0.68518	0.03176
3	10.92860	0.00005	0.70399	0.03263
4	11.07640	0.00005	0.71769	0.03327
5	10.98920	0.00005	0.70961	0.03289
6	11.00270	0.00005	0.71086	0.03295
7	10.88340	0.00005	0.69980	0.03244
8	11.36750	0.00005	0.74468	0.03452
9	10.91560	0.00005	0.70279	0.03258
10	10.79120	0.00005	0.69125	0.03204
Promedio			0.70427	0.01883

Anexo 5. Datos calculados de la muestra de arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 49. Densidad de bulto de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Peso 1 (g)	12.9060
Peso 2 (g)	13.2656
Peso 3 (g)	13.7655
Promedio (g)	13.3123
Densidad de bulto (g/cm^3)	1.5107 1

Cuadro 50. Densidad compactada de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Peso 1 (g)	13.3823
Peso 2 (g)	13.2098
Peso 3 (g)	13.2874
Promedio (g)	13.2931
Densidad de bulto (g/cm^3)	1.5085 1

Cuadro 51. Densidad aireada de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Peso 1 (g)	13.9282
Peso 2 (g)	14.1654
Peso 3 (g)	13.7002
Promedio (g)	13.9313
Densidad de bulto (g/cm^3)	1.5810

Cuadro 52. Análisis granulométrico de arena volcánica, realizado en la tamizadora W.S Tyler Ro-Tap del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Malla	Malla	Tara (g)	Masa total (g)	Muestra (g)	Abertura Dpi (mm)	Fracción masa retenida	% masa retenida	% masa que pasa
20	0 – 20	15.7	97	81.3	0.833	0.111035236	11.10%	88.90%
30	20 – 30	15.7	59.9	44.2	0.595	0.06036602	6.04%	82.86%
45	30 – 45	15.7	94.2	78.5	0.354	0.107211144	10.72%	72.14%
60	45 – 60	15.7	81.8	66.1	0.246	0.090275881	9.03%	63.11%
80	60 – 80	15.6	175.1	159.5	0.175	0.217836657	21.78%	41.33%
100	80 - 100	15.7	156.5	140.8	0.147	0.192297187	19.23%	22.10%
Finos	100 - Finos	15.6	177.4	161.8		0.220977875	22.10%	
			TOTAL	732.2				

Cuadro 53. Datos calculados ángulo de reposo de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Angulo (º)	Incertidumbre
1	40	0.5
2	41	0.5
3	43	0.5
4	40	0.5
5	42	0.5
Promedio	41.2	0.5

Cuadro 54. Porcentaje de humedad en arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Peso Muestra (g)	Peso Final (g)	% de humedad
1	5	4.8	4
2	5	4.79	4.2
3	5	4.8	4
Promedio	5	4.80	4.07

Cuadro 55. Porcentaje de pérdida por calcinación de la arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Peso Muestra (g)	Peso Final (g)	% de humedad
1	4.8	4.7	2.083
2	4.79	4.69	2.087
3	4.8	4.7	2.083
Promedio	4.80	4.70	2.08

Cuadro 56. Ángulo de reposo de arena volcánica, obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corrida	Ángulo (º)	Incertidumbre
1	40	0.5
2	41	0.5
3	43	0.5
4	40	0.5
5	42	0.5
Promedio	41.2	0.5

Anexo 6. Imágenes de los procedimientos aplicados a la arcilla.

Imagen 32. Determinación del límite líquido arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 33. Determinación del límite líquido arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

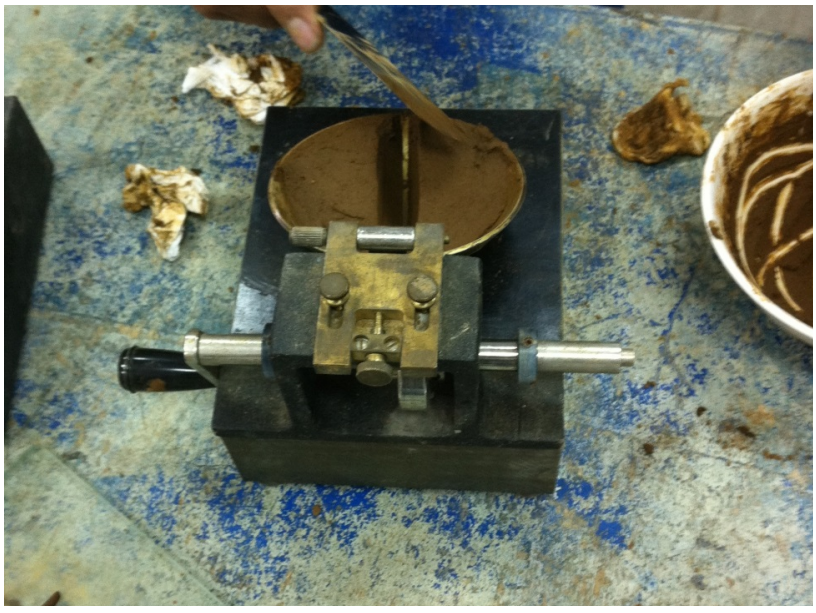


Imagen 34. Determinación de fineza de arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 35. Determinación de fineza de arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 36. Determinación ángulo de reposo arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

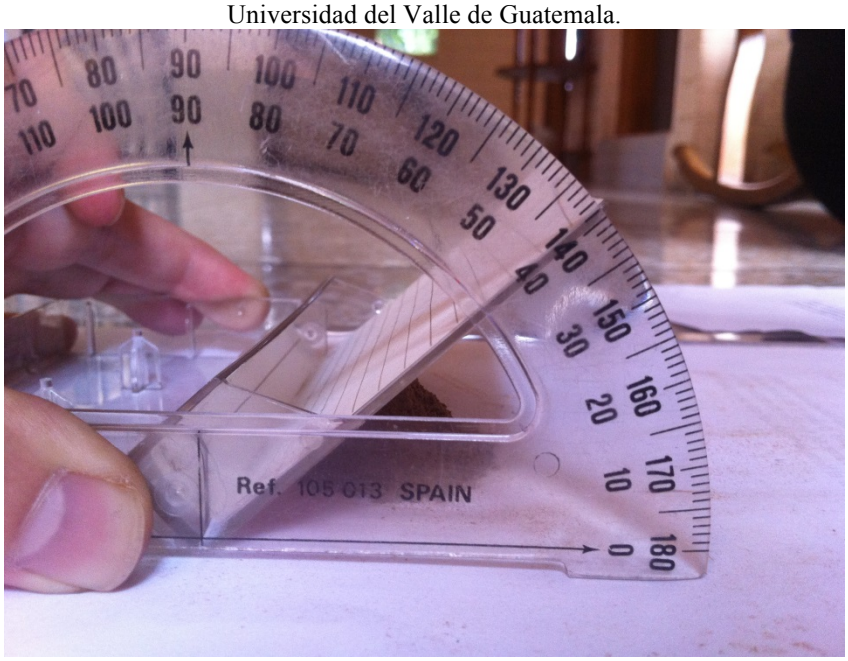


Imagen 37. Determinación ángulo de reposo arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 38. Determinación límite plástico arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 39. Determinación límite plástico arcilla, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Anexo 7. Datos originales de la producción de mezclas de geopolímeros.

Cuadro 57. Datos de mezcla a escala laboratorio para la producción de geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Mezcla	Fecha		Tiempo en horno (h/60˚C)	Materia prima	Tamaño de partícula
	Realizada	Ensayada			
1	22-Sep-14	-	-	Arcilla	-
2		25-Sep-14	-	Arcilla	-
3	23-Sep-14	30-Sep-14	-	Arena Volcánica	x<150µm
4			-	Arena Volcánica	x<150µm
5	24-Sep-14	25-Sep-14	24.00	Arcilla	x<75µm
6		1-Oct-14	24.00	Arcilla	150µm<x<600µm
7	26-Sep-14	30-Sep-14	24.00	Arena Volcánica	x<75µm
8	30-Sep-14	1-Oct-14	24.00	Arcilla	x<75µm
9	30-Sep-14	1-Oct-14	24.00	Arcilla	x<75µm
10		1-Oct-14	24.00	Arcilla	x<75µm
11		1-Oct-14	24.00	Arcilla	x<75µm

Cuadro 58. Relaciones másicas utilizadas para las mezclas de Geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Mezcla	Materia prima	Concentración molar de solución NaOH	Relación $\frac{Silicato\ de\ Sodio}{Hidróxido\ de\ Sodio}$	Relación $\frac{Solución\ Alcalina}{Materia\ Prima}$	Relación $\frac{Agua}{Sólidos\ Geopolímero}$
1	Arcilla	8 M	2.50	0.35	0.21
2	Arcilla	14 M	2.50	0.35	0.20
3	Arena Volcánica	8 M	2.50	0.70	0.38
4	Arena Volcánica	14 M	2.50	0.69	0.35
5	Arcilla	14 M	2.50	0.69	0.73
6	Arena Volcánica	14 M	2.50	0.43	0.25

Cuadro 59. Cantidades de cada componente en las mezclas realizadas con arcillla como materia prima, para la producción de geopolímero realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Mezcla	Materia prima (± 0.05 g)	Agregado fino (± 0.05 g)	Solución NaOH (± 0.50 mL)	Concentración solución de NaOH (M)	Solución silicato de sodio (± 0.50 mL)	Agua extra (± 0.50 mL)
1	314.25	962.50	25.76	8	60.43	0.00
2	310.30	962.50	23.16	14	59.67	0.00
5	157.13	541.27	23.16	14	59.67	75.00
6	157.13	541.27	23.16	14	59.67	75.00
8	814.81	0.00	88.76	14	228.74	15.00

Cuadro 60. Cantidades de cada componente en las mezclas realizadas con arena volcánica como materia prima para la producción de geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Mezcla	Materia prima (± 0.05 g)	Agregado fino (± 0.05 g)	Solución NaOH (± 0.50 mL)	Concentración solución de NaOH (M)	Solución silicato de sodio (± 0.50 mL)	Agua extra (± 0.50 mL)
3	157.13	530.39	25.76	8	60.43	0.00
4	157.13	541.27	23.16	14	59.67	0.00
7	814.81	0.00	88.76	14	228.74	15.00

Cuadro 61. Medidas de los cubos compactados con mezclas de arcilla y fuerza aplicada en la prueba de resistencia a compresión para la producción de geopolímero, realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Mezcla	Largo (± 0.05 cm)	Ancho (± 0.05 cm)	Fuerza aplicada (± 1 lb_f)
1	-	-	-
1	-	-	-
1	-	-	-
2	5.05	5.00	54.00
2	4.95	5.00	58.00
2	5.05	5.05	51.00
5	4.95	5.00	234.00
5	5.00	5.00	212.00
5	4.96	4.90	248.00
6	4.95	4.95	440.00
6	4.95	4.98	417.00
6	5.00	4.92	411.00
8	4.90	4.30	781.10
8	4.90	4.90	242.36
8	4.95	4.90	559.90

Cuadro 62. Medidas de los cubos compactados con mezclas de arena volcánica y fuerza aplicada en la prueba de resistencia a compresión, para la producción de geopolímero realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Mezcla	Largo (± 0.05 cm)	Ancho (± 0.05 cm)	Fuerza aplicada (± 1 lb_f)
3	-	-	-
3	-	-	-
3	-	-	-
4	3.50	4.00	590.00
4	5.00	3.50	990.00
4	3.50	3.50	355.00
7	4.60	4.90	2300.00
7	4.60	5.00	1860.00
7	5.00	4.60	2000.00

Anexo 8. Cálculos de la muestra de las mezclas preparadas para la producción de Geopolímero realizado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

1. Cantidad de hidróxido de sodio para preparar solución

$$g\ NaOH = \left(\frac{M}{1\ L\ solución}\right)(PM_{NaOH})\left(\frac{100}{\%\ Pureza}\right)(V_{solución})$$

Ecuación No. 1

Donde M es la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio requerida, PM_{NaOH} es el peso molecular del hidróxido de sodio, % Pureza es la indicada por el fabricante del reactivo y $V_{solución}$ es el volumen requerido de la solución a preparar. Ejemplo con la solución de hidróxido de sodio 8 Molar.

$$g\ NaOH = \left(\frac{8\ M}{1\ L\ solución}\right)\left(\frac{40\ g}{mol\ NaOH}\right)\left(\frac{100}{98}\right)(0.5\ L) = 163.26\ g$$

2. Sólidos de geopolímero

$$SG = (M_{Silicato\ de\ Sodio} * (\%SiO_2 + \%Na_2O)) + (M_{NaOH} * \%NaOH) + M_{mp}$$

Ecuación No. 2

Donde $M_{Silicato\ de\ Sodio}$ es la cantidad en gramos de la solución de silicato de sodio en la mezcla, $\%SiO_2$ y $\%Na_2O$ la cantidad de estas especies en la composición de la solución de silicato de sodio. M_{NaOH} es la cantidad en gramos de la solución de hidróxido de sodio en la mezcla. El %NaOH es el porcentaje en peso que representa la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio y M_{mp} la cantidad en gramos de la materia prima en la mezcla. Ejemplo utilizando las cantidades de la mezcla No. 7.

$$SG = \big(250.53\ g * (0.27 + 0.08)\big) + (100.21\ g * 0.4043) + 814.81\ g = 943.02\ g$$

3. Cantidad de agua en la mezcla

$$A_T = \left(M_{Silicato\ de\ Sodio} + M_{NaOH} + M_{mp}\right) - SG + A_{extra}$$

Ecuación No. 3

Donde $M_{silicato\ de\ Sodio}$ es la cantidad en gramos de la solución de silicato de sodio en la mezcla, M_{NaOH} es la cantidad en gramos de la solución de hidróxido de sodio en la mezcla, M_{mp} es la cantidad en gramos de la materia prima en la mezcla. Siendo SG la cantidad de sólidos de geopolímero dada por la ecuación 2. A_{extra} es la cantidad en gramos de agua extra añadida a la mezcla. Ejemplo utilizando las cantidades de la mezcla No. 7.

