

ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruiz

JENIFFER LYDA SÁNCHEZ LONDOÑO

Escuela Colombiana de Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2020

Concreto estructural liviano con agregados volcánicos del Nevado del Ruiz

Jeniffer Lyda Sánchez Londoño

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Civil con énfasis en ingeniería estructural

Directora:

Ph.D. Ingeniera Nancy Torres

Codirector:

MSc. Geólogo Efraín Casadiego

Línea de Investigación:

Comportamiento de materiales de construcción

Grupo de Investigación Estructuras y Materiales

GIMECI

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Posgrado en Ingeniería Civil

Ciudad, Colombia

2020

Dedico este trabajo a Dios que es a quien se deben dedicar todos los logros, a mi hija María José porque el brillo de sus ojos me dio fuerzas para continuar con mis estudios y con el desarrollo de este trabajo, a mi mamá que es mi ejemplo, a mis hermanos que son mi apoyo, a mi papá y a mi abuelita que desde el cielo me cuidan.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mi familia por el apoyo incondicional que me brindan, a mi directora de trabajo de grado la ingeniera Nancy Torres por su apoyo en el desarrollo de este proyecto, a mi codirector el geólogo Efraín Casadiego por su acompañamiento a lo largo del proceso, a mis grandes amigos el Ingeniero Camilo Ríos, la ingeniería Lorena Chamorro, el Ingeniero William Piñerez y a el Ingeniero Andrés Ríos por su apoyo en las diferentes fases del proyecto, tengo que agradecer de manera muy especial a la laboratorista Yamile Mora que con su gran ayuda pudo llevarse a cabo la fase experimental de su proceso y a mi maestro Luigi Leonardo Guinche quien apoyó de principio a fin la realización de este documento.

Resumen

Con el fin de producir un concreto estructural liviano usando agregados piroclásticos procedentes del sector adyacente al nevado del Ruiz se presenta el análisis de resultados de un proceso experimental, basado en una metodología cuantitativa que permitió la caracterización de los agregados piroclásticos, la incorporación de estos a las mezclas de concreto y el análisis de las propiedades del concreto en estado fresco y estado endurecido. Como un primer acercamiento a la dosificación ideal, se planteó una primera fase experimental reemplazando los agregados convencionales por agregados piroclásticos en proporciones del 25%, 50% y 100% para el agregado fino, y del 25% y 50% para el agregado grueso. En el proceso de caracterización de los agregados se encontró que los agregados piroclásticos tenían un pH ácido el cual se intentó disminuir con la incorporación de cal hidratada al 75% de pureza directamente a las mezclas. Se identificó que el uso de materiales piroclásticos disminuye la trabajabilidad del concreto y que las propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido con reemplazos de agregados naturales por agregados piroclásticos disminuyeron significativamente con respecto a la mezcla de control. Partiendo de los resultados de la fase experimental uno se planteó la fase experimental dos, en la que se realizó un proceso de saturación de los agregados piroclásticos con cal hidratada al 85% de pureza para controlar la acidez, se reemplazó el agregado fino en proporciones de 25%, 50% 75% y 100%, buscando mejorar las propiedades de resistencia se incorporó 10% de humo de sílice en 4 de las 9 mezclas. Los resultados de la segunda fase experimental muestran que las propiedades mecánicas del concreto mejoraron con respecto a los resultados de la fase uno, alcanzando resistencias de compresión superiores a 17 MPa con densidades de equilibrio entre 1804 kg/m³ y 2174 kg/m³. Finalmente, se realizó un análisis de los depósitos de material piroclástico, que demostró la viabilidad de explotación minera en la zona de influencia del Nevado del Ruiz.

Palabras clave: Agregados livianos, Lapilli, concreto liviano, construcción, resistencia, humo de sílice.

Abstract

In order to produce a lightweight structural concrete using pyroclastic aggregates from the sector adjacent to the Nevado del Ruiz, the analysis of results of an experimental process is presented, based on a quantitative methodology that allowed the characterization of pyroclastic aggregates, their incorporation into concrete mixtures and analysis of the properties of concrete in fresh and hardened state. As a first approach to the ideal dosage, a first experimental phase was proposed, replacing the conventional aggregates with pyroclastic aggregates in proportions of 25%, 50% and 100% for the fine aggregate, and 25% and 50% for the coarse aggregate. In the process of characterizing the aggregates, it was found that the pyroclastic aggregates had an acidic pH, which an attempt was made to decrease with the incorporation of hydrated lime at 75% purity directly to the mixtures. It was identified that the use of pyroclastic materials decreases the workability of the concrete and that the mechanical properties of concrete in the hardened state with replacements of natural aggregates by pyroclastic aggregates decreased significantly with respect to the control mix. Starting from the results of the experimental phase one, the experimental phase two was proposed, in which a process of saturation of the pyroclastic aggregates with hydrated lime at 85% purity was carried out to control the acidity, the fine aggregate was replaced in proportions of 25%, 50%, 75% and 100%, seeking to improve resistance properties, 10% of silica fume was incorporated in 4 of the 9 mixtures. The results of the second experimental phase show that the mechanical properties of the concrete improved with respect to the results of phase one, reaching compression strengths higher than 17 MPa with equilibrium densities between 1804 kg / m³ and 2174 kg / m³. Finally, an analysis of the pyroclastic material deposits was carried out, which demonstrated the viability of mining in the area of influence of Nevado del Ruiz

Keywords: Light Aggregates, Lapilli, Light Concrete, Construction, Strength, Silica Fume

Contenido

1. Marco teórico	17
1.1 Procesos de explotación de materiales de cantera	17
1.2 Agregados livianos	18
1.3 Material lapilli	19
1.4 Concreto liviano	20
2. Estado del arte	23
2.1 Investigaciones internacionales	23
2.2 Investigación nacional	29
3. Objetivos	32
3.1 Objetivo General	32
3.2 Objetivos específicos	32
4. Programa experimental	33
4.1 Materiales	34
4.1.1 Cemento	34
4.1.2 Agregados	34
4.1.2.1 Agregado grueso	34
4.1.2.2 Agregado fino	35
4.1.3 Aditivo	36
4.1.4 Humo de sílice	36
4.1.5 Cal	36
4.2 Caracterización de los materiales	37
4.2.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino	38
4.2.2 Material que pasa la malla No. 200	40
4.2.3 Colorimetría	41
4.2.4 Equivalente de arena	44
4.2.5 Densidades de los agregados	44
4.2.6 Masa Unitaria	46
4.2.7 Solidez 46	46
4.2.8 Desgaste máquina de los ángeles	48
4.2.9 Caras fracturadas, alargamiento y aplanamiento	49
4.2.10 Reacción álcali agregado	50
4.2.11 Pérdidas por calcinación	51
4.2.12 Terrones de arcilla y partículas deleznable	52
4.2.13 Densidad del cemento hidráulico	52
4.2.14 Caracterización Mineralógica	53
4.2.14.1 Petrografía	53
4.2.14.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	55
4.2.14.3 Difracción de Rayos X	58
4.3 Elaboración de mezclas de Concreto	61
5. Dosificación del concreto con agregado piroclástico	64
5.1 Diseño de mezcla	64
5.1.1 Nomenclatura de las mezclas de concreto	65

6. ANALISIS Y RESULTADOS	68
6.1 Ensayos del concreto en estado fresco	68
6.1.1 Elaboración de especímenes.....	69
6.1.2 Temperatura	71
6.1.3 Asentamiento	73
6.1.4 Contenido de aire.....	76
6.1.5 Masa unitaria fresca.....	78
6.2 Ensayos del concreto en estado endurecido.....	80
6.2.1 Ensayo de resistencia a compresión	81
6.2.2 Ensayo de resistencia a flexión	87
6.2.3 Ensayo de Módulo de elasticidad.	90
6.2.4 Cálculo de correlación entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo a compresión.	93
6.2.5 Cálculo de correlación entre el módulo de rotura y el esfuerzo a compresión.....	95
6.2.6 Absorción, poros y vacíos	97
6.2.7 Tensión indirecta.....	100
6.2.8 Masa unitaria del concreto	102
6.2.9 Permeabilidad al ión cloruro.....	106
7. Análisis de factibilidad de la producción de concreto liviano con agregado volcánico por medio del análisis de depósitos.	109
7.1.Municipio de Filadelfia.....	111
7.2.Municipio de Aránzazu.....	113
7.3.Municipio de Marulanda.	115
7.4.Ciudad de Manizales.....	117
7.5.Evaluación de costos.	119
8. Conclusiones y recomendaciones	122
8.1 Conclusiones.....	122
8.2 Recomendaciones	123
9. Bibliografía	125

Lista de figuras

	Pág.
Figura 4-1: Metodología del programa experimental.....	33
Figura 4-2: Grava convencional.	34
Figura 4-3: Grava lapilli.	35
Figura 4-4: Arena lapilli.	35
Figura 4-5: Comparación granulométrica de la grava con La norma NTC 174	38
Figura 4-6: Comparación granulométrica de la grava lapilli con la norma NTC 4045.....	38
Figura 4-7: Comparación granulométrica de la arena de río con La norma NTC 174.....	39
Figura 4-8: Comparación granulométrica de la arena lapilli con la norma NTC 4045.	39
Figura 4-9: Limite plástico en agregado lapilli.	41
Figura 4-10: Ensayo colorimetría arena de río.	41
Figura 4-11: Ensayo colorimetría arena lapilli con diferentes concentraciones de cal hidratada de uso general (2%, 5%, 10% y 20%).	42
Figura 4-12: Ensayo de Colorimetría con adición de cal hidratada el 1%, 2%, 5% y 10% respectivamente de izquierda a derecha.....	43
Figura 4-13: Equivalente de arena en agregado fino.	44
Figura 4-14: Ensayo de absorción de los agregados pétreos.	45
Figura 4-15: Índice de alargamiento agregado lapilli y Caras fracturadas agregado grueso.	49
Figura 4-16: Resultados de ensayo reacción álcali-sílice con agregados piroclásticos.	51
Figura 4-17: Imágenes del ensayo álcali-sílice con agregados piroclásticos.	51
Figura 4-18: Imagen de ensayos de pérdidas por calcinación agregados piroclásticos.....	52
Figura 4-19: Imagen de ensayo de densidad del cemento hidráulico.	53
Figura 4-20: Imágenes de secciones delgadas del agregado piroclástico (lapilli).....	54
Figura 4-21: Imágenes del ensayo SEM en el material piroclástico.....	55
Figura 4-22: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 1 de lapilli.	56
Figura 4-23: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 2 de lapilli.	57
Figura 4-24: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 3 de lapilli.	57
Figura 4-25: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 3 de lapilli con una partícula de cobre.	58
Figura 4-26: Triángulo de clasificación de la roca.	58
Figura 4-27: Resultados gráficos del ensayo de difracción de rayos x.	59
Figura 4-28: Variables proceso experimental.....	61
Figura 6-1: Elaboración de especímenes para ensayos de concreto.....	70
Figura 6-2: Resultados de temperatura de la mezcla de la fase uno.	71
Figura 6-3: Resultados de temperatura de la mezcla de la fase dos.	72
Figura 6-4: Ensayo de toma de temperatura mezclas M12 y MC-1	73
Figura 6-5: Resultados de asentamiento de la fase uno.	73
Figura 6-6: Imagen del ensayo de asentamiento realizado para la mezcla 4.....	74
Figura 6-7: Imagen del ensayo de asentamiento MC-1.....	74

Figura 6-8: Resultados de asentamiento de la fase dos.....	75
Figura 6-9: Ensayo de asentamiento mezcla M11.....	76
Figura 6-10: Resultados contenido de aire en concreto de la fase dos.....	77
Figura 6-11: Ensayo de contenido de aire por método volumétrico mezcla M11 y M13.....	78
Figura 6-12: Ensayo de masa unitaria en estado fresco del concreto de la fase dos.....	78
Figura 6-13: Resultados de resistencia a compresión, fase uno.....	82
Figura 6-14: Ensayo de compresión, para las siguientes mezclas: MC, M1, M2, M3, M4, M4, M6 y M7.....	83
Figura 6-15: Resultados de resistencia a compresión, de la fase dos.....	84
Figura 6-16: Resultados de resistencia a flexión, fase uno.....	87
Figura 6-17: Resultados de resistencia a flexión, fase dos.....	88
Figura 6-18: Ensayo de flexión en los tercios medios, mezcla M9.....	90
Figura 6-19: Resultados de módulo de elasticidad, para la fase uno.....	90
Figura 6-20: Ensayo del módulo elástico, para la mezcla M1.....	91
Figura 6-21: Resultados de módulo de elasticidad, fase dos.....	92
Figura 6-22: Ensayo de módulo elástico, mezcla M9.....	93
Figura 6-23: Resultados absorción después de inmersión, fase uno.....	97
Figura 6-24: Resultados absorción después de inmersión, fase dos.....	98
Figura 6-25: Resultados volumen de poros y vacíos, Fase uno.....	99
Figura 6-26: Resultados volumen de poros y vacíos, fase dos.....	100
Figura 6-27: Resultados de tensión indirecta, fase dos.....	101
Figura 6-28: Ensayo de tensión indirecta, fase dos.....	102
Figura 6-29: Resultados de densidad de equilibrio, fase dos.....	103
Figura 6-30: Resultados de densidad de equilibrio aproximada, fase dos.....	104
Figura 6-31: Resultados de densidad de secado al horno aproximada, fase dos.....	105
Figura 6-32: Resultados de densidad de secado al horno, fase dos.....	105
Figura 6-33: Resultados permeabilidad ión cloruro, fase dos.....	107
Figura 6-34: Montaje ensayo de penetración del ión cloruro.....	108
Figura 7-1: Plancha geológica 206 del servicio geológico colombiano.....	110
Figura 7-2 Plancha geológica 206 ubicando el municipio de Filadelfia y los depósitos de lapilli cercanos..	111
Figura 7-3 Perfil geológico trazado cerca al municipio de Filadelfia.....	112
Figura 7-4 Plancha geológica 206 ubicando el municipio de Aránzazu y los depósitos de lapilli cercanos..	113
Figura 7-5 Perfil geológico trazado cerca al municipio de Aránzazu.....	114
Figura 7-6 Plancha geológica 206 ubicando el municipio de Marulanda y los depósitos de lapilli cercanos.	115
Figura 7-7 Perfil geológico trazado cerca al municipio de Marulanda.....	117
Figura 7-8 Plancha geológica 206 ubicando la ciudad de Manizales y los depósitos de lapilli cercanos.	118
Figura 7-9 Perfil geológico trazado cerca de la ciudad de Manizales.....	118

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 4-1 Características Químicas de la cal hidratada de uso general.....	36
Tabla 4-2 Características Químicas de la cal hidratada al 85% de pureza.....	36
Tabla 4-3 Métodos de ensayo para caracterización de agregados y cemento.....	37
Tabla 4-4. Densidad en los agregados convencionales y los agregados piroclásticos.....	44
Tabla 4-5. Resultados de masas unitarias en los agregados pétreos.....	46
Tabla 4-6: Resultados del ensayo de solidez arena de río.....	47
Tabla 4-7: Resultados del ensayo de solidez arena lapilli.....	47
Tabla 4-8: Resultados del ensayo de solidez de grava de cantera.....	48
Tabla 4-9: Resultados del ensayo de solidez de grava lapilli.....	48
Tabla 4-10: Resultados ensayo de desgaste del agregado grueso convencional.....	48
Tabla 4-11: Resultados ensayo de desgaste del agregado grueso piroclástico (lapilli).....	49
Tabla 4-12 Resultados de ensayo álcali-sílice del agregado piroclástico bajo la norma ASTM C1260.....	50
Tabla 4-13 Resultados de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados bajo la norma NTC 589 para los agregados piroclásticos.....	52
Tabla 4-14 Resultados de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico.....	53
Tabla 4-15 Resumen de resultados de ensayos de caracterización de los agregados.....	60
Tabla 4-16 Variables experimentales fase uno en las mezclas de concreto.....	62
Tabla 4-17 Variables experimentales fase dos en las mezclas de concreto.....	63
Tabla 5-1 Nomenclatura de las mezclas fase uno.....	65
Tabla 5-2 Nomenclatura de las mezclas fase dos.....	66
Tabla 5-3 Dosificación de mezclas de concreto para la fase uno.....	66
Tabla 5-4: Dosificación de mezclas de concreto para la fase dos.....	67
Tabla 6-1: Ensayos del concreto en estado fresco.....	68
Tabla 6-2: características de los especímenes elaborados para ensayo.....	69
Tabla 6-3: Resultados de los ensayos del concreto en estado fresco fase uno.....	79
Tabla 6-4: Resultados de los ensayos del concreto en estado fresco fase dos.....	80
Tabla 6-5: Ensayos físico-mecánicos del concreto endurecido.....	81
Tabla 6-6: Ensayos de durabilidad realizados al concreto con agregados piroclásticos.....	81
Tabla 6-7: Resultados de los ensayos de compresión para la fase uno.....	84
Tabla 6-8: Resultados de los ensayos de compresión para la fase dos.....	86
Tabla 6-9: Resultados de los ensayos de flexión para la fase uno.....	88
Tabla 6-10: Resultados de los ensayos de flexión para la fase dos.....	89
Tabla 6-11: Relaciones entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión en la fase uno.....	94
Tabla 6-12: Relaciones entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión en la fase dos.....	95
Tabla 6-13: Relaciones entre el esfuerzo de compresión y el módulo de rotura en la fase uno.....	96
Tabla 6-14: Relaciones entre el esfuerzo de compresión y el módulo de rotura en la fase dos.....	97
Tabla 6-15: Resultados de densidad de equilibrio y densidad de secado al horno para la segunda fase experimental.....	103
Tabla 6-16: Resultados de Ensayo de penetración ión cloruro fase dos.....	106
Tabla 6-17: Indicadores de las propiedades de las mezclas de la fase dos con respecto a la mezcla control.....	108
Tabla 7-1: caracterización de depósitos municipio de Filadelfia.....	112
Tabla 7-2: Caracterización de depósitos municipio de Aránzazu.....	114
Tabla 7-3: Caracterización de depósitos municipio de Marulanda.....	116
Tabla 7-4: Caracterización de depósitos cercanos a Manizales.....	119
Tabla 7-5: Presupuesto de las mezclas de concreto por metro cúbico.....	120

Introducción

Colombia se encuentra ubicada en una zona de actividad sísmica y volcánica debido al encuentro de tres placas tectónicas; la placa de Nazca, la placa Suramérica y la placa del Caribe. La mayoría de los volcanes colombianos se encuentran en la cordillera central, sin embargo, las otras dos cordilleras, oriental y occidental, cuentan con algunos volcanes que a lo largo de la historia han presentado actividad (Vallejo, 2014). De dicha actividad volcánica surgen materiales provenientes del proceso de erupción conocidos como materiales piroclásticos, los cuales se clasifican de acuerdo con su tamaño en: cenizas volcánicas que son las fracciones más pequeñas con partículas menores a 2 mm, lapilli con partículas entre 2 mm y 64 mm, y bombas cuyas partículas comprenden tamaños superiores a 64 mm.

Se cuenta con un 12% de depósitos de suelos derivados de cenizas volcánicas localizados en zonas de crecimiento y desarrollo importantes, tales como el eje cafetero, la zona centro del país y algunos sectores de los llanos orientales. El desconocimiento del comportamiento físico-mecánico de estos materiales imposibilita el aprovechamiento en su totalidad como materia prima de materiales de construcción en la ingeniería (Murcia, y otros, 2013).

Los materiales piroclásticos son gotas de lava líquida que al ser expulsadas en la erupción del volcán se solidifican, generalmente están compuestos por minerales primarios livianos y debido a su proceso de formación cuentan con una resistencia considerable. Estos agregados al ser naturales podrían marcar la diferencia en costos frente a las arcillas expandidas que han sido investigadas en Colombia como agregados livianos, que requieren un proceso de calcinación y producción adicional lo cual incrementa los costos de estas como agregados para producir el concreto liviano (Rodríguez & Sánchez, 2018).

En sectores del País, como el caso de Bogotá, los suelos están formados tras la desecación de un cuerpo hídrico, lo cual origina que geológicamente están constituidos por arcillas con estratificaciones de arena y suelos orgánicos, que mecánicamente tienen una respuesta baja frente a cargas y esfuerzos cortantes, tal como se puede evidenciar en el estudio geológico realizado por la alcaldía de Bogotá que generó el documento de microzonificación sísmica de la ciudad, estableciendo que en ciertas localidades como la de Suba los suelos están conformados por arcillas arenosas firmes, arcillas limosas blandas, arcillas limosas muy blandas; suelos que no solo tienen baja capacidad portante si no que adicionalmente son altamente compresibles (Jimenez & Otalvaro, 2020). Por esta razón, es importante diseñar y construir estructuras livianas que generen menor carga en el suelo.

Según la guía ACI 213-R, se consideran concretos estructurales livianos aquellos que son capaces de alcanzar resistencias superiores a 17 MPa, con densidades en estado seco inferiores a 1920 kg/m^3 , mientras que en un concreto estructural normalizado se manejan densidades en estado seco entre 2200 kg/m^3 y 2400 kg/m^3 .

De acuerdo con ACI 213R-14, con densidades 20% por debajo de la densidad normal se puede optimizar las estructuras, ya que siendo estas menos pesadas serán aptas para cimentarse sobre suelos con capacidades portantes bajas. Contando con un material liviano no solo se tendrán beneficios en el diseño de la cimentación, sino que la concepción de la estructura misma se optimiza con secciones menos robustas.

Las estructuras además de cumplir con las sollicitaciones de esfuerzo y de desplazamientos deben brindar comodidad a los usuarios. Un factor determinante es el aislamiento térmico y el aislamiento acústico que la estructura pueda brindar. El comportamiento térmico de los concretos está relacionado con su conductividad térmica, la cual depende de la densidad y de la relación de poros que se puedan presentar entre los agregados y la pasta de cemento. Frente al aislamiento térmico es mejor el desempeño de los concretos estructurales livianos que el de los concretos estructurales convencionales. Puesto que entre más denso es el concreto, menos relación de poros tendrá y el aire que se puede incorporar en estos vacíos es el que genera un mejor comportamiento térmico, ya que el aire es uno de los mejores materiales aislantes (Ortiz, 2018)

Teniendo en cuenta lo expuesto en los párrafos anteriores sobre los beneficios que brindan los concretos livianos y las propiedades mecánicas deseadas, se realiza este trabajo experimental que busca producir concretos livianos incorporando agregados piroclásticos. El trabajo se inicia con la caracterización mineralógica, física y química de los agregados piroclásticos que fueron obtenidos de la exploración realizada en la ciudad de Manizales, dicho sector cuenta con material proveniente del volcán Nevado de Ruiz. Posteriormente se planteó el reemplazo de porcentajes de agregado grueso y agregado fino en las mezclas de concreto, por agregado piroclásticos, buscando la mejor dosificación que permitiera obtener un concreto liviano capaz de presentar una buena respuesta mecánica en estado endurecido logrando estar en los rangos de resistencia para que sea considerado un concreto estructural y adicionalmente que cuente con un buen comportamiento en estado plástico que permita la manejabilidad de la mezcla.

Posterior a la fase experimental se presenta un análisis de factibilidad, teniendo en cuenta que este material piroclástico tendría que ser explotado para pensar en la producción industrializada de este tipo de concretos, bajo las normativas vigentes en Colombia para el proceso de minería y transporte de materiales de cantera.

1.Marco teórico

Este capítulo presenta una revisión del marco teórico general sobre el proceso de explotación de materiales de cantera, las características del material lapilli y se presenta una descripción del concreto liviano y sus propiedades.

1.1 Procesos de explotación de materiales de cantera

Los procesos para la autorización de la explotación de canteras presentan dificultad en las regiones con poblaciones que van creciendo significativamente, adicionalmente cuando las zonas cercanas a dichas poblaciones no cuentan con agregados de buena calidad se genera un incremento en los costos por el transporte.

Dentro del proceso de explotación de los agregados se llevan a cabo diferentes etapas, iniciando con la exploración del lugar de extracción verificando que se pueda realizar el proceso a bajos costos de transporte y maquinaria, permitiendo con esto que se pueda vender el material a los precios promedio del mercado. Seguidamente se realiza la extracción de los agregados, con el uso de maquinaria pesada, posteriormente son transportados a la planta para su lavado, trituración y clasificación, finalmente son trasladados a los centros de distribución para la utilización en el sector de la construcción.

Las actividades mineras enfocadas a la explotación de agregados junto con los procesos urbanísticos están directamente relacionadas con la tendencia de las personas de concentrarse en las áreas urbanas, en un país como Colombia podría decirse que se sufre un fenómeno denominado sifón donde el desarrollo tienden a concentrarse hacia el centro del territorio (Ospina & Molina , 2013).

El crecimiento de la población, genera impactos que convierten a los municipios cercanos en municipios satélites de las grandes ciudades, en Colombia la metropolización tuvo sus

primeros inicios a mitad del siglo XX, por causa del conflicto armado, que generó la movilización de las personas del campo a la ciudad lo cual hizo que se requiera una mayor cantidad de procesos de explotación minera enfocada a la extracción de materia prima para la construcción y proveer las viviendas necesarias así como las obras de infraestructura.

Es importante resaltar que los procesos de explotación de canteras en Colombia deben cumplir con la normativa minero ambiental, la cual se fundamenta en el cumplimiento de todas las leyes y normas tanto mineras como ambientales relacionadas con las actividades de minería bajo tierra o a cielo abierto. En el marco de la minería se debe cumplir lo estipulado en el código de minas Ley 685 de 2001, adicionalmente con lo indicado en las normas reglamentarias y complementarias, como la resolución 428 de 2013. Se resalta que el período de explotación se inicia con el cumplimiento del artículo 84 del código de minas, de igual manera se debe cumplir con el decreto 2222 de 1993 de higiene y seguridad en labores mineras a cielo abierto. En el ámbito ambiental se debe cumplir lo estipulado en la Ley 99 de 1993 que rige los estudios de impacto ambiental para la explotación de materiales de construcción y otros minerales, adicionalmente con lo indicado en las normas complementarias como el decreto 2820 de 2010 para el otorgamiento de la licencia ambiental, y todos los demás permisos ambientales relacionados con la actividad (Acosta *et al.* 2013). No obstante, en los últimos años tanto la ley 685 de 2001 como la ley 99 de 1993 han presentado modificaciones y actualizaciones que se encuentran condensadas en el Decreto Único Reglamentario -D.U. R- del sector administrativo de minas y energía 1073 de 2015.

1.2 Agregados livianos

Los agregados se clasifican de acuerdo con su origen, su tamaño, su densidad y sus características físicas y químicas. Dependiendo de los valores de estas propiedades influyen en el comportamiento y respuesta mecánica de las mezclas de concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido, siendo los agregados constituyentes de la mezcla en un porcentaje de entre el 50% y el 80%, por lo cual deben estudiarse a fondo y no considerar que son menos importantes que la pasta de cemento, las adiciones o los aditivos.

Los agregados ligeros son el núcleo fundamental para lograr la mayoría de los concretos livianos. En términos generales se considera que los agregados cuya densidad es menor que 1200 kg/m^3 son agregados ligeros. Su meso-estructura (mineral o artificial) los hace especiales al lograr una retención de aire mayor que la mayoría de los agregados convencionales. Los agregados ligeros se utilizan en la fabricación de concreto liviano, de baja masa volumétrica pero en la mayoría de los casos limitada resistencia a la compresión, la mayor parte están constituidos por materiales inorgánicos de estructura celular, o fabricados por calcinación, expansión, o fusión incipiente de otros materiales como, arcillas, escorias de altos hornos, diatomitas, lutitas, cenizas volantes o mediante otros tratamientos de materiales naturales tales como piedra pómez que por su misma composición y estructura son de baja densidad (Lopez & Sepulveda, 2014).

1.3 Material lapilli

El lapilli es un material piroclástico de color oscuro con un porcentaje de porosidad de entre el 8.5% y el 33%, los poros en su estructura se encuentran interconectados convirtiéndose en un material de baja densidad. Es utilizado de manera común en las Islas Canarias como material de construcción, generalmente como agregado del concreto.