$$A_T = (250.53g + 100.21g + 814.81g) - 943.02g + 14.96g = 237.50\ g$$

4. Relación "Agua/Sólidos de Geopolímero"

$$\frac{Agua}{Sólidos\ de\ Geopolímero} = \frac{A_T}{SG}$$

Ecuación No. 4

Donde A_T es la cantidad total de agua en la mezcla obtenido de la ecuación 3 y SG es la cantidad de sólidos de geopolímero el dada por la ecuación 2. Ejemplo con los valores obtenidos para la mezcla No. 7.

$$\frac{Agua}{Sólidos\ de\ Geopolímero} = \frac{237.50\ g}{943.02\ g} = 0.25$$

5. Cantidad de solución alcalina en la mezcla

$$Solución\ Alcalina = R_{\frac{Solución\ Alcalina}{Materia\ Prima}} * M_{mp}$$

Ecuación No. 5

Donde $R_{\frac{Solución\ Alcalina}{Materia\ Prima}}$ es la relación másica a de solución alcalina a materia prima a variar en la mezcla y M_{mp} es la cantidad en gramos de la materia prima. Ejemplo utilizando las cantidades de la mezcla No. 7.

$$Solución\ Alcalina = 0.43 * 814.81g = 350.74\ g$$

6. Cantidad de solución de hidróxido de sodio en la mezcla

$$M_{NaOH} = \frac{Solución\ Alcalina}{3.50}$$

Ecuación No. 6

Donde Solución Alcalina es el valor obtenido de la ecuación 5. La constante 3.50 se obtiene de la relación másica constante de "Solución Silicato de Sodio/Solución Hidróxido de Sodio" de 2.50. Ejemplo con las cantidades de la mezcla No. 7.

$$M_{NaOH} = \frac{350.74\ g}{3.50} = 100.21\ g$$

7. Cantidad de solución de silicato de sodio en la mezcla

$$M_{Silicato\ de\ Sodio} = Solución\ Alcalina - M_{NaOH}$$

Ecuación No. 7

Donde Solución Alcalina es el valor obtenido de la ecuación 6 y M_{NaOH} es el valor dado por la ecuación 7. Ejemplo con las cantidades de la mezcla No. 7.

$$M_{Silicato\ de\ Sodio} = 350.74g - 100.21g = 250.53\ g$$

8. Cantidad de agregado fino en la mezcla

$$Agregado\ Fino = R_{\frac{Agregado\ Fino}{Sólidos\ de\ Geopolímero}} * SG$$

Ecuación No. 8

Donde $R_{\frac{Agregado\ Fino}{Sólidos\ de\ Geopolímero}}$ es la relación másica de agregado fino a la cantidad de sólidos de geopolímero se utilizó como constante 2.75 obtenida del ASTM C 109. SG es la cantidad de sólidos de geopolímero dada por la ecuación 2. Ejemplo utilizando las cantidades de la mezcla No. 1.

$$Agregado\ Fino = 2.75 * 350.00\ g = 962.50\ g$$

9. Área de los cubos

$$A = \left(a * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right) * \left(b * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right)$$

Ecuación No. 9

Donde "a" es el ancho del cubo y "b" el largo, ambas mediciones en centímetros. Ejemplo utilizando el primer cubo de la mezcla No. 7.

$$A = \left(4.90\ cm * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right) * \left(4.60\ cm * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right) = 3.49\ in^2$$

10. Área de los triángulos

$$A = \frac{\left(a * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right) * \left(b * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right)}{2}$$

Ecuación No. 10

Donde "a"es el ancho del triángulo y "b" el largo, ambas mediciones en centímetros. Ejemplo utilizando el primer triángulo de la mezcla No. 4.

$$A = \frac{\left(4.00 * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right) * \left(3.50 * \left(\frac{0.393701\ in}{1\ cm}\right)\right)}{2} = 1.09\ in^2$$

11. Resistencia a Compresión

$$RC = \frac{F}{A}$$

Ecuación No. 11

Donde F es la fuerza aplicada al cubo ó triángulo en lb_f y A el área de aplicación en in^2. Ejemplo con el primer cubo de la mezcla No. 7.

$$RC = \frac{2300\ lb_f}{3.49\ in^2} = 658.33\ psi$$

12. Conversión de masa a volumen de soluciones de hidróxido de sodio

$$V_{NaOH} = \frac{M_{NaOH}}{\rho_{M,NaOH}}$$

Ecuación No. 12

Donde M_{NaOH} es la cantidad en gramos de la solución de hidróxido de sodio en la mezcla y $\rho_{M,NaOH}$ es la densidad de la solución, a 8 Molar esta es 1.22 g/mL y a 14 Molar es de 1.34 g/mL. Ejemplo utilizando la cantidad de solución de NaOH 8 Molar en la mezcla No. 1.

$$V_{NaOH} = \frac{31.43\ g}{1.22\ g/mL} = 25.76\ mL$$

13. Conversión de masa a volumen de solución de silicato de sodio

$$V_{Silicato\ de\ Sodio} = \frac{M_{Silicato\ de\ Sodio}}{\rho_{Silicato\ de\ Sodio}}$$

Ecuación No. 13

Donde $M_{Silicato\ de\ Sodio}$ es la cantidad en gramos de la solución de silicato de sodio en la mezcla y $\rho_{Silicato\ de\ Sodio}$ es la densidad de la solución, la cual es de 1.30 g/mL. Ejemplo utilizando la cantidad de solución de silicato de sodio en la mezcla No. 1.

$$V_{Silicato\ de\ Sodio} = \frac{78.56\ g}{1.30\ g/mL} = 60.43\ mL$$

Anexo 9. Análisis de error de las mezclas de geopolímero a nivel de laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

1. Media: se utiliza para obtener un vapor promedio de dos o más mediciones, se obtiene al dividir la suma de las medidas duplicadas entre el número de medidas del conjunto.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$$

Ecuación No. 14

Donde x_i representa cada uno de los valores de x que componen el conjunto de N medidas de las réplicas. Ejemplo con las resistencias a compresión obtenidas en los tres cubos de la mezcla No. 7.

$$\bar{x} = \frac{658.33\ psi + 521.74\ psi + 561.01\ psi}{3} = 580.36 \pm 70.32\ psi$$

2. Desviación estándar de la muestra: se aplica para series pequeñas de datos.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Ecuación No. 15

Donde x_i representa cada uno de los valores de x que componen el conjunto de N medidas de las réplicas y $\bar{x}$ es la media de la muestra. Ejemplo utilizando los resultados obtenidos de resistencia a compresión de los cubos compactados con la mezcla No. 7.

$$s = \sqrt{\frac{(658.33 - 580.36)^2 + (521.74 - 580.36)^2 + (561.01 - 580.36)^2}{3-1}} = 70.32\ psi$$

3. Propagación de Error

a. Propagación para multiplicación y división

$$s_y = y * \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{c}\right)^2}$$

Ecuación No. 16

Donde s_a, s_b y s_c son las desviaciones estándar relativas de los números que se multiplican ó dividen, siendo estos a, b y c. El resultado final obtenido es representado por y. Ejemplo utilizando la resistencia a compresión obtenida del cubo 1 de la mezcla No. 7.

$$s_y = 658.33 * \sqrt{\left(\frac{1}{2300}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{3.49}\right)^2} = 9.82$$

Anexo 10. Datos calculados de las mezclas de geopolímero a nivel de laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 63. Áreas y presión de los cubos compactados con arcilla como materia prima.

Mezcla	Área (in^2)	Presión (psi)
1	-	-
1	-	-
1	-	-
2	3.91±0.06	13.80±0.32
2	3.84±0.05	15.12±0.34
2	3.95±0.06	12.90±0.31
5	3.84±0.05	61.00±0.91
5	3.88±0.05	54.71±0.82
5	3.77±0.05	65.83±0.98
6	3.80±0.05	115.85±1.68
6	3.82±0.05	109.14±1.58
6	3.81±0.05	107.79±1.56
8	3.27±0.05	239.17±3.71
8	3.72±0.05	65.12±0.98
8	3.76±0.05	148.93±2.15

Cuadro 64. Áreas y presión de los cubos compactados con arena volcánica como materia prima.

Mezcla	Área (in^2)	Presión (psi)
3	-	-
3	-	-
3	-	-
4	1.09±0.02	543.78±10.36
4	1.36±0.02	729.95±12.75
4	0.95±0.02	373.93±7.63
7	3.49±0.05	658.33±9.82
7	3.57±0.05	521.74±7.71
7	3.57±0.05	561.01±8.29

Cuadro 65. Cantidad de sólidos de geopolímero y agua en las mezclas con arcilla y arena volcánica.

Mezcla	Materia Prima	Sólidos de Geopolímero (g)	Agua (g)	Agua Sólidos de Geopolímero
1	Arcilla	350.00	74.25	0.21
2	Arcilla	350.00	68.91	0.20
3	Arena Volcánica	192.87	74.25	0.38
4	Arena Volcánica	196.83	68.91	0.35
5	Arcilla	196.83	143.68	0.73
6	Arcilla	196.83	143.68	0.73
7	Arena Volcánica	943.02	237.50	0.25
8	Arcilla	943.02	237.50	0.25

Anexo 11. Resultados de los ensayos a compresión de las mezclas y los cuadros de cálculos de costos, para la producción de geopolímero a nivel de laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 66. Resultados de los ensayos realizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, para la producción de geopolímero a nivel laboratorio.

Mezcla no.	Altura (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Área (cm2)	Área (in2)	Fuerza (lb)	Presión (psi)	Error de la media (%)	Comentario
2	4.97	5.00	5.05	25.25	3.91	54.00	13.80	1.02%	Se le rompió una esquina
2	4.98	5.00	4.95	24.75	3.84	58.00	15.12	8.46%	Se le rompió una esquina
2	4.90	5.05	5.05	25.50	3.95	51.00	12.90	7.44%	Se le rompió 2 esquinas
3 y 4	2.60	4.00	3.50	7.00	1.09	590.00	543.78		Forma de triángulo
3 y 4	2.30	3.50	5.00	8.75	1.36	990.00	729.95		Forma de triángulo
3 y 4	4.80	3.50	3.50	6.13	0.95	355.00	373.93		Forma de triángulo
5	4.89	5.00	4.95	24.75	3.84	234.00	61.00	0.80%	
5	4.90	5.00	5.00	25.00	3.88	212.00	54.71	9.59%	
5	4.70	4.90	4.96	24.30	3.77	248.00	65.83	8.79%	
6	4.95	4.95	4.95	24.50	3.80	440.00	115.85	4.44%	
6	5.00	4.98	4.95	24.65	3.82	417.00	109.14	1.61%	
6	4.95	4.92	5.00	24.60	3.81	411.00	107.79	2.83%	
7	4.95	4.90	4.60	22.54	3.49	2,300.00	658.33	13.43%	
7	5.00	5.00	4.60	23.00	3.57	1,860.00	521.74	10.10%	
7	5.00	4.60	5.00	23.00	3.57	2,000.00	561.01	3.33%	
8	4.80	4.30	4.90	21.07	3.27	781.10	239.17	68.18%	Se rajó solamente en el área superior
8	4.85	4.90	4.90	24.01	3.72	242.36	65.12	54.21%	Se rajó en la mitad superior
8	5.00	4.90	4.95	24.26	3.76	459.90	122.33	13.98%	Se rajó en la mitad superior

Cuadro 67. Costo por mezcla de geopolímero realizada.

Mezcla	Cantidad de Materia Prima (g)	Costo Total por kg (Q./kg)	Costo Total (Q.)
1	314.26	10.35	439.72
2	310.30	10.89	462.68
3	157.13	16.43	698.39
4	157.13	17.16	729.37
5	157.13	17.16	729.37
6	157.13	17.16	729.37
7	814.81	14.20	603.49
8	814.81	14.20	603.49

Cuadro 68. Costo de la solución de NaOH en las mezclas.

Mezcla	Solución de NaOH (mL)	Densidad Solución (g/mL)	Concentración Molar	Costo de NaOH (Q./L)	Costo de NaOH (Q.)
1	25.76	1.22	8 M	14.99	0.39
2	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
3	25.76	1.22	8 M	14.99	0.39
4	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
5	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
6	23.16	1.34	14 M	26.23	0.61
7	88.76	1.34	14 M	26.23	2.33
8	88.76	1.34	14 M	26.23	2.33

Cuadro 69. Costo de la solución de silicato de socio en las mezclas

Mezcla	Solución de Silicato de Sodio (mL)	Densidad Solución (g/mL)	Costo de Silicato de Sodio (Q./L)	Costo de Silicato de Sodio (Q.)
1	60.43	1.30	66.25	4.00
2	59.67	1.30	66.25	3.95
3	60.43	1.30	66.25	4.00
4	59.67	1.30	66.25	3.95
5	59.67	1.30	66.25	3.95
6	59.67	1.30	66.25	3.95
7	228.74	1.30	66.25	15.15
8	228.74	1.30	66.25	15.15

Anexo 12. Especificaciones del equipo utilizado a nivel laboratorio para la producción de geopolímero a nivel laboratorio realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 70. Datos técnicos del horno deshidratador situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

No. De Serie	12805
Voltaje	220/3/60
No. De modelo	EC-404-6
Potencia del motor	1 hp
Dimensiones del horno	2000x1700x500
Hogar horno	Acero inoxidable AISI 204L
Temperatura de trabajo	Hasta 180°C
Capacidad aproximada	500 kg

Imagen 40. Horno deshidratador utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 71. Datos técnicos del molino de discos, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Velocidad de rotación	6600/min
Diámetro de rotadores	230mm
Capacidad de producción	100kg/h
Potencia (hp)	2
Eficiencia Teórica	0.74

Imagen 41. Molino de discos utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 72. Datos técnicos del molino de bolas utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Corresponde a las normas	ASTM C 131, ASTM C 535; INV E 218, INV E 219 NTC 98, NTC 93
Cilindro	De acero 12 ±0.5mm espesor de pared, 711±1mm de diámetro interno y 508 ±1mm de longitud
Eje	Horizontal
Capacidad	5000g de agregado y 5000g de carga (esferas)
Velocidad de tambor	30-33 RPM
Contador	Digital automático
Tapa de cierre	Para retención de polvo de 51x15 cm
Cantidad de esferas	12 con diámetros entre 46.38 mm y 47.63 mm (1 13/16” y 1 7/8”), son de hierro fundido
Especificación de esferas	Con pesos entre 390 y 446g c/u
Motor, potencia	1 HP
Operación	110 VAC - 60Hz

Imagen 42. Molino de bolas utilizado, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 73. Datos técnicos de la balanza electrónica utilizada, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Marca	OHAUS
Dimensiones	22 x 8.5 x 30 cm
Diámetro del platillo	12 cm
Capacidad máxima	2100g
Incertidumbre	±0.1 g
Capacidad de sobrecarga	150% de la capacidad
Tiempo de estabilización	3 segundos
Temperatura de operación	10 a 40°C
Calibración	Digital externa

Imagen 43. Balanza electrónica utilizada, situado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

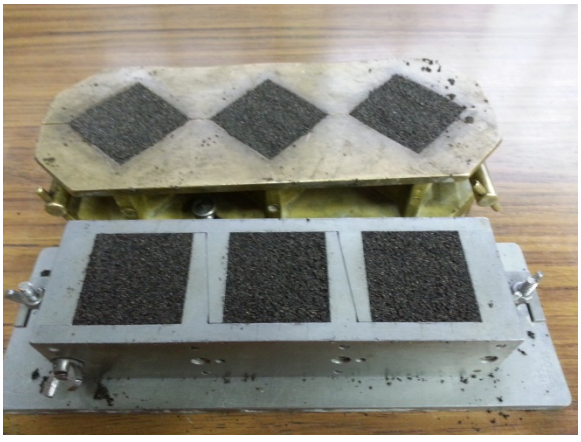
Imagen 44. Tazones de aceros inoxidables utilizados, situado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Tazón de acero inoxidable: con una altura de 10cm y un diámetro interno de 20cm. Utilizada en sustitución de los mezcladores, debido a que la cantidad a mezclar fue menor a 2kg.