En Colombia los depósitos de materiales piroclásticos de la zona cafetera, provienen de la actividad volcánica de los complejos del Ruiz-Tolima, se ha identificado y estimado que su formación se llevó a cabo en la época cuaternaria, que cubren gran parte de la zona aledaña a la cordillera central, mezclándose con unidades rocosas más antiguas lo cual hace que se suavice la morfología del terreno, dichas capas piroclásticas están conformadas por ceniza, lapilli y bombas volcánicas, debido a la fragilidad de este material no es común encontrarlo en tamaños grandes como el de las bombas. Se ha podido identificar con los estudios de amenaza volcánica potencial de los volcanes Cerro Bravo, Ruiz, Santa Isabel y Tolima la distribución y fuentes probables de los depósitos piroclásticos de la zona, estableciendo que cerca del Cerro Bravo se encuentra la mayor cantidad de material suelto (bombas con diámetros promedio de 10 cm) y los depósitos de ceniza y lapilli que en su mayoría serían producto de la actividad volcánica de los volcanes Ruiz y Tolima (Gonzalez, 2001).

1.4 Concreto liviano

El concepto de concreto liviano surge a partir de la idea de lograr reducciones del peso específico de las mezclas de concreto por medio de modificaciones o adiciones en sus componentes, lo cual puede ser logrado a partir del uso de agregados ligeros, obteniendo concretos de similar resistencia a compresión de los concretos convencionales para fines estructurales, pero exhibiendo variaciones en la proporcionalidad de los componentes empleados, como es de esperarse, lo que requiere de estudios puntuales dependiendo del tipo de agregados a utilizar (Nilsen & Aïtcin, 1992).

Por otra parte, también se pueden lograr concretos ligeros tras la omisión de la fracción fina de los agregados (concreto sin finos), el cual está compuesto por agregados gruesos (algunas veces ligeros) con fracciones por encima de tamaños nominales de 4 cm (Chandra & Berntsson, 2002. p. 92), también la inclusión de burbujas de gas para obtener concretos con estructura celular (L.Clarke, 2005), los cuales tienen un uso menos estructural, se usan como rellenos en losas prefabricadas, optimizando el peso de la estructura sin sacrificar capacidad de soporte.

L.Clarke, (2005) indica que el concreto liviano para fines estructurales se define como aquel concreto cuya densidad seca (al horno) varía entre los 1440 a los 1900 kg/m³, con resistencia mínima a la compresión de 17.3 MPa. (L.Clarke, 2005). Por otro lado, la guía ACI 213R-14 establece que el concreto liviano es aquel que cuenta con una densidad de equilibrio entre 1120 kg/m³ y 1920 kg/m³ con resultados de resistencia a la compresión mínima de 17 MPa. La NSR 10 define el concreto liviano como aquel de agregados livianos con la densidad de equilibrio entre 1440 kg/m³ y 1840 kg/m³ encontrada con el procedimiento definido en la norma NTC 4022. Según el numeral C.8.6 denominado concreto liviano se debe tener en cuenta el λ como factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas reducidas del concreto de peso liviano comparado con el concreto de peso normal el cual puede variar entre 0.75 y 1.0.

Las aplicaciones del concreto liviano están dentro de un amplio rango de posibilidades, se encuentran desde las aplicaciones en estructuras convencionales, como dinteles (Mazur et al., 2016). Las placas prefabricadas para cubiertas, no solo con capacidades

estructurales, sino también acústicas y contra incendios (Hertz *et al.* 2014) y paneles prefabricados con concreto celular (Yardim *et al.* 2013).

Otra aplicación son las estructuras especiales, como colectores semi parabólicos, que requieren materiales ligeros, altamente manipulables para la generación de superficies de alta precisión para la reflexión de rayos electromagnéticos y lo suficientemente resistentes en paredes delgadas, alcanzando resistencias considerables no solo a la compresión sino también a la tracción (Forma *et al.* 2015).

2.Estado del arte

En este capítulo se expone una recopilación de diversas investigaciones internacionales y nacionales, desarrolladas sobre concreto liviano y agregados piroclásticos.

2.1 Investigaciones internacionales

A continuación, se presentan las principales investigaciones internacionales realizadas en los últimos años sobre concreto liviano:

En Cuba, De la Cruz *et ál.* (2015), mediante un proceso experimental, buscaron la disminución de la densidad del concreto hidráulico por medio de la adición de cáscara de nuez y humo de sílice, adicionando cáscara de nuez en los porcentajes del 10%, 15% y el 20% respecto al peso total del concreto, esta cáscara de nuez se utilizó como remplazo de agregado grueso. El humo de sílice lo incorporaron buscando el aumento en la resistencia a la compresión de los especímenes ensayados. De dicho proceso se concluyó que las propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido presentaban un comportamiento desfavorable comparado con el comportamiento de los concretos convencionales disminuyendo su resistencia a la compresión y a la flexión. Por tal razón, el concreto liviano con cáscara de nuez podía ser usado para prefabricados y elementos no estructurales.

Por su parte, Kozo *et ál.* (2015) llevaron a cabo una investigación con el fin de identificar la capacidad de absorción de impactos del concreto ligero que utiliza agregado de piedra pómez, este estudio fue motivado por los constantes daños que sufren las presas de contención de concreto que se utilizan para mitigar los desastres debidos a la concentración de sedimentos que surgen luego de las lluvias intensas, este tipo de estructuras se afectan por la colisión de rocas o el flujo de escombros por lo cual se plantea la protección con un material ligero. Esta investigación buscaba medir dicha capacidad de

manera experimental, por medio de una prueba de impacto empleando un sistema de caída de peso, colocando una capa de concreto ligero sobre la capa de concreto base y así poder identificar si el concreto ligero con piedra pómez podría ser usado como material amortiguador. Se consideraron como variables el tipo de agregado grueso, la relación agua/cemento, el espesor de la capa amortiguadora y la velocidad de impacto. Este estudio concluyó que el concreto ligero tiene una capacidad de absorción de impactos en promedio 28% y 41% superior a la del concreto convencional que se usó como patrón de comparación que tenía piedra caliza como agregado grueso.

Por otro lado, en el mismo periodo de tiempo se adelantó un estudio para el análisis de las propiedades hidráulicas e higrotérmicas de los bloques de concreto liviano con lapilli basáltico como agregado. Este tipo de bloques se utiliza de manera habitual en las islas Canarias y debido a su porosidad brinda una baja conductividad térmica a los bloques de concreto, la principal desventaja que presentan los bloques de concreto liviano con lapilli es la retención de agua por su capacidad de absorción. Por tal razón mediante ensayos de espectroscopía dieléctrica (DS), porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) y determinación de conductividad térmica, se determinó que existe relación entre los parámetros de los poros (principalmente diámetro de poro crítico y conectividad de poro) y la posibilidad de permeabilidad de los fluidos (Sánchez F, *et ál.* 2015).

La alta actividad sísmica del Ecuador motivó a Morales F, *et ál.* (2018) a llevar a cabo un proceso de investigación para desarrollar un concreto estructural de baja densidad para edificaciones, haciendo remplazo del agregado grueso por piedra pómez con el fin de disminuir la variable de masa, que es determinante a la hora de calcular las fuerzas sísmicas que afectarán la edificación. La dosificación para un metro cúbico de concreto liviano que se usó fue de 9.2 sacos de cemento, 208 litros de agua, 792 kg de arena, 326 kg de piedra pómez y 4.6 kg de aditivo superplastificante Aditec SF – 106 compuesto por nano sílice, bajo estas condiciones se obtuvo un concreto liviano estructural con una resistencia a la compresión a los 28 días de 28.2 MPa y densidad de equilibrio de 1.81 kg/cm³, se evaluaron otras propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión que alcanzó valores de 3.2 MPa y la resistencia a la tracción indirecta que alcanzó un valor de 3.56 MPa, concluyendo que el concreto desarrollado con piedra pómez cumplía con los rangos de densidad de equilibrio establecidos por el ACI 213R-03.

Por otro lado, Ortiz (2018) en el distrito de Yura en Perú desarrolló un estudio de un concreto estructural liviano con el uso de escoria y cenizas volcánicas como agregados livianos naturales, aplicado en la construcción de viviendas de interés social. En esta investigación se diseñaron concretos para 21 MPa, 28 MPa, 35 MPa y 50 MPa, en los cuales se reemplazó el 100% del agregado fino por ceniza volcánica, esperando un asentamiento de 7.5 cm. El trabajo experimental, concluyó que los materiales volcánicos son aptos para la elaboración de concretos estructurales livianos obteniendo resistencias a la compresión superiores a las resistencias de diseño, la mezcla diseñada para 21 MPa contó en su dosificación con ceniza volante y obtuvo una resistencia de 38.2 MPa, en la mezcla que se diseñó para 28 MPa se agregó ceniza volante como reemplazo del agregado fino y se obtuvo una resistencia de compresión a los 28 días de 42.5 MPa, en la mezcla que se diseñó para 35 MPa se adicionó ceniza volante y nanosílice y el resultado de resistencia a la compresión fue de 48.6 MPa y finalmente para la mezcla que se diseñó inicialmente para 50 MPa el resultado fue de 62.1 MPa adicionando ceniza volante y nanosílice. Adicionalmente esta investigación demostró que los agregados naturales ligeros producen una incorporación de aire en el concreto mejorando sus propiedades térmicas muy conveniente para climas fríos y que la manejabilidad del concreto disminuye con el uso de estos agregados puesto que en ninguna de las mezclas se alcanzó el asentamiento esperado.

Salazar (2018), realizó un estudio experimental sobre el “Efecto del concreto ligero con agregados de roca volcánica en la fabricación de postes en el Perú” analizó los efectos físicos, mecánicos y económicos del concreto ligero reemplazando el agregado grueso por rocas volcánicas y realizando la comparación entre el concreto convencional usado en la producción de postes, diseñando mezclas de concreto con diferentes dosificaciones variando las proporciones de agregado fino y agregado grueso para que fuesen capaz de resistir un mínimo de 31.4 MPa a la compresión, con una relación agua cemento 0.445. Las rocas volcánicas usadas en el proceso experimental provenían de las canteras del departamento de Lima y Quilmaná en la provincia de Cañete, dicho estudio se desarrolló por fases iniciando por recolectar tres muestras de rocas volcánicas, luego realizar los estudios geológicos y finalmente realizar el diseño de mezclas de concreto. Se estudiaron 3 tipos de mezclas con diferentes dosificaciones cumpliendo con la norma técnica peruana para el concreto de postes, se partió de la primera dosificación de mezcla de concreto en la que se hizo reemplazo del 100% del agregado grueso por la roca volcánica en las

siguientes dos dosificaciones se varió la relación entre el agregado grueso (roca volcánica) y el agregado fino, tomando como referencia la relación de 1.0 de la primera dosificación, para la segunda dosificación la relación entre el agregado grueso (roca volcánica) y el agregado fino fue de 1.3; en la tercera dosificación se usó una relación entre el agregado grueso y el agregado fino de 0.60, se procedió a ensayar las probetas identificando que se cumplía con el objetivo que se trazó en el inicio del estudio frente a la resistencia a la compresión obteniendo resistencias entre 35.4 MPa y 36.6 MPa, cumpliendo con lo requerido en la norma técnica peruana, este estudio incluyó las recomendaciones para la producción industrializada de este tipo de concretos.

Saradar *et ál.* (2020) evaluaron las propiedades mecánicas del concreto ligero con adiciones de humo de sílice, cenizas volantes y de fibras de basalto como refuerzo. El comportamiento desfavorable a la resistencia a tracción y la posibilidad de falla repentina durante los sismos que tiene el concreto, motivó este estudio en busca de mejorar la poca ductilidad del concreto liviano con arcilla expandida adicionando diferentes cantidades de fibra de basalto entre 0 % y 0.5%, adicionalmente se incorporaron humo de sílice y cenizas volantes como remplazo parcial del cemento para modificar las propiedades de resistencia del concreto liviano. En el estudio se realizaron 21 mezclas en la fase experimental revisando las propiedades del concreto en estado plástico y endurecido a los 7, 28 y 90 días. La incorporación de fibras de basalto en el concreto liviano según los resultados del estudio redujo la manejabilidad de la mezcla en un 37% y la resistencia a la compresión en un 13%; sin embargo, continuó siendo categorizado como concreto estructural, los resultados a flexión y a tracción presentaron un mejor comportamiento que el concreto sin fibras.

En Italia se adelantó una investigación para la utilización de materiales piroclásticos provenientes de la actividad volcánica del volcán Etna, para producir mortero ligero aislante. La fase experimental consistió en el diseño y elaboración de 14 mezclas, divididas en tres grupos, en cada grupo variaba el material cementante, el grupo uno usó cemento Portland, en el grupo dos se usó cal hidráulica natural y en el grupo tres se usó arena puzolánica con hidróxido de calcio. Se tuvo como variable también el uso de un aditivo incorporador de aire. Como resultado, esta investigación mostró que es factible el uso de materiales piroclásticos en mezclas de concreto como agregados y que no es conveniente

usarlos como material cementante debido a que los materiales piroclásticos no presentaron un buen comportamiento puzolánico (Contrafatto *et ál.* 2020).

Schumacher *et ál.* (2020), investigaron la combinación de concreto celular con agregados livianos con el fin de desarrollar un concreto liviano con configuración extra porosa, para este propósito combinaron un concreto celular con agregados livianos como la piedra pómez, el vidrio expandido, la arcilla y la perlita expandidas. Los concretos estudiados dieron como resultado una estructura molecular homogénea y una buena distribución de los componentes: La mejor configuración porosa se logró con la piedra pómez, la perlita y la arcilla expandidas respectivamente. De este estudio se pudo concluir que la resistencia a la compresión del concreto celular con agregados livianos aumentó en un 40% con respecto al concreto celular convencional.

En la Republica China, Chen *et ál.* (2020), en busca de la comodidad acústica y térmica en la ciudad de Wuhan investigaron la generación de un concreto ultra ligero con fibras de Miscanthus, (planta originaria del Japón), usando sus fibras como agregados ligeros con el fin de mejorar el comportamiento del concreto frente a la absorción del sonido y mejorar las propiedades de aislamiento térmico, debido a su estructura interna porosa, estas fibras actúan como una especie de biomasa. El estudio concluyó, con la producción de un concreto de muy baja densidad de un mejor comportamiento térmico y acústico, recomendado para paredes no estructurales y placas de techo.

En relación con la incorporación de agregados piroclásticos en el concreto, a continuación, se presentan las principales investigaciones internacionales realizadas en los últimos años:

La actividad de los volcanes libera grandes cantidades de material piroclástico como la ceniza volcánica que tiene la posibilidad de agruparse para la conformación de agregados, es el caso del lapilli, que fue material de estudio por (Mueller *et ál.* 2016) mediante la simulación de las condiciones por las cuales varía el flujo de partículas de gas que se genera dentro de las erupciones, revisando las corrientes de densidad piroclástica por medio de un equipo de laboratorio denominado *ProCell Lab System de Glatt Ingenieurtechnik GmbH*, en donde, las partículas sólidas se ponen en movimiento en un medio fluido con todas las variables controladas (caudal de aire, temperatura del gas, concentración de partículas, humedad, composición del líquido). Los experimentos se

realizaron con perlas de vidrio de cal sodada y partículas de ceniza volcánica natural. Como resultado se identificó que la ceniza volcánica al igual que las perlas de vidrio tenían la capacidad de agruparse, sin embargo, los agregados solo se produjeron cuando se presentaron concentraciones altas de cloruro de sodio que recubrieron los materiales, el tamaño y conformación de los agregados dependió de la granulometría inicial del proceso. Con este estudio se logró generar agregados esféricos con estructuras estables muy similares a los que se encuentran en los depósitos piroclásticos. Los resultados de este estudio son un avance para definir modelos de transporte y sedimentación de los materiales volcánicos como la ceniza.

Por otro lado, la investigación de Ince y Fener (2016), se concentró en el análisis del comportamiento de las rocas piroclásticas frente al ciclo de congelación y descongelación, este estudio fue motivado por la utilización de rocas piroclásticas en la construcción de lugares históricos como la región de Anatolia en Turquía específicamente la ciudad de Capadocia considerada patrimonio histórico y cultural, donde las construcciones presentan deterioro debido a las condiciones atmosféricas. Aunque la roca piroclástica es de las más usadas por su manejabilidad en el sector de la construcción, a la vez es una de las que más se ve afectada por el este tipo de fenómenos. Para esta investigación se tomaron como muestra diez rocas piroclásticas de Capadocia para determinar las propiedades mecánicas con el fin de desarrollar un modelo de predicción estadístico que permitiera estimar la disminución porcentual de resistencia a la compresión uniaxial durante los periodos de congelación y descongelación, analizando variables como la densidad seca, la velocidad ultrasónica, la resistencia a carga puntual y los índices de durabilidad logrando esta investigación generar el modelo estadístico sin ser necesarias las pruebas de congelación y descongelación.

Adicional a los procesos atmosféricos que fueron el caso de estudio anterior también se han desarrollado investigaciones en busca de lograr la estabilidad de los depósitos piroclásticos que son suelos de baja resistencia al esfuerzo cortante, por tal razón se desarrolló un estudio experimental para tratar un suelo de origen volcánico en Italia buscando mejorar las propiedades mecánicas con la adición de cal lo cual de manera adicional modificaba el pH ácido propio de los suelos volcánicos, se realizó la comparación de los resultados del ensayo de corte directo de muestras tratadas con cal y muestras naturales: Los resultados del estudio, permitieron concluir que la adición de cal produce el

aumento de la resistencia al corte y se genera alta reactividad del sistema a nivel molecular (Guidobaldi *et ál.* 2017).

Por otro lado, García *et ál.* (2020), realizaron un análisis de las características geomecánicas de diferentes tipos de rocas volcánicas generando una base de datos experimental de los diferentes agregados obtenidos de este tipo de rocas, para esto estudiaron 971 muestras de 11 tipos de rocas volcánicas comunes como lo son los basaltos, fonolitas, traquibasaltos, traquitas, ignimbritas y piroclastos, teniendo en cuenta que son las rocas más encontradas en las zonas insulares. Los resultados de esta investigación mostraron que la mayor cantidad de agregados volcánicos provienen de rocas muy porosas las cuales tienen una capacidad de absorción alta y baja resistencia, la dispersión de los datos estadísticos fue consecuencia de las diferencias de viscosidad de la lava, a la magnitud de la explosión volcánica y la distribución aleatoria de los espacios. El estudio reveló que los agregados provenientes de la actividad volcánica pueden ser una alternativa de buena calidad para ser usados como materia prima en el sector de la construcción siendo una solución natural y sostenible en las zonas insulares.

2.2 Investigación nacional

En Colombia se han adelantado investigaciones en relación con los concretos estructurales livianos, sin embargo, aún hace falta mayor investigación para lograr la incorporación de esta tecnología a la industria de producción de los concretos estructurales. Los siguientes son los estudios más significativos:

Ramos (2005) realizó la caracterización de las fuentes de extracción de arcillas expansivas para la elaboración de agregados livianos mediante calcinación, realizando una descripción de las propiedades y los ensayos de laboratorio para la clasificación de arcillas expansivas con el fin de hacer uso de este material como agregado liviano, el estudio determinó que los costos para el proceso de calcinación de arcillas son muy altos comparados con el uso de agregados convencionales, por lo cual no es factible que se pueda generar una producción industrializada del proceso.

Pineda (2010), investigó sobre “Concreto liviano estructural con arcilla expandida térmicamente extraída de canteras localizadas en el sur de la sabana de Bogotá”, que

buscaba la obtención de concretos livianos mediante la utilización de agregados livianos provenientes del proceso térmico de arcillas expansivas extraídas de la sabana de la ciudad. En este estudio se identificó que con el uso de arcillas calcinadas como agregados livianos era posible alcanzar resistencias a la compresión entre 29 MPa y 37 MPa, valores superiores a lo exigido por la normativa para denominar un concreto como estructural. Sin embargo, de acuerdo con los resultados encontrados en los ensayos de porosidad y absorción concluye que los concretos pueden presentar deficiencias de durabilidad.

Por otro lado, Veriel y Claro (2017) desarrollaron un trabajo experimental para el diseño de morteros livianos utilizando arcilla expandida del barrio Hatillo (ubicado en Ocaña) y del sector de Molinos (ubicado en Cúcuta) en el departamento del Norte de Santander, la arcilla expandida se produjo mediante un proceso de sinterización y trituración y se utilizó en remplazo de agregado fino convencional en el mortero. Este estudio concluyó con óptimos resultados de resistencia a la compresión, para las probetas elaboradas con la arcilla extraída de Ocaña se alcanzaron resistencias de 44.21 MPa a los 28 días y el mortero elaborado con la arcilla extraída de Cúcuta alcanzó resistencias de 35.16 MPa a los 28 días, valores que estaban por encima del valor de resistencia a la compresión de 20.94 MPa dado por el mortero de comparación elaborado con arena de río convencional, los morteros contaron con bajas densidades y un buen comportamiento termoacústico y de resistencia al fuego, este estudio buscaba una solución sostenible que mitigara la explotación de los ríos Pamplonita y Algonodal de los cuales se extraen los agregados convencionales.

En la exploración geológica referente a materiales piroclásticos, en Colombia se han realizado caracterizaciones en cuanto a la geometría de las capas de material acumulado, granulometría, mineralogía, composición de la roca y cambios de textura, adicional se han realizado análisis morfométricos y levantamientos estratigráficos de los depósitos piroclásticos identificando la petrografía y composición geoquímica de los depósitos. Un caso particular de investigación es el realizado en el Centro Eruptivo el Morro, ubicado en el departamento de Huila. Sus alrededores están compuestos por escorias y los depósitos se preservan por lo cual se puede establecer, que son depósitos piroclásticos jóvenes, los tamaños de partículas de los depósitos varían entre ceniza y bomba. En la petrografía se identificó que el centro eruptivo tiene una emisión de magma basáltico y por su morfología

se puede concluir que el ambiente de formación de los depósitos está asociado con el fenómeno de subducción (Rodríguez & Sánchez, 2018)

De otro lado, Banquero et ál. (2019), realizaron una investigación buscando implementar materiales como la arcilla expandida y la piedra pómez (roca metamórfica) reemplazando de manera total los agregados convencionales en la mezcla de concreto, las arcillas y la piedra pómez se usaron en dos estados en la mezcla de concreto: sin saturar y totalmente saturados, se acudió también al uso de superplastificante y humo de sílice para mejorar las propiedades de la mezcla. Al finalizar el estudio se obtuvo un concreto ligero con resistencias a la compresión entre 13 MPa y 18 MPa con densidades entre los 1300 y 1500 kg/m³. Los autores concluyeron en su estudio que es posible el remplazo al 100% de los agregados convencionales por la arcilla expandida y la piedra pómez para la producción de concretos ligeros en el país.

Ayala y Urrego, (2020) llevaron a cabo una investigación experimental para desarrollar concreto liviano de 21 MPa, reemplazando los agregados convencionales por piedra pómez extraída de Flandes Tolima, se realizaron dos tipos de mezcla una con el remplazo de agregados por piedra pómez y la otra incorporando un aditivo reductor de absorción (dulce de caña de azúcar). La mezcla en la cual no se incorporó el aditivo requirió la adición de 0.50 kg de agua extra para alcanzar el asentamiento esperado lo cual afectó la relación agua cemento inicial que era de 0.49, las resistencias alcanzadas por las 18 probetas de la mezcla sin aditivo a los 28 días oscilaron entre 21.8 MPa y 26.24 MPa, la mezcla con la inclusión de aditivo no permitió la formación de probetas se puede concluir que el dulce de caña de azúcar impidió la cohesión de los materiales.

Después de consultado el estado del arte y la necesidad de evaluar la producción industrial de concretos estructurales livianos con agregados piroclásticos de bajo costo se vio la pertinencia de realizar el presente estudio el cual buscaba caracterizar los agregados piroclásticos provenientes de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz y posteriormente usarlos como remplazo de los agregados convencionales en mezclas de concreto, evaluando sus propiedades y comparándolo con un concreto convencional.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de un concreto liviano estructural con reemplazo parcial de agregados naturales por agregados de origen volcánico provenientes del sector adyacente al volcán Nevado del Ruíz.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar mediante caracterización las propiedades físicas y mecánicas de los agregados naturales de origen volcánico.
- Comparar las propiedades en estado plástico de trabajabilidad, contenido de aire y temperatura y en estado endurecido de resistencia a compresión, a flexión, densidad, permeabilidad y durabilidad del concreto liviano estructural con agregados de origen volcánico, respecto al concreto convencional.
- Analizar la factibilidad de producción de concretos estructurales con agregados livianos de origen natural provenientes de la actividad volcánica en Colombia.

4. Programa experimental

La metodología de trabajo que se empleó para llevar a cabo esta investigación es presentada en la Figura 4-1, se observa que el programa experimental parte de una revisión bibliográfica relacionada con los materiales piroclásticos, se hizo un estudio general de las zonas geográficas con actividad volcánica en la región, donde se recolectaron muestras de los materiales procedentes de actividad volcánica del complejo adyacente al nevado del Ruiz, haciendo énfasis en el material denominado “lapilli”, se determinaron las propiedades intrínsecas del material, posteriormente se desarrollaron los diseños de mezclas y se evaluó el comportamiento físico mecánico de mezclas de concreto con agregados piroclásticos, finalmente se realizó un análisis de los depósitos de lapilli de la zona adyacente al nevado del Ruiz determinando la ubicación, área, profundidad y posible volumen de explotación de cada depósito.

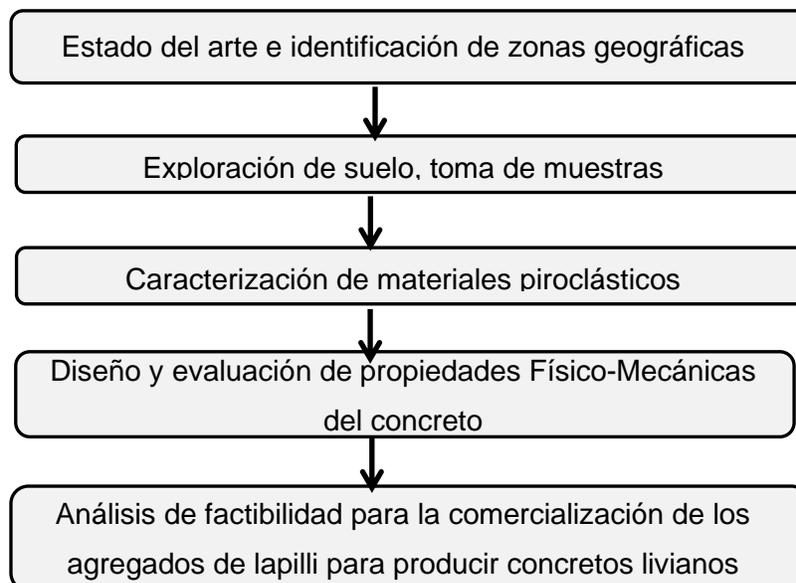


Figura 4-1: Metodología del programa experimental.

4.1 Materiales

En este numeral se presentan los materiales usados en la investigación y sus principales características.

4.1.1 Cemento

Para esta investigación se utilizó cemento especializado de tipo estructural proveniente de la productora y comercializadora de cemento Argos. Es un cemento especialmente diseñado para la producción industrializada de concreto, que ofrece un alto desarrollo de resistencia a edades iniciales (ARI) y finales, la densidad del cemento es de 3.0 g/cm^3 .

4.1.2 Agregados

A continuación, son presentados los agregados convencionales y piroclásticos utilizados para la elaboración del concreto propuesto.

4.1.2.1 Agregado grueso

Para las mezclas se utilizó agregado grueso de dos tipos: el primero procedente de cantera y denominado agregado grueso natural (Figura 4-2) que pasa por un proceso de explotación en las canteras ubicadas a las afueras de la ciudad de Bogotá.



Figura 4-2: Grava convencional.

El otro agregado proviene de una exploración de suelo en la ciudad de Manizales que se encuentra ubicada cerca al Volcán Nevado del Ruíz, denominado lapilli (Figura 4-3) que proviene de depósitos piroclásticos, se emplea como reemplazo en volumen del agregado natural en porcentaje del 25% y 50%.



Figura 4-3: Grava lapilli.

4.1.2.2 Agregado fino

Fueron utilizado dos tipos: el primero fue arena de río proveniente de los depósitos superficiales fluviales y el segundo fue el agregado liviano que proviene de una exploración de suelo en la ciudad de Manizales que se encuentra ubicada cerca al Volcán Nevado del Ruiz, denominado lapilli (Figura 4-4) proviene de depósitos piroclásticos. Este reemplaza al agregado fino de arena de río, con reemplazos parciales del 25%, 50%, 75% y 100%.



Figura 4-4: Arena lapilli.