Cuadro 74. Datos técnicos de los moldes utilizados del Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala

Marca	Humboldt
Materiales	Acero inoxidable y bronce forjado
Capacidad	3 cubos de 2”
Modelo	H-2810 y H-2820
Peso de embarque	15 lb cada uno

Imagen 45. Moldes de cubos para concreto utilizados del Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.



Cuadro 75. Datos técnicos de la mufla utilizada

Modelo	Blue M
Modelo	OV-490ª-2
Datos Eléctricos	120V 1PH 60Hz
Número de Serie	OV3-16833
Rango de temperaturas	30° a 260°C
Watts	1600W
Motor, potencia	1/6 hp

Imagen 46. Horno utilizado para el proceso de curado, situado en Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Anexo 13. Equipo Extra para la producción de geopolímero a nivel de laboratorio que se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 47. Máquinas universales de carga, en el lado izquierdo esta una máquina para medir cargas pequeñas y en el lado derecho esta una máquina para medir cargas mayores, situadas en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Anexo 14. Datos y descripción de los equipos para la implementación de una planta piloto para la producción de geopolímeros.

Cuadro 76: Datos y descripción del equipo para planta piloto.

Descripción	Size	Unidades	Costo	Exponente
Molino de Bolas c/motor	74.6	kW	Q 130,000.00	0.92
Dosificador de sólidos	3.8	m3	Q 3,300.00	0.3
Mezclador agitado	3.8	m3	Q 12,300.00	0.5
Bodega almacenamiento	3.0	m3	Q 57,000.00	0.84

Cuadro 77: Costos del equipo para propuesta de planta piloto.

Descripción	Material	Unidades necesarias	Marshal 1000	Marshal 2014	Factor materiales	Corrección Material
Molino de Bolas c/motor	Acero	1	130000.00	224250.00	1	$ 224,250.00
Dosificador de sólidos	Acero	2	6600.00	11385.00	2.8	$ 31,878.00
Mezclador agitado	Acero	2	24600.00	42435.00	1.3	$ 55,165.50
Camión Mixer	Acero	1	35000.00	60375.00	1.7	$ 102,637.50
Silo	Acero Galvanizado	1	851.20	1468.32	1	$ 1,468.32
Bodega almacenamiento	Acero	1	171000.00	294975.00	2	$ 589,950.00
					Total	$ 1,005,349.32
						Q7,841,724.70

Cuadro 78: Inversión inicial para línea de producción de geopolímero.

Descripción	Factor	Costo
Entrega del Equipo	1	Q7,841,724.70
Instalación	0.41	Q3,215,107.13
Tubería	0.34	Q2,666,186.40
Servicios eléctricos	0.13	Q1,019,424.21
Instrumentación	0.13	Q1,019,424.21
Infraestructura	0.3	Q2,352,517.41
Excavación y preparación del sitio	0.15	Q1,176,258.70
Auxiliares	0.52	Q4,077,696.84
Ingeniería	0.39	Q3,058,272.63
Contratistas	0.13	Q1,019,424.21
Contingencia	0.39	Q3,058,272.63
Inversión Aproximada (sin iva)	TOTAL:	Q30,504,309.07

Anexo 15. Cálculos para la propuesta de planta piloto de producción de Geopolímero.

1. Formulación de geopolímero:
   Se eligió la formulación de la muestra 4 de la tabla 12, ya que presenta mejores resultados en las pruebas de resistencia de compresión (tabla 13). Se realiza la conversión para una producción de $8m^3$.
   - Debido a que se trabajó en triplicado, y la mezcla de la tabla 12 se hizo para 3 cubos:
     $$3 * 5cm^3 = 15\ cm^3$$
   - Se convierten los cm^3 a m^3 para trabajar en iguales unidades:
     $$15\ cm^3 * \left(\frac{1\ m}{100\ cm}\right)^3 = 0.000015\ m^3$$
   - Se busca la relación entre $8m^3$ y $0.000015m^3$:
     $$\frac{8m^3}{0.000015m^3} = 533{,}333.3$$
   - Se multiplica la relación por cada cantidad de materia prima:
     - Ejemplo con cantidad (tabla 12) de arena volcánica:

$157.13g\ arena\ volcanica * 533{,}333.3 =$ 83, 802,667g arena volcánica = 83,802.67Kg arena volcánica

2. Costos de Equipo:
   Para calcular el costo del equipo se utiliza el Manual del Ingeniero Químico Perry, edición 7, capitulo 9 “Procesos económicos”.
   - Ejemplo para molino de bolas: Se obtiene de la tabla 9.50 los siguientes valores según los requerimientos deseados:

Descripción	***Size***	***Unidades***	***Exponente***	***Material***	***Unidades necesarias***	***Marshall 1000***	***Factor materiales***
Molino de Bolas c/motor	74.6	kW	0.92	Acero	1	130000.00	1

*Para el cálculo se realiza la corrección del Índice de Marshall para el año 2014

Marshall 1000	***Marshall 2014***
130000.00	224250.00

Se Multiplica las unidades necesarias por el índice de Marshall, que posteriormente se corrige por el factor del material, este valor es dado en dólares y se convierte a quetzales a una tasa de 7.80.

$$224250.00 * 1 * 1 = \$\,224{,}250.00$$

$$\$224{,}250.00 * 7.80 = Q\ 1{,}749{,}150.00$$

3. Costos de Inversión:
   Para cada área involucrada para la inversión de la línea se encuentra un factor en la tabla 9.53 Manual del Ingeniero Químico Perry, edición 7, capitulo 9 “Procesos económicos”, y esta es multiplicada por el valor total del equipo, posteriormente se realiza la suma de cada área para encontrar el valor total.
   - Ejemplo de instalación:

Descripción	***Factor***
Instalación	0.41

$$\boldsymbol{Q7{,}841{,}107.13 * 0.41 = Q3{,}215{,}107.13}$$

4. Cálculos del Equipo Principal:
   - Molino de Bolas: Para el proceso se requiere 2.79t/h, ya que no se desea trabajar a la capacidad máxima, se calcula el 10% de materia a tratar para conocer la capacidad deseada.

$$2.79\frac{t}{h} * (1.10) = 3.069 t/h \; arena \; volcánica$$

Se elige un molino con capacidad máxima de 3.5 t/h, ya que se aproxima a lo requerido.

- Bodega de Almacenamiento: Se calcula a partir del volumen requerido para el proceso, sobredimensionado el 10%; obtenido a partir de la densidad teórica de la arena volcánica.

$$3 \; t \; arena \; volcánica * 1.10 = 3.3 \; t \; arena \; volcánica$$

$$3.3t * \frac{1000 \; kg}{1 \; t} = 3{,}300 \; kg \; arena \; volcánica$$

$$3{,}300 \; kg \; arena \; volcánica * \frac{1 \; m3 \; arena \; volcanica}{1.375 \; kg \; arena \; volcanica} = 2{,}400 \; m3 \; arena \; volcánica$$

Se calcula el área y se asume un ancho (15m), la cual se puede variar para dimensionar la bodega. Se toma el área de un rectángulo.

$$V = A * L$$

$$2{,}400m3 = A * 20m$$

$$A = \frac{2{,}400m3}{20 \; m} = 120 \; m2$$

$$A = a * h$$

Se asume un ancho (a) de 15 m:

$$h = \frac{A}{a} = \frac{120m2}{15m} = 8.0 \; m$$

Se asume el tamaño estándar de lámina de acero al carbón de:

12 X 4 ft = 3.66 x 1.21 m

$$A_{lamina} = 3.66m * 1.21m = 4.42 \; m2$$

$$Número \; de \; láminas = \frac{120 \; m2}{4.42 \; m2} = 27.14 \; láminas = 28 \; láminas$$

$$Número\ de\ láminas\ corregido = 28 * 2 = 56\ láminas$$

Se multiplica por 2, ya que son dos lados. Para el techo se realiza el mismo cálculo, sólo que utilizan las ecuaciones geométricas de un triángulo.

* Se realiza de igual forma para el silo de almacenamiento, tomando el área y perímetro de un círculo y cilindro.

** Es importante mencionar que no se realiza cálculo de cada equipo principal, ya que únicamente se seleccionó el equipo para que cumpliera con las cantidades necesarias para llevar a cabo el proceso cumpliendo la demanda asumida.

Anexo 16. Tabla 9.50, 9.53 y 9.54 del Manual del Ing. Químico- Perry utilizada para el cálculo de costos del equipo propuesto.

Imagen 48. Exponentes para costo de capital Manual del Ingeniero Químico.

TABLE 9-50 Typical Exponents for Equipment Cost versus Capacity

Equipment	Size	Unit	Approximate cost, $000	Size range	Exponent
Agitator, turbine, top entry, open, FOB	10 (7.5)	hp (kW)	7.0	2–30 (1.5–22.4)	0.45
Agitator, turbine, top entry, closed, FOB	10 (7.5)	hp (kW)	10.7	2–200 (1.5–150)	0.96
Blower, centrifugal, 4 lbf/in² (27.6 kN/m²), DEL, excluding motor	10 (4.72)	10^2 ft³/min (sm³/s)	67	0.5–150 (0.24–71)	0.60
Cone crusher, FOB, crusher only	100 (74.6)	hp (kW)	130	30–300 (22.4–224)	0.92
Jaw crusher, FOB, excluding motor	10 (7.5)	hp (kW)	34	1–60 (0.75–44.7)	0.65
Jaw crusher, FOB, excluding motor	100 (74.6)	hp (kW)	284	60–400 (44.7–300)	0.81
Centrifugal pump, C/S, FOB, excluding motor	10 (7.5)	hp (kW)	1.6	0.5–40 (0.37–30)	0.30
Centrifugal pump, C/S, FOB, excluding motor	100 (74.6)	hp (kW)	4.4	40–400 (30–300)	0.67
Conveyor, belt, C/S, FOB, excluding motor	100 (9.3)	ft² (m²)	6.7	60–200 (5.6–18.6)	0.50
Conveyor, screw, C/S, DEL, excluding motor	70 (540)	ft × in diameter (m × mm diameter)	10	50–100 (390–780)	0.46
Centrifuge, automatic batch, horizontal, C/S, FOB	20 (1.86)	Filter area, ft² (m²)	100	7–80 (0.65–7.43)	0.69
Compressor, reciprocating, <1000 lbf/in², FOB, including motor	300 (224)	hp (kW)	133	1–20000 (0.75–1490)	0.84
Crystallizer, forced circulation, C/S, FOB	100 (91)	tons/day (Mg/day)	283	10–1000 (9.1–970)	0.59
Dryer, drum, C/S, FOB, excluding motor	100 (9.3)	ft² (m²)	73	10–400 (0.9–37)	0.52
Dryer, vacuum, shelf, C/S, FOB, excluding trays, vacuum equipment	100 (9.3)	ft² (m²)	17	15–1000 (1.4–93)	0.56
Dust collector, cloth, shaker type, FOB, including motors	10^4 (4.7)	ft³/min (m³/s)	17	10^3–5×10^4 (0.47–23.6)	0.79
Dust collector, multicyclones, FOB	10^4 (4.7)	ft³/min (m³/s)	7	10^3–1.5×10^5 (0.47–70.8)	0.66
	10^4 (4.7)	ft³/min at 40°C	77	10^3–8×10^4 (0.47–73.8)	0.39
Electrostatic precipitator, FOB	2×10^5 (94)	(m³/s)	383	8×10^4–10^6 (37.8–472)	0.81
Ejector, single-stage, 100 psig, steam, FOB	3 (10^{-2})	lb/h (air/mmHg absolute)	2.7	0.2–30 (6.8×10^{-4}–0.1)	0.50
Ejector, two-stage, FOB, including condenser, piping	1 (3.4×10^{-3})	[kg/h/(N/m²)]	6.3	0.2–10 (6.8×10^{-4}–3.4×10^{-2})	0.43
Ejector, multistage, FOB, including condenser, piping	10 (3.4×10^{-2})	[kg/h/(N/m²)]	16.7	0.2–100 (6.8×10^{-4}–0.34)	0.26
Filter, vertical-pressure leaf, C/S, DEL	100 (9.3)	ft² (m²)	17	30–1500 (2.8–140)	0.57
Filter, plate and frame, C/S, DEL	100 (9.3)	ft² (m²)	5.7	10–1000 (0.9–93)	0.55
Filter, vacuum rotary drum, C/S, FOB, including motor	100 (9.3)	ft² (m²)	63.3	10–1500 (0.9–140)	0.48
Heat exchanger, shell-tube, floating head, C/S, DEL; fixed tube × 0.85; U tube × 0.87; kettle × 1.35	1000 (93)	ft² (m²)	21.7	20–20000 (1.9–1860)	0.59
Heat exchanger, thermal screw, C/S, FOB, excluding motor	100 (9.3)	ft² (m²)	33	10–400 (0.9–37)	0.78
Kettle, jacketed, glass-lined, FOB	100 (0.38)	U.S. gal (m³)	53	50–1000 (0.2–3.8)	0.48
Motors, ac induction, wound rotor, TEFC, FOB	10 (7.5)	hp (kW)	12.3	10–25 (7.5–18.6)	0.96
Motors, ac induction, wound rotor, TEFC, FOB	70 (52)	hp (kW)	19.3	25–200 (18.6–149)	0.77
Piping, typical straight run, C/S, FOB, $/ft					
Installed: $/ft × 6 to 7	6 (152)	Nominal diameter in (mm)	0.0093	1–24 (25–610)	1.33
Complex network: FOB $/ft × 2 Installed: $/ft × 13					
Pressure vessel horizontal drum (150 psig), C/S	1000 (3.8)	U.S. gal (m³)	6.3	100–80000 (0.4–302)	0.62
Jacketed reactors, including mixer, FOB	100 (0.38)	U.S. gal (m³)	9.3	10–4000 (0.04–15.1)	0.53
Refrigeration, packaged mechanical, INST	100 (351.7)	U.S. tons (kW)	133	10–1000 (35.2–3520)	0.73
Screen, vibrating, single-deck, DEL, including motor	500 (46)	ft² (m²)	10	150–700 (14–65)	0.62
Stack, carbon steel		ft (m)	—	20–150 (6.1–45.7)	1.00
Tanks: atm, horizontal cylinder, C/S, FOB	1000 (3.8)	U.S. gal (m³)	4.7	100–40000 (0.4–151)	0.57
Vertical cylinder, C/S, FOB	1000 (3.8)	U.S. gal (m³)	3.3	100–20000 (0.4–76)	0.30
Vertical jacketed, C/S, FOB	1000 (3.8)	U.S. gal (m³)	15	70–1500 (0.26–5.7)	0.57
Vertical agitated, C/S, FOB, including motor	1000 (3.8)	U.S. gal (m³)	12.3	100–20000 (0.4–76)	0.50
Towers, distillation including internals, INST	4000 (trays)	$\left(\frac{\text{feed, lb/year}}{10^6}\right)^{0.85}$	3300	300–30000	1.00