4.1.3 Aditivo

En algunas mezclas se utilizó el aditivo Superplastificante Toxement Plastol 7000. Es un aditivo líquido base policarboxilato de alta concentración, diseñado como reductor de agua de alto poder para concreto. Cumple los requerimientos de la norma ASTM C-494 Tipo A y Tipo F, tiene una densidad: 108 kg/l +/- 0.02 kg/l.

4.1.4 Humo de sílice

Para la segunda fase experimental de la investigación se incorporó en algunas mezclas humo de sílice o micro sílice de color gris oscuro, con peso específico entre 2.2 g/cm³ y 2.3 g/cm³, superficie específica de mínimo 15.000 kg/m² y con contenido de SiO₂ de mínimo 85% de la casa comercial Toxement.

4.1.5 Cal

Debido a la acidez de los materiales piroclásticos en esta investigación se utilizó en la primera fase experimental cal hidratada al 75% de pureza o de uso general de color blanco, sin olor, con densidad de 1.117 g/ml, pH entre 11 y 12.5, la composición química se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Características Químicas de la cal hidratada de uso general.

hidróxido de calcio	72% mínimo.
óxido de magnesio	1.5% máximo.
sílice	1.5% máximo.
óxido de hierro con aluminio	0.5% máximo.
insolubles	2% máximo.

Para la segunda fase experimental se utilizó cal hidratada al 85% de pureza con densidad de 1.117 g/ml, pH entre 11 y 12.5 su composición química se presenta en la Tabla 4-2. En las dos fases se utilizó cal de la casa comercial Caltek.

Tabla 4-2 Características Químicas de la cal hidratada al 85% de pureza.

hidróxido de calcio	83% mínimo.
óxido de magnesio	0.7% máximo.
sílice	1.0% máximo.
óxido de hierro con aluminio	0.5% máximo.
insolubles	1.5% máximo.

4.2 Caracterización de los materiales.

A continuación, se presentan los ensayos de caracterización, realizados a cada uno de los materiales considerados para el programa experimental planteado. Se realizaron las pruebas en un ambiente controlado regidas por normas y especificaciones técnicas. Los métodos empleados para la caracterización y control de calidad del cemento, agregados gruesos y agregados finos (incluyendo los piroclásticos) fueron los establecidos por las normas NTC e INVIAS 2013 (Tabla 4-3).

Tabla 4-3 Métodos de ensayo para caracterización de agregados y cemento.

Código	Norma	Arena	Grava	Cemento
NTC 77	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino	X	X	
NTC 78	Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 μm (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado	X	X	
NTC 127	Presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas para la preparación de morteros o concretos	X		
NTC 4630	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	X		
NTC 6179	Equivalente de arena de suelos y agregados finos	X		
NTC 237	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino	X		
NTC 176	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso		X	
NCT 92	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto	X	X	
NTC 126	Método de ensayo para determinar la solidez (sanidad) de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio	X	X	
NTC 98	Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles		X	
NTC 5987	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso		X	
INV E – 230	Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras		X	
NTC 6222	Método de ensayo para determinar el potencial de reactividad de los agregados al álcali (Método de barras de mortero)	X		
NTC 184	Perdidas por Calcinación	X		
NTC-589	Método de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados	X		
NTC 221	Densidad del cemento hidráulico			X

Otros análisis que se llevaron a cabo para la determinación de propiedades físico-químicas de los agregados piroclásticos fueron los ensayos de difracción de rayos X, imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis petrográfico.

4.2.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino

En la Figura 4-5 y la Figura 4-6, son presentadas las curvas granulométricas para la grava convencional y la grava lapilli.

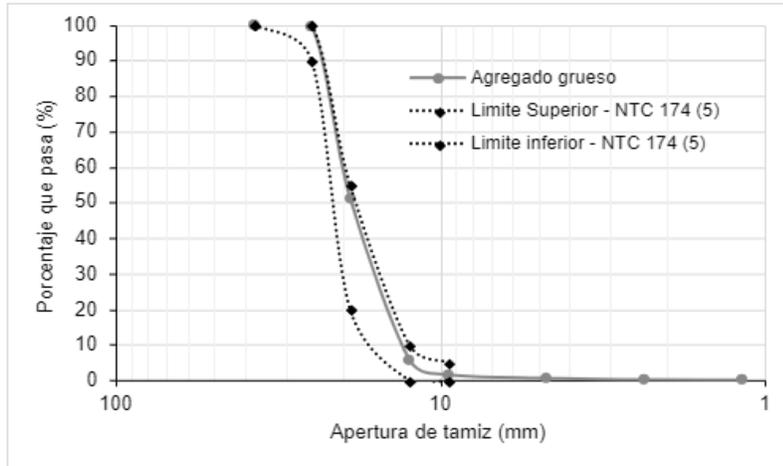


Figura 4-5: Comparación granulométrica de la grava con La norma NTC 174

De acuerdo con las especificaciones granulométricas de la norma NTC 174 para agregados convencionales, la grava de cantera utilizada para la presente investigación cumple con los requisitos de gradación para tamaño de agregado número 5 (1 pulgada) del ítem 10.1 de NTC 174.

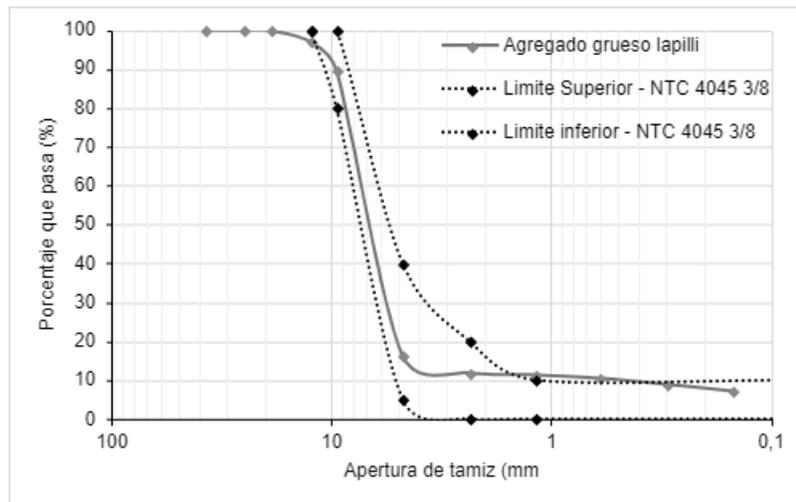


Figura 4-6: Comparación granulométrica de la grava lapilli con la norma NTC 4045.

Los tamaños de las partículas de grava de cantera oscilan entre 25mm y 12.5 mm y para la grava lapilli fluctúa entre 9.5 mm y 0.6 mm. La grava lapilli no cumple con las especificaciones del numeral 6.1.3 de la norma NTC 4045, para gravas con tamaño nominal de 3/8", esto se evidencia en la Figura 4-6 donde se retienen partículas con tamaño de 1/2" y pasa más del 10% de partículas en la malla N°16.

En la Figura 4-7 y la Figura 4-8, se presentan las curvas granulométricas de la arena de río y la arena lapilli.

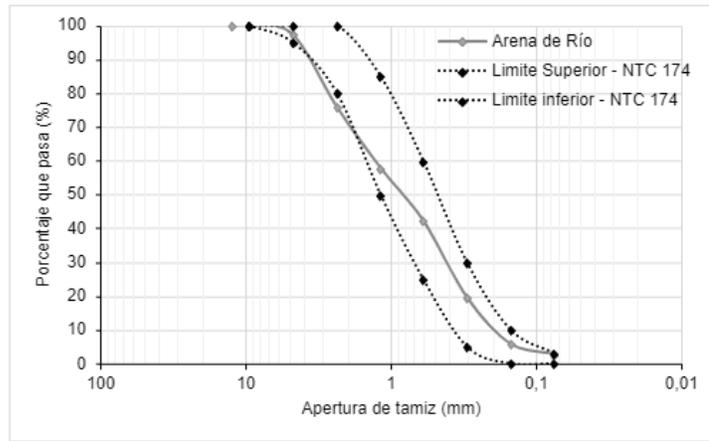


Figura 4-7: Comparación granulométrica de la arena de río con La norma NTC 174.

El agregado fino convencional que en este caso es arena de río, no cumple con la gradación del numeral 6.1 de la norma NTC 174, esto se observa en la Figura 4-7 donde pasa menos del 80% de partículas del tamiz N° 16.

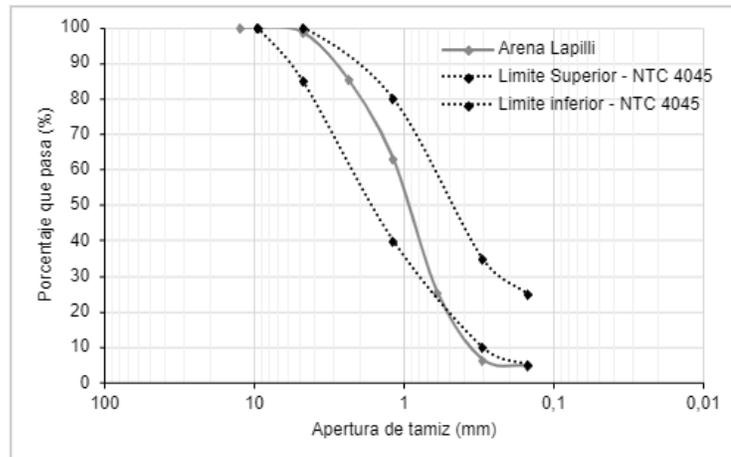


Figura 4-8: Comparación granulométrica de la arena lapilli con la norma NTC 4045.

Respecto al agregado fino lapilli no cumple con las especificaciones del numeral 6.1.2 de la norma NTC 4045, en la Figura 4-8 las partículas que pasan por la malla N° 50 es inferior al 10% permitido. Analizando la curva granulométrica mostrada en la Figura 4-8, se observa que el agregado fino de lapilli presenta mayor porcentaje de partículas gruesas superiores a 0.6 mm y menores porcentajes de retención en las partículas inferiores a 0.6 mm.

4.2.2 Material que pasa la malla No. 200

Otro análisis importante es la evaluación de la cantidad y tipo de material que conforma la parte más fina de los diferentes agregados, puesto que tienen gran influencia en la resistencia a compresión o fisuración del concreto si dichas partículas están conformadas por arcillas expansivas o materiales plásticos.

De este análisis se obtiene que el agregado grueso convencional presenta un porcentaje de partículas inferiores a 75 μm del 1.8%, de acuerdo con la tabla 4 de la norma NTC 174, el valor máximo permitido para agregado convencional es del 1.5% considerando que el material esté libre de arcillas o pizarra.

El agregado fino convencional presenta un 7% de material inferior a 75 μm , pero de acuerdo con la Tabla 1 de la norma NTC 174 el valor máximo es del 5% si el concreto está sometido a abrasión y del 7% si está libre de arcillas o esquistos y no está sometido a abrasión.

Respecto al agregado grueso y fino lapilli el resultado es del 12%, pero de acuerdo con la Nota 3 de la norma NTC 4045, las partículas con tamaño inferior al tamiz N° 200, que se encuentran en la superficie de los agregados livianos piro-procesados, no son dañinas y pueden ser moderadamente puzolánicas, por lo tanto, no hay un valor máximo permitido de la misma.

Para descartar la presencia de materiales arcillosos se realizó un análisis a través de los límites de Atterberg de las partículas más finas, donde con estos ensayos se descartó que tuviese índice de plasticidad puesto que no se logró armar los rollos (Figura 4-9).



Figura 4-9: Limite plástico en agregado lapilli.

4.2.3 Colorimetría

Para el agregado fino convencional el resultado del ensayo de impurezas orgánicas es la placa N° 3, por lo tanto, es aceptable de acuerdo con el numeral 7.2 de la norma NTC 174 (Figura 4-10)



Figura 4-10: Ensayo colorimetría arena de río.

Respecto a las especificaciones del numeral 5.1.1 de la norma NTC 4045, la arena lapilli no es aceptable, puesto que en el ensayo de sanidad e impurezas orgánicas presento una coloración N° 5 que es superior al límite aceptable N° 3. Inicialmente se consideró que el resultado se debía a altos contenidos de materia orgánica, por lo cual se lavó el material y se realizó nuevamente el ensayo obteniendo el mismo resultado. Debido a este resultado se estimó que la acidez era propia de la composición química del material y se procedió a realizar ensayos especializados para conocer su composición mineralógica. De acuerdo con lo reportado por (Giulia Guidobaldi, 2017), la cal mejora las propiedades físicas y disminuye la acidez de los materiales piroclásticos por tal motivo, se decidió adicionar cal hidratada con el fin de evitar que la acidez afecte las propiedades del concreto en estado endurecido.

En la fase uno para determinar el contenido de cal hidratada de uso general (75% de pureza) adecuado, se utilizaron muestras de 200 g de agregado fino lapilli, que se mezclaron con cal hidratada de uso general en diferentes proporciones. El criterio utilizado fue adicionar un porcentaje respecto al peso de la muestra de agregado fino lapilli, luego las muestras se sometían al ensayo de impurezas orgánicas para observar el cambio de color en la muestra. La propuesta inicial consistía en adicionar un 1% de cal (2 gr), como no se observaron cambios significativos se realizaron reemplazos aumentando las proporciones (2%, 5%, 10% y 20%). En la Figura 4-11 se observa de izquierda a derecha, las diferentes muestras de agregado fino liviano con adición de cal hidratada de uso general (75% de pureza) en las proporciones mencionadas anteriormente. Una vez analizadas las muestras se considera pertinente utilizar una adición del 10% puesto que la coloración de la muestra ya cumplía con la escala de color aceptable (N°3).

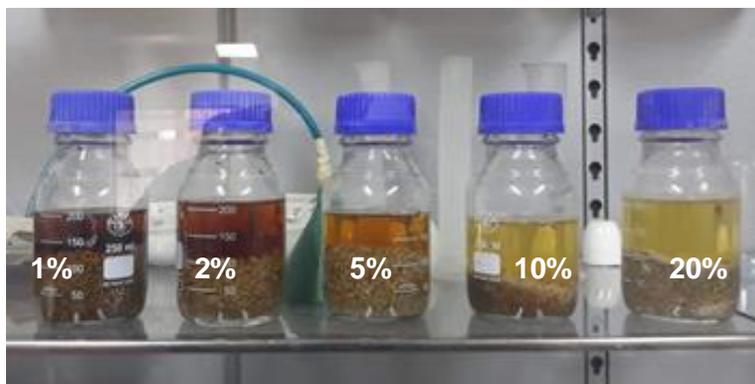


Figura 4-11: Ensayo colorimetría arena lapilli con diferentes concentraciones de cal hidratada de uso general (2%, 5%, 10% y 20%).

Para la fase dos se realizó nuevamente el ensayo de colorimetría utilizando otro tipo de cal (Cal hidratada al 85% de pureza) para reducir la acidez del agregado fino lapilli. La Figura 4-12, muestra el agregado fino de procedencia volcánica con adición del 1% 2% 5% y 10% de cal hidratada al 85% respectivamente. Se decide realizar las mezclas de la fase dos incorporando un porcentaje del 2% de cal hidratada al 85%, puesto que la coloración cumple con el requisito de la norma NTC 4045 para que este agregado sea utilizado en mezclas de concreto liviano. Para la fase dos los agregados piroclásticos se sumergieron en agua mezclada con el contenido de cal seleccionado durante 24 horas, luego se retiraron y se dejaron secar hasta el estado triple SSS para posteriormente ser utilizados en las correspondientes mezclas. En la fase uno la cal fue incorporada directamente a las mezclas.

Es importante resaltar que la acidez de un material está dada por que contiene grupos fenólicos y carboxílicos que en el momento que entran en contacto con el agua liberan iones H^+ , esta acidez se puede neutralizar con el uso de cal viva (óxido de calcio), cal apagada o hidratada (hidróxido de calcio), calcita y dolomita. La cal permite la neutralización de los iones H^+ únicamente cuando se está en contacto con el agua. Los óxidos reaccionan de manera inmediata transformándose en hidróxidos y neutralizando la acidez con sus OH^- siendo muy efectivos en corto plazo.



Figura 4-12: Ensayo de Colorimetría con adición de cal hidratada el 1%, 2%, 5% y 10% respectivamente de izquierda a derecha.

4.2.4 Equivalente de arena

Para el agregado piroclástico fino se encontró que un 81% de la muestra corresponde a partículas de arena, mientras que la arena de río presenta un 57% de arenas (Figura 4-13). cómo se mencionó anteriormente se descarta que la parte final de los agregados piroclásticos sea perjudicial para la mezcla pues no presenta plasticidad. (Ver Figura 4-8).



(a) Arena de río.

(b) Arena lapilli.

Figura 4-13: Equivalente de arena en agregado fino.

4.2.5 Densidades de los agregados

La densidad de los agregados convencionales y los agregados piroclásticos se encuentran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Densidad en los agregados convencionales y los agregados piroclásticos

Resultados de densidad agregados finos			
	Arena de río	Arena Lapilli	Diferencia %
Densidad aparente (g/cm ³)	2.58	2.21	14.34%
Densidad aparente SSS (g/cm ³)	2.63	2.28	13.31%
Absorción (%)	2.04	3.26	37.32%
Resultados de densidad agregados gruesos			
	Grava de cantera	Grava lapilli	Diferencia %
Densidad aparente (g/cm ³)	2.56	0.85	66.80%
Densidad aparente SSS (g/cm ³)	2.6	1.49	42.69%
Absorción (%)	1.45	74.58	98.06%

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4-4, se observa que la densidad aparente de los agregados piroclásticos es inferior a los materiales naturales convencionales utilizados

para la elaboración de mezclas, la arena lapilli presentó una reducción de densidad del 14.34% con respecto a la arena de río. En el caso de la grava lapilli la densidad aparente presentó una reducción del 66.8% con respecto a la grava de cantera. Por otro lado, la densidad aparente en estado SSS en la arena de lapilli disminuye en un 13.31% con respecto a la arena de río, la densidad aparente en estado SSS de la grava lapilli disminuye en un 42.69% con respecto a la grava de cantera.

Otro aspecto importante es la absorción de los agregados piroclásticos, en la arena lapilli aumenta el porcentaje de absorción en un 37.42% con respecto a la arena de río y en la grava lapilli aumenta el porcentaje de absorción en un 98.06% con relación a la grava de cantera.

Resaltando, con respecto al ensayo de absorción, se observa que, a mayor tamaño de la partícula piroclástica, mayor es la cantidad de vacíos dentro de la misma, por lo tanto, la porosidad de este material hace que se retenga una mayor cantidad de agua con respecto al material de río.

En la Figura 4-14 se observa la configuración estructural de las partículas de agregado grueso, donde son evidentes los poros presentes en el agregado lapilli y a su vez una superficie áspera, mientras que la grava convencional posee una superficie lisa.



(a) Grava de cantera.



(b) Grava lapilli.

Figura 4-14: Ensayo de absorción de los agregados pétreos.

Se evidencia durante los ensayos que estas partículas de agregado grueso lapilli son muy frágiles y se disgregan fácilmente en partículas más pequeñas, alterando la granulometría inicial. También se observa que al sumergir las partículas de agregado grueso lapilli en

agua, estas flotan sobre la superficie debido al gran número de poros internos. La resistencia a la abrasión es demasiado baja, tanto así, que en el proceso de tamizado los agregados piroclásticos se delezaban con facilidad y la mayoría de las partículas de mayor tamaño terminaban siendo partículas mucho más pequeñas e inclusive inferiores a las 75 μm .

4.2.6 Masa Unitaria

De acuerdo con el numeral 6.1.3 de la norma NTC 4045 la densidad volumétrica o masa unitaria suelta de los agregados livianos debe ser como máximo 1120 kg/m^3 para agregado fino y 880 kg/m^3 para agregado grueso. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 4-5 los agregados piroclásticos cumplen con lo especificado por la norma NTC 4045. Estos resultados coinciden con la literatura consultada reafirmando así que este tipo de materiales son más livianos que los agregados del concreto convencional.

Tabla 4-5. Resultados de masas unitarias en los agregados pétreos

Masas Unitarias de agregados finos			
	Arena Lapilli kg/m^3	Arena de río kg/m^3	Diferencia %
Masa Unitaria suelta	776	1450	46.48
Masa Unitaria Compactada	830	1672	50.42
Masas Unitarias de agregados gruesos			
	Grava Lapilli kg/m^3	Grava cantera kg/m^3	Diferencia %
Masa Unitaria suelta	316	1382	77.08
Masa Unitaria Compactada	348	1503	76.85

4.2.7 Solidez

Para evaluar la resistencia de los agregados expuestos a diferentes ámbitos de meteorización como lo son los sulfatos, es conveniente evaluar cuál es el grado de degradación de los materiales granulares, aunque en la norma NTC 4045 no se especifica un valor máximo para este ensayo es importante tener en cuenta que este es un factor importante si el concreto se expone a ambientes sulfatados. En la Tabla 4-6 se encuentran los resultados del ensayo de solidez para el agregado fino convencional.

Tabla 4-6: Resultados del ensayo de solidez arena de río.

Fracción		% gradación original	Peso fracciones		% pasa tamiz designado después ensayo	Pérdida porcentual ponderada
Pasa	retenido		Antes	Después		
3/8"	No 4	20.01	100.08	91.30	8.77	1.76
No 4	No 8	20.00	100.02	97.00	3.02	0.60
No 8	No 16	20.00	100.01	92.20	7.81	1.56
No 16	No 30	20.00	100.01	84.10	15.91	3.18
No 30	No 50	20.00	100.03	92.50	7.53	1.51
Total		100.00	500.15	457.10		8.61
% pérdida			8.61			

En la Tabla 4-7 se encuentran los resultados del ensayo de solidez para el agregado fino piroclástico, se identifica como la arena de río tiene una pérdida de 8.61% mientras que la arena lapilli presenta una pérdida del 40.8%.

Tabla 4-7: Resultados del ensayo de solidez arena lapilli.

Fracción		% gradación original	Peso fracciones		% pasa tamiz designado después ensayo	Pérdida porcentual ponderada
Pasa	Retenido		Antes	después		
3/4"	1/2"	0.2	-	-	-	-
1/2"	3/8"	1.3	-	-	-	-
3/8"	No 4	9.6	100.00	16.20	83.80	8.07
No 4	No 8	19.8	100.00	29.10	70.90	14.04
No 8	No 16	26.5	100.00	52.70	47.30	12.55
No 16	No 30	19.8	100.00	76.00	24.00	4.76
No 30	No 50	8.3	100.00	83.40	16.60	1.37
No 50	No 100	5.0	-	-	-	-
No 100	No 200	5.4	-	-	-	-
Total		95.86	500.00	257.40		40.8
% perdida			40.8			

En la Tabla 4-8 se presentan los resultados del ensayo de solidez para la grava de cantera y, se puede observar que la grava convencional tiene una pérdida del 0.17% y la grava lapilli presenta una pérdida del 12.24%.

Tabla 4-8: Resultados del ensayo de solidez de grava de cantera.

Fracción		% gradación original	Peso fracciones		% pasa tamiz designado después ensayo	Pérdida porcentual ponderada
Pasa	Retenido		Antes	Después		
1"	3/4"	27.78	500.00	500.00	0.00	0.00
3/4"	1/2"	37.22	670.00	670.00	0.00	0.00
1/2"	3/8"	18.33	330.00	327.00	0.91	0.17
3/8"	No 4	16.67	300.00	300.00	0.00	0.00
Total		100.00	1800.00	1797.00		0.17
		% perdida	0.17			

En la Tabla 4-9 se presentan los resultados del ensayo de solidez para la grava lapilli, Según estos resultados los agregados piroclásticos tienen un alto grado de erosión frente a estos compuestos químicos lo cual puede provocar afectaciones en la durabilidad del concreto.

Tabla 4-9: Resultados del ensayo de solidez de grava lapilli.

Fracción		% gradación original	Peso fracciones		% pasa tamiz designado después ensayo	Pérdida porcentual ponderada
Pasa	retenido		Antes	Después		
1"	3/4"	0.00	0.00	0.00	-	-
3/4"	1/2"	0.00	0.00	0.00	-	-
1/2"	3/8"	58.82	500.00	431.00	13.80	8.12
3/8"	No 4	41.18	350.00	315.00	10.00	4.12
Total		100.00	850.00	746.00		12.24
		% perdida	12.24			

4.2.8 Desgaste máquina de los ángeles

La grava convencional utilizada para esta investigación tiene un porcentaje de desgaste del 47% por lo tanto cumple con el rango que exige la norma NTC 174 - Tabla 4, donde especifica que debe ser máximo del 50%. Los resultados se presentan en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10: Resultados ensayo de desgaste del agregado grueso convencional.

Masa Inicial de la muestra (g) =	5002.20	Gradación =	B
Masa Final (g) =	2640.50	N° de esferas =	11
Masa de las esferas (g) =	4584.00		
% desgaste		47	

El ensayo de desgaste sobre el material lapilli arrojó un desgaste de 85% siendo este material deleznable, susceptible a la rotura con la presión de los dedos. Los resultados se pueden observar en la tabla 4-11.

Tabla 4-11: Resultados ensayo de desgaste del agregado grueso piroclástico (lapilli)

Masa Inicial de la muestra (g) =	<u>4998.50</u>	Gradación =	<u>B</u>
Masa Final (g) =	<u>753.00</u>	N° de esferas =	<u>11</u>
Masa de las esferas (g) =	<u>4584.00</u>		
% desgaste 85			

4.2.9 Caras fracturadas, alargamiento y aplanamiento

El porcentaje de caras fracturadas para la grava convencional y la grava lapilli es un valor óptimo, el primero tiene un 89% y el segundo un 98%, aunque las normas NTC 174 y NTC 4045 no especifican cuales son los valores máximos, se entiende que esta propiedad permite una mejor adherencia con la pasta de cemento. Los porcentajes de índice de alargamiento y aplanamiento que son características físicas de los agregados gruesos (Figura 4-15) deben tener mayor control, ya que estos ocasionan que se formen espacios vacíos entre la pasta de cemento y los agregados que afectan la resistencia del concreto. Para este ensayo la grava convencional tiene un índice de aplanamiento del 18% y un índice de alargamiento del 25%, mientras que el agregado piroclástico presenta un 17% de índice de aplanamiento y un 9% de índice de alargamiento.



(a) Agregado lapilli.



(b) Agregado grueso convencional.

Figura 4-15: Índice de alargamiento agregado lapilli y Caras fracturadas agregado grueso.

4.2.10 Reacción álcali agregado

Para el control de los agregados piroclásticos se realizó el ensayo con barras de mortero con el fin de detectar si existe una reacción nociva entre álcali-sílice del agregado, la norma ASTM C1260, refiere que si las expansiones son inferiores al 0.10% entonces el comportamiento es inocuo, si están entre 0.10% y 0.20% se considera realizar un análisis complementario o seguir registrando lecturas hasta los 28 días, y si las expansiones son superiores al 0.20% entonces indican que son potencialmente nocivos. Experimentalmente se obtuvo un porcentaje promedio del 0.087% de expansión, lo cual indica que posiblemente es inocuo de acuerdo con lo especificado por la ASTM C1260; sin embargo, una de las probetas está por encima del límite de 0.10 % con una expansión de 0.14% lo cual se puede identificar en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12 Resultados de ensayo álcali-sílice del agregado piroclástico bajo la norma ASTM C1260.

Lectura(mm)		Inicial	Cero	Día 1	Día 2	Día 5	Día 7	Día 9	Día 12	Día 14	
Probeta 1	Máximo	4.160	4.168	4.170	4.172	4.175	4.448	4.514	4.529	4.542	
	Mínimo	4.150	4.162	4.167	4.170	4.182	4.442	4.494	4.504	4.538	
	Promedio	4.155	4.165	4.169	4.171	4.179	4.445	4.504	4.517	4.540	
Probeta 2	Máximo	3.347	3.358	3.364	3.386	3.395	3.400	3.425	3.452	3.474	
	Mínimo	3.331	3.334	3.342	3.368	3.375	3.388	3.410	3.458	3.460	
	Promedio	3.339	3.346	3.353	3.377	3.385	3.394	3.418	3.455	3.467	
Probeta 3	Máximo	3.456	3.460	3.468	3.475	3.482	3.484	3.488	3.491	3.571	
	Mínimo	3.423	3.435	3.441	3.445	3.457	3.460	3.472	3.481	3.654	
	Promedio	3.440	3.448	3.455	3.460	3.470	3.472	3.480	3.486	3.613	
				Día 1	Día 2	Día 5	Día 7	Día 9	Día 12	Día 14	
Expansión %	Probeta 1				0.001	0.002	0.005	0.110	0.133	0.138	0.148
	Probeta 2				0.003	0.012	0.015	0.019	0.028	0.043	0.048
	Probeta 3				0.003	0.005	0.009	0.010	0.013	0.015	0.065
Expansión promedio %					0.002	0.006	0.010	0.046	0.058	0.065	0.087

En la Figura 4-16 se presenta el resultado del porcentaje de expansión a lo largo de los días en los que se tomó lectura del ensayo.