NOTE: All costs are North American values with M & S = 1000.

Imagen 49. Factores de estimación económica Manual del Ingeniero Químico.

TABLE 9-53 Estimate Using Factors from Table 9-51

Details (solids-fluid, grass-roots plant)	Factor assumed	Cost, $	Percentage of total
Equipment, delivered	1.00	1,000,000	23.4
Installed	0.41	410,000	9.6
Piping	0.34	340,000	8.0
Electrical	0.13	130,000	3.0
Instruments	0.13	130,000	3.0
Battery-limit building and service	0.30	300,000	7.0
Excavation and site preparation	0.15	150,000	3.5
Auxiliaries	0.52	520,000	12.2
Total physical plant	2.98	2,980,000	69.7
Field expense	0.39	390,000	9.1
Engineering	0.39	390,000	9.1
Direct plant costs	3.76	3,760,000	87.9
Contractor's fees, overhead, profit	0.13	130,000	3.0
Contingency	0.39	390,000	9.1
Total fixed-capital investment	4.28	4,280,000	100.0

TABLE 9-54 Typical Factors with Separation of Materials and Labor*

	Total factor	Materials factor	Labor factor
Equipment delivered	1.00		
Installation	0.09		0.09
Instruments installed	0.13	0.09	0.04
Piping	0.29	0.155	0.135
Foundations and steel	0.18	0.08	0.10
Insulation painting	0.11	0.025	0.085
Electrical	0.18	0.06	0.12
Battery-limit building	0.21	0.13	0.08
Site preparation	0.08		
Auxiliaries	0.55		
Physical-plant cost	2.82		
Engineering and home office	0.31	0.01	0.30
Field expense	0.43	0.30	0.13
Direct plant cost	3.56		
Contractor's fees	0.17		
Contingency	0.39		
Fixed-capital cost	4.12		

*Based on the data of H. C. Bauman, *Fundamentals of Cost Engineering in the Chemical Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1964, p. 285, for essentially carbon steel equipment.

Anexo 17. Normas ASTM aplicadas para la producción de geopolímero.

ASTM C311

D 4326 Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash By X-Ray Fluorescence

2.2 *ACI Document:*[3]

ACI 201.2R Guide to Durable Concrete

3. Terminology

3.1 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.1.1 *composite sample*—a sample that is constructed by combining equal portions of grab or regular samples.

3.1.2 *established source*—a source for which at least six months of continuous production quality assurance records from a test frequency required for a new source are available, sampled at the source.

3.1.3 *grab sample*—a sample that is taken in a single operation from a conveyor delivering to bulk storage, from bags, or from a bulk shipment. Such a sample may, or may not, reflect the composition or physical properties of a single lot of fly ash or natural pozzolan. This type of sample can be used to characterize small amounts of material.

3.1.4 *jobsite or new source*—a source for which less than six months of production records are available, sampled at the source.

3.1.5 *lot*—specific quantity of fly ash or natural pozzolan offered for inspection at any one time. A lot may be one storage bin or the contents of one or more transport units representing material drawn from the same storage bin.

3.1.6 *regular sample*—a sample that is constructed by combining equal portions of grab samples that were taken at predetermined times or locations from any single lot of material.

4. Significance and Use

4.1 These test methods are used to develop data for comparison with the requirements of Specification C 618. These test methods are based on standardized testing in the laboratory and are not intended to simulate job conditions.

4.1.1 *Strength Activity Index*—The test for strength activity index is used to determine whether fly ash or natural pozzolan results in an acceptable level of strength development when used with hydraulic cement in concrete. Since the test is performed with mortar, the results may not provide a direct correlation of how the fly ash or natural pozzolan will contribute to strength in concrete.

4.1.2 *Chemical Tests*— The chemical component determinations and the limits placed on each do not predict the performance of a fly ash or natural pozzolan with hydraulic cement in concrete, but collectively help describe composition and uniformity of the material.

5. Materials

5.1 *Graded Standard Sand*—The sand used for making test specimens for the activity index with lime or portland cement shall be natural silica sand conforming to the requirements for graded standard sand in Specification C 778.

NOTE 1—*Segregation of Graded Sand*—The graded standard sand should be handled in such a manner as to prevent segregation, since variations in the grading of the sand cause variations in the consistency of the mortar. In emptying bins or sacks, care should be exercised to prevent the formation of mounds of sand or craters in the sand, down the slopes of which the coarser particles will roll. Bins should be of sufficient size to permit these precautions. Devices for drawing the sand from bins by gravity should not be used.

5.2 *Hydrated Lime*— The hydrated lime used in the tests shall be reagent-grade calcium hydroxide, 95 % minimum calculated as $Ca(OH)_2$(Note 2), and have a minimum fineness of 2500 m^2/kg as determined in accordance with Test Method C 204.

NOTE 2—The calcium hydroxide should be protected from exposure to carbon dioxide. Material remaining in an opened container after a test should not be used for subsequent tests.

5.3 *Portland Cement*— The portland cement used in the Strength Activity Index with Portland Cement test shall comply with the requirements of Specification C 150 and have a minimum compressive strength of 35 MPa (5000 psi) at 28 days and total alkalies ($Na_2O + 0.658\ K_2O$) not less than 0.50 % nor more than 0.80 %.

5.3.1 The use of a locally available portland cement in the Strength Activity Index or a project cement that does not meet the requirements of the section on Materials is permitted when the variations from the requirements of the section on Materials are reported and when the use of such portland cement is requested.

6. Sample Type and Size

6.1 Grab samples and regular samples shall have a mass of at least 2 kg (4 lb).

6.2 Grab samples or regular samples taken at prescribed intervals over a period of time (see Table 1), may be combined to form a composite sample representative of the fly ash or natural pozzolan produced during that period of time.

6.3 Composite samples shall have a mass of at least 4 kg (8 lb).

6.4 The sampling shall be done by, or under the direction of, a responsible representative of the purchaser.

7. Sampling Procedure

7.1 The fly ash or natural pozzolan may be sampled by any one of the following methods:

7.1.1 *From Bulk Storage at Point of Discharge or from Rail Cars and Road Tankers*—A sample may be taken by siphon

TABLE 1 Minimum Sampling and Testing Frequency[A]

Test	Sample Type	Jobsite or New Source[B]	Established Source[B]
Moisture content Loss on ignition Fineness	Regular	Daily or each 90 Mg[C] (100 Tons)	Daily or each 360 Mg[C] (400 Tons)
Density and the other tests in Specification C 618, Tables 1 and 2	Composite	Monthly or each 1 800 Mg[C] (2 000 Tons)	Monthly or each 2 900 Mg[C] (3 200 Tons)

[A] It should be noted that the minimum test frequency given in Table 1 is not necessarily the frequency needed for quality control programs on some fly ash or natural pozzolans.

[B] For definitions, refer to the Terminology section.

[C] Whichever comes first.

[3] Available from American Concrete Institute (ACI), P.O. Box 9094, Farmington Hills, MI 48333.

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
Reproduction authorized per License Agreement with Monique Pyle (ASTM Account); Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

tube during loading or by sampling tube from each loaded car or tanker. If the load is sampled at the point of discharge into the rail car or tanker, the top surface shall be removed to a depth of at least 200 mm (8 in.) before sampling. The sample shall be identified with at least the date and shipment number.

7.1.2 *From Bags in Storage*—The regular sample shall comprise increments of equal size taken by sampling tube from three bags selected at random from one lot of bagged material. The sample shall be identified with date and lot number.

7.1.3 *From Conveyor Delivering to Bulk Storage*—Take one sample of 2 kg (4 lb) or more of the material passing over the conveyor. This may be secured by taking the entire test sample in a single operation, known as the grab sample method, or by combining several equal portions taken at regular intervals, known as the regular sample method. Automatic samplers may be used to obtain samples.

7.2 Samples shall be treated as described in Section 8.

NOTE 3—Some methods of loading or delivery of fly ash or natural pozzolan, particularly from an airstream or conveyor belt, may create stratification or segregation in the material stream. Sampling techniques must be designed to ensure that the sample is representative of the material shipped.

8. Preparation and Storage of Samples

8.1 Prepare composite samples for the tests required in Section 9, by arranging all grab or regular samples into groups covering the period or quantity to be represented by the sample. Take equal portions from each, sufficient to produce a composite sample large enough for the tests required. Mix the composite sample thoroughly.

8.2 Samples shall be stored in clean, airtight containers identified with the source and lot or period of time represented. Untested portions of the sample shall be retained for at least one month after all test results have been reported.

9. Testing Frequency

9.1 *General*—When required, the purchaser shall specify the amount of testing for available alkalies, reactivity with cement alkalies, drying shrinkage, and air-entrainment. Make all other tests on regular or composite samples chosen as specified in Table 1.

CHEMICAL ANALYSIS

10. General

10.1 All apparatus, reagents and techniques shall comply with the requirements of Test Methods C 114.

10.2 *Purity of Water*— Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean distilled water or water of equal purity.

MOISTURE CONTENT

11. Procedure

11.1 Dry a weighed sample, as received, to constant weight in an oven at 105 to 110 °C (221 to 230 °F).

12. Calculation

12.1 Calculate the percentage of moisture to the nearest 0.1 %, as follows:

$$\text{Moisture content, } \% = (A/B) \times 100 \quad (1)$$

where:

A = mass loss during drying, and
B = mass as received.

LOSS ON IGNITION

13. Procedure

13.1 Determine loss on ignition in accordance with the procedures outlined in Test Methods C 114, except that the material remaining from the determination of moisture content shall be ignited to constant mass in an uncovered porcelain, not platinum, crucible at 750 ± 50 °C (1382 ± 190 °F).

14. Calculation

14.1 Calculate the percentage of loss on ignition to the nearest 0.1, as follows:

$$\text{Loss on ignition, } \% = (A/B) \times 100 \quad (2)$$

where:

A = loss in mass between 105 and 750 °C (221 and 1382 °F),
B = mass of moisture-free sample used.

SILICON DIOXIDE, ALUMINUM OXIDE, IRON OXIDE, CALCIUM OXIDE, MAGNESIUM OXIDE, SULFUR TRIOXIDE, SODIUM OXIDE AND POTASSIUM OXIDE

15. Procedure

15.1 Determine the percentages of these oxides as required in accordance with the applicable sections of Test Methods C 114 for materials having an insoluble residue greater than 1 % (Note 4). Analysts performing sodium oxide and potassium oxide determinations shall observe the precautions outlined in the applicable section of Performance Specification C 1157 (refer to the section on Test Methods). Most pozzolans dissolve completely in lithium borate fluxes.

NOTE 4—Rapid and instrumental methods may be employed similar to those in Test Methods C 114 and D 4326.

AVAILABLE ALKALI

16. Procedure

16.1 Weigh 5.0 g of the sample and 2.0 g of hydrated lime on a piece of weighing paper, carefully mix using a metal spatula, and transfer to a small plastic vial of approximately 25-mL capacity. Add 10.0 mL of water to this mixture, seal the vial by securing the cap or lid to the vial with tape (Note 5), blend by shaking until the mixture is uniform, and store at 38 ± 2 °C.

NOTE 5—To ensure that moisture loss from the paste does not occur, place the sealed vial in a sealable container (such as a small sample or mason jar), add sufficient water to cover the bottom of the container, and seal.

16.2 Open the vial at the age of 28 days and transfer the contents to a 250-mL casserole. Break up and grind the cake with a pestle, adding a small amount of water, if necessary, so that a uniform slurry containing no lumps is obtained (Note 6). Add sufficient water to make the total volume 200 mL. Let

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
Reproduction authorized per License Agreement with Monique Tyree (TRB Admin Account); Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

stand 1 h at room temperature with frequent stirring. Filter through a medium-textured filter paper onto a 500-mL volumetric flask. Wash thoroughly with hot water (eight to ten times).