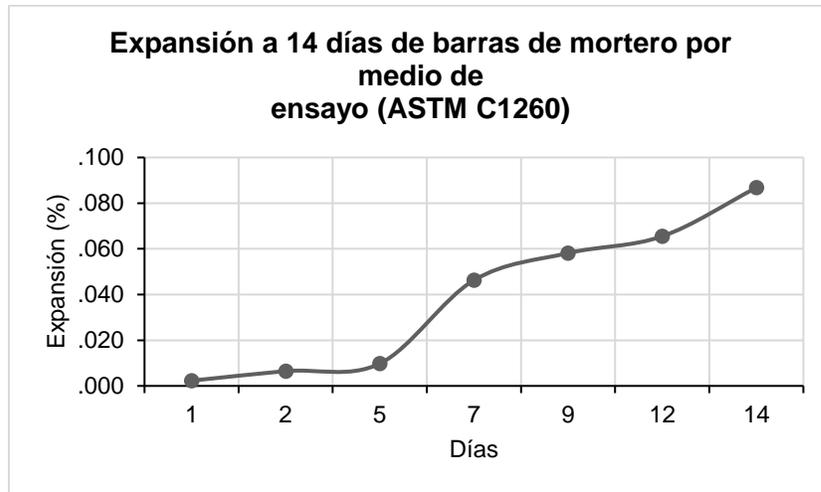


Figura 4-16: Resultados de ensayo reacción álcali-sílice con agregados piroclásticos.

En la figura 4-17 se presenta el desarrollo la elaboración de especímenes y la toma de lecturas durante el desarrollo del ensayo.

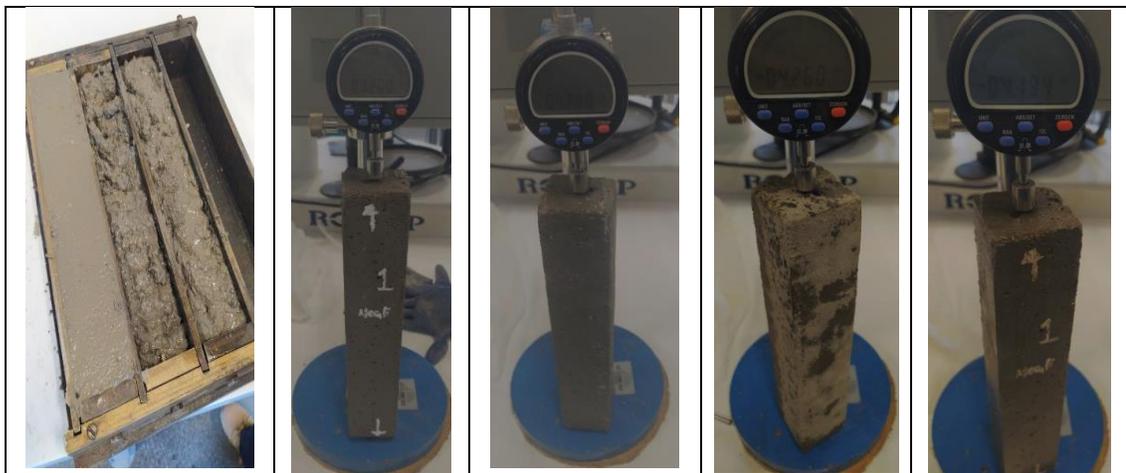


Figura 4-17: Imágenes del ensayo álcali-sílice con agregados piroclásticos.

4.2.11 Pérdidas por calcinación

Para el agregado fino lapilli la pérdida por calcinación es del 11%, de acuerdo con la norma NTC 4045 la pérdida debe ser inferior al 5%, por lo tanto, este material piroclástico no cumple con los requerimientos para esta propiedad (Figura 4-18). En el caso del cemento hidráulico Argos estructural la pérdida por calcinación fue del 3%.



Figura 4-18: Imagen de ensayos de pérdidas por calcinación agregados piroclásticos.

4.2.12 Terrones de arcilla y partículas deleznales

La presencia de partículas deleznales y terrones de arcilla perjudican la calidad del concreto, por tal motivo este ensayo hace parte de los requisitos que deben cumplir los materiales livianos para ser utilizados en concreto estructural. El resultado obtenido para agregados piroclásticos utilizados en esta investigación es del 5%, lo cual no cumple con el valor máximo permitido que es del 2% de acuerdo con las especificaciones de la NTC 4045. Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13 Resultados de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados bajo la norma NTC 589 para los agregados piroclásticos.

Resultados			
<i>M</i> =	50.00	<i>P</i> =	5%
<i>R</i> =	47.30		

$$P = [(M - R)/M] * 100$$

<i>P</i> =	Porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales
<i>M</i> =	masa de la muestra de ensayo (g)
<i>R</i> =	Masa de las partículas retenidas en el tamiz designado (g)

4.2.13 Densidad del cemento hidráulico

Mediante el método de ensayo descrito por la norma NTC 221 se determinó la densidad del cemento Argos estructural de 3.0 g/cm³, los resultados son presentados en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14 Resultados de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico.

Ensayo	1	2	3
Masa del cemento (g)	64.00	64.00	64.00
Volumen desplazado (g)	21.40	21.42	20.99
Densidad ρ (g/cm³)	3.0	3.0	3.0

En la figura 4-19 se presenta el desarrollo del ensayo de densidad del cemento hidráulico usando el matraz volumétrico Le Chatelier.

**Figura 4-19:** Imagen de ensayo de densidad del cemento hidráulico.

4.2.14 Caracterización Mineralógica

El análisis composicional de los residuos estériles y sus agregados se obtiene a partir del estudio mineralógico y petrográfico, mediante las observaciones del microscopio electrónico de barrido (SEM), cortes finos (SD) y difracción de rayos X (XRD). A continuación, se presentan los resultados de estos ensayos realizados en el material piroclástico.

4.2.14.1 Petrografía

Para el análisis de petrografía de las muestras de agregados piroclásticos se utilizó un microscopio petrográfico Carl, la sección delgada estaba impregnada con rojo de aluzarin

que genera un color rosado oscuro que resalta los carbonatos como la calcita (CaCO_3), como se observa en la Figura 4-20.

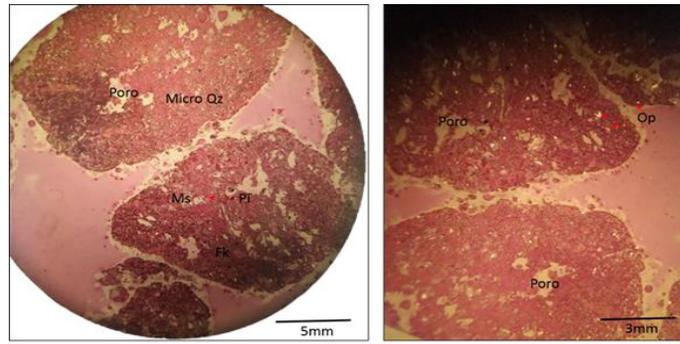


Figura 4-20: Imágenes de secciones delgadas del agregado piroclástico (lapilli).

- **Textura:** las muestras de agregado piroclástico analizadas exhiben una tendencia en el tamaño de grano principalmente de grano muy fino a arcilla con una media granulométrica que la clasifica como matriz arcillo limosa. La selección de los granos es principalmente moderada a buena. Los cristales flotan en una matriz de composición calcárea.

La muestra presenta una porosidad primaria del 20% al 40%, generada por cavidades tipo vuggy (vesicular) los cuales son vacíos o poros grandes en una roca que comúnmente están revestidos con precipitados minerales como en el caso de la ceniza volcánica. Este tipo de porosidad se genera en el momento de precipitación de la ceniza, pero además la composición calcárea del material aumenta el diámetro de los poros debido a que el carbonato es disuelto por los fluidos.

- **Composición:** El armazón de las rocas piroclásticas analizadas está constituido fundamentalmente por granos de cuarzo (5–15%) de tipo monocristalino con extinción recta (8-15%) y extinción ondulosa (1-5%). No se observó cuarzo policristalino. La fracción del armazón la completan trazas de líticos de origen, ígneos. Como minerales accesorios se encuentran pirita (2%), magnetita ilmenita (5%), anfíbol (2%), piroxeno (1%) y moscovita (5-10%). Para esta muestra, la matriz ígnea (50-80%) y la porosidad (30-40%) se mantiene similar, llegando a presentar una disminución de la porosidad de (20%).

4.2.14.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La morfología de partículas (Figura 4-21), ha diseñado una clasificación que integra de forma simple la gran dispersión de términos morfológicos aplicados en la literatura a las partículas de agregados piroclásticos. Se basa en el análisis de imágenes microscópicas SEM seriadas según aumentos estandarizados.

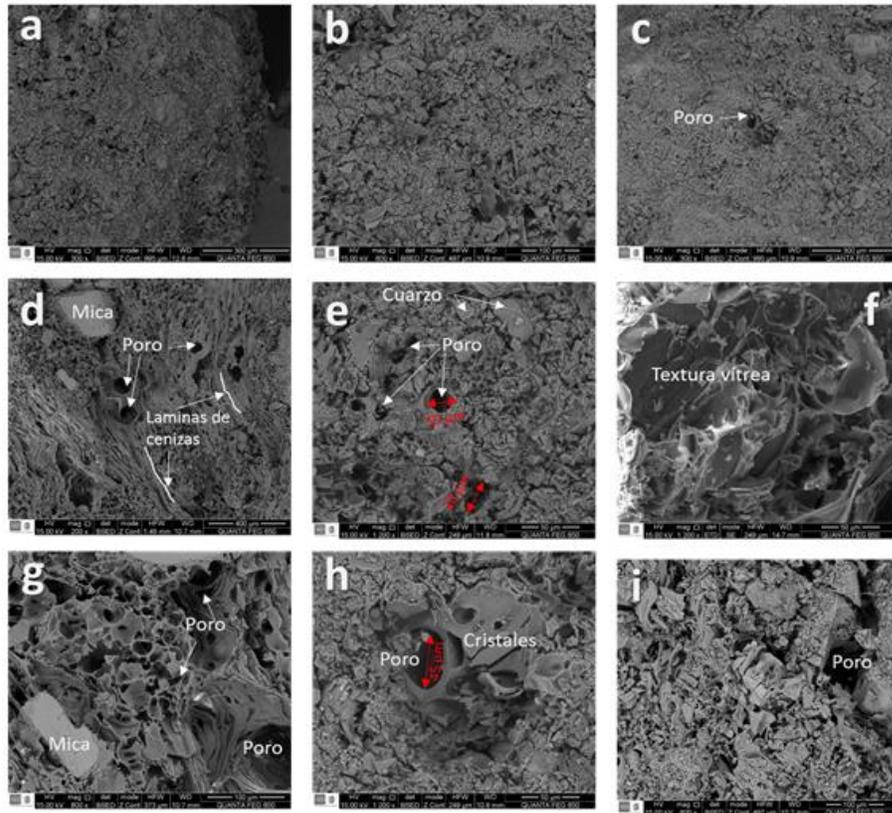


Figura 4-21: Imágenes del ensayo SEM en el material piroclástico.

Las imágenes de SEM de las muestras de lapilli presentan las siguientes características:

- Vista de la muestra a una escala de 300 µm, se observa una muestra frágil poco compacta.
- Los cristales presentan espacio poroso entre ellos, dando una apariencia granular.
- Se observan poros circulares.
- Imagen de electrones secundarios mostrando cristales de mica moscovita y biotita de formula $K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH, F)$, y poros de 50 µm a 200 µm.

- e) Imagen de electrones secundarios mostrando cristales de cuarzo y poros de 10 μm a 20 μm .
- f) Imagen de electrones secundarios mostrando la textura vítrea compuesta por Ca, Si, Al y Na, principalmente.
- g) Imagen de electrones secundarios mostrando la alta porosidad generada por el enlace de las partículas de lapilli.
- h) Porosidad formada en la textura vesicular de las cenizas, poros de 45 μm ; imagen de electrones secundarios donde se ven poros secundarios por la fragilidad de la roca.

Los poros de la matriz mineral se desarrollan principalmente entre y dentro de cristales del lapilli, granos de cuarzo y minerales arcillosos.

La Figura 4-22, presenta: a) Imagen de electrones secundarios mostrando cristales de micas con formula $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})$; b) espectro composicional de partículas de mica y porcentaje en peso (Wt %) y atómico (At %), de la composición química para la partícula de lapilli.

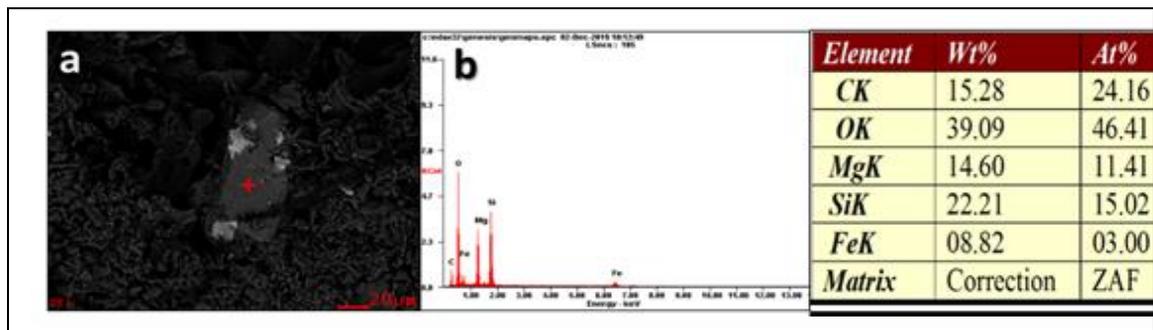


Figura 4-22: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 1 de lapilli.

La Figura 4-23 muestra la Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra de lapilli. a) Imagen de electrones secundarios mostrando la matriz del lapilli; b) espectro composicional de partículas de la matriz del lapilli compuesta principalmente por sílice (SiO_2), oxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (OFe_2) y óxido de sodio y potasio ($\text{ONa}_2\text{-OK}_2$).

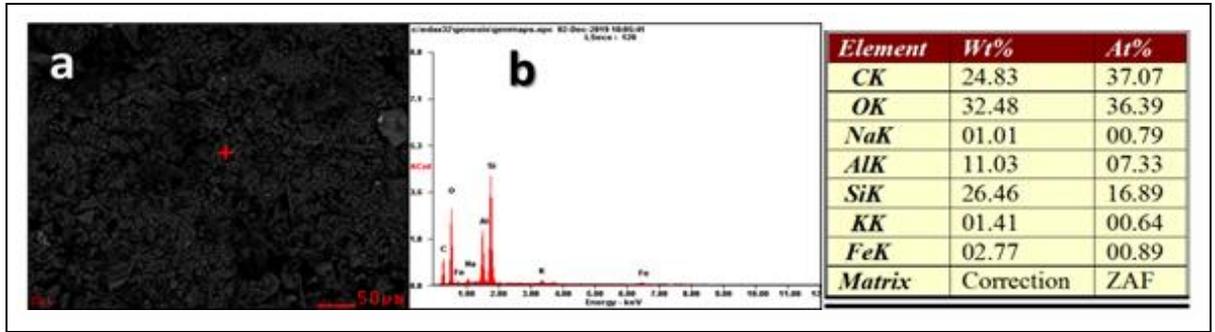


Figura 4-23: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 2 de lapilli.

La Figura 4-24, obtenida del estudio en el SEM de la muestra de lapilli presenta: a) Imagen de electrones secundarios mostrando los cristales del lapilli; b) espectro composicional de partículas de los cristales del lapilli compuesta principalmente por sílice (SiO_2), oxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de calcio (OCa) y óxido de sodio y potasio ($\text{ONa}_2\text{-OK}_2$).

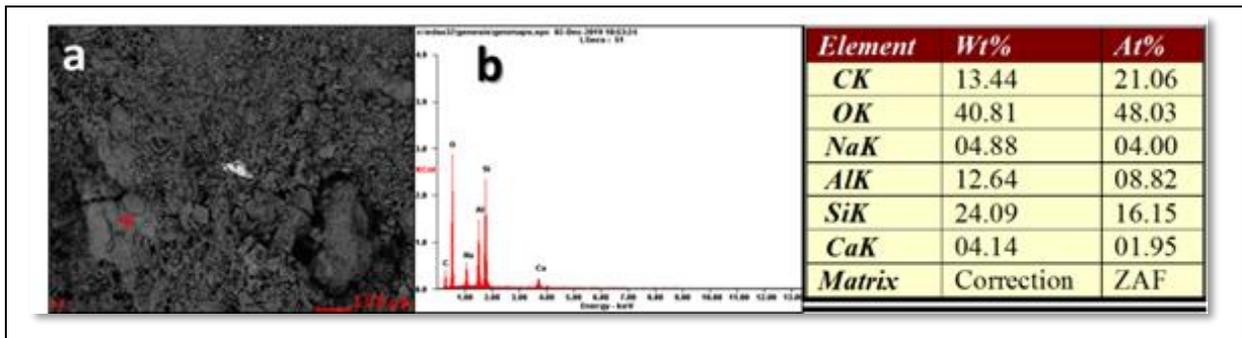


Figura 4-24: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 3 de lapilli.

En la Figura 4-25, se muestra la imagen de una partícula de cobre en una muestra de lapilli la figura presenta la siguiente descripción: a) Imagen de electrones secundarios mostrando la partícula de cobre (Cu) que sobresale por su imagen blanca ya que no absorbe los electrones; b) espectro composicional de partícula cristalina de cobre (Cu).

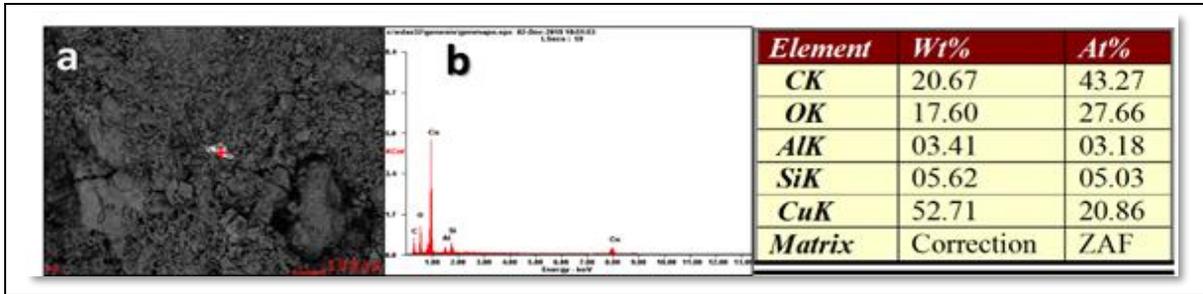


Figura 4-25: Imágenes obtenidas del estudio en el SEM de la muestra 3 de lapilli con una partícula de cobre.

La muestra de roca de lapilli se clasifica como roca vítrica, debido a que no se observaron en la petrografía ni en el ensayo de SEM líticos, ni granos. Teniendo en cuenta el triángulo de clasificación de la roca que se muestra a continuación en la Figura 4-26.

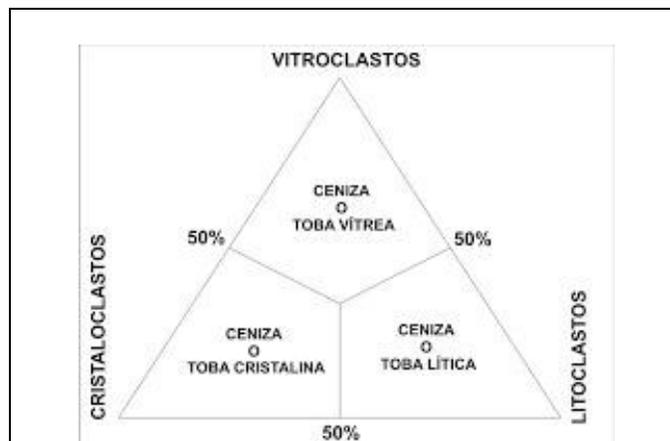


Figura 4-26: Triángulo de clasificación de la roca.

4.2.14.3 Difracción de Rayos X

Se realizó el análisis de difracción de rayos X al material piroclástico y de este se obtuvo un estimado cualitativo el cual se correlaciono para tener unas proporciones aproximadas de la composición del material, se identifica que el material está compuesto principalmente por cuarzo con un porcentaje mayor al 50%, luego siguen los feldespatos con un porcentaje entre el 15% y 30%, también hay presencia de goetita entre un 5% y 15%, y por último hay trazados que son minerales inferiores al 5% como lo son los anfíboles, calcita, caolinita,

dolomita, halita, hematita y lepidocrocita. La Figura 4-27 muestra la imagen de los resultados gráficos del ensayo de difracción de rayos x de la muestra de lapilli.

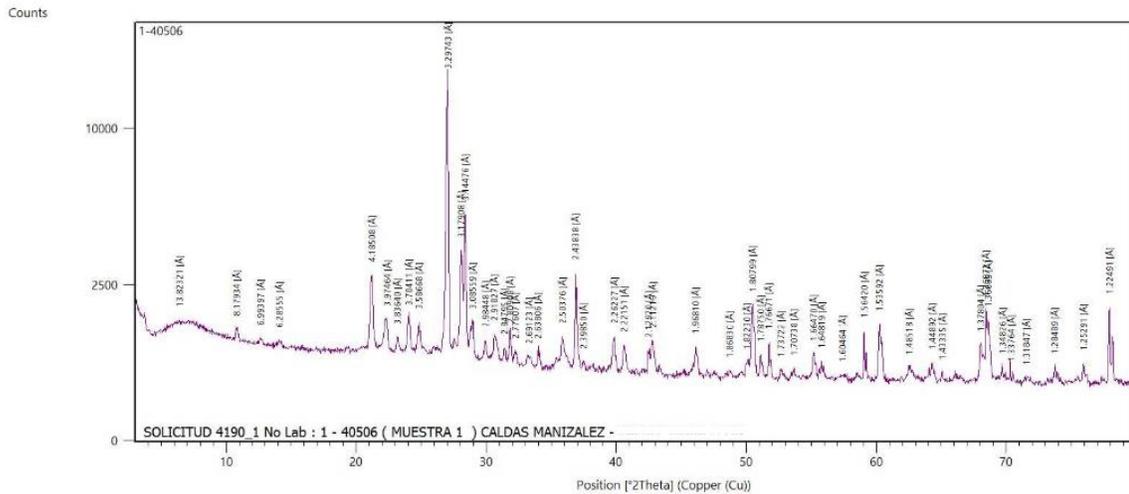


Figura 4-27: Resultados gráficos del ensayo de difracción de rayos x.

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos que permitieron determinar las propiedades mineralógicas de los agregados piroclásticos se hace el siguiente análisis referente al tipo de reacción de la muestra de lapilli con el concreto, que según la composición podría ser una reacción álcali-sílice, esto debido a que la muestra se compone de sílice proveniente del cuarzo microcristalino y las partículas de ceniza Paulon (1981). Minerales como el feldespato, alcalinos y anfíboles que se encuentran en menor abundancia también aportan contenido de sílice, autores como (Cavalcante-da Silva, 2011) proponen que los feldespatos pueden liberar álcalis en la solución del concreto. Los feldespatos presentan una moderada alteración a caolinita y siritización que aportan aluminio. El sodio (Na) que genera la halita se encuentra en contenido traza, por lo tanto, es posible que aporte en menor cantidad a cualquier reacción química.

Los resultados del ensayo de difracción de rayos X se encuentran en el Anexo A de este documento, las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) se encuentra en el Anexo B y los resultados del análisis petrográfico se encuentran en el Anexo C de este documento.

A continuación, se presenta la tabla 4-15 en la cual se realiza un resumen de los resultados de los ensayos de caracterización de los agregados convencionales y los agregados

piroclásticos. Todos los resultados de los ensayos de caracterización se encuentran en el anexo D de este documento.

Tabla 4-15 Resumen de resultados de ensayos de caracterización de los agregados.

Análisis	Agregado fino		Agregado grueso	
	Arena de río	Arena Lapilli	Grava cantera	Grava Lapilli
*TM (Tamiz)	3/8"	3/8"	1 1/2"	3/4"
**TMN (Tamiz)	No. 4	No. 4	1"	3/8"
Material que pasa tamiz No. 200 (gr)	7	12	1.8	12
Impurezas orgánicas	Aceptable	No aceptable	-	-
Equivalente de arena (%)	57	81	-	-
Densidad aparente (g/cm ³)	2.58	2.21	2.56	0.85
Densidad aparente SSS (g/cm ³)	2.63	2.28	2.60	1.49
Densidad nominal (g/cm ³)	2.72	2.38	2.66	2.34
Absorción (%)	2.04	3.26	1.45	74.58
Masa unitaria suelta (kg/m ³)	1450	776	1382	316
Masa unitaria apisonada (kg/m ³)	1672	830	1503	348
Solidez (%)	8.61	40.8	0.17	12.24
Desgaste máquina Ángeles (%)	-	-	47	85
Caras fracturadas (%)	-	-	89	98
Índice alargamiento (%)	-	-	25	9
Índice aplanamiento (%)	-	-	18	17
Perdida por calcinación (%)	-	11	-	-
Expansión álcali-sílice (%)	-	0.087	-	-

*TM: Tamaño máximo. **TMN: Tamaño máximo nominal

4.3 Elaboración de mezclas de Concreto

La elaboración de mezclas de concreto se dividió en dos fases. A partir de los resultados encontrados en la fase uno donde se evaluó el comportamiento de las mezclas al adicionar el material piroclástico, se planteó la fase dos. A continuación, en la Figura 4-28, se muestran las variables del programa experimental de elaboración de mezclas de concreto.

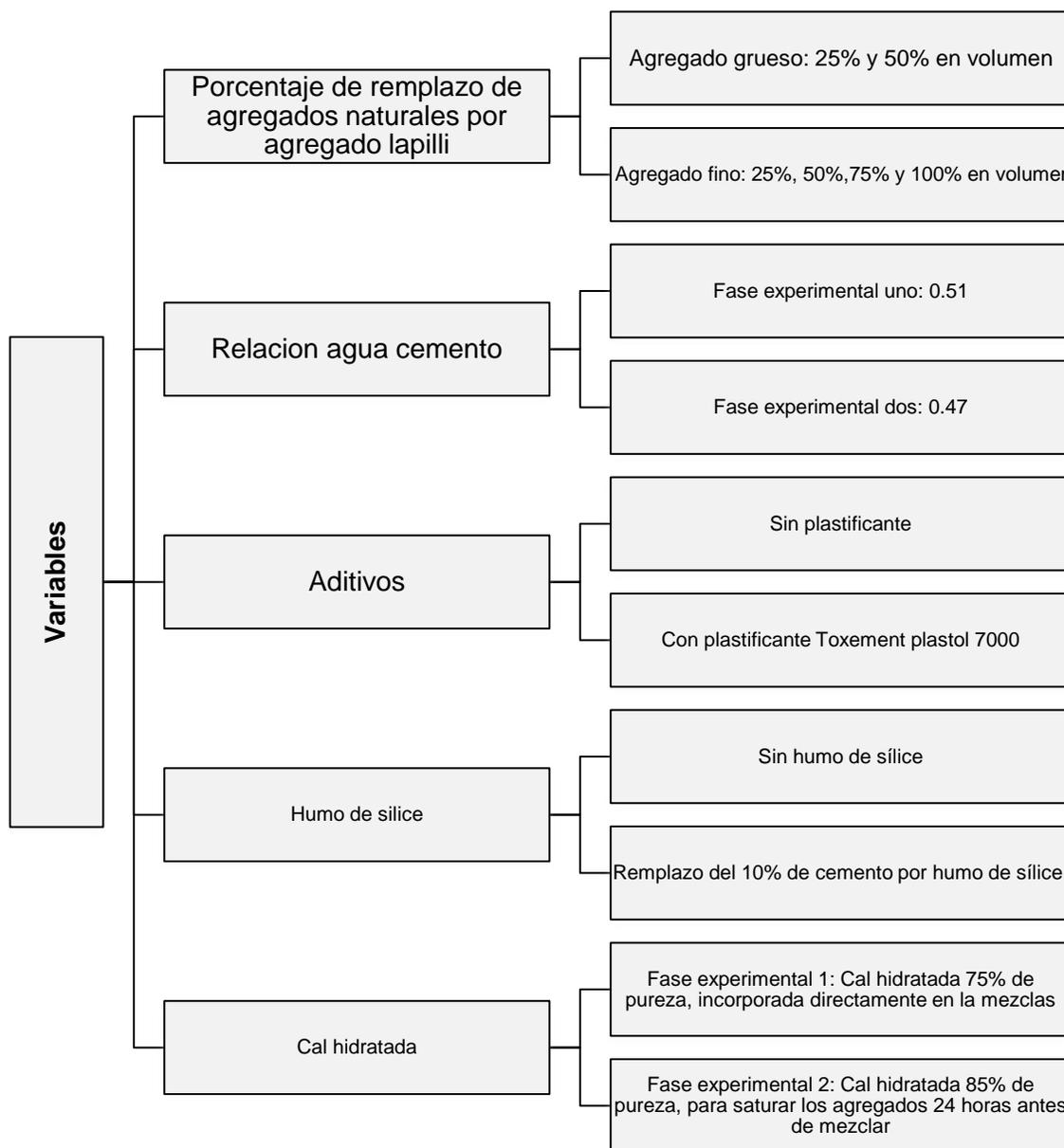


Figura 4-28: Variables proceso experimental.

En la fase uno se realizaron 8 mezclas, la mezcla control y las mezclas con diferentes proporciones de reemplazo en volumen de agregado fino y grueso, variando entre el 25% y 100%. La relación agua/cemento fue de 0.51, se utilizó cemento Argos estructural. Se hizo necesario el uso de un superplastificante para mejorar la manejabilidad de las mezclas que tenían el reemplazo de agregado piroclástico, pues se identificó que la manejabilidad era inversamente proporcional al aumento en el remplazo de agregados piroclásticos. En esta fase la cal se incorporaba directamente a las mezclas de concreto. Los especímenes de concreto se curaron en una piscina con cal hasta la fecha de ensayo.

Debido al resultado del ensayo de colorimetría en el cual el material no cumplía lo establecido por la norma técnica como se explicó anteriormente en la caracterización de los agregados, se realizaron pruebas con diferentes porcentajes de cal hidratada de uso general (75% de pureza) y se identificó que con un 10% de cal con respecto a la cantidad de agregados piroclásticos el material lograba alcanzar en el ensayo un color por debajo de 3 en la escala de colores. En la Tabla 4-16 se identifican las variables para cada mezcla en la fase uno.

Tabla 4-16 Variables experimentales fase uno en las mezclas de concreto.

Mezcla	Arena (%)	Arena lapilli (%)	Grava (%)	Grava lapilli (%)	Relación a/c	Uso de Plastificante	Humo de sílice (%)	Cal Hidratada 75% (%)
MC	100	0	100	0	0.51	No	0	0
M1	75	25	100	0	0.51	No	0	10
M2	75	25	75	25	0.51	No	0	10
M3	50	50	100	0	0.51	No	0	10
M4	50	50	75	25	0.51	No	0	10
M5	0	100	100	0	0.51	Plastol 7000	0	10
M6	0	100	75	25	0.51	Plastol 7000	0	10
M7	0	100	50	50	0.51	Plastol 7000	0	10

En la fase dos se tomaron como referencia las mezclas con mejor resultado de las propiedades mecánicas de la fase uno. En esta fase se trabajó con una relación agua cemento de 0.47 y se realizó adición de humo de sílice con el fin de evaluar su incidencia en las diferentes

propiedades, donde se elaboraron 8 mezclas con remplazo de agregado fino por agregado piroclástico y una mezcla control. Se realizó un proceso de preparación y saturación previo de los agregados piroclásticos con cal hidratada al 85% de pureza. En la Tabla 4-17 se identifican las variables para cada mezcla en la fase dos.

Tabla 4-17 Variables experimentales fase dos en las mezclas de concreto

Mezcla	Arena	Arena lapilli	Grava	Grava lapilli	Relación a/c	Uso de Plastificante	Humo de sílice (%)	Cal Hidratada 85 % (%)
	(%)	(%)	(%)	(%)				
MC2	100	0	100	0	0.47	Plastol 7000	0	0
M8	75	25	100	0	0.47	Plastol 7000	0	2
M9	50	50	100	0	0.47	Plastol 7000	0	2
M10	25	75	100	0	0.47	Plastol 7000	0	2
M11	0	100	100	0	0.47	Plastol 7000	0	2
M12	75	25	100	0	0.47	Plastol 7000	10	2
M13	50	50	100	0	0.47	Plastol 7000	10	2
M14	25	75	100	0	0.47	Plastol 7000	10	2
M15	0	100	100	0	0.47	Plastol 7000	10	2

5. Dosificación del concreto con agregado piroclástico

En este capítulo serán descritos los diseños de mezclas realizados por el método ACI y los análisis de las propiedades físico-mecánicas del concreto con agregados piroclásticos con base en los ensayos realizados en estado fresco, en estado endurecido y los ensayos de durabilidad.

5.1 Diseño de mezcla

El método empleado para la dosificación de las mezclas de concreto es el método de la American Concrete *Institute* – ACI, adicionalmente se utilizó el procedimiento alternativo propuesto por la Road Note *Laboratory* (RNL) ya que los agregados convencionales no cumplen con las especificaciones granulométricas de la norma NTC 174 y los agregados piroclásticos no cumplen las especificaciones granulométricas de la norma NTC 4045. Para determinar las proporciones de los agregados se utilizó el método gráfico de Fuller y Thompson.

De acuerdo con este método se realizaron los diseños de mezcla para una resistencia a la compresión de 21 MPa, teniendo en cuenta el factor de seguridad. La relación final de agua cemento (*a/c*) para ese diseño fue de 0.47; sin embargo, en la fase uno se aumentó la cantidad de agua puesto que las mezclas que tenían reemplazos de agregado piroclástico presentaron una baja trabajabilidad, por lo tanto, la relación *a/c* de la fase uno fue de 0.51, para la fase dos se conservó la relación agua/cemento de 0.47.

El asentamiento esperado era de 75 mm y se manejó un contenido de aire naturalmente atrapado de 1.5%. La proporción de los agregados obtenida de las curvas de Fuller y Thompson es de 48% de agregado grueso y 52% de agregado fino.

5.1.1 Nomenclatura de las mezclas de concreto

En las Tabla 5-1, se identifican los nombres de cada mezcla y los reemplazos de agregado fino y grueso convencional por agregado piroclástico, para la fase uno. Para fines prácticos las mezclas recibieron una notación alfanumérica.

Tabla 5-1 Nomenclatura de las mezclas fase uno.

ID	Mezcla	Reemplazo (%)				
		Arena de río	Arena lapilli	Grava de cantera	Grava lapilli	Humo de sílice
MC1	Mezcla de control Fase uno	100	0	100	0	0
M1	Reemplazo del 25% de arena lapilli	75	25	100	0	0
M2	Reemplazo del 25% de arena y 25% grava lapilli	75	25	75	25	0
M3	Reemplazo del 50% de arena lapilli	50	50	100	0	0
M4	Reemplazo del 50% de arena lapilli y 25% de grava lapilli	50	50	75	25	0
M5	Reemplazo del 100% de arena lapilli	0	100	100	0	0
M6	Reemplazo del 100% de arena lapilli y 25% de grava lapilli	0	100	75	25	0
M7	Reemplazo del 100% de arena lapilli y 50% de grava lapilli	0	100	50	50	0

En las Tabla 5-2, se identifican los nombres de cada mezcla y los reemplazos de agregado fino convencional por agregado piroclástico, al igual que el reemplazo de cemento por humo de sílice para la fase experimental dos. En esta fase se dio continuidad a la numeración alfanumérica de la fase uno.

Tabla 5-2 Nomenclatura de las mezclas fase dos.

ID	Mezcla	Reemplazo (%)			
		Arena de río	Arena lapilli	Grava de cantera	Humo de sílice
MC2	Mezcla de control Fase dos	100	0	100	0
M8	Reemplazo del 25% de arena lapilli	75	25	100	0
M9	Reemplazo del 50% de arena lapilli	50	50	100	0
M10	Reemplazo del 75% de arena lapilli	25	75	100	0
M11	Reemplazo del 100% de arena lapilli	0	100	100	0
M12	Reemplazo del 25% de arena lapilli con 10% de humo de sílice	75	25	100	10
M13	Reemplazo del 50% de arena lapilli con 10% de humo de sílice	50	50	100	10
M14	Reemplazo del 75% de arena lapilli con 10% de humo de sílice	25	75	100	10
M15	Reemplazo del 100% de arena lapilli con 10% de humo de sílice	0	100	100	10

En la Tabla 5-3 se muestra en resumen la dosificación para 1 m³ de concreto de acuerdo con los reemplazos que se hicieron en la fase uno.

Tabla 5-3 Dosificación de mezclas de concreto para la fase uno.

Material	Dosificación para un metro cubico de concreto (kg)							
	MC1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Cemento	369	369	369	369	369	369	369	369
Agua	188	188	188	188	188	188	188	188
Grava de cantera	850	850	638	850	638	782	587	391
Grava lapilli	-	-	71	-	71	-	65	130
Arena de río	921	691	691	461	461	-	-	-
Arena lapilli	-	197	197	394	394	848	848	848
Cal	-	20	27	39	47	85	91	98
*Aditivo	-	-	-	-	-	2.95	2.95	2.95

en la Tabla 5-4 se resume la dosificación para 1 m³ de concreto de acuerdo con los reemplazos que se hicieron en la fase dos. En el Anexo D de este documento se encuentran los cálculos realizados para los diseños de mezcla.

Tabla 5-4: Dosificación de mezclas de concreto para la fase dos.

Material	Dosificación para un metro cubico de concreto (kg)									
	MC2	M8	M9	M1	M11	M12	M13	M14	M15	0
Cemento	400	400	400	400	400	360	360	360	360	360
Humo de sílice		-	-	-	-	40	40	40	40	40
Agua	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188
Grava de cantera	852	852	852	852	789	852	852	852	852	789
Grava lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena de río	923	692	462	231	-	692	462	231	-	-
Arena lapilli	-	200	400	600	855	200	400	600	855	-
*Aditivo	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2

*** El aditivo plastificante se incorporó de acuerdo con la cantidad de cemento, el valor en kg/m³ corresponde al 0.8% del cemento en cada mezcla**

6. ANALISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados experimentales y análisis obtenidos de los ensayos de los concretos con agregados piroclásticos en los estados fresco y endurecido.

6.1 Ensayos del concreto en estado fresco

Para evaluar las propiedades del concreto en estado fresco se tuvieron en cuenta los ensayos que se encuentran en la Tabla 6-1. Estos ensayos permiten medir la capacidad del concreto de ser manejable o trabajable, la cantidad de aire atrapado en la mezcla y los cambios de temperatura por la reacción del cemento con los agregados, el agua y el medio ambiente. En las dos fases experimentales se ejecutaron los ensayos de temperatura y asentamiento, siendo que en la fase dos se realizaron adicionalmente los ensayos de contenido de aire y masa unitaria.

Tabla 6-1: Ensayos del concreto en estado fresco.

Norma	Ensayo
NTC 1377	Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión.
NTC 3357	Método de ensayo para determinar la temperatura del concreto fresco de cemento hidráulico.
NTC 396	Asentamiento del concreto de cemento hidráulico (Slump).
NTC 1926	Métodos de ensayo para determinar la densidad (Masa unitaria), el rendimiento y el contenido de aire por gravimetría del concreto.
NTC 1028	Determinación del contenido de aire en concreto fresco método volumétrico.

6.1.1 Elaboración de especímenes

Las mezclas se elaboraron con ayuda de una mezcladora para concreto, donde se realizaron mezclas de 70 litros para la fase uno y de 80 litros para la fase dos, para así fundir los especímenes necesarios para los ensayos posteriores. El curado de los especímenes se realizó en una piscina de curado con cal y se mantuvieron hasta el momento de ser ensayos. Los ensayos de las propiedades físico – mecánicas y de durabilidad se llevaron a cabo a los 7, 14 y 28 días.

Una vez realizadas las mezclas se procedió a la elaboración de especímenes para los diferentes ensayos; En la Tabla 6-2 se presenta por fases experimentales la cantidad de especímenes por cada mezcla.

Tabla 6-2: características de los especímenes elaborados para ensayo.

Fase experimental uno			
Ensayo	N° de especímenes	Edades de ensayo (días)	Dimensiones de los especímenes (cm)
Resistencia a la compresión	9	7 ,14 y 28	7.5 x 15
Resistencia a la flexión	2	28	15 x 15 x 52
Módulo de elasticidad	3	28	10 x 20 15 x 30
Absorción	2	28	7.5 x 15
Penetración Ion cloruro	2	28	10 x 20
Fase experimental dos			
Ensayo	N° de especímenes	Edades de ensayo (días)	Dimensiones de los especímenes
Resistencia a la compresión	9	7 ,14 y 28	10 x 20
Resistencia a la flexión	2	28	15 x 15 x 52
Masa Unitaria de concreto*	4	28	10 x 20
Tensión indirecta **	8	28	10 x 20
Módulo de elasticidad	3	28	10 x 20
Absorción	4	28	10 x 20
Reacción Alcali-agregado***	3	1,2,5,9,12,14	5 x 5 x 25
Penetración Ion cloruro	2	28	10 x 20

*Masa unitaria seca: Secado a temperatura entre 16 – 27°C durante 6 días y luego a 23°C durante 21 días.

**7 días en piscina de curado y luego 21 días de secado a 23°C con humedad relativa del 50%-

***Cuarto húmedo durante 24h, luego recipiente con agua durante 24h y finalmente sumergidos en hidróxido de sodio hasta los días de lecturas designados.

En la Figura 6-1 se presentan registros de la elaboración de especímenes.



Figura 6-1: Elaboración de especímenes para ensayos de concreto.

6.1.2 Temperatura

En la Figura 6-2 se observan los resultados obtenidos en el ensayo de temperatura de las mezclas de concreto realizadas en la fase uno.

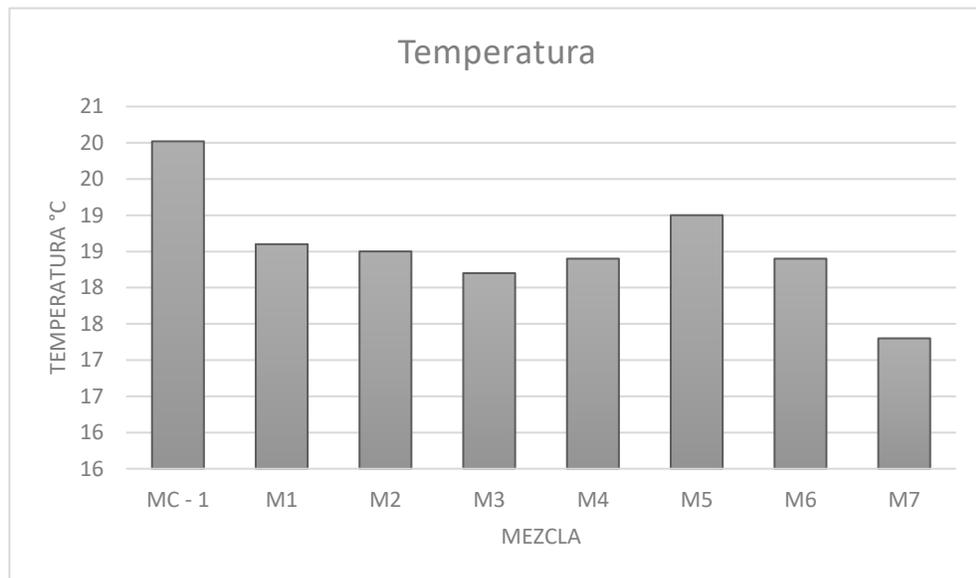


Figura 6-2: Resultados de temperatura de la mezcla de la fase uno.

Se identifica que la temperatura oscila entre los 17.3°C a 20 °C, no se evidencia una tendencia clara del comportamiento de la temperatura con respecto al porcentaje de reemplazo de agregados, sin embargo, se puede analizar que las mezclas con reemplazo de agregado convencional por agregado piroclástico presentan menor temperatura que la mezcla control; Esto puede atribuirse a la adición de cal hidratada de 75% de pureza que en dicha fase de incorporó directamente en el momento de mezclar. La cal hidratada mantiene la humedad en la mezcla de concreto por más tiempo debido a su capacidad para absorber agua lo cual posiblemente pudo ocasionar la disminución de la temperatura en las mezclas en las cuales se usó. En la Figura 6-3 se observan los resultados obtenidos en el ensayo de temperatura de las mezclas de concreto realizadas en la fase dos.

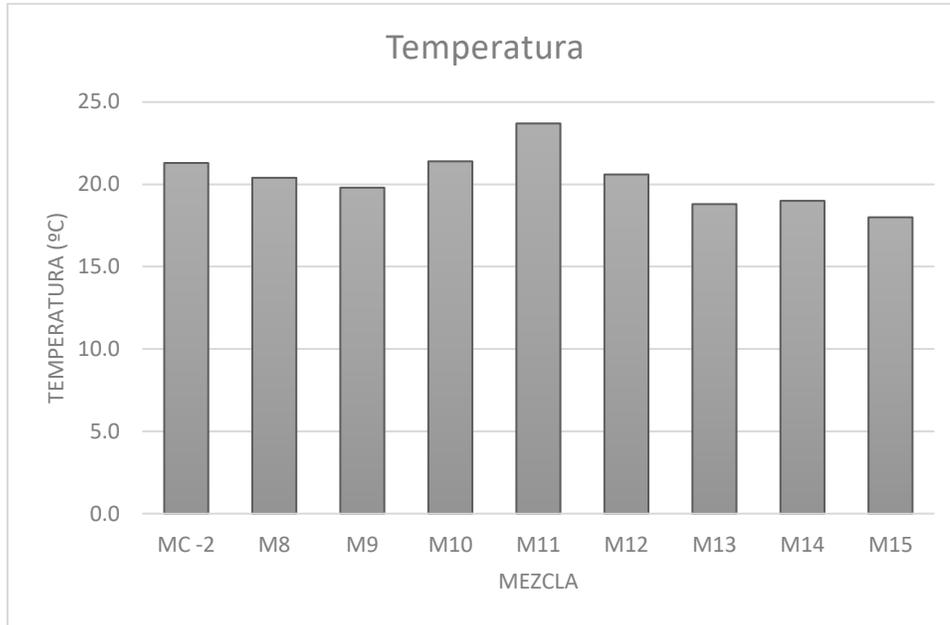


Figura 6-3: Resultados de temperatura de la mezcla de la fase dos.

En la fase dos la temperatura oscila entre 18.0°C y 23.7°C la mezcla control de la fase dos presenta mayor temperatura que la mezcla control de la fase uno, lo cual puede ser causado por la relación agua cemento que en la fase dos es menor, lo que significa que las mezclas de la fase dos, cuenta con mayor cantidad de cemento que puede generar mayor cantidad de calor al hidratarse. Las temperaturas de las mezclas con remplazo de agregados piroclásticos de la fase dos están más cercanas a las temperaturas de la mezcla de control de dicha fase, esto puede atribuirse a que en la fase dos la cal hidratada no se incorporó directamente en la mezcla, sin embargo, las mezclas sin humo de sílice (M8, M9, M10 y M11) presentan un ligero incremento de temperatura respecto a las mezclas que si lo poseen (M12, M13, M14, M15) lo cual pudo ser causado porque la adición del humo de sílice disminuye la cantidad de cemento lo cual disminuye el calor de hidratación, la disminución es muy pequeña porque la adición humo de sílice reacciona rápidamente con los compuestos del cemento dando lugar a reacciones exotérmicas que rebajan en menor medida el calor de hidratación según lo indican Rivera *et ál.* (2000) en su trabajo denominado “*Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales*”. En las Figuras 6-4 se presenta el ensayo de temperatura de las mezclas MC-1 y M12 respectivamente.



Figura 6-4: Ensayo de toma de temperatura mezclas M12 y MC-1

6.1.3 Asentamiento

El ensayo de asentamiento permite conocer la consistencia de las mezclas de concreto indicando el grado de fluidez, en la Figura 6-5 se presentan los resultados del ensayo de asentamiento de la fase uno.

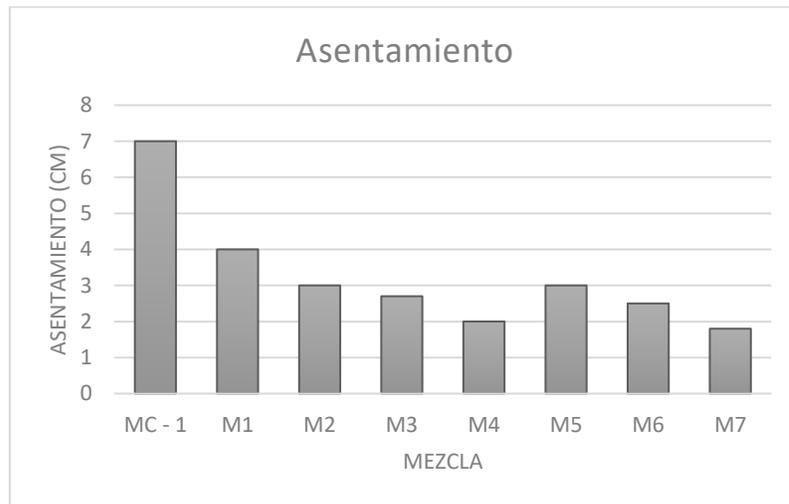


Figura 6-5: Resultados de asentamiento de la fase uno.

De acuerdo con el diseño de mezcla el resultado esperado era de 7.5 cm, sin embargo, se evidenció que el asentamiento disminuye conforme se aumenta el remplazo de agregados

convencionales por agregados piroclásticos. En la mezcla M4 el asentamiento presentó una disminución drástica de manejabilidad obteniendo un valor de 2 cm, como consecuencia se optó por usar el aditivo plastificante Plastol 7000 de la casa comercial Toxement en las mezclas M5, M6 y M7 en proporción de 0.8% con respecto a la cantidad de cemento de la mezcla. Igualmente, desde la mezcla M5 en la cual se usó el aditivo se identifica que el fenómeno de pérdida de trabajabilidad aumenta con respecto al aumento en remplazo de agregados convencionales por agregados piroclásticos pese al uso del aditivo. La Figura 6-6, muestra el ensayo de asentamiento donde se evidencia la poca trabajabilidad de la mezcla número M4 sin uso de aditivo.



Figura 6-6: Imagen del ensayo de asentamiento realizado para la mezcla 4.

En la Figura 6-7 se presenta el ensayo de asentamiento de la mezcla control MC-1 con un resultado de 7 cm.



Figura 6-7: Imagen del ensayo de asentamiento MC-1.

En la Figura 6-8 se presentan los resultados del ensayo de asentamiento obtenidos en la fase dos.

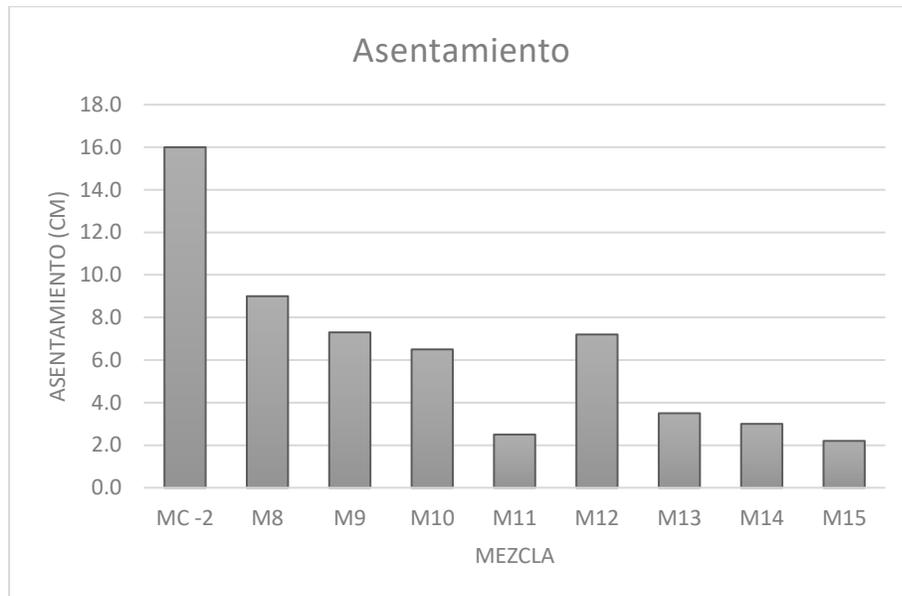


Figura 6-8: Resultados de asentamiento de la fase dos.

Al igual que en la fase uno se observa que en la fase dos la trabajabilidad disminuye a medida que se aumenta la cantidad de reemplazo del agregado fino piroclástico. Sin embargo, el valor del asentamiento en las mezclas M9 y M12 está cercano del valor esperado por el diseño de 7.5 cm, los cambios drásticos se presentaron en la mezcla con 100% de reemplazo sin humo de sílice (M11) y las tres mezclas con diferentes reemplazos de agregado fino y con adición de humo de sílice (M13, M14 y M15), donde los valores oscilan entre 2.0 cm – 3.5 cm.

Este comportamiento de la trabajabilidad en las dos fases puede estar atribuido a que los agregados piroclásticos presentan un porcentaje de absorción mayor que los agregados convencionales, las partículas de lapilli usadas como agregado fino presentan 37% más absorción que la arena de río y las partículas de lapilli usadas como agregado grueso presentan 98% más de absorción que la grava de cantera, esta característica influye en el manejo y trabajabilidad de la mezcla, la cual según los resultados encontrados es inversamente proporcional al aumento de remplazo de agregados convencionales por agregados piroclásticos. Al comparar los resultados de asentamiento de las mezclas M13, M14 y M15 que tienen el mismo volumen de remplazo que las mezclas M9, M10 y M11 respectivamente, se concluye que debido a la alta superficie específica del humo de sílice

disminuye la trabajabilidad de las mezclas con agregados piroclásticos puesto que estas mezclas presentaron asentamientos entre 3.5 cm y 2.2 cm. En la figura 6-9 se presenta el ensayo de asentamiento para la mezcla M11 donde se evidencia la poca trabajabilidad de las mezclas con humo de sílice.

Se identificó que la mejor trabajabilidad la presentó la mezcla M8 que contenía un remplazo de arena lapilli del 25%. En cuanto a las mezclas M9, M10 y M11 que contenían un remplazo de 50%, 75% y 100% del agregado piroclástico y que no contenían humo de sílice, presentaron asentamientos de 7.3 cm, 6.5 cm y 2.5 cm respectivamente, ratificando que al aumentar el remplazo de agregados disminuye la trabajabilidad.



Figura 6-9: Ensayo de asentamiento mezcla M11.

6.1.4 Contenido de aire

En el proceso de mezclado del concreto queda aire atrapado, las burbujas permanecen en la mezcla ocupando un porcentaje del volumen, la cantidad de aire atrapado puede influir

sobre las propiedades de resistencia y durabilidad del concreto. El ensayo de contenido de aire se llevó a cabo en la fase dos, en la Figura 6-10 se observan los resultados.

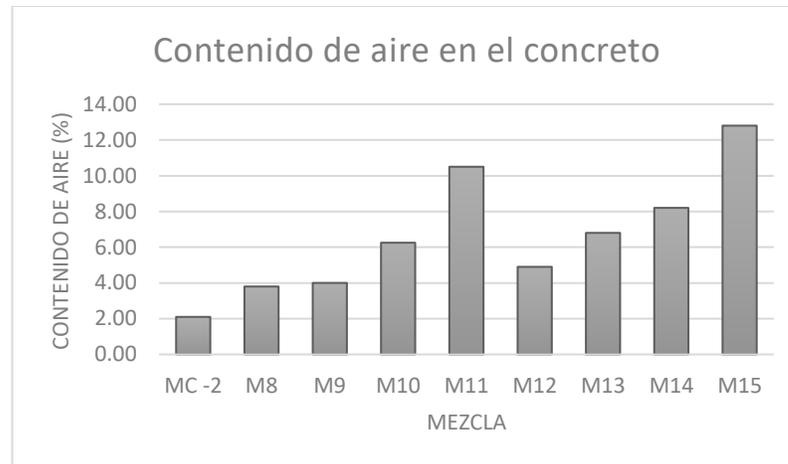


Figura 6-10: Resultados contenido de aire en concreto de la fase dos.