NOTE 6—At times it may be necessary to break the vial and peel off the plastic from the solid cake. In such cases, care should be exercised to avoid the loss of material and to remove all solid material from the fragments of the vial. If the cake is too hard to break up and grind in the casserole, a mortar should be used.

16.3 Neutralize the filtrate with dilute HCl (1 + 3), using 1 to 2 drops of phenolphthalein solution as the indicator. Add exactly 5 mL of dilute HCl (1 + 3) in excess. Cool the solution to room temperature and fill the flask to the mark with distilled water. Determine the amount of sodium and potassium oxides in the solution using the flame photometric procedure, described in Test Methods C 114, except that the standard solutions shall be made up to contain 8 mL of calcium chloride ($CaCl_2$) stock solution per litre of standard solution, and the solution as prepared shall be used in place of the solution of cement.

NOTE 7—The standard solutions made up with 8 mL of calcium chloride ($CaCl_2$) stock solution contain the equivalent of 504 ppm of CaO. Tests have shown that this amount closely approximates the amount of calcium dissolved in the test solution.

17. Calculation and Report

17.1 Calculate the results as weight percent of the original sample material. Report as equivalent percentage of sodium oxide (Na_2O), calculated as follows:

$$\text{Equivalent } Na_2O, \% = Na_2O, \% + 0.658 \times K_2O, \% \quad (3)$$

AMMONIA

18. Procedure

18.1 Weigh 1.00 g of the fly ash sample into a 125 mL Erlenmeyer flask. Add 100 mL of ammonia-free water. Place a neoprene rubber stopper on the flask and swirl the contents to thoroughly mix the sample and the water.

18.2 Filter the mixture using a medium-textured filter paper and save the filtrate for the ammonia determination.

18.3 Determine the concentration of ammonia in the filtrate in accordance with the procedures outlined in Test Methods D 1426, Method A–Direct Nesslerization or Method B–Selective Ion Electrode.

18.4 Calculate the ammonia concentration of the fly ash as follows:

$$Ammonia, mg/kg = N_W \times V_W / W_{fa} \quad (4)$$

where:

N_W = ammonia concentration of the water extract determined by Test Methods D 1426, mg/L,
V_W = volume of water used for extracting ammonia from the fly ash sample, mL, and
W_{fa} = Mass of fly ash sample used in the test, g.

PHYSICAL TESTS

DENSITY

19. Procedure

19.1 Determine the density of the sample in accordance with the procedure described in Test Method C 188, except use about 50 g of fly ash or natural pozzolan instead of approximately 64 g of cement as recommended in Test Method C 188.

FINENESS, AMOUNT RETAINED WHEN WET-SIEVED ON A 45-μm (NO. 325) SIEVE

20. Procedure

20.1 Determine the amount of the sample retained when wet-sieved on a 45-μm (No. 325) sieve, in accordance with Test Method C 430, with the following exceptions.

20.1.1 Calibrate the 45-μm (No. 325) sieve using a cement standard (SRM 114). Calculate the sieve correction factors as follows:

$$CF = std - obs \quad (5)$$

where:

CF = the sieve correction factor, %, (include a negative sign when appropriate),
std = the certified residue value for the SRM, %, and
obs = the observed residue value for the SRM, %.

20.1.2 Calculate the fineness of the fly ash or natural pozzolan to the nearest 0.1 % as follows:

$$R_C = R_S + CF \quad (6)$$

where:

R_C = corrected sieve residue, %,
R_S = observed residue for the test sample, %, and
CF = the sieve correction factor, %.

If the residue retained for the test sample is equal to zero ($R_S = 0$), then the sieve correction factor shall not be added to the test result to calculate the corrected sieve residue. In such cases, the corrected fineness shall be reported as zero.

NOTE 8—Test Method C 430 has been adopted for testing fly ash fineness. However, certain requirements, such as cleaning of sieves and interpretation of the test results, are sometimes not appropriate for fly ashes.

INCREASE OF DRYING SHRINKAGE OF MORTAR BARS

21. Test Specimen

21.1 Prepare test specimens in accordance with the procedures described in Test Method C 157/C 157M, except mold three mortar bars from both the control mix and the test mix using the following proportions:

	Control Mix	Test Mix
Portland cement, g	500	500
Fly ash or natural pozzolan, g	None	125
Graded standard sand, g	1375	1250
Water	sufficient to produce a flow of 100 to 115 %	

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM [by ASTM Int'l (all rights reserved);
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
Reproduction authorized per License Agreement with Monique Tyree (ASTM Int'l Account); Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

22. Procedure

22.1 Cure and measure the test specimens in accordance with Test Method C 157/C 157M, except that the moist-curing period (including the period in the molds) shall be 7 days, and the comparator reading at the age of 24 ± ½ h shall be omitted. Immediately after taking the comparator reading at the end of the 7-day moist-curing period, store the specimens in accordance with Test Method C 157/C 157M, and after 28 days of air storage, take a comparator reading for the specimens in accordance with Test Method C 157/C 157M.

23. Calculation and Report

23.1 Calculate the increase in drying shrinkage of the mortar bars, S_i, as follows:

$$S_i = S_t - S_c \quad (7)$$

where:

S_t = average drying shrinkage of the test specimens calculated as follows, and

S_c = average drying shrinkage of the control specimens calculated as follows:

$$S = \frac{[\text{initial CRD} - \text{CRD}] \times 100}{G} \quad (8)$$

where:

S = drying shrinkage of test or control specimens, %,

initial CRD = difference between the comparator reading of the specimen and the reference bar at 7 days of moist curing,

CRD = difference between the comparator reading of the specimen and the reference bar at 28 days of drying, and

G = the gage length of the specimens 250 mm (10 in.).

23.2 Report the results to the nearest 0.01. If the average drying shrinkage of the control specimens is larger than the average drying shrinkage of the test specimens, prefix a minus sign to the increase of drying shrinkage of mortar bars reported.

SOUNDNESS

24. Procedure

24.1 Conduct the soundness test in accordance with Test Method C 151, except that the specimens shall be molded from a paste composed of 25 parts by weight of fly ash or natural pozzolan and 100 parts by weight of a portland cement conforming to Specification C 150.

AIR-ENTRAINMENT OF MORTAR

25. Procedure

25.1 Using portland cement conforming to the requirements for Type I or Type II of Specification C 150, prepare a test mixture in accordance with Test Method C 185, using the following proportions:

	Test Mix
Portland cement, g	300
Fly ash or natural pozzolan	75
20–30 standard sand, g	1125
Water, mL, sufficient to give a flow of 80 to 95	Y
Neutralized Vinsol resin solution, mL,[A] sufficient to produce an air content of 18 ± 3 %	Z

[A] The amount of Vinsol resin solution used shall be considered as part of the mixing water.

25.2 The neutralized Vinsol resin solution used in this section on Air-Entrainment of Mortar shall be either a commercial neutralized Vinsol resin solution or a neutralized Vinsol resin solution prepared in accordance with Specification C 226. If it is necessary to dilute either of these solutions, use distilled or demineralized water. (Note 9.)

NOTE 9—Dissolved minerals in drinking water may precipitate Vinsol resin solutions and greatly diminish its air-entraining characteristics.

25.3 Prepare two test mixtures with sufficient neutralized Vinsol resin to produce an air content of 15 to 18 % in the first mix and 18 to 21 % in the second mix. Then, determine by interpolation the amount of Vinsol resin, expressed as weight percent of the cement, required to produce an air content of 18 %.

26. Calculation

26.1 Calculate the air content of the test mixtures as follows:

$$\text{Air content, volume \%} = 100[1 - (W_a/W_c)] \quad (9)$$

$$W_a = W/400 \quad (10)$$

$$W_c = \frac{300 + 1125 + 75 + (300 \times P \times 0.01)}{\left[\left(\frac{300}{3.15}\right) + \left(\frac{1125}{2.65}\right) + \left(\frac{75}{D}\right) + \left(\frac{300 \times P \times 0.01}{1}\right)\right]} \quad (11)$$

where:

W_a = actual weight per unit of volume of mortar as determined by Test Method C 185, g/mL,

W = weight of the specified 400 mL of mortar (see Test Method C 185), g,

W_c = theoretical weight per unit of volume, calculated on an air-free basis and using the values for density and quantities of the materials in the mix, g/mL,

P = percentage of mixing water plus Vinsol resin solution based on weight of cement, and

D = density of fly ash or natural pozzolan in the mixture, Mg/m^3.

STRENGTH ACTIVITY INDEX WITH PORTLAND CEMENT

27. Specimens

27.1 Mold the specimens from a control mixture and from a test mixture in accordance with Test Method C 109/C 109M. The portland cement used in the Strength Activity Index test shall comply with the requirements of Specification C 150 and with the alkali and strength limits given in the section on Materials. In the test mixture, replace 20 % of the mass of the amount of cement used in the control mixture by the same mass of the test sample. Make six-cube batches as follows:

27.1.1 Control Mixture:

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
Reproduced per License Agreement with Monique
Copyright © by ASTM Int'l (all rights reserved);
Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

500 g of portland cement
1375 g of graded standard sand
242 mL of water

27.1.2 Test Mixture:

400 g of portland cement
100 g of test sample
1375 g of graded standard sand
mL of water required for flow ± 5 of control mixture

27.2 *Number of Specimens*:

27.2.1 Since Specification C 618 specifies that "meeting the 7 day or 28 day Strength Activity Index will indicate specification compliance" only one age might be required. At the option of the producer or the user after preparing six-cube batches, only three cubes of control and test mixtures need to be molded for either 7 or 28 day testing.

28. Storage of Specimens

28.1 After molding, place the specimens and molds (on the base plates) in the moist room or closet at 23.0 ± 2.0 °C (73.4 ± 3 °F) for 20 to 24 h. While in the moist room or closet, protect the surface from dripping water. Remove the molds from the moist room or closet and remove the cubes from the molds. Place and store the cubes in saturated lime water as specified in Test Method C 109/C 109M.

NOTE 10—Take care to ensure against zones of stratification or pockets of variation in temperature in the curing chamber.

29. Compressive Strength Test

29.1 Determine the compressive strength, as specified in Test Method C 109/C 109M, of three specimens of the control mixture and three specimens of the test mixture at ages of 7 days, or 28 days, or both, depending upon how many specimens were molded as prescribed in the section on Number of Specimens.

30. Calculation

30.1 Calculate the strength activity index with portland cement as follows:

Strength activity index with portland cement =

$$(A/B) \times 100 \quad (11)$$

where:

A = average compressive strength of test mixture cubes, MPa (psi), and
B = average compressive strength of control mix cubes, MPa (psi).

WATER REQUIREMENT

31. Calculation

31.1 Calculate the water requirement for the Strength Activity Index with Portland Cement as follows:

Water requirement, percentage of control =

$$(Y/242 \times 100) \quad (12)$$

where:

Y = water required for the test mixture to be ±5 of control flow.

EFFECTIVENESS OF FLY ASH OR NATURAL POZZOLAN IN CONTROLLING ALKALI SILICA-REACTIONS (SEE Appendix X1)

32. Procedure

32.1 Determine expansion of mortar made with a fly ash or natural pozzolan and a test cement as a percent of expansion of mortar made with low alkali cement in accordance with Test Method C 441 as modified in the following paragraphs:

32.1.1 *Control Mixture*— The control mixture will be made as required in Test Method C 441 except that the control cement shall have an alkali content (as equivalent Na_2O) less than 0.60 % (Note 11).

NOTE 11—Generally, the control cement should have an alkali content as equivalent Na_2O between 0.50 and 0.60 %. However, lower alkali control cement may be used, if desired, to demonstrate equivalence.

32.1.2 *Test Mixture Using Fly Ash or Natural Pozzolan*— The combined quantity of cement plus fly ash or natural pozzolan shall total 400 g (see Appendix X1). Use 900 g of borosilicate glass aggregate and sufficient mixing water to produce a flow between 100 and 115 % as determined in accordance with Test Method C 1437. The cement used in the test mixture shall have an alkali content greater than that of the cement in the control mixture (Note 12).

NOTE 12—Generally, this test cement will have an alkali content equal to or higher than that used in the job.

32.1.3 Store and measure specimens as required in Test Method C 227. Measure length of specimens at ages of 1 and 14 days.

33. Report

33.1 Include in the report for each test mixture comparison made:

33.1.1 The 14 day expansion of the test mixture as a percent of the control mixture at that age,

33.1.2 The identification and chemical analysis of the fly ash or natural pozzolan,

33.1.3 The mass percentage of fly ash or natural pozzolan based on the total mass of cement plus fly ash or natural pozzolan in the test mixture, and

33.1.4 The alkali content of control and test mixture cements as equivalent alkali ($Na_2O + 0.658\ K_2O$).

EFFECTIVENESS OF FLY ASH OR NATURAL POZZOLAN IN CONTRIBUTING TO SULFATE RESISTANCE

34. Procedure

34.1 Compare the length change of mortar bars with absolute expansion limits or compare the length change of mortar bars made with a control cement with the length change of mortar bars made with fly ash or natural pozzolan and a test cement, in accordance with Test Method C 1012, as modified in the following paragraphs. Results shall be evaluated using absolute limits (Procedure A) or the relative expansion limits (Procedure B) in Specification C 618, Table 2A.

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM [by ASTM Int'l (all rights reserved);
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

34.2 *Control Mixture for Procedure A*—A control mixture is not mandatory since performance measured using Procedure A is based on maximum expansion of the test mixture. If a control mixture is made for Procedure A then proportion it as required in Test Method C 1012 using a cement meeting the requirements of Specification C 150, Type II or Type V.

34.3 *Test Mixture Using Fly Ash or Natural Pozzolan for Procedure A*—Make the combined quantity of cement plus fly ash or natural pozzolan, by mass, the same as the total cement content of the control mixture described in the Making Mortars section of Test Method C 1012. The proportion of fly ash or natural pozzolan may be varied using from 15 % to 50 %, by mass, of the total cement plus fly ash or natural pozzolan. Any type of portland cement may be used to prepare test mixtures.