Se puede determinar que existe una relación directa entre el contenido de aire y el reemplazo de agregado fino convencional por agregado piroclástico, también se identificó que el humo de sílice influye en el aumento del contenido de aire atrapado en el concreto, esto se observó comparando los resultados de las mezclas con y sin reemplazo del cementante. Las mezclas M8 y M9 presentan los valores más bajos con un porcentaje cercano al 4% aproximadamente, que corresponden a los reemplazos del 25% y 50% respectivamente, aun así, superan el valor planteado por diseño del 1.5%. Las mezclas M11, M14 y M15 obtuvieron valores entre 8.2% y 12.8%, estas mezclas corresponden al reemplazo del 75% y 100% de agregado fino convencional por agregado piroclástico.

Se puede atribuir la cantidad de aire atrapado en las mezclas con agregados piroclásticos a la naturaleza porosa de los agregados que pese al proceso de saturación permiten que quede aire en la mezcla y por tal razón entre más reemplazo de agregados mayor es el porcentaje de aire. Este comportamiento es similar al que obtuvo Ortiz (2018) en su investigación de concreto liviano con escoria y ceniza volcánica donde el contenido de aire del concreto liviano era relativamente alto comparado con el contenido de aire del concreto convencional e inversamente proporcional a la resistencia a la compresión. La Figura 6-11 se presenta el desarrollo del ensayo de contenido de aire para las mezclas M11 y M13.



Figura 6-11: Ensayo de contenido de aire por método volumétrico mezcla M11 y M13.

6.1.5 Masa unitaria fresca

El ensayo de masa unitaria en estado fresco se llevó a cabo en la fase dos, en la Figura 6-12 se presentan los resultados.

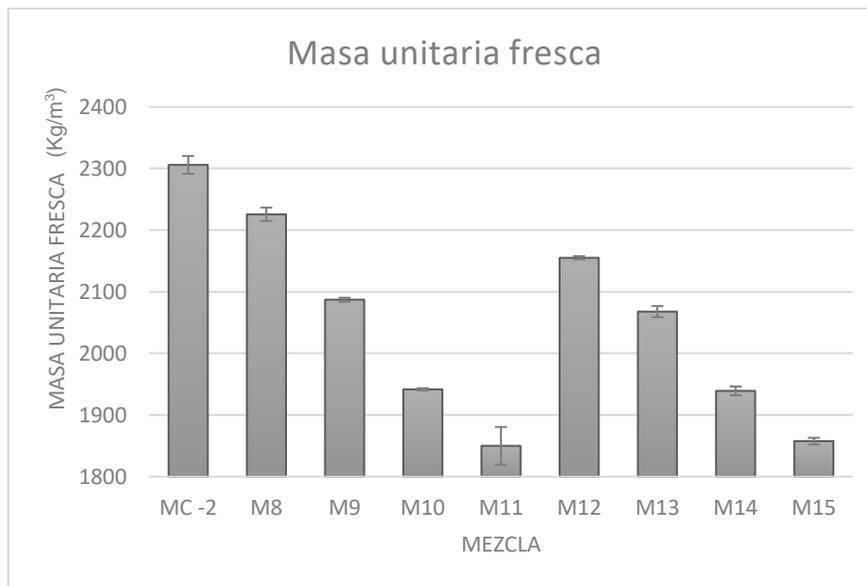


Figura 6-12: Ensayo de masa unitaria en estado fresco del concreto de la fase dos.

Se observa que la masa del concreto es inversamente proporcional al reemplazo del agregado fino convencional por agregado piroclástico. Esto se debe a la baja densidad de

los agregados piroclásticos, como se mencionó anteriormente, la arena lapilli tiene una densidad en estado SSS 13.31% menor que la densidad de la arena de río, lo que causa la disminución de la masa unitaria en estado fresco de las mezclas de concreto, teniendo densidades entre 1850 kg/m^3 y 2226 kg/m^3 , por lo cual se puede concluir que el uso de este tipo de agregados naturales genera concretos más livianos que los concretos convencionales. Se resalta que las mezclas que tienen remplazo de humo de sílice presentan un resultado de masa unitaria menor que el registrado para las mezclas sin remplazo de cementante.

En la Tabla 6-3 se presenta el resumen de los resultados de los ensayos en estado fresco para las mezclas de la fase uno.

Tabla 6-3: Resultados de los ensayos del concreto en estado fresco fase uno.

Muestra	Mezcla	Estado fresco	
		Temperatura (°C)	Asentamiento (cm)
MC - 1	Mezcla de Control. Fase uno	20.0	7.0
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	18.6	4.0
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	18.5	3.0
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	18.2	2.7
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	18.4	2.0
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	19.0	3.0
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% grava lapilli	18.4	2.5
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% grava lapilli	17.3	1.8

En la Tabla 6-4 se presentan los resultados de los ensayos en estado fresco para la fase dos.

Tabla 6-4: Resultados de los ensayos del concreto en estado fresco fase dos.

Muestra	Mezcla	Estado fresco			
		Temperatura (°C)	Asentamiento (cm)	Contenido de aire (%)	Masa unitaria (kg/m ³)
MC -2	Mezcla de control. Fase dos	21.3	16.0	2.10	2306
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	20.4	9.0	3.80	2226
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	19.8	7.3	4.00	2087
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21.4	6.5	6.25	1942
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	23.7	2.5	10.50	1850
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	20.6	7.2	4.90	2155
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	18.8	3.5	6.80	2068
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	19.0	3.0	8.20	1939
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	18.0	2.2	12.80	1858

6.2 Ensayos del concreto en estado endurecido

El concreto es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión, dependiendo de las propiedades tanto físicas, químicas y mecánicas de sus componentes y de la interacción de cada uno de ellos. Para evaluar las propiedades físico-mecánicas del concreto liviano se realizaron los ensayos estipulados en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5: Ensayos físico–mecánicos del concreto endurecido.

Código	Ensayo
NTC 673	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto
NTC 2871	Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)
NTC 4022	Masa Unitaria de concreto liviano estructural
NTC 722	Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto
NTC 4025	Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión
ASTM C642	Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete

Los ataques al concreto por diversos factores, sea climáticos, químicos, biológicos o abrasivos se deben controlar con el fin de evitar daños a las diferentes estructuras, por tal motivo es importante evaluar estas propiedades de durabilidad para permitir así un buen servicio del elemento en función. En la Tabla 6-10 se señalan los ensayos que se hicieron para cada una de las mezclas de concreto y que permite evaluar la capacidad del concreto para mitigar el daño ante la presencia de iones de cloruro.

Tabla 6-6: Ensayos de durabilidad realizados al concreto con agregados piroclásticos.

Código	Ensayo
ASTM C1202	Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration

6.2.1 Ensayo de resistencia a compresión

En la Figura 6-13 se puede observar el resultado de los ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14, y 28 días de la fase uno, los resultados muestran que la resistencia a la compresión es inversamente proporcional al reemplazo de agregados convencionales por los agregados piroclásticos.

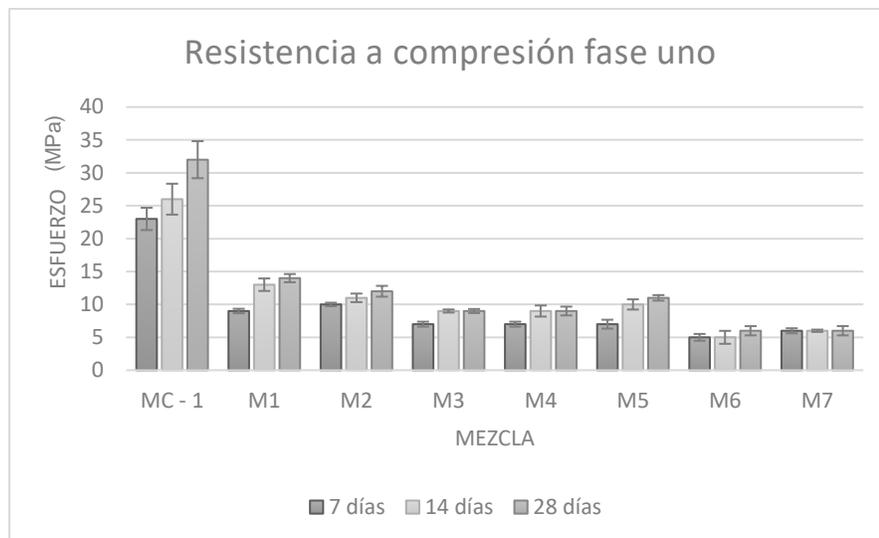


Figura 6-13: Resultados de resistencia a compresión, fase uno.

En esta fase la resistencia a la compresión de las mezclas con agregados piroclásticos disminuyó considerablemente con respecto a la resistencia de la mezcla de control, posiblemente atribuido a que no se realizó mediante hidrólisis el proceso para reducir la acidez de los agregados piroclásticos.

Teniendo en cuenta los resultados de la fase uno se puede analizar que en las mezclas con reemplazo del 25% de agregados finos (M1) la resistencia a la compresión se reduce en un 56.25% respecto a la mezcla de control (MC-1), a su vez la mezcla con reemplazo del 25% de agregado fino y 25% de agregado grueso (M2) la resistencia a la compresión se redujo en un 62.5% en proporción a la mezcla de control.

En las mezclas donde se reemplazó el agregado grueso es evidente que el material piroclástico posee características que lo hacen liviano, pero poco resistente ya que estas partículas se disgregan con facilidad por la cantidad de poros y por las características conferidas por el material parental, que en este caso es roca volcánica extrusiva.

En la Figura 6-14, se observan las partículas de materiales piroclásticos en el concreto y los tipos de falla de los diferentes ensayos de resistencia a la compresión de esta fase.



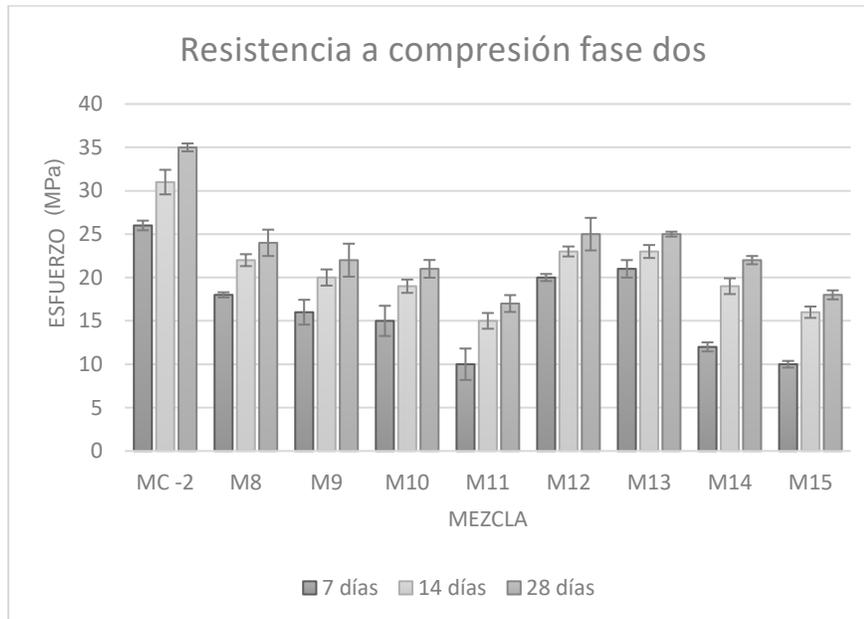
Figura 6-14: Ensayo de compresión, para las siguientes mezclas: MC, M1, M2, M3, M4, M4, M6 y M7.

Se puede analizar que las partículas de los agregados piroclásticos presentaron buena adherencia con la pasta de cemento esto se debe a la superficie áspera y porosa adicional a la configuración de los agregados piroclásticos que se estudió con los ensayos de caras fracturadas, alargamiento y aplanamiento. En la Tabla 6-7 se encuentra un resumen de los resultados del ensayo de compresión a las diferentes edades de falla.

Tabla 6-7: Resultados de los ensayos de compresión para la fase uno.

Mezcla	Compresión					
	7 días (MPa)	Desviación estándar (7 días)	14 días (MPa)	Desviación estándar (14 días)	28 días (MPa)	Desviación estándar (28 días)
MC - 1	23	1.69	26	2.35	32	2.81
M1	9	0.34	13	0.95	14	0.62
M2	10	0.26	11	0.65	12	0.83
M3	7	0.38	9	0.24	9	0.30
M4	7	0.38	9	0.84	9	0.67
M5	7	0.68	10	0.78	11	0.42
M6	5	0.52	5	0.98	6	0.70
M7	6	0.38	6	0.17	6	0.71

En la fase dos se cambió el procedimiento para disminuir la acidez del agregado lapilli exponiéndolo a un periodo de saturación durante 24 horas en una solución de agua con cal hidratada al 85%, donde la cantidad de cal utilizada para cada solución dependía de la masa del agregado fino lapilli en cada diseño de mezcla, que correspondía al 2% del peso total. Una vez culminado este periodo se retiraba el agregado y se extendía en una superficie plana y se dejaba secar a temperatura ambiente para lograr un material en estado SSS el cual luego se utilizaría en cada una de las mezclas. Los resultados de los ensayos a compresión de la fase dos se presentan en la Figura 6-15.

**Figura 6-15:** Resultados de resistencia a compresión, de la fase dos.

En la fase dos es evidente el cambio que se presentó en la resistencia a compresión respecto a la fase uno, donde comparando la mezcla M1 de la fase uno y la M8 de la fase dos, las cuales tienen el mismo reemplazo de agregado fino (25%), se observa que la resistencia a la compresión aumentó en un 71%, mejorando de manera satisfactoria los resultados obtenidos, caso similar ocurrió con el reemplazo del 50% y 100% de agregado fino convencional por agregado fino piroclástico que hacen referencia a las mezclas M3 y M5 de la fase uno en contraste con las mezclas M9 y M10 de la fase dos.

Se observa que las mezclas con reemplazos del 25%, 50% y 75% de agregado fino (M8, M9, M10, M12, M13 y M14) cumplen con la resistencia de diseño planteada inicialmente de 21 MPa a los 28 días. También se evidencia que las mezclas que incluyen reemplazo del material cementante por humo de sílice (M12, M13, M14 y M15) presentaron un leve incremento en la resistencia en proporción a sus pares (M8, M9, M10 y M11) esto puede atribuirse a la acción del humo de sílice que al reaccionar con el hidróxido de calcio produce mayor cantidad de silicato de calcio hidratado lo cual mejora las propiedades de resistencia e impermeabilidad del concreto como lo indican Kosmatka et ál. (2004) en su libro “Diseño y control de mezclas de concreto”. En esta fase dos también se observa que a medida que aumenta el reemplazo de agregado fino en cada mezcla la resistencia disminuye, hay que recordar que en esta fase se realizaron mezclas reemplazando únicamente el agregado fino y que se optó por reemplazar el 10% del cemento por humo de sílice (Tabla 6-8).

Tabla 6-8: Resultados de los ensayos de compresión para la fase dos.

Mezcla	Compresión					
	7 días (MPa)	Desviación estándar (7 días)	14 días (MPa)	Desviación estándar (14 días)	28 días (MPa)	Desviación estándar (28 días)
MC -2	26	0.56	31	1.42	35	0.46
M8	18	0.30	22	0.69	24	1.52
M9	16	1.43	20	0.93	22	1.90
M10	15	1.74	19	0.77	21	1.02
M11	10	1.81	15	0.91	17	0.97
M12	20	0.41	23	0.58	25	1.88
M13	21	1.01	23	0.75	25	0.29
M14	12	0.52	19	0.91	22	0.48
M15	10	0.39	16	0.65	18	0.52

Analizando los resultados de los ensayos de la resistencia a compresión del concreto se puede identificar que, debido a la acidez de los agregados piroclásticos, las mezclas de la fase uno de la M1 a la M7 presentó resistencias a la compresión muy bajas entre 6 MPa y 14 MPa. En la fase dos las mezclas de la M8 a la M15 presentaron resistencias a la compresión mayores entre 17 MPa y 25 MPa valores con los cuales pueden ser considerados como concretos estructurales. Se concluye que la resistencia a la compresión disminuye a medida que se incrementa el remplazo de agregados piroclásticos, atribuido a que los agregados piroclásticos presentan un comportamiento deleznable.

En los ensayos de desgaste en máquina de los ángeles y de solidez los resultados de los agregados piroclásticos son desfavorables, ya que se presenta un desgaste del 85% una pérdida por reacción a los sulfatos del 41%. Este comportamiento de los agregados piroclásticos influyó en la disminución de la resistencia a la compresión. Adicionalmente se analiza que la incorporación de humo de sílice a la mezcla aumenta las propiedades de resistencia, sin embargo, el aumento es en promedio del 7%, mientras que la pérdida de trabajabilidad promedio al incorporar el humo de sílice es del 39.3%

Al comparar los resultados obtenidos en la fase dos de la investigación con los estudios consultados en el estado del arte, se puede establecer que el concreto liviano con agregados piroclásticos (lapilli) alcanza resistencias cercanas a las alcanzadas en los concretos livianos con remplazo de agregado grueso por piedra pómez siendo este un agregado natural de origen volcánico al igual que el lapilli, en la investigación de Morales F, et ál., (2018) en la que remplazó el agregado grueso por piedra pómez, el valor de resistencia a la compresión a los 28 días fue de 28.2 MPa, por otro lado en el análisis de Ayala y Urrego, (2020) de concreto liviano con piedra pómez extraída de Flandes Tolima se alcanzó el valor de resistencia a la compresión a los 28 días de 26.24 MPa.

6.2.2 Ensayo de resistencia a flexión

La Figura 6-16, presenta los resultados obtenidos en la fase uno del ensayo de resistencia a la flexión que se realizó a los 28 días de edad del concreto, utilizando una viga simple con carga en los tercios medios.

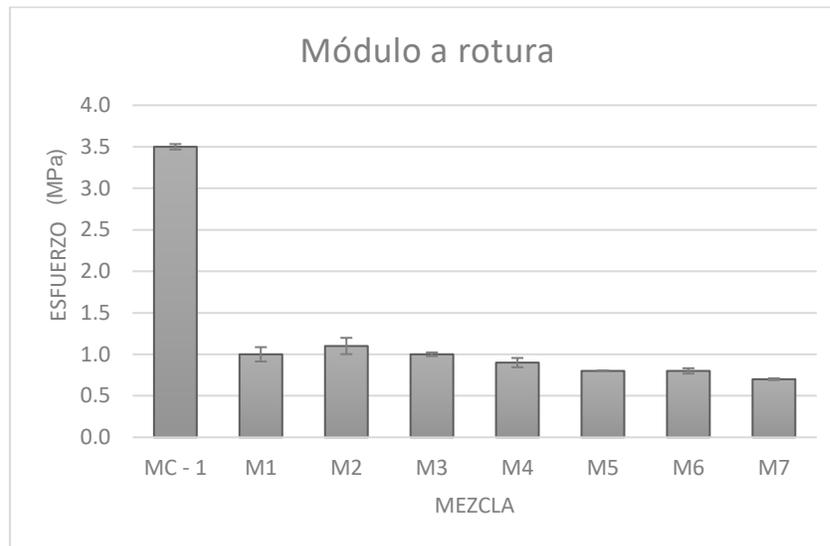


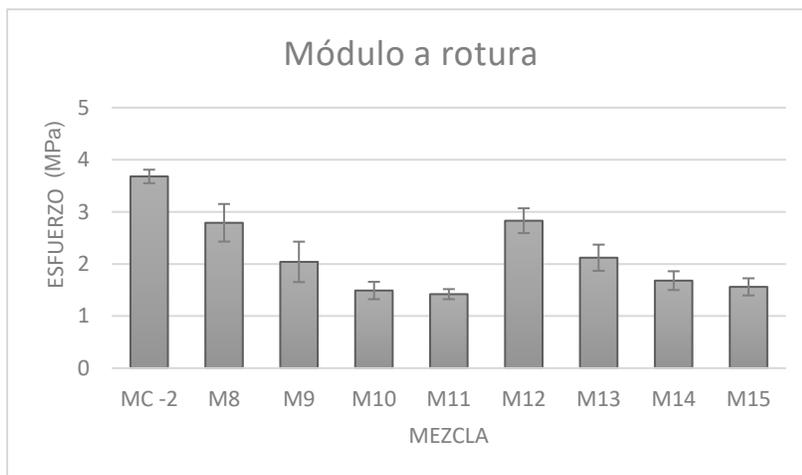
Figura 6-16: Resultados de resistencia a flexión, fase uno.

En estos resultados se repite el patrón del ensayo de resistencia a compresión, donde cada vez que se aumentaba el reemplazo de agregado fino y grueso convencional por agregados piroclásticos el módulo de rotura decrece. En la fase uno, la mezcla control (MC-1) presenta el valor máximo con un módulo de rotura de 3.5 MPa, mientras que el menor resultado se obtuvo en la mezcla con reemplazo de agregado fino del 100% y grueso del 50% (M7) con tan solo 0.7 MPa (Tabla 6-9).

Tabla 6-9: Resultados de los ensayos de flexión para la fase uno.

Muestra	Mezcla	Edad (días)	Carga (N)	Promedio (MPa)
MC - 1	Mezcla de Control. Fase uno	28	28325.0	3.5
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	28	8210.0	1.0
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	28	8972.5	1.1
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	28	7095.0	1.0
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	28	7085.0	0.9
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	28	6675.0	0.8
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	28	6125.0	0.8
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	28	5825.0	0.7

La Figura 6-17 muestra los resultados de resistencia a flexión de la fase dos ejecutados a los 28 días de edad del concreto.

**Figura 6-17:** Resultados de resistencia a flexión, fase dos.

Se observa que al mejorar las condiciones de acidez del agregado piroclástico fino (lapilli) y con la relación agua cemento de 0.47 los resultados mejoraron con respecto a los resultados de la fase uno. Se mantiene la tendencia que el remplazo de agregado fino y la resistencia a la flexión son inversamente proporcionales como se presentó en la fase uno. (Tabla 6-10). De la Cruz *et ál.*, (2015) en el estudio de concreto ligero con cáscara de nuez analizaron tres mezclas que contenían 15% de cáscara de nuez y adición del 10 %, 15%

y 20% de humo de sílice obteniendo valores de módulo de rotura de 1.50 MPa para la primera mezcla (15% de cáscara de nuez y 10% de humo de sílice), 1.72 MPa para la segunda mezcla (15% de cáscara de nuez y 15% de humo de sílice) y 1.76 MPa para la tercera mezcla (15% de cáscara de nuez y 20% de humo de sílice). Por otro lado, Ortiz (2018) Investigó un concreto estructural liviano con escoria y ceniza volcánica donde realizaron 4 mezclas que alcanzaron valores de módulo de rotura de 2.9 MPa, 3.1 MPa, 3.4 MPa y 4.1MPa. En conclusión, los resultados obtenidos en la fase dos presentan la misma tendencia que los resultados de Ortiz (2018) y de De la Cruz *et ál.*, (2015). En la tabla 6-10 se presentan los resultados de módulo de rotura para la fase dos.

Tabla 6-10: Resultados de los ensayos de flexión para la fase dos.

Muestra	Mezcla	Edad	Carga (N)	Módulo de Rotura (MPa)
MC - 2	Mezcla de control. Fase dos	28	29250	3.68
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	28	22000	2.79
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	28	16200	2.04
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	28	11747	1.49
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	28	11296	1.42
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	22600	2.83
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	16775	2.12
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	13214	1.68
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	12223	1.56

En la Figura 6-18, se observa el montaje que se utilizó para llevar a cabo este ensayo tomando como ejemplo la mezcla con reemplazo del 75% de agregado fino (M9).



Figura 6-18: Ensayo de flexión en los tercios medios, mezcla M9.

6.2.3 Ensayo de Módulo de elasticidad.

En la Figura 6-19 se presentan los resultados del ensayo de módulo elástico para la fase uno. Como el resultado de este ensayo está enlazado con el esfuerzo a compresión de cada una de las mezclas, se reitera el comportamiento inversamente proporcional entre la variable de reemplazo y la relación entre esfuerzo y deformación unitaria.

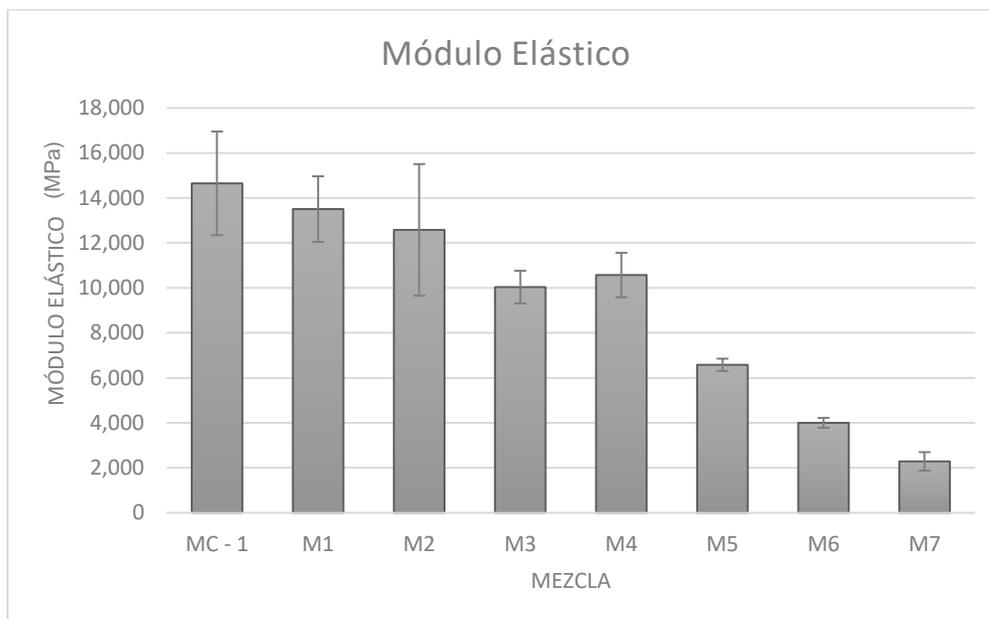


Figura 6-19: Resultados de módulo de elasticidad, para la fase uno.

En la fase uno la mezcla control tiene un módulo de elasticidad de 14531 MPa, siendo el valor más alto y punto de referencia para las demás mezclas, por otro lado, el valor decrece en cada una de las mezclas hasta obtener un módulo de elasticidad de 2286 MPa en la mezcla con reemplazo del 100% de agregado fino y 50% de reemplazo de agregado grueso (M7), lo que representa una pérdida del 84% de rigidez.

En la Figura 6-20 se presenta el montaje utilizado para llevar a cabo el ensayo de módulo elástico en concreto con la mezcla que tiene un reemplazo del 25% de agregado fino (M1).



Figura 6-20: Ensayo del módulo elástico, para la mezcla M1.

En la Figura 6-21 se presentan los resultados de módulo de elasticidad de la fase dos, se resalta que los resultados de rigidez son superiores a los obtenidos en la fase uno. En la fase dos ninguna de las mezclas con agregados piroclásticos supera la rigidez de la mezcla de control (MC-2), donde se identifica que el módulo de elasticidad disminuye a medida que se aumenta la proporción de reemplazo.

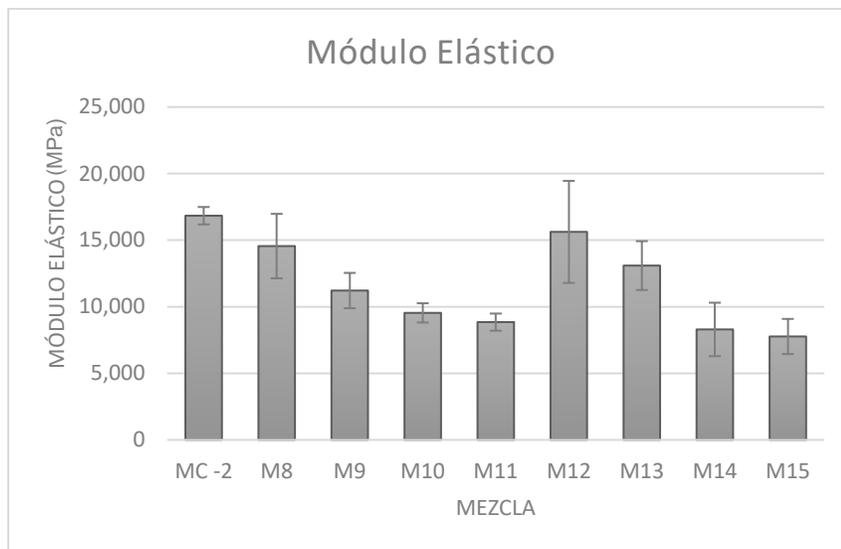


Figura 6-21: Resultados de módulo de elasticidad, fase dos.