34.4 *Control Mixture for Procedure B*—Make the control mixture for Procedure B as required in Test Method C 1012 with the cement that is proposed for use in the project or a cement that through performance or definition (Specification C 150, Section 1) is expected to give satisfactory results (or a cement for which the contribution to sulfate resistance is known and is satisfactory).

NOTE 13—The control cement should be chosen to give sulfate resistance for the expected level of sulfate exposure. Experience has shown that Type II cements are often used for moderate levels of exposure. Type V cement is commonly used for severe exposures (see X2.2 of Appendix X2).

34.5 *Test Mixture for Using Fly Ash or Natural Pozzolan for Procedure B*—Make the combined quantity of cement plus fly ash or natural pozzolan, by mass, the same as the total cement used in the control mixture. The proportion of fly ash or natural pozzolan may be varied from 15 % to 50 % of the total cement plus fly ash or natural pozzolan by mass. Any type of portland cement may be used to prepare test mixtures.

34.6 For either Procedure A or B, store and measure specimens as required in Test Method C 1012 for at least 6 months.

NOTE 14—Evaluation of the sulfate resistance of cementitious materials for use in certain situations or critical structures may require longer periods of storage and additional length measurements. Refer to Test Method C 1012 for guidance on this matter.

35. Report

35.1 In addition to the information required in Test Method C 1012, report the following information for each mixture comparison made:

35.2 For Procedure A, the age and expansion as a specific amount,

35.3 For Procedure B, the age and expansion as a percent of the control mixture at that age,

35.4 The identification and chemical analysis including C_3A content of the cements used in both the control and test mixtures,

35.5 The identification and chemical analysis of the fly ash or natural pozzolan used in the test mixtures,

35.6 The mass percentages of the fly ash or natural pozzolan based on the total mass of cement plus fly ash or natural pozzolan in the test mixture.

TABLE 2 Within and Between Lab Precision Estimates for C 114 Methods Applied to the Analysis of Fly Ash[A]

Oxide	1s		d2s	
	W/L	B/L	W/L	B/L
SiO_2	0.62	0.86	1.75	2.45
Al_2O_3	1.46	2.29	4.12	6.48
Fe_2O_3				
<2 %	0.12	0.11	0.34	0.31
≥2 %	0.12	0.25	0.34	0.71
CaO	0.63	0.74	1.79	2.09
MgO	0.20	0.21	0.55	0.61
SO_3	0.10	0.16	0.28	0.45
Moisture	0.05	0.06	0.15	0.17
LOI	0.09	0.12	0.25	0.35

[A] The four values for SO_3 were editorially corrected to reflect updated research reports associated with this standard.

PRECISION AND BIAS

36. Precision and Bias

36.1 *Strength Activity Index Test*:

36.1.1 Precision was determined from two interlaboratory studies involving two Class C fly ashes, two Class F fly ashes, and one Class N pozzolan. Participating laboratories numbered 12 and 7 in the two studies.[4]

36.1.2 The single-operator standard deviation for the Strength Activity Index test has been found to be 3.7 % (1s). This does not appear to vary either with material or with test age, over the range of 7 to 28 days. Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same material should not differ by more than 10.5 % (d2s) of the average of the two results.

36.1.3 The multilaboratory standard deviation for the Strength Activity Index test has been found to be 4.5 % (1s). This does not appear to vary either with material or with test age, over the range of 7 to 28 days. Therefore, results of two properly conducted tests in different laboratories on the same material should not differ by more than 12.7 % (d2s) of the average of the two results.

36.1.4 Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for this procedure, no statement on bias is being made.

36.2 *Chemical Analysis*:

36.2.1 Precision and bias estimates for the test methods in C 114 when applied to the analysis of pozzolans were calculated from an interlaboratory study involving 7 laboratories each analyzing 4 NIST SRM fly ashes. A research report describing the results of this study is available from ASTM.[5]

36.2.2 *Precision*—Within-laboratory (W/L) and between-laboratory (B/L) estimates of standard deviation and estimates of maximum differences expected between duplicate determinations in 95 % of comparisons[6] are summarized in Table 2.

36.2.3 *Bias*—Statistically significant bias was found in the determination of CaO and MgO. CaO determinations averaged

[4] Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR: C09-1001.

[5] Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR: C09-1008.

[6] These values represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670.

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
by ASTM Int'l (all rights reserved);
Reproduction authorized per License Agreement with Monique Tyree (ASTM MNL Account); Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

0.46 % higher than the value certified for the SRM. MgO determinations averaged 0.19 % higher than the value certified for the SRM.

36.3 *Ammonia*:

36.3.1 Precision of Method A (Direct Nesslerization) – The single-laboratory coefficient of variation (repeatability) has been found to be 9.2 % (1s %). The reproducibility of this test method is being determined and will be available on or before July 2010.

36.3.2 Precision of Method B (Selective Ion Electrode) – The single-laboratory coefficient of variation (repeatability) has been found to be 7.4 % (1s %). The reproducibility of this test method is being determined and will be available on or before July 2010.

36.3.3 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for these procedures, no statement on bias is being made.

37. Keywords

37.1 fly ash; natural pozzolan

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. COMMENTARY ON SECTION 32

X1.1 Test procedures in Section 32 are designed to determine the effectiveness of fly ash, or natural pozzolan, in preventing excessive expansion resulting from a reaction between certain aggregates and alkalies in portland-cement mixtures. Tests are made in accordance with Test Method C 441 using:

X1.1.1 400 g of portland cement or a combined total of cement plus fly ash or natural pozzolan of 400 g,

X1.1.2 900 g of borosilicate glass, and

X1.1.3 Sufficient water to obtain a flow of 100 to 115 %.

X1.2 The control mixture is made with a low-alkali portland cement. The test mixture, made of a test percentage of the fly ash or natural pozzolan, can be made with the same cement or any other cement having an equivalent alkali content greater than 0.60 %.

X1.3 *Interpretation of Results*—The fly ash or natural pozzolan should be considered "effective" when used at percentages equal to or greater than the percentages used in the test mixture with cements having alkali contents that do not exceed by more than 0.05 percentage points the alkali content of the cement used in the test mixture.

X1.4 *Selection of the Percentage of Fly Ash or Natural Pozzolan*—It may be necessary to make test mixtures with several percentages of fly ash or natural pozzolan to determine the minimum amount necessary to be considered "effective" in reducing expansion to the level produced by the "control" low-alkali cement. The minimum amount of fly ash or natural pozzolan should be 15 % by weight of cementitious material.

X1.5 *Selection of the Alkali Content of the Cement Used in the Test Mixture*—In some instances it may not be necessary to demonstrate that the fly ash or natural pozzolan will reduce expansion, but rather that it will not increase expansion. In this instance the test and control mixtures should be made with the same low alkali cement used in the control mixture to better delineate any increase in expansion. The fly ash or natural pozzolan percentage used may need to be sufficiently high to demonstrate that the percentage exceeds the pessimum if such pessimum exists for the combination.

X1.6 *Selection of the Low Alkali Control Cement*—The test procedure in this test method and requirements in Specification C 618 are designed to measure the relative effectiveness of the fly ash or natural pozzolan in reducing expansion due to alkali-silica reactions. The effectiveness is a function of both the alkali content of the cement used in the test mixture and the percentage of fly ash or natural pozzolan. The higher the alkali content of the test mixture cement and the lower the percentage of fly ash or natural pozzolan used, the more effective the fly ash or natural pozzolan. This test procedure and the 100 % criterion of Specification C 618 can be used as a guide to enhance field performance of job mixtures if it is assumed that use of the low alkali control cement will prevent excessive expansion in service with materials proposed for use in the job. This is the situation when the aggregates proposed for use contain rapidly reactive constituents but do not exceed 0.05 % expansion in three months or 0.10 % expansion in six months when tested with the control cement in Test Method C 227. In such instances the control cement used in this test method should have an alkali content as required to control the expansive reactions of the aggregates being used, for example in the 0.50 to 0.60 % range. See the appendix to Specification C 33.

X1.6.1 Certain reactive aggregates have been identified which produce deleterious expansion after many years of service when used with cements with equivalent alkali contents well below 0.60 %. Often these reactive aggregates do not produce expansions in Test Method C 227 exceeding those discussed in the appendix of Specification C 33 until a much later age, perhaps one or two years. In such instances the use of a control cement with an alkali content significantly less than 0.60 % is appropriate.

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
Reproduction authorized per License Agreement with Monique Tyree (ASTM MMS Account); Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

X2. COMMENTARY ON SECTION 34

X2.1 The test procedures in Section 34 are designed to evaluate the performance of particular fly ashes or natural pozzolans in contributing to the resistance or durability of concrete in a sulfate environment. Tests are made on mortars in accordance with Test Method C 1012.

X2.2 The control mixture should be made with a cement that by performance or definition (Specification C 150, Section 1.1) is expected to give satisfactory results for the anticipated level of sulfate exposure. ACI 201.2R recommends Type II cement when the sulfate content, expressed as SO_4, is 0.10 to 0.20 percent in soils or 150 to 1500 ppm in waters. ACI 201.2R recommends Type V cements when the sulfate content, expressed as SO_4, is 0.20 to 2.0 % in soils, or 1500 to 10 000 ppm in waters. The test mixtures for both procedures may be made with varying percentages of fly ash or natural pozzolan. Test mixtures can use cements with equal or higher or lower C_3A contents that might not have given satisfactory results when used alone.

X2.3 *Interpretation of Results*—The absolute expansion limits used in Procedure A make it difficult to ascertain how the addition of fly ash or natural pozzolan influences sulfate resistance. However, as referenced in Test Method C 1012, research has indicated that mortars meeting the expansion criteria will perform adequately. Under Procedure B, the fly ash or natural pozzolan will be considered to be able to contribute to sulfate resistance if the expansion of the test mixture does not exceed that of the control mixture at an exposure time of at least 6 months. It is recommended that the proportion of fly ash or natural pozzolan used in the test mixture be the same one proposed for use in the project ± 2 %, and that the C_3A content of the project cement be equal to, or less than, that which was used in the test mixtures. See Appendix X1, Technical Background, Test Method C 1012.

X2.4 *Selection of the Percentage of Fly Ash or Natural Pozzolan*—It may be necessary to make test mixtures with several percentages of fly ash or natural pozzolan to determine the amount necessary to obtain adequate resistance to different concentrations of sulfates. Percentages used in a project should be within 2 % of those that are successful in the test mixtures or should be between two percentages that are successful.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

Copyright ASTM International
Provided by IHS under license with ASTM
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Licensee=Purdue University/5923082001
Not for Resale, 01/08/2008 08:13:54 MST
Reproduction authorized per License Agreement with Monique Tyree (ASTM IHS Account); Mon Jan 30 13:07:53 EST 2006

ASTM C117

Designation: C 117 – 95

Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing[1]

This standard is issued under the fixed designation C 117; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the amount of material finer than a 75-µm (No. 200) sieve in aggregate by washing. Clay particles and other aggregate particles that are dispersed by the wash water, as well as water-soluble materials, will be removed from the aggregate during the test.

1.2 Two procedures are included, one using only water for the washing operation, and the other including a wetting agent to assist the loosening of the material finer than the 75-µm (No. 200) sieve from the coarser material. Unless otherwise specified, Procedure A (water only) shall be used.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 136 Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates[2]

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials[2]

C 702 Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size[2]

D 75 Practice for Sampling Aggregates[3]

E 11 Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes[4]

2.2 *AASHTO Standard:*

T11 Method of Test for Amount of Material Finer than 0.075-mm Sieve in Aggregate[5]

3. Summary of Test Method

3.1 A sample of the aggregate is washed in a prescribed manner, using either plain water or water containing a wetting agent, as specified. The decanted wash water, containing suspended and dissolved material, is passed through a 75-µm (No. 200) sieve. The loss in mass resulting from the wash treatment is calculated as mass percent of the original sample and is reported as the percentage of material finer than a 75-µm (No. 200) sieve by washing.

4. Significance and Use

4.1 Material finer than the 75-µm (No. 200) sieve can be separated from larger particles much more efficiently and completely by wet sieving than through the use of dry sieving. Therefore, when accurate determinations of material finer than 75 µm in fine or coarse aggregate are desired, this test method is used on the sample prior to dry sieving in accordance with Test Method C 136. The results of this test method are included in the calculation in Test Method C 136, and the total amount of material finer than 75 µm by washing, plus that obtained by dry sieving the same sample, is reported with the results of Test Method C 136. Usually, the additional amount of material finer than 75 µm obtained in the dry sieving process is a small amount. If it is large, the efficiency of the washing operation should be checked. It could also be an indication of degradation of the aggregate.

4.2 Plain water is adequate to separate the material finer than 75 µm from the coarser material with most aggregates. In some cases, the finer material is adhering to the larger particles, such as some clay coatings and coatings on aggregates that have been extracted from bituminous mixtures. In these cases, the fine material will be separated more readily with a wetting agent in the water.

5. Apparatus and Materials

5.1 *Balance*—A balance or scale readable and accurate to 0.1 g or 0.1 % of the test load, whichever is greater, at any point within the range of use.

5.2 *Sieves*—A nest of two sieves, the lower being a 75-µm (No. 200) sieve and the upper a 1.18-mm (No. 16) sieve, both conforming to the requirements of Specification E 11.

5.3 *Container*—A pan or vessel of a size sufficient to contain the sample covered with water and to permit vigorous

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved March 15, 1995. Published May 1995. Originally published as C 117 – 35 T. Last previous edition C 117 – 90.

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

[5] Available from the American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., NW, Suite 225, Washington, DC 20001.

ASTM D4318

Designation: D 4318 – 05

Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils[1]

This standard is issued under the fixed designation D 4318; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of the liquid limit, plastic limit, and the plasticity index of soils as defined in Section 3 on Terminology.

1.2 Two methods for preparing test specimens are provided as follows: *Wet preparation method,* as described in 10.1. *Dry preparation method,* as described in 10.2. The method to be used shall be specified by the requesting authority. If no method is specified, use the wet preparation method.

1.2.1 The liquid and plastic limits of many soils that have been allowed to dry before testing may be considerably different from values obtained on non-dried samples. If the liquid and plastic limits of soils are used to correlate or estimate the engineering behavior of soils in their natural moist state, samples should not be permitted to dry before testing unless data on dried samples are specifically desired.

1.3 Two methods for determining the liquid limit are provided as follows: *Method A,* Multipoint test as described in Sections 11 and 12. *Method B,* One-point test as described in Sections 13 and 14. The method to be used shall be specified by the requesting authority. If no method is specified, use Method A.

1.3.1 The multipoint liquid limit method is generally more precise than the one-point method. It is recommended that the multipoint method be used in cases where test results may be subject to dispute, or where greater precision is required.

1.3.2 Because the one-point method requires the operator to judge when the test specimen is approximately at its liquid limit, it is particularly not recommended for use by inexperienced operators.

1.3.3 The correlation on which the calculations of the one-point method are based may not be valid for certain soils, such as organic soils or soils from a marine environment. It is strongly recommended that the liquid limit of these soils be determined by the multipoint method.

1.4 The plastic limit test is performed on material prepared for the liquid limit test.

1.5 The liquid limit and plastic limit of soils (along with the shrinkage limit) are often collectively referred to as the Atterberg limits. These limits distinguished the boundaries of the several consistency states of plastic soils.

1.6 The composition and concentration of soluble salts in a soil affect the values of the liquid and plastic limits as well as the water content values of soils (see Method D 2216). Special consideration should therefore be given to soils from a marine environment or other sources where high soluble salt concentrations may be present. The degree to which the salts present in these soils are diluted or concentrated must be given careful consideration.

1.7 The methods described herein are performed only on that portion of a soil that passes the 425-μm (No. 40) sieve. Therefore, the relative contribution of this portion of the soil to the properties of the sample as a whole must be considered when using these tests to evaluate properties of a soil.

1.8 The values stated in acceptable metric units are to be regarded as the standard, except as noted below. The values given in parentheses are for information only.

1.8.1 The standard units for the resilience tester covered in Annex A1 are inch-pound, not metric. The metric values given are for information only.

1.9 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:* [2]

C 702 Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size

D 75 Practice for Sampling Aggregates

D 420 Guide to Site Characterization for Engineering, Design, and Construction Purposes

D 653 Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids

Anexo 18. Hoja técnica del cemento UGC 4000 psi de Cementos Progreso.

CEMENTO PROGRESO

UGC CON PUZOLANA

Reduce agrietamientos y es más durable.

¡El Cemento que protege su obra de los efectos del tiempo por estar reforzado con puzolana!

Contiene Puzolana natural, la cual contribuye a que el Cemento Progreso UGC tenga los siguientes beneficios:

- Aumenta la resistencia del concreto a lo largo del tiempo.
- Mayor tiempo de trabajabilidad: facilita el trabajo de acabado del concreto.
- Minimiza el agrietamiento del concreto.
- Hace más impermeable el concreto.
- Aumenta la resistencia al ataque de los sulfatos y otros agentes agresivos.
- Disponible en presentaciones de saco de 42.5 Kg. y granel.

Resistencia mínima de 4000 psi
A los 28 días (28 N/mm²)

Usos recomendados para el Cemento Progreso UGC

Es un cemento que puede ser usado prácticamente en todas las actividades típicas de la construcción.

- Concreto premezclado.
- Mezclado en obra.
- Elaboración de morteros de distintos tipos.
- Zapatas, cimientos y columnas.
- Paredes, losas y vigas.

Preparación de Cemento Progreso UGC con Puzolana*

PARA HACER:	UGC	ARENA	PIEDRÍN	AGUA
MORTERO (Medidas en carretilla)	1 saco de UGC	2 carretillas de arena (4 pies³)	No lleva	En galones: 6 galones En litros: 23 litros (si la arena está húmeda)
MORTERO (Medidas en botes de 5 galones)	1 saco de UGC	6 botes de arena	No lleva	En galones: 6 galones En litros: 23 litros (si la arena está húmeda)
CONCRETO				
a) Para cimientos de concreto reforzado, aceras, pisos, postes, muros de concreto	1 saco de UGC	a) 5 botes de 5 galones (3.5 pies³)	a) 6 botes de 5 galones (4 pies³)	Para toda preparación de concreto: de 20 a 25 litros (5 a 6.6 galones)
b) Cimientos, vigas, columnas, losas		b) 3.5 botes de 5 galones (2.5 pies³)	b) 4.5 botes de 5 galones (3 pies³)	Nota: Para mezclas pobres (6 sacos o menos), puede necesitarse más agua
c) Pavimentos, piso de bodegas		c) 3 botes de 5 galones (2 pies³)	c) 3.5 botes de 5 galones (2.5 pies³)	

* Medidas aproximadas.

Las arenas y su contenido de humedad

Aprendiendo a diferenciarlas:

Arena seca o ligeramente húmeda (humedad hasta de 5%): se disgrega al apretarla con la mano.

Arena húmeda (humedad de 10-15%): forma una bola al apretarla con la mano, pero no deja agua visible en la palma de la mano.

Arena mojada (humedad alrededor de 20%): al apretarla con la mano, deja agua visible en la palma y gotea.

EQUIPO PROGRESO

cementos PROGRESO
Sólo con un buen Cemento se hace una buena Obra.

CEMENTO PROGRESO

UGC CON PUZOLANA

Reduce agrietamientos y es más durable.

¿QUÉ ES EL CEMENTO PROGRESO UGC?

Es un cemento Pórtland con adición de puzolana natural y se clasifica como cemento para uso general en la construcción. Esto quiere decir que por las características propias de éste, puede ser utilizado en prácticamente todas las actividades típicas de la construcción, en especial en la fabricación de concreto premezclado y mezclado en obra y en la elaboración de morteros de diferentes tipos.

¿QUÉ SON LAS PUZOLANAS?

Las puzolanas son sustancias que contienen minerales silíceos y aluminosos que, si bien no tienen por sí mismas cualidades cementantes, son capaces de reaccionar con la cal en presencia del agua a temperaturas ordinarias para formar compuestos cementantes.

El nombre de las puzolanas viene de la población de Puzzuoli, cerca del Volcán Vesubio en Italia, donde hay depósitos de tobas fonolíticas empleadas extensamente por los romanos.

Para ser efectivas, las puzolanas requieren de un alto grado de finura y, algunas como las arcillas y los esquistos arcillosos, necesitan además de la calcinación para ser activas.

En Guatemala hay muchos depósitos de tobas, cenizas y arenas volcánicas, así como de diatomitas y algunos de esquistos arcillosos y caolines que son potencialmente utilizables.

¿EN QUÉ CONSISTE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA?

Al hidratarse el clinker de cemento Pórtland, las puzolanas mezcladas con el mismo reaccionan con la cal libre y sobre todo con la cal de hidrólisis del clinker, que es más activa y que va quedando liberada conforme se van estabilizando los componentes activos del cemento, principalmente el silicato tricálcico y silicato dicálcico. La actividad puzolánica se va desarrollando progresivamente y, si bien es lenta a edades tempranas, a edades mayores de 28 días es más notorio su efecto. La reacción cal-puzolanas forma compuestos cementantes similares a los que resultan de la hidratación de los silicatos tricálcico y dicálcico. Con el tiempo, los cementos con puzolanas van adquiriendo mayor resistencia mecánica y mayor impermeabilidad de lo que se lograría con los cementos Pórtland ordinarios.

Además de esta acción, las puzolanas contribuyen a que el Cemento Progreso UGC tenga un menor calor de hidratación, una mayor resistencia al ataque de los sulfatos y otros agentes agresivos (por la fijación de la cal libre y cal de hidrólisis), y mayor trabajabilidad en las mezclas de concreto. Este cemento cumple con los requisitos de norma para moderado calor de hidratación (MCH) y moderada resistencia a sulfatos (MRS).

¿CUÁLES SON LAS CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PROGRESO UGC?

Es un cemento Pórtland con puzolanas que cumple con los requisitos de las normas para cementos hidráulicos ASTM C1157.

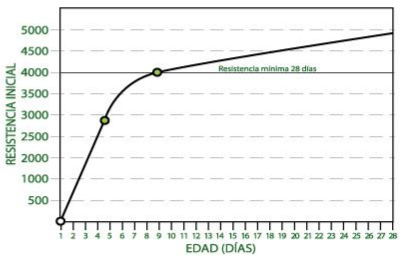
El Cemento Progreso UGC, corresponde a una categoría de resistencia de 4000 psi (28 N/mm²), expresada como medida de fuerza por unidad de área, en libras por pulgada cuadrada (o en Newtons por milímetro cuadrado, que es su equivalente en el Sistema Internacional de Unidades, SI).

¿QUÉ SON LAS CATEGORÍAS DE RESISTENCIA?

Las categorías de resistencia representan grados o niveles de resistencia en que se clasifican los cementos para ayudar al usuario a escoger lo que realmente necesita. Las categorías son aplicables a cualquier marca y tipo de cemento. En Guatemala, CEMENTOS PROGRESO, S. A. utiliza las categorías de 5000 psi (35 N/mm²) y 4000 psi (28 N/mm²) desde hace varios años. Esto significa que cualquier tipo de cemento, sea éste UGC, I, II, I (PM), u otro, independiente de su composición, con o sin adiciones, puede ser de una categoría de resistencia de 4000 psi o 5000 psi. En la actualidad el Cemento Progreso UGC cumple con la categoría de resistencia de 4000 psi a los 28 días en la prueba de resistencia a compresión de morteros estandarizados de cemento.

GRÁFICA DE RESISTENCIA EN MORTEROS ESTANDARIZADOS DE CEMENTO PROGRESO UGC

Resistencia en morteros Estandarizados de Cemento (ASTM C109) Cemento Progreso
UGC - Comportamiento de Resistencia Típico



EQUIPO PROGRESO

cementos PROGRESO
Sólo con un buen Cemento se hace una buena Obra.

Anexo 19. Hoja técnica del Concrete patching material: Pyrament 505

Suppl 3

REMR MATERIAL DATA SHEET CM-PC-1.23

CONCRETE PATCHING MATERIAL: PYRAMENT 505

1. NAME

PYRAMENT 505

2. MANUFACTURER

Lone Star Industries, Inc.
Pyrament Division
P.O. Box 2148
Houston, TX 77252
Telephone: 713-921-4861

3. DESCRIPTION

PYRAMENT 505 Rapid Concrete Repair Material is a packaged mortar that requires only the addition of mixing water to produce a durable, very rapid strength-gaining material for the permanent repair of concrete.

4. APPLICABLE SPECIFICATIONS

PYRAMENT 505 meets or exceeds the requirements of ASTM C 928-80 "Specification for Packaged, Dry, Rapid-Hardening Cementitious Materials for Concrete Repairs." (Type-very rapid hardening mortar.)

5. USES

PYRAMENT 505 can be used for rapid restoration of concrete on airport runways, aprons, and taxiways, on highways and bridge decks, on industrial floors, structural members, and for new construction when high early strength is needed.

6. MANUFACTURER'S TECHNICAL DATA

The results for PYRAMENT 505 both as a mortar and as a mortar extended 100 percent by weight with 1/2-in. gravel are given. Test results are for laboratory tests performed at standard conditions.

	Mortar	Mortar & Gravel
PYRAMENT 505, lb	50.0	50.0
1/2-in. Gravel, lb	----	50.0
Water, lb	4.8	4.8
Yield, cu ft	0.40	0.70
Consistency, (15 min)	ASTM C 109-86 105%	ASTM C 143-78 3 in.
Time of setting Final (min)	ASTM C 266-86 30	ASTM C 403-85 30

(Continued)

	Mortar	Mortar & Gravel
Compressive strength. psi	ASTM C 109-86	ASTM C 39-86
2 hr	2,500	2,000
3 hr	3,300	2,300
1 day	6,000	5,500
7 days	10,000	9,000
Flexural strength psi	ASTM C 293-79	ASTM C 293-79
3 hr	600	400
1 day	1,000	700
7 days	1,500	900
Modulus of elasticity, psi	ASTM C 469-83 ----	ASTM C 469-83 5.5MM
Freeze/Thaw durability 300 cycles, Durability factor	ASTM C 666-84 (Procedure A) 96	ASTM C 666-84 (Procedure A) 96

7. MANUFACTURER'S GUIDANCE FOR APPLICATION

Surface preparation: When repairing a spalled or deteriorated area of concrete, chip or saw cut the spalled area to a depth sufficient to remove all deteriorated concrete. It is recommended that edges be squared and depth be a minimum of 1/2-in. Feather-edging is not recommended. Clean and remove all oil, grease, dirt, and loose debris from the area to be repaired. Dampen the repair area with clean water just prior to beginning the mixing cycle.

Recommended mixing procedure: Use a mortar or high intensity mixer with at least twice the volume of the amount of mortar to be mixed. Locate the mixer close to the repair area. Make sure the mixer is clean of any foreign material, including water. Determine the number of bags of mortar to be mixed in each batch. (Each bag of PYRAMENT 505 will yield 0.4 cu ft of mortar.) Use only freshly opened bags, as performance may be affected by using mortar from previously opened bags. The mixture may be extended with coarse aggregate. Follow the instructions printed on each 50-lb package. Measure the total mixing water required for the batch. Use 4.25 to 5.0 lb of water for each 50-lb bag to be mixed. Accurate measurement of water is very important. Charge the mixer with 1/2 of the bags to be mixed, and then add all the water. Mix for 1-1/2 min, and then add the second half of material. Mix for 5 to 8 min until a uniform mixture is achieved. Do not add any other materials to the mixture.

Placing: Place the material into the dampened, prepared area, from one side to the other, working the material into the sides and bottom of the repair area to assist in satisfactory bonding. Screed and level to the proper elevation of existing concrete. Finish by trowel to seal edges, surface and saw cuts. Do not retemper mixture by adding water.

Curing: Normal, ambient concrete curing methods should be followed. Approved curing compounds should provide satisfactory results and are recommended.