Analizando los resultados de las mezclas con humo de sílice (M12 y M13) con reemplazo del 25% y el 50% de agregado fino respectivamente, se identifica que el módulo de elasticidad está por encima de los registrados para las mezclas sin humo de sílice (M8 y M9), también se observa que en las mezclas con humo de sílice a partir del 75% de reemplazo de agregado fino por agregado piroclástico se pierde rigidez.

Existen varios factores que pueden afectar el módulo de elasticidad uno de ellos tiene relación con los materiales que componen la mezcla y otro con el comportamiento de los materiales en conjunto haciendo parte de la mezcla, entre esos factores se podrían asociar a los resultados de esta investigación la porosidad de los agregados piroclásticos, generalmente los materiales porosos presentan módulos de elasticidad muy bajos que afectan el módulo de elasticidad de la mezcla. En conclusión, los resultados de módulo de elasticidad encontrados en la fase dos para las mezclas con agregados piroclásticos se encuentran dentro del rango estimado para concretos livianos que esta entre 7000 MPa y 17000 MPa.

En la Figura 6-22 se observa el montaje utilizado para llevar a cabo el ensayo de módulo elástico en concreto con la mezcla que tiene un reemplazo del 75% de agregado fino (M9).



Figura 6-22: Ensayo de módulo elástico, mezcla M9.

6.2.4 Cálculo de correlación entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo a compresión.

Se define K como la correlación existente entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión. En la NSR-10 en el numeral CR8.5.1 se encuentran algunos valores de K recomendados para ser usados cuando no se cuenta con los valores experimentales, y que relacionan el valor de K con el tipo de agregado que se utiliza para la elaboración de la mezcla: para agregados gruesos de origen ígneo se estima un K de 5.500, para agregado grueso de origen metamórfico se estima un K de 4.700, para mezclas con agregado grueso de origen sedimentario se estima 3.600, y recomienda valor experimental a nivel nacional de K de 3.900. Se resalta que los valores experimentales fueron obtenidos para concretos convencionales y en el caso de los concretos livianos de acuerdo con lo estipulado por la NSR-10 en el numeral C.8.6.1. se debe emplear el factor de modificación lambda (λ) como multiplicador de $\sqrt{f'c}$.

En la Tabla 6-11 se presentan las relaciones entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión para las mezclas de la fase uno. La correlación entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión se determinó usando los valores experimentales, con el uso de la ecuación 6.1:

$$E_c = K\lambda\sqrt{f'_c} , \quad (6.1)$$

donde:

E_c: es el módulo de elasticidad en (MPa).

λ: Factor multiplicador para concretos livianos (numeral 6.8.6.1 de la NSR-10).

K: Factor de correlación entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión.

f'_c: es el esfuerzo de compresión que se obtuvo a los 28 días (MPa).

Tabla 6-11: Relaciones entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión en la fase uno.

Muestra	Mezcla	f' _c (MPa)	Módulo Elástico (MPa)	Lambda λ	K Correlación E _c y f' _c
MC - 1	Mezcla de Control. Fase uno	32	14648	1.00	2589.4
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	14	13504	0.98	3682.8
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	12	12579	0.96	3782.5
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	9	10035	0.92	3635.9
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	9	10572	0.90	3915.6
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	11	6580	0.92	2156.5
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% grava lapilli	6	4000	0.90	1814.4
0.3M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% grava lapilli	6	2286	0.88	1060.5

En la Tabla 6-12 se presentan las relaciones entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión para las mezclas de la fase dos. La correlación se determinó usando los valores experimentales, con el uso de la ecuación 6.1

Tabla 6-12: Relaciones entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión en la fase dos.

Muestra	Mezcla	f'c (MPa)	Módulo Elástico (MPa)	Lambda λ	K
					Correlación Ec y f'c
MC -2	Mezcla de control. Fase dos	35	16838	1.0	2846.1
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	24	14557	0.98	3032.1
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	22	11217	0.96	2491.0
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21	9540	0.94	2214.7
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	17	8847	0.92	2332.4
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	25	15624	0.98	3188.6
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	25	13091	0.96	2727.4
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	22	8297	0.94	1881.8
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	18	7768	0.92	1990.1

6.2.5 Cálculo de correlación entre el módulo de rotura y el esfuerzo a compresión.

Según lo estipulado en la ecuación C.9-10 del numeral C9.5.2.3 de la NSR 10 el valor de K para relacionar esfuerzo de compresión y módulo de rotura es de 0.62, dicha correlación se calculó haciendo uso de los datos experimentales de las mezclas en las dos fases, por medio de la fórmula:

$$MR = K\lambda\sqrt{f'c} \quad (6.2)$$

donde:

MR: es el módulo de rotura (MPa)

K: Factor de correlación entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de compresión.

λ : Factor multiplicador para concretos livianos (numeral 6.8.6.1 de la NSR-10).

f'c: es el esfuerzo de compresión que se obtuvo a los 28 días (MPa).

En la Tabla 6-13 se presentan los resultados de los cálculos de correlación entre el esfuerzo a compresión y el módulo de rotura partiendo de los valores obtenidos experimentalmente para las mezclas de la fase uno.

Tabla 6-13: Relaciones entre el esfuerzo de compresión y el módulo de rotura en la fase uno.

Muestra	Mezcla	f'c (MPa)	MR (MPa)	Lambda λ	K correlación MR y f'c
MC - 1	Mezcla de Control. Fase uno	32	3.5	1.00	0.62
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	14	1.0	0.98	0.27
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	12	1.1	0.96	0.33
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	9	1.0	0.92	0.36
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	9	0.9	0.90	0.33
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	11	0.8	0.92	0.26
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% grava lapilli	6	0.8	0.90	0.36
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% grava lapilli	6	0.7	0.88	0.32

En la Tabla 6-14 se presentan las relaciones entre el módulo de rotura y el esfuerzo de compresión para las mezclas de la fase dos. La correlación se determinó usando los valores experimentales, con el uso de la ecuación 6.2.

Tabla 6-14: Relaciones entre el esfuerzo de compresión y el módulo de rotura en la fase dos.

Muestra	Mezcla	f'c (MPa)	MR (MPa)	Lambda λ	K correlación MR y f'c
MC -2	Mezcla de control. Fase dos	35	3.68	1.0	0.62
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	24	2.79	0.98	0.58
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	22	2.04	0.96	0.45
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21	1.49	0.94	0.35
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	17	1.42	0.92	0.37
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	25	2.83	0.98	0.58
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	25	2.12	0.96	0.44
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	22	1.68	0.94	0.38
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	18	1.56	0.92	0.40

6.2.6 Absorción, poros y vacíos

La Figura 6-23 representa el porcentaje de absorción de las mezclas en la fase uno. Los resultados del ensayo muestran un comportamiento directamente proporcional entre el porcentaje de remplazo y la absorción, ya que a medida que aumenta el uso de agregado piroclástico va aumentando la capacidad de absorción del concreto.

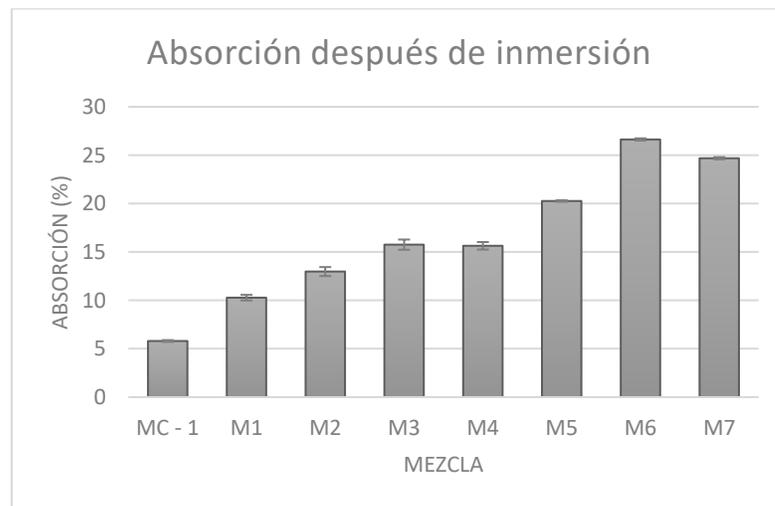


Figura 6-23: Resultados absorción después de inmersión, fase uno.

En la mezcla de control (MC) el porcentaje de absorción es del 5.8%, este porcentaje aumenta hasta la mezcla M6 que tiene un reemplazo del 100% de agregado fino y un 25% de reemplazo de agregado grueso obteniendo un resultado de 26.6% de absorción, donde triplica el valor del concreto convencional, sin embargo, se presenta un valor atípico con la mezcla M7 ya que esta debería presentar un mayor porcentaje de absorción puesto que esta mezcla tiene un reemplazo de agregado fino del 100% y de agregado grueso del 50%, esto puede estar relacionado con la porción más gruesa, ya que este agregado estaba compuesto mayoritariamente por partículas de menor tamaño (4 mm) las cuales tienen menor absorción que las partículas más gruesas (9.5 mm).

En la Figura 6-24 se presentan los resultados de absorción de la fase dos. Como en esta fase solo se trabajó con reemplazos de agregado fino por agregado piroclástico los valores de porcentaje de absorción disminuyen considerablemente respecto a los reportados en la fase uno.

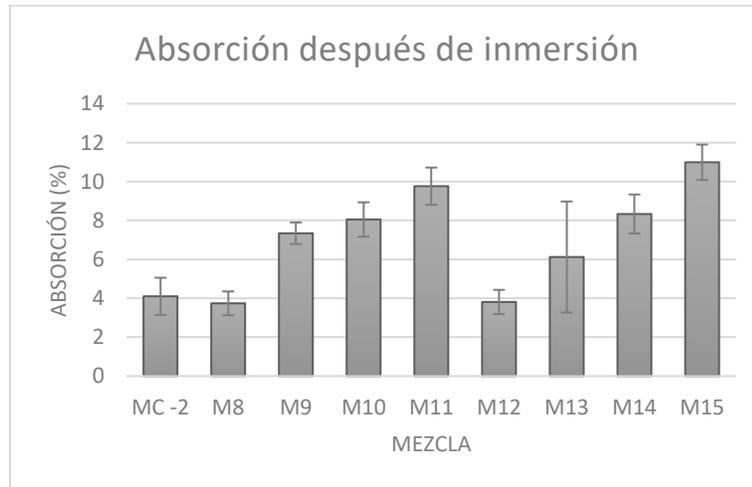


Figura 6-24: Resultados absorción después de inmersión, fase dos.

Igualmente se presenta la relación directa entre el aumento del reemplazo de agregado normal por agregado piroclástico y la absorción. La mezcla M13 que contiene humo de sílice presenta una absorción menor que la mezcla M9 que no contiene humo y que tiene el mismo reemplazo de agregados piroclásticos, podría asociarse ese comportamiento al alto grado de empaquetamiento que el humo de sílice genera en la pasta de cemento, sin embargo, no es un comportamiento constante en las otras dos mezclas con la adición del humo. De este resultado se puede concluir que la absorción que presentan los agregados piroclásticos influye en la capacidad de absorción del concreto, como se sabe la porción

en volumen de los agregados representa aproximadamente el 50% de la mezcla, lo que indica que si los materiales granulares que se utilizan cambian sus características drásticamente entonces estas afectan directamente al concreto. Como los agregados piroclásticos son de naturaleza volcánica al salir efusivamente del volcán y al entrar en contacto con la atmósfera, forman un gran número de poros y/o vacíos, que en consecuencia generan mayor capacidad de retención de agua respecto a los agregados convencionales.

La relación de poros y vacíos es directamente proporcional al incremento en el volumen de reemplazo de agregados convencionales por agregados piroclásticos, tal como se puede evidenciar en la Figura 6-25.

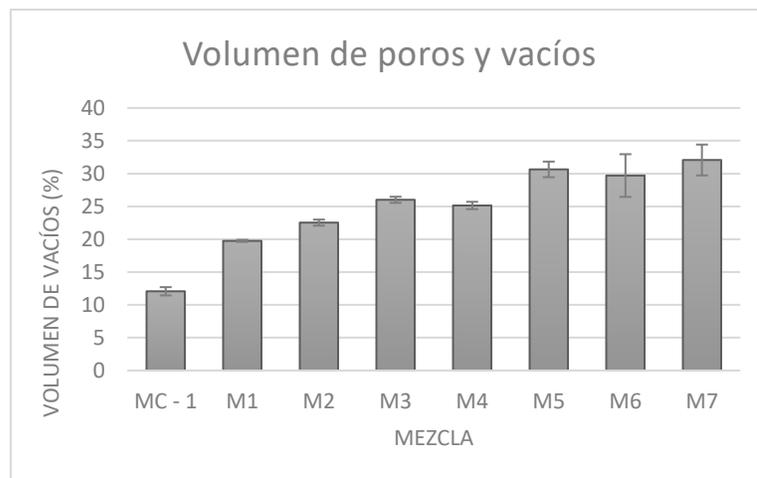


Figura 6-25: Resultados volumen de poros y vacíos, Fase uno.

La mezcla control presenta un 12.1% de poros que pueden estar asociados a las características internas de los materiales de acuerdo con su capacidad de absorción o por características externas como los vacíos entre partículas planas y alargadas que no permiten el conglomerado o sellamiento por completo con la pasta de cemento. En las mezclas con mayor cantidad de reemplazo de agregados gruesos y finos por agregados piroclásticos este valor puede llegar hasta duplicarse, como consecuencia, esta cantidad de aire atrapado en el concreto le permite disminuir su peso y ser más liviano.

En cuanto a los resultados de la fase dos, se presenta (al igual que en la absorción) una disminución de los resultados de poros y vacíos. Se mantiene la relación directa de proporción de reemplazo y poros (Figura 6-26).

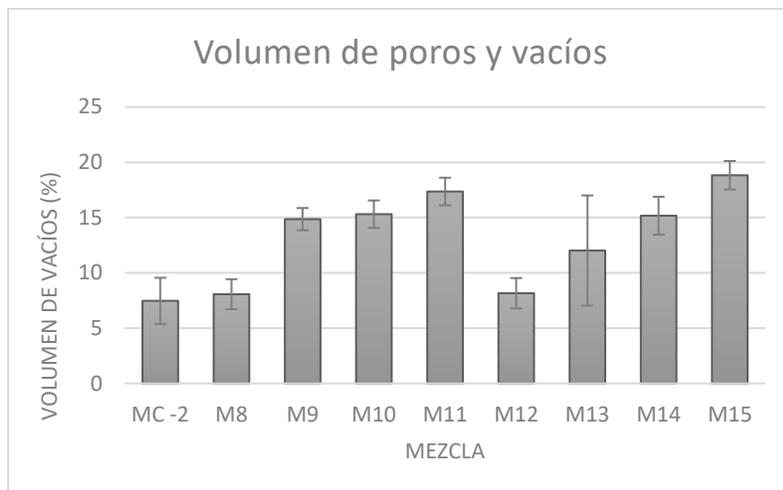


Figura 6-26: Resultados volumen de poros y vacíos, fase dos.

Este porcentaje de vacíos le confiere al concreto pérdida de masa, ya que una vez se evapore el agua de diseño y curado se generan vacíos propiciando que el concreto disminuya su densidad.

En esta fase la mezcla control presenta un valor de 7.5%, las mezclas con menor proporción de reemplazo M8 y M12 presentan valores de 8.1% y 8.2% de vacíos respectivamente, Las mezclas M9 y M13 presentan valores de 14.9 % y 12.0% respectivamente, las mezclas M10 y M14 presentan valores de 15.3% y 15.2% respectivamente y las mezclas con el 100% de reemplazo M11 y M15 presentan valores de 17.4% y 18.8 %. No existe una tendencia definida o cambio de comportamiento para la relación de poros entre las mezclas con reemplazo de humo de sílice y las que no lo tienen.

6.2.7 Tensión indirecta

En la Figura 6-27 se reportan los resultados del ensayo de tracción indirecta llevado a cabo en la fase dos a la edad de 28 días para evaluar el cumplimiento del concreto liviano con los requisitos de control de calidad que exige la norma NTC 4045 para concretos estructurales incluyendo agregados livianos.

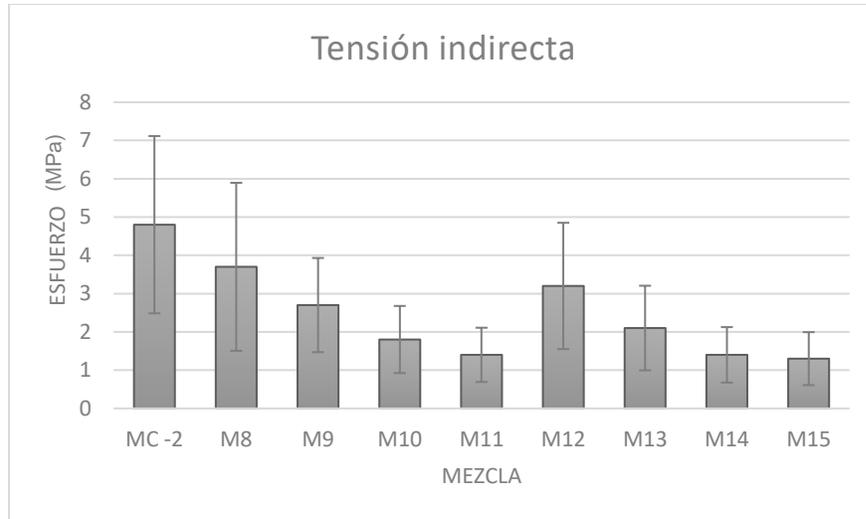


Figura 6-27: Resultados de tensión indirecta, fase dos.

La relación que existe entre el porcentaje de reemplazo del agregado fino y la tensión indirecta es inversamente proporcional. El valor máximo se encuentra en la mezcla con el reemplazo del 25% (M8), con un valor de 3.7 MPa, mientras que el valor mínimo les corresponde a las mezclas con reemplazos del 100% de agregado fino con y sin humo de sílice, que oscila entre 1.3 MPa y 1.4 MPa. En el estudio realizado por Morales *et ál.*, (2018) denominado “*Hormigón estructural de baja densidad para edificaciones*” en el que se reemplazó el agregado grueso por piedra pómez los valores de resistencia a la tensión indirecta fueron de 3.5 MPa para una resistencia a la compresión a los 28 días de 28.2 MPa que al igual que en la presente investigación son resultados que están por debajo de los resultados del concreto convencional.

En este ensayo las mezclas que contienen humo de sílice (M12, M13, M14 y M15) presentan menores valores de tracción indirecta respecto a las mezclas de contraste (M8, M9, M10 y M11). Se confirma que el humo de sílice disminuye la resistencia a tracción directa del concreto, similar al comportamiento reportado por Ortiz (2018) al elaborar concreto estructural liviano con escoria y ceniza volcánica. El autor reportó resistencias de tensión directa de 2.99 MPa para el concreto liviano.

En el estudio de Ortiz se utilizó un aditivo con nano sílice que ofrece las mismas propiedades del humo de sílice con algunos beneficios adicionales, estas nano partículas se pueden dispersar en soluciones acuosas reemplazando la presentación en polvo del humo de sílice. Se concluyó que la nano sílice mejora la capacidad de resistencia a la

compresión y a la flexión, pero disminuye la capacidad de resistir esfuerzos de tensión indirecta.

De acuerdo con la Tabla 3 de la norma NTC 4045 los concretos con resistencias promedio a la compresión a 28 días de 21 MPa deben cumplir con una tracción indirecta de 2.1 MPa si el concreto es completamente liviano o combinado entre agregados de peso normal y liviano, para el caso de esta investigación solo las mezclas con reemplazo del 25 y 50% (M8, M9, M12 y M13) cumplen con este requisito. En la Figura 6-29 se presenta el desarrollo del ensayo de tensión indirecta en la mezcla M12.



Figura 6-28: Ensayo de tensión indirecta, fase dos.

6.2.8 Masa unitaria del concreto

En la Tabla 6-17 se presentan los valores registrados en el ensayo de masas unitarias del concreto en estado endurecido que se llevó a cabo en la fase dos.

Tabla 6-15: Resultados de densidad de equilibrio y densidad de secado al horno para la segunda fase experimental.

Mezcla	Densidad de equilibrio (kg/m ³)	Densidad de secado al horno (kg/m ³)	Densidad del secado al horno, aproximada (kg/m ³)	Densidad de equilibrio, aproximada (kg/m ³)
MC -2	2212.4	2081.7	2223.8	2273.8
M8	2174.3	1996.2	2191.3	2241.3
M9	1998.8	1784.7	2160.0	2210.0
M10	1895.5	1633.4	2126.3	2176.3
M11	1800.4	1517.3	2085.0	2135.0
M12	2032.4	1811.6	2190.3	2241.3
M13	1973.1	1809.1	2160.0	2210.0
M14	1908.3	1658.4	2126.3	2176.3
M15	1804.8	1651.3	2085.0	2135.0

En la figura 6-32 se reportan los resultados de densidad de equilibrio de las mezclas de la fase dos, llevados a cabo para evaluar el cumplimiento del concreto con agregados piroclásticos con los requisitos de control de calidad que exige la norma NTC 4045 para concretos estructurales incluyendo agregados livianos.

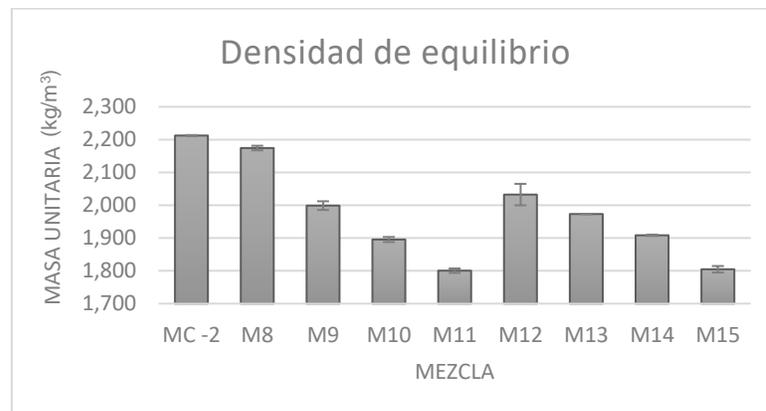


Figura 6-29: Resultados de densidad de equilibrio, fase dos.

Una vez realizadas las mezclas y elaborados los ensayos correspondientes para determinar la densidad de equilibrio real, se obtuvo que la mezcla con reemplazo del 25% de agregado fino (M8) presentó el valor más alto de densidad ya que la relación entre el reemplazo y la densidad es inversamente proporcional con un valor de 2174 kg/m³, por otro lado las mezclas con reemplazo del 50% (M9 y M13) obtuvieron densidades de 1999 kg/m³ y 1973 kg/m³ respectivamente, las mezclas con reemplazo del 75% (M10 y M13)

presentaron densidades de 1895 kg/m^3 y 1908 kg/m^3 , y por último las mezclas con reemplazo del 100% (M11 y M15) tienen densidades de 1800 kg/m^3 y 1805 kg/m^3 .

De acuerdo con la Tabla 3 de la norma NTC 4045 el promedio de densidad de equilibrio máximo para concretos de resistencia a la compresión a 28 días de 21 MPa debe ser de 1680 kg/m^3 para concretos con agregado completamente liviano y de 1760 kg/m^3 para concretos con combinación de agregado de peso normal y agregado liviano, de acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorio, ninguna de las mezclas cumple con este requisito, ya que los valores de todas las mezclas superan el umbral estipulado por la norma. Por otro lado, la guía ACI 213R-14 establece que el concreto ligero es aquel que cuenta con una resistencia a la compresión mínima de 28 días de 2500 psi (17 MPa), una densidad de equilibrio entre 70 y 120 lb / ft³ (1120 kg / m^3 y 1920 kg / m^3), y está compuesto únicamente por agregados ligeros o una combinación de agregados ligeros y convencionales, rangos de densidad de equilibrio y resistencia que cumplen las mezclas M10, M11, M14 y M15.

La densidad de equilibrio aproximada es un cálculo estimado de la densidad del concreto, que se realiza partiendo de los valores reportados durante el diseño de la mezcla conociendo los porcentajes de humedad y absorción de cada uno de los materiales para comparar luego con los valores obtenidos en laboratorio. En este caso los valores teóricos oscilaron entre 2037 kg/m^3 que corresponden a los reemplazos del 100% de agregado fino y 2089 kg/m^3 que corresponde a la mezcla con reemplazo del 25%. Los resultados se presentan en la Figura 6-30

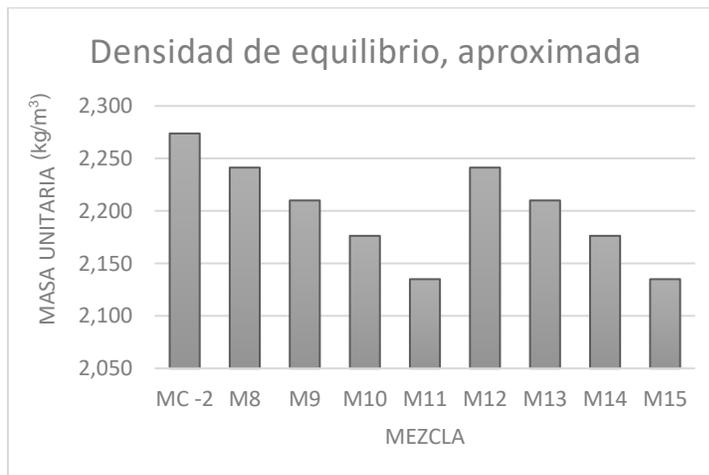


Figura 6-30: Resultados de densidad de equilibrio aproximada, fase dos.

De igual manera que se realizó un cálculo teórico y práctico para la densidad de equilibrio se realiza un cálculo teórico de la densidad aproximada de secado al horno y la densidad real del concreto secado al horno, Los resultados de la densidad de secado al horno aproximada se presenta en la Figura 6-31.

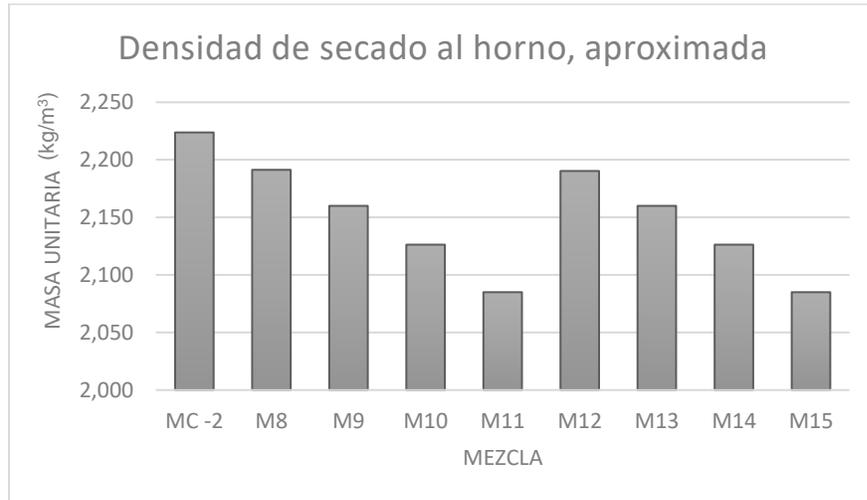


Figura 6-31: Resultados de densidad de secado al horno aproximada, fase dos.