8. CORPS OF ENGINEERS' EVALUATION

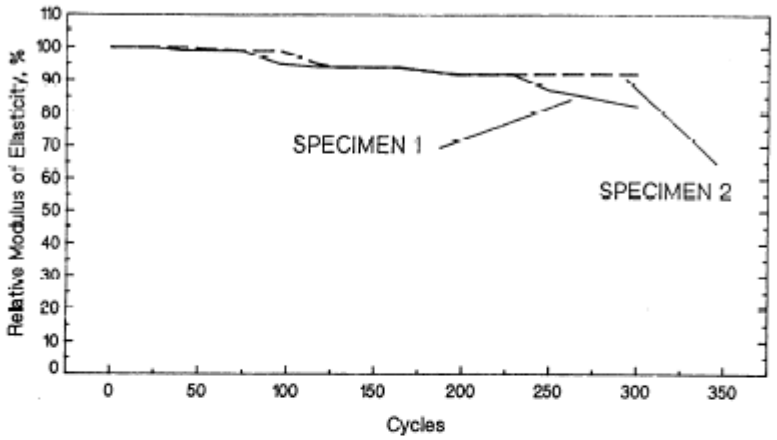
Technical data:

Properties	Test Method	Results
Compressive strength, psi	ASTM C 109	
	2 hr	2,610
	3 hr	3,410
	4 hr	3,850
	ASTM C 39	
	24 hr	6,120
	28 days	12,180
Modulus of elasticity, psi	ASTM C 469	
	1 day	2.35×10^6
	28 days	2.67×10^6
Flexural strength, psi	ASTM C 78	
	3 hr	450
	24 hr	480
	28 days	835
Bond to concrete, psi	ASTM C 882	
	24 hr	2,380
	28 days	3,560
Shrinkage, percent	GR-83-10*	
	(unconfined condition)[1]	0.096

* Bureau of Reclamation Technical Report Standard.
[1] An exotherm of 35°F was recorded on the shrinkage specimen using a mixture of 4.5 lb of water per 50-lb bag of material.

REMR MDS CM-PC-1.23
Suppl 3

Rapid Freezing and Thawing ASTM C 666, Relative Dynamic Modulus of Elasticity, %



9. ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS

Reasonable caution should guide the preparation, repair, and cleanup phases of activities involving potentially hazardous and toxic chemical substances. Manufacturer's recommendations to protect occupational health and environmental quality should be carefully followed. Material safety data sheets should be obtained from the manufacturers of such materials. In cases where the effects of a chemical substance on occupational health or environmental quality are unknown, chemical substances should be treated as potentially hazardous toxic materials.

10. AVAILABILITY AND COSTS

Availability: PYRAMENT 505 is manufactured by Pyrament/Lone Star Industries in Houston, Texas. It is manufactured under U.S. Patent 4,349,386 and other patents issued and pending.

Cost: Contact Pyrament for pricing.

11. TECHNICAL SERVICES

Technical assistance is provided by the Pyrament Technical Services Department on request.

Anexo 20. Hoja técnica de ladrillos refractarios de RASA.

REFRACTARIOS Y ANEXOS S.A.
CALLE EL DORADO 280 URBANIZACION VULCANO - ATE - VITARTE
(51-1)Telefax: 348-0370 - 348-7677 - 348-7707 - 348-6661 - 348-7591 LIMA 3 - PERU
E-mail:rasaventas@yahoo.com refractariosrasa@yahoo.com

HOJA TECNICA

DENOMINACION	: LADRILLO REFRACTARIO
MARCA	: RASA – 42-CODIGO 031643-1/4
CALIDAD	: SUPER REFRACTARIEDAD

CARACTERISTICAS FISICAS		
Porosidad aparente (%)		: 16 - 20
C. P. E.		: 33 - 34
Temp. equivalente		: 1,763 °C
Densidad aparente (gr/cm^3)		: 2.05
Resistencia a la compresión ($Kg./cm^2$)		: 200 - 400
Módulo de ruptura (Kg/cm^2)		: 50 - 70
Variación lineal por recalentamiento		: ±0.5% a 1,500 °C
COMPOSICION QUIMICA (Prom.)		
Sílice	SiO_2	: 50.9%
Alúmina	Al_2O_3	: 42.0%
Oxido de Hierro	Fe_2O_3	: 1.8%
Alcali	$Na_2O+K_2O+Li_2O$	: 1.8%
Titanio	Ti_2O	: 1.4%
Cal	CaO	: 0.1%

SE RECOMIENDA PARA SER USADO EN:

- Hornos Rotativos.
- Hornos de Cal.
- Hornos de Cemento.
- Hornos: de vidrio, de enlozado, recuperadores de calor.
- Estufas de alto horno
- Incineradores
- Calderas y en general aplicaciones bajo condiciones severas de abuso mecánico y térmico.

Ladrillos silico-aluminosos prensados, clasificados como super refractarios (Super Duty), cuyas características principales son baja porosidad, alta resistencia mecánica y al ataque por monóxido de Carbono (bajo contenido de Fe_2O_3) y buena estabilidad dimensional.

Observaciones:
Los datos que se indican están sujetos a variaciones razonables; solo deben usarse como referencia, no como especificación determinante. Cuando alguna propiedad puede estimarse crítica, la confirmación debe solicitarse a RASA.

Anexo 21. Gráfico de temperaturas de cocimiento de cerámicos.

KILN FIRING CHART

Firing converts ceramic work from weak greenware into a strong, durable form. As the temperature in a kiln rises, many changes take place in the clay; and understanding what happens during the firing can help you avoid problems. The following chart provides highlights of what happens when firing clay.

Temperature C°	Temperature F°	Color	Cone (approx.)	Event
1400	2552	Brilliant white	14	End of porcelain range
			13	
			12	
1300	2372	White	11	End of stoneware range
			9	
		Yellow-white	7	
1200	2192		5½	End of earthenware (red clay) range
		Yellow	4	
			2	Between 1100-1200°C, mullite and cristobalite (two types of silica) form when clay starts converting to glass. Clay and ceramic particles start to melt together and form crystals. These changes make the material shrink as it becomes more dense. Soaking (holding the end temperature) increases the amount of fused matter and the amount of chemical action between the fluxes and the more refractory materials.
1100	2012	Yellow-orange	1	
			04	
		Orange	05	
1000	1832		06	
			07	
		Red-orange	08	
900	1652		010	Between 800-900°C sintering begins. This is the stage where clay particles begin to cement themselves together to create a hard material called bisque.
			012	
		Cherry red	013	
800	1472		015	Between 300-800°C, the temperature must be raised steadily and ample air must be present to permit the complete burning of carbonaceous materials (impurities in the clay along with paper, wax, etc.). After 800°C, the clay surface will start to seal off, trapping unburned carbonaceous materials and sulfides, which could cause bloating and black coring.
			016	
		Dull red	017	
700	1292		018	
			019	
		Dark red	020	
600	1112		021	Quartz inversion occurs at 573°C. When clay is refired for a glaze firing, quartz crystals change from an alpha (α) crystal structure to a beta (β) crystal structure. The inversion is reversed on cooling. This conversion creates stresses in the clay so temperature increase and decrease must be slow to avoid cracking the work.
			022	
		Dull red glow		
500	932			
		Black		
400	752			Between 480-700°C chemical water (referred to as "water smoke") is driven off.
300	572			Upon cooling, cristobalite, a crystalline form of silica found in all clay bodies, shrinks suddenly at 220°C. Fast cooling at this temperature will cause ware to crack.
200	392			
100	212			Water boils and converts to steam. Trapped water will cause clay to explode so all water should be evaporated below 100°C. Begin a firing by keeping the kiln below 100°C until all water has evaporated.

PotteryMaking Illustrated

www.potterymaking.org

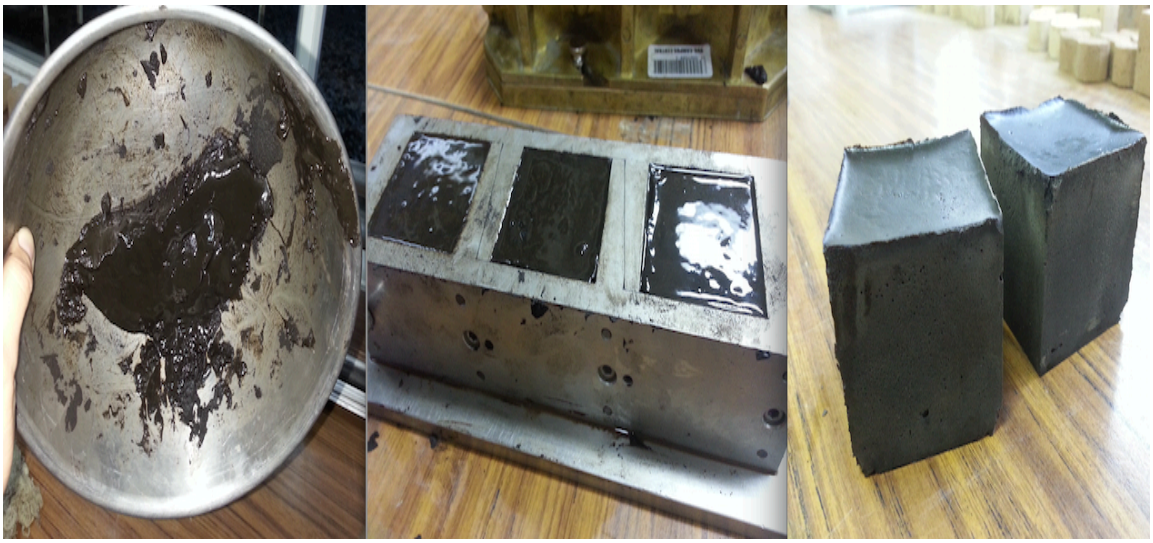
©Copyright 2005 The American Ceramic Society

Anexo 22. Resultado de la producción de Geopolímero a nivel laboratorio.

Imagen 49. Geopolímero a base de arena volcánica, obtenido en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 50. Geopolímero a base de arcilla, obtenido en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Imagen 51. Mezcla No. 7, compactación y cubos después del proceso de curado, realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad del Valle de Guatemala.



XI. TERMINOLOGÍA

1. ASTM: *American Society of Testing and Materials*, organización que se dedica a crear normas para los ensayos y clasificación estandarizada de materiales y sustancias.

2. ACI: *American Concrete Institute*, organización que se dedica a crear normas para la construcción y todo lo relacionado con el concreto.

3. COGUANOR: Comisión Guatemalteca de Normas, organización que se dedica a crear normas para la normalización que ayuda a mejorar la competitividad de las empresas dentro de Guatemala.

4. CO_2: Dióxido de carbono.

5. $Ca(OH)_2$: Hidróxido de calcio.

6. SiO_4: Tetraóxido de silicio.

7. Al_2O_3: Óxido de aluminio.

8. NaOH: Hidróxido de Sodio.

XII. GLOSARIO

1. Aluminosilicato: mineral que contiene óxido de aluminio y sílice de origen natural o sintético. Requieren de cationes adicionales con la finalidad de poder neutralizar la carga eléctrica.

2. Análisis granulométricos: Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo.

3. Análisis químico: requiere de un objetivo en específico, al igual que de una muestra del componente al cual se le realizará el análisis. Se evalúan las propiedades requeridas. Por ejemplo: contenido de humedad, densidad, viscosidad, etc.

4. Agregados finos: se refiere a la arena y piedra triturada. El contenido de agregado fino normalmente es del 35 al 45% por masa o volumen total del agregado.

5. Agregados gruesos: re refiere a grava (rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 milímetros)

6. Arcilla: material heterogéneo, compuesto de materiales propios de la arcilla así como otros componentes; incluye fragmentos de roca, geles, óxidos hidratados y compuestos orgánicos.

7. Área Superficial: Área en la parte exterior de un material la cual es donde ocurren las reacciones químicas.

8. Arena volcánica: Es roca que ha sido convertida en polvo o arena por la actividad volcánica. Estas arena tienen un tamaño inferior a 2mm, por ello la columna eruptiva las eleva a gran altura donde son arrastradas por el viento a grandes distancias antes de caer al suelo.

9. Concentración Molar: Cantidad de una sustancia medida en moles partido por el volumen de la solución.

10. Cuerpo (de una arcilla): mezcla de arcillas o de una arcilla con otros materiales cerámicos.

11. Estudio granulométrico: la finalidad del estudio es obtener una distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra. Para obtener la distribución de tamaños se emplean tamices normalizados y numerados.

12. Gel: Sustancia en estado sólido hasta que se le aplica una presión y se convierte en un líquido viscoso.

13. Geopolimerización: manera viable para procesar y agregar valor a los residuos industriales de aluminosilicato, dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas, alta inercia química y que permiten encapsular otros residuos.

14. Geopolímero: generalmente se define como un material sólido y estable rico en aluminosilicatos formado por la activación con soluciones alcalinas.

15. Humedad: agua que está impregnada en un cuerpo o que, vaporizada, se mezcla con el aire. Cantidad de vapor acuoso existente en un cuerpo.

16. Humedad ligada: humedad contendida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

17. Humedad no ligada: humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

18. Macromolécula: Molécula que contiene una gran cantidad de átomos como por ejemplo, una proteína o un polímero sintético.

19. Materia prima: es la materia extraída de la naturaleza y que se transforma para elaborar materiales que más tarde se convertirán en bienes de consumo.

20. Monómero: Unidad estructural pequeña que tiene la capacidad de unirse de forma repetitiva con unidades iguales o similares para formar un polímero.

21. Molino: máquina de reducción e tamaño para servicio intermedio.

22. Óxidos de silicio: compuesto de silicio y oxígeno, generalmente se encuentra mayormente en la arena.

23. Óxidos de aluminio: compuesto de aluminio y oxígeno; polvo cristalino blanco e inodoro, se utiliza en materiales abrasivos y refractarios.

24. Pérdida por Calcinación: cantidad de materia que se pierde al calcinar una sustancia

25. Polímero: Sustancia que tiene una estructura molecular formada por una gran cantidad de unidades estructurales pequeñas unidas.

26. Tamizadora: Elemento mecánico que facilita la distribución de partículas por medio del tamaño. Se coloca una batería de tamices de mayor a menor abertura de malla. Con el movimiento oscilatorio se realiza el tamizado de la muestra.

27. Triturador: máquinas de baja velocidad para la reducción de tamaño de grandes cantidades de sólidos.

28. Plasticidad: capacidad que presentan las arcillas para dejarse moldear y tomar una forma estable que perdure a lo largo de un proceso cerámico.