La densidad del secado al horno aproximada oscila entre los 1987 kg/m³ y 2039 kg/m³, En este caso la densidad es inversamente proporcional a la cantidad de reemplazo de agregado fino. Los resultados experimentales de la densidad secada al horno se presentan en la Figura 6-32

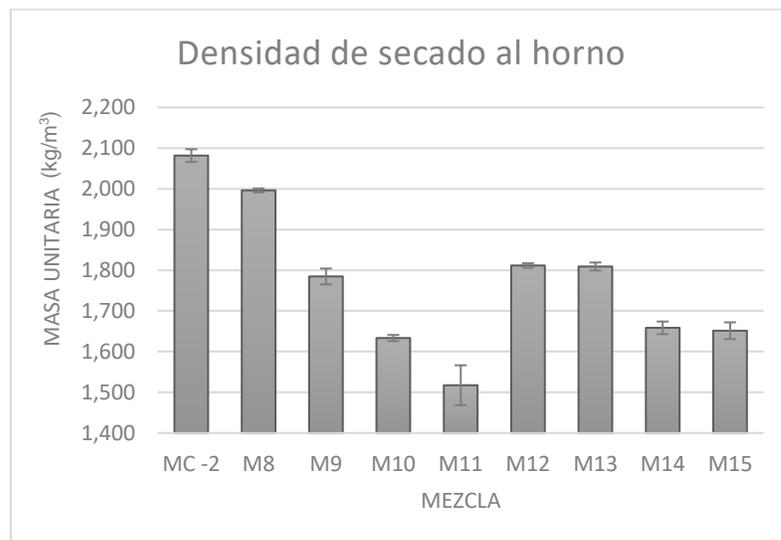


Figura 6-32: Resultados de densidad de secado al horno, fase dos.

Se puede analizar que el valor del espécimen secado al horno es inferior al valor en seco de la densidad de equilibrio, las densidades calculadas con estos valores se reducen bastante ya que al espécimen se le retira por completo el agua contenida en sus poros dejándolos vacíos. La densidad de secado al horno en laboratorio registra valores para el reemplazo del 25% de 1996 kg/m³ (M8) y 1812 kg/m³ (M12), para los reemplazos de 50% se registraron valores de 1785 kg/m³ (M9) y 1809 kg/m³ (M13), para los reemplazos del 75% los valores registrados fueron de 1633 kg/m³ (M10) y 1658 kg/m³ (M14), y por último con los reemplazos del 100% se obtuvieron valores de 1517 kg/m³ (M11) y 1651 kg/m³ (M15).

6.2.9 Permeabilidad al ión cloruro

En la fase uno se llevó a cabo el ensayo de permeabilidad al ión cloruro sin embargo las muestras con remplazo de agregado piroclástico no soportaron las 6 horas de ensayo debido al exceso de carga, esto pudo estar asociado a la porosidad de los agregados piroclásticos que hacen más permeable el concreto. La mezcla control (MC1) presentó una carga de 5388 Coulombs que corresponde a una penetración alta, lo cual hace que sea susceptible al quedar expuesto a ambientes que aceleran el ingreso de iones al concreto, a su vez influye en la corrosión del acero en el caso de estructuras con refuerzo. En la Tabla 6-16 se presentan los resultados del ensayo de penetración ión cloruro de la fase dos.

Tabla 6-16: Resultados de Ensayo de penetración ión cloruro fase dos.

Mezcla	Carga que pasa (Coulomb)	Permeabilidad del ión cloruro
MC -2	3013.85	Moderada
M8	3113.49	Moderada
M9	6002.02	Alta
M10	3206.72	Moderada
M11	4157.70	Alta
M12	5619.82	Alta
M13	3836.16	Moderada
M14	4794.10	Alta
M15	2042.17	Baja

En la Figura 6-33 se grafican los resultados y se establece la escala para de penetración para edificar en cual nivel de permeabilidad esta cada mezcla de la fase dos.

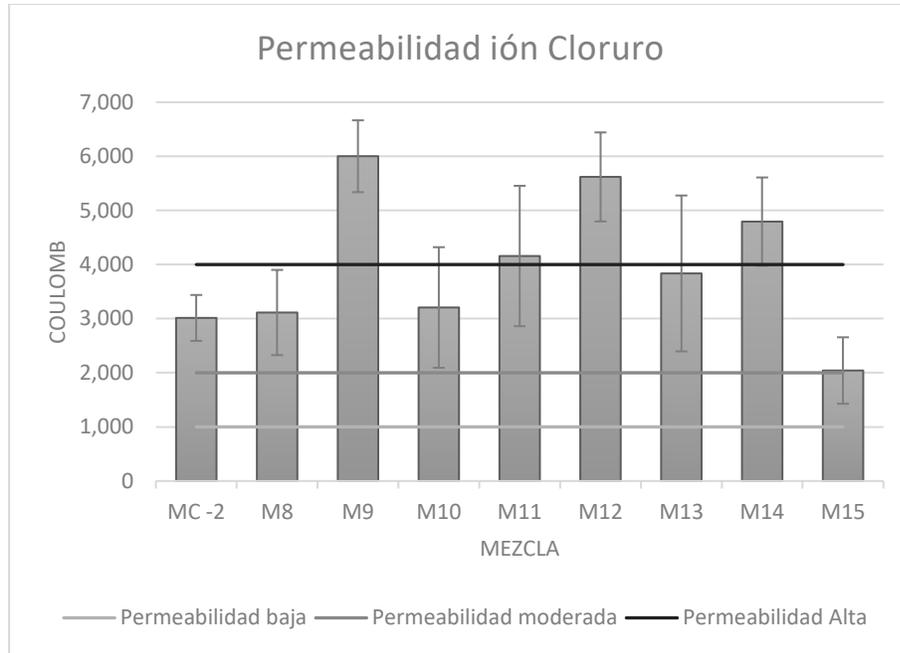


Figura 6-33: Resultados permeabilidad ión cloruro, fase dos

En esta fase se observa que aumenta notoriamente la carga de penetración en las mezclas con agregados piroclásticos con respecto a la mezcla control. La carga inferior se presenta en la mezcla M15 que tiene el 100% de remplazo de agregado fino y remplazo de humo de sílice con una carga de 2042.2 Coulombs, posiblemente atribuido al mayor empaquetamiento que genera esta adición. Sin embargo, este comportamiento no se replica en las otras mezclas que contienen el humo de sílice, le siguen las mezclas con reemplazo del 25% y 75% de agregado fino sin humo de sílice (M8 y M10) con valores de 3113.5 y 3206.7 Coulombs respectivamente, los valores de las mezclas M8, M10 y M15 se califican como una penetración del ión cloruro moderada igual que la mezcla control que presentó una carga de penetración de 3013.9 Coulombs. Mientras que la mezcla con reemplazo del 50% de agregado fino con y sin humo de sílice (M9 y M13), la mezcla con reemplazo del 100% sin humo de sílice (M11) y la mezcla con reemplazo del 75% con humo de sílice (M14) superan la carga de 4000 Coulombs que corresponde a un tipo de penetración Alta.

En la Figura 6-34 se encuentra el equipo utilizado para realizar el ensayo y en el Anexo H los resultados obtenidos en el ensayo.



Figura 6-34: Montaje ensayo de penetración del ión cloruro

Para una mejor comprensión y análisis de los resultados encontrados se presentan en la Tabla 6-17 los indicadores de las mezclas de la fase dos con respecto a la mezcla control, que se hallaron dividiendo el resultado de cada propiedad en el valor obtenido en la mezcla control.

Tabla 6-17: Indicadores de las propiedades de las mezclas de la fase dos con respecto a la mezcla control.

Mezcla	Temperatura	Asentamiento	Contenido de aire	Compresión 28 días	Flexión	Tensión indirecta	Densidad de equilibrio	Modulo Elástico	ión cloruro
M8	0.96	0.56	1.81	0.69	0.76	0.8	0.98	0.86	1.03
M9	0.93	0.46	1.90	0.63	0.55	0.6	0.90	0.67	1.99
M10	1.00	0.41	2.98	0.60	0.40	0.4	0.86	0.57	1.06
M11	1.11	0.16	5.00	0.49	0.39	0.3	0.81	0.53	1.38
M12	0.97	0.45	2.33	0.71	0.77	0.7	0.92	0.93	1.86
M13	0.88	0.22	3.24	0.71	0.58	0.4	0.89	0.78	1.27
M14	0.89	0.19	3.90	0.63	0.46	0.3	0.86	0.49	1.59
M15	0.85	0.14	6.10	0.51	0.42	0.3	0.82	0.46	0.68

Analizando la información presentada en la Tabla se identifica que los comportamientos más desfavorables de asentamiento, contenido de aire, tensión indirecta, rigidez, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión los presentan las mezclas M11 y M15 en las que se reemplazó el 100% del agregado fino convencional por agregado piroclástico, siendo a la vez las mezclas con menores densidades de equilibrio. Por otro lado, se identifica que las mezclas M10 y M14 reducen su densidad en un 14% con respecto a la mezcla control y la resistencia a la compresión se reduce entre un 37% y un 40%. Sin embargo, el asentamiento de la mezcla M14 está 81% por debajo de la mezcla control, y el asentamiento de la mezcla M10 se reduce un 59%. Por último, la reducción de densidad de las mezclas M8, M9, M12 y M13 es igual o inferior al 10% con respecto a la mezcla de control con lo cual no alcanzan a incluirse en el rango de concretos livianos y el porcentaje de pérdida de resistencia oscila entre el 31% y el 37%.

7. Análisis de factibilidad de la producción de concreto liviano con agregado volcánico por medio del análisis de depósitos.

Una vez concluidas las fases de experimentación en las mezclas de concreto con el uso de agregados piroclásticos, se inicia el análisis para identificar las características de los depósitos de los agregados, donde se abordará la clasificación de los depósitos de Lapilli desde dos puntos de vista, inicialmente desde el estudio de tipo geológico, el cual permite conocer a mayor detalle las características de los depósitos que condicionarán su explotación minera, identificar los límites geográficos, la cercanía entre un depósito y otro que presenten similitud.

Dentro de la característica del depósito y su composición química en este proyecto se llevaron a cabo estudios de microscopía petrográfica y barrido SEM, los cuales permitieron identificar los minerales que componen las muestras, el estudio de difracción de rayos X, que permitió identificar con mayor precisión la naturaleza de los componentes minerales de las muestras de Lapilli, usadas en las mezclas de concreto.

Los aspectos geométricos de un depósito permiten conocer su orientación con respecto a la ubicación espacial, su espesor y la variabilidad que se presenta en el depósito, adicionalmente las condiciones de orientación del depósito con respecto a las rocas.

El estudio de tipo económico-minero requiere un análisis de la cubicación de reservas y el análisis de viabilidad económica, en el primero se busca establecer de forma numérica los principales parámetros de explotación, como: el volumen explotable, ley media y ley de corte, así como un estimado del valor económico de las reservas. El estudio de

viabilidad incluye principalmente los costos de explotación y el tiempo que se estima durará el proceso de explotación.

Para realizar el análisis de la posibilidad de explotación de depósitos de Lapilli se utilizó la plancha geológica 206 del servicio geológico colombiano que se encuentra en la Figura 7-1.

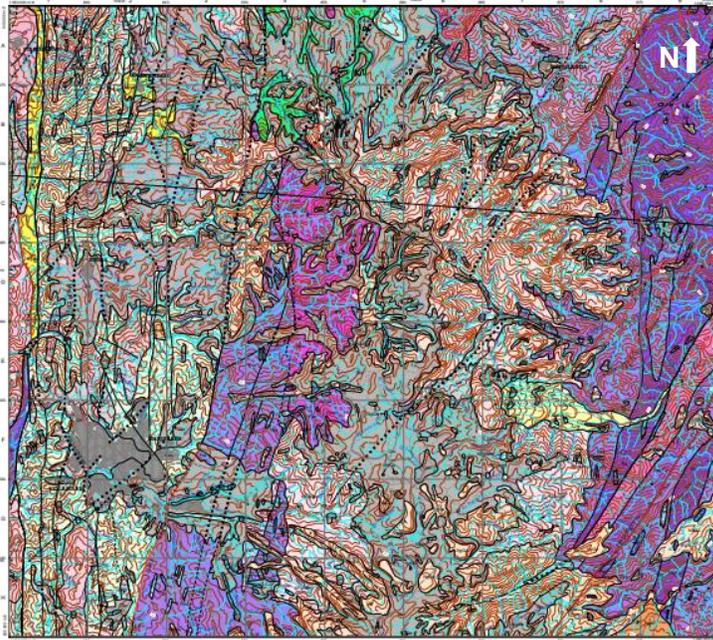


Figura 7-1: Plancha geológica 206 del servicio geológico colombiano.

Es la plancha que se encuentra más cerca al volcán Nevado del Ruiz ubicado en el Parque Nacional Natural los Nevados. Se identificaron los depósitos de Lapilli que según la información de la plancha 206 están denominados como rocas piroclásticas Qto (depósitos de cenizas y lapilli), en el territorio comprendido en la plancha, se identificó en la ciudad de Manizales, los municipios y las veredas cercanas a las principales fuentes del material, por lo cual se dividieron por zonas de acuerdo a la cercanía de estas poblaciones, excluyendo los depósitos cercanos al nevado puesto que comprenden la zona del parque natural en el cual no se podrían llevar a cabo labores de minería.

Los afloramientos encontrados en esta zona de la Cordillera Central hacen parte del Complejo Quebrada grande (González, 1976), las cuales son rocas ígneas de tipo toleítica predominando lavas basálticas, andesitas y iroclastitas, en contacto con capas

medias de lutitas carbonosas arcillosas y en menor proporción, areniscas feldespáticas, limolitas, liditas y localmente bancos de caliza negra.

Las zonas que se identificaron se encuentran ubicados en el departamento de Caldas, los depósitos se clasificaron de acuerdo con la cercanía con los municipios y la ciudad de Manizales. Con el fin de caracterizar los depósitos se utilizaron herramientas de georreferenciación para obtener datos como la ubicación, el área, la distancia del depósito al municipio o ciudad y se realizaron cortes geológicos para obtener las profundidades del depósito y así mismo poder obtener una aproximación de la cubicación de material.

7.1. Municipio de Filadelfia.

El municipio se encuentra ubicado en el departamento de Caldas, posee una extensión de 193 Km, está situado a 48 km de la capital de departamento que es la ciudad de Manizales, la Figura 7-2 que se presenta a continuación es fragmento de la plancha 206 en la que se encuentra el municipio de Filadelfia y en color azul se resaltan los depósitos identificados de lapilli cercanos al municipio con el fin de caracterizarlos.

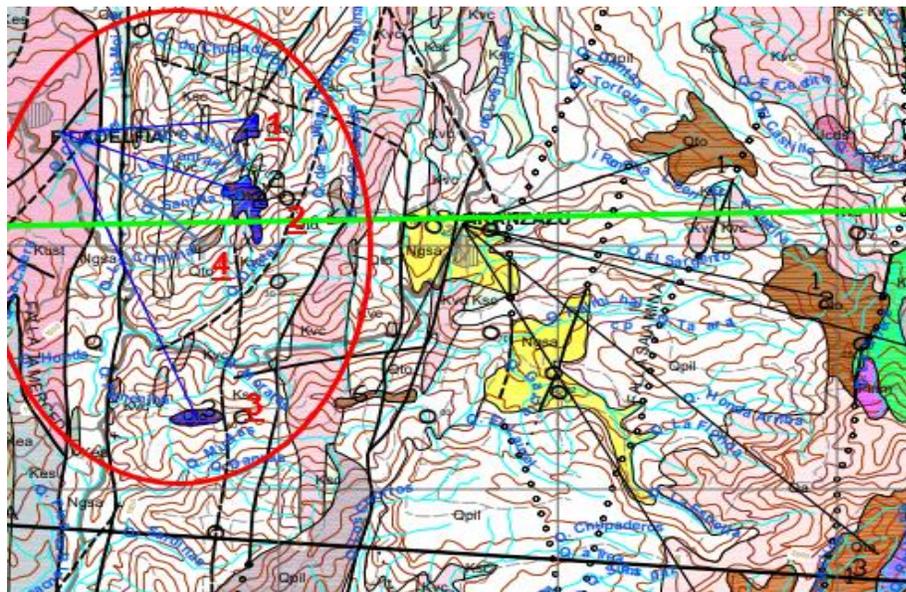


Figura 7-2 Plancha geológica 206 ubicando el municipio de Filadelfia y los depósitos de lapilli cercanos.

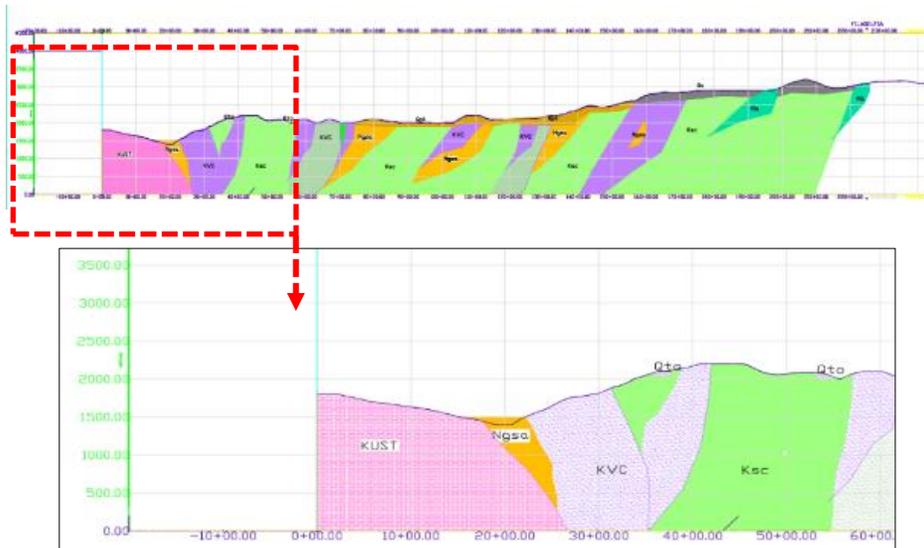
En la Tabla 7-1 se encuentran los valores de caracterización por depósito que contemplan las áreas, profundidades, volúmenes y las distancias al municipio.

Tabla 7-1: caracterización de depósitos municipio de Filadelfia.

Depósitos municipio de Filadelfia					
Depósito	Área (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)	Distancia (m)	Distancia (Km)
1	157042.86	83.22	13070551.60	3349.19	3.35
2	525210.93	69.52	36516602.94	3176.93	3.18
3	184063.76	91.62	16864786.52	5139.73	5.14
4	237950.11	200.60	47733030.02	6315.61	6.32

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 7-1 se resalta que los cuatro depósitos cercanos al municipio de Filadelfia se encuentran a menos de 7 km de distancia, y que aproximadamente se contaría con 114.000.000 m³ para explotar, los territorios donde se encuentran los depósitos están ubicados en la zona rural por lo que sería posible realizar procesos de minería legal regulada por las normativas colombianas para la extracción del material, el municipio cuenta con vías de comunicación que lo conectan con los municipios de Neira, Chinchiná, la Merced y Aránzazu. El municipio de Filadelfia hace parte de la zona cafetera, y tienen una adecuada red de vías de comunicación, en la mayoría de los casos pavimentadas lo cual permite un acceso relativamente fácil a las zonas que podrían denominarse de explotación. En la Figura 7-3, se observa uno de los perfiles geológicos que se utilizó para determinar los espesores aproximados de los depósitos cercanos al municipio de Filadelfia.

Figura 7-3 Perfil geológico trazado cerca al municipio de Filadelfia.



7.2. Municipio de Aránzazu.

El municipio está ubicado al norte del departamento de Caldas a 52 kilómetros de la capital del departamento, la Figura 7-4 que se presenta a continuación es fragmento de la plancha 206 en la que se encuentra el municipio de Aránzazu y en color café se resaltan los depósitos identificados de lapilli cercanos al municipio con el fin de caracterizarlos. En color verde de la Figura 7-4, representa uno de los cortes que se ejecutaron con el fin de conocer las profundidades de los depósitos y realizar las cubificaciones.

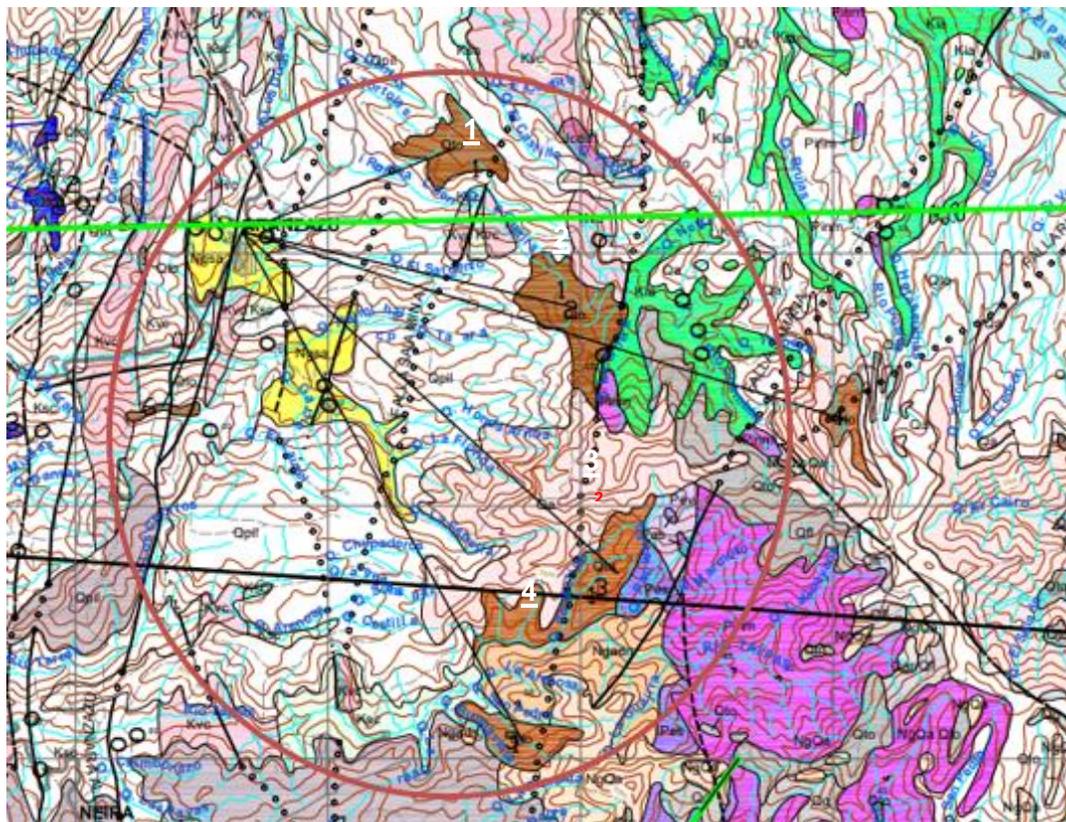


Figura 7-4 Plancha geológica 206 ubicando el municipio de Aránzazu y los depósitos de lapilli cercanos.

En la Figura 7-5 se muestra el perfil que atraviesa el municipio de Aránzazu con el cual se pudo realizar el cálculo aproximado de las profundidades de cada uno de los depósitos de lapilli.

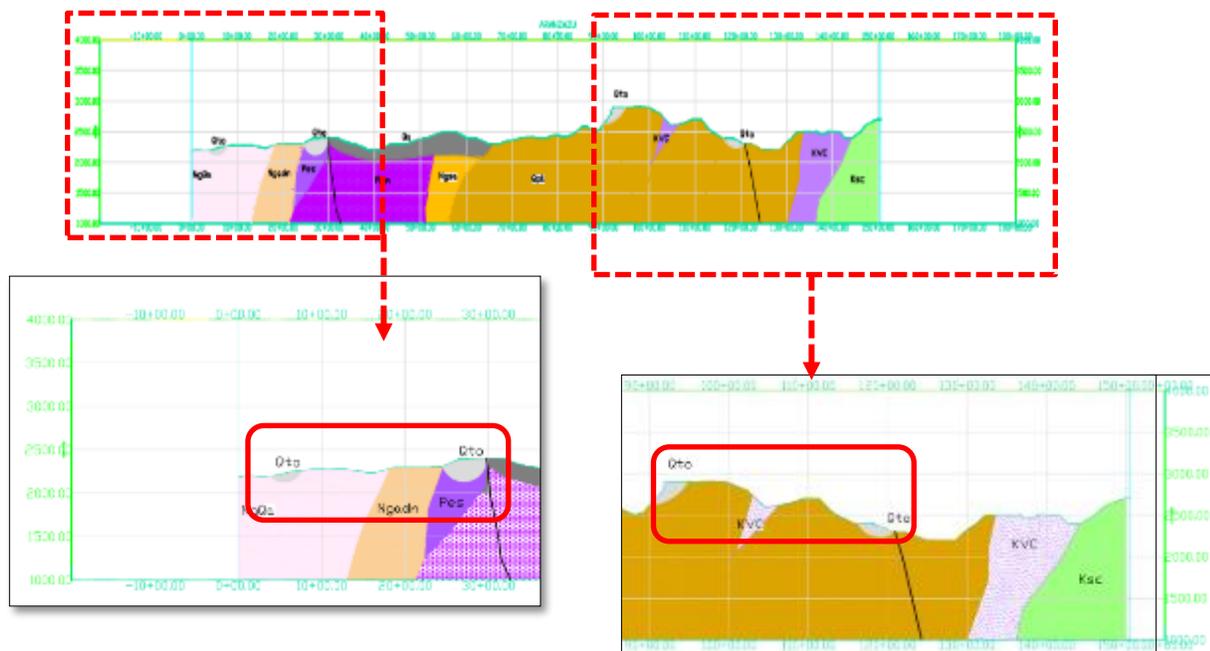


Figura 7-5 Perfil geológico trazado cerca al municipio de Aránzazu.

En la Tabla 7-2 se encuentran los datos de caracterización de los depósitos que se contemplaron dentro del área aferente al municipio de Aránzazu.

Tabla 7-2: Caracterización de depósitos municipio de Aránzazu.

Municipio de Aránzazu					
Depósito	Área (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)	Distancia (m)	Distancia (km)
1	1785780.90	165.87	296216406.81	4510.52	4.51
2	2998318.40	202.87	608286843.70	6786.19	6.79
3	3663048.71	270.59	991188010.81	10048.43	10.05
4	1538673.62	104.54	160857554.21	11522.31	11.52

Se resalta que dos de los depósitos se encuentran a menos de 7 km de distancia del municipio, y los otros dos depósitos a menos de 12 km, lo cual facilitaría los procesos de transporte y explotación de material desde dicho municipio. Los depósitos de material de lapilli de esta zona en su mayoría cuentan con más de 150 m de profundidad, se podría establecer que se cuenta con un volumen aproximado de 20.500.000.000 m³.

7.3. Municipio de Marulanda.

El municipio de Marulanda está ubicado en el área central-oriental del departamento de Caldas, hace parte de la subregión denominada “Alto Oriente” con los municipios de Marquetalia, Manzanares y Pensilvania. En la Figura 7-6 se encuentra un fragmento de la plancha 206, donde se ubica el municipio de Marulanda.

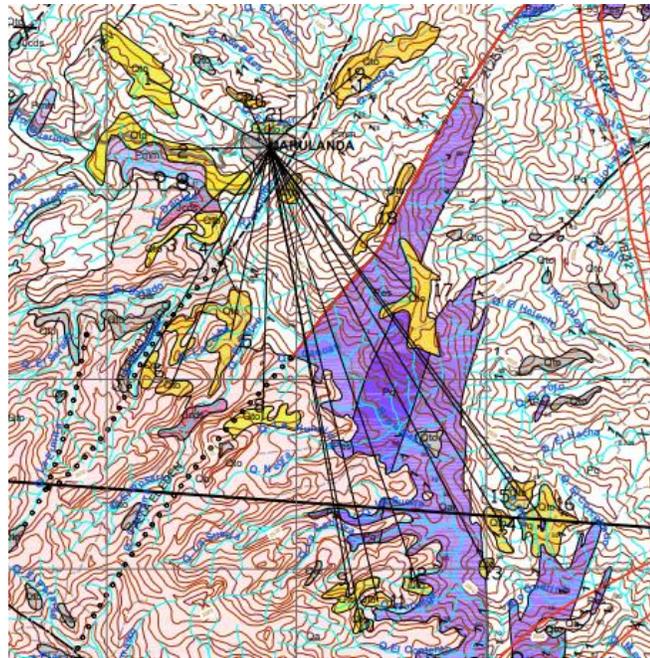


Figura 7-6 Plancha geológica 206 ubicando el municipio de Marulanda y los depósitos de lapilli cercanos.

Se presentan resaltados en amarillo los depósitos de lapilli, como se identifica en la plancha es uno de los municipios de la zona con más depósitos cercanos los cuales se caracterizan en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3: Caracterización de depósitos municipio de Marulanda.

Municipio de Marulanda					
Depósito	Área (m²)	Espesor (m)	Volumen (m³)	Distancia (m)	Distancia (Km)
1	8446.97	624.87	5278309.88	3670.32	3.67
2	524647.85	146.97	77110747.33	2598.74	2.60
3	2063159.04	208.67	430525586.40	5164.09	5.16
4	855184.89	261.98	224043904.90	7165.66	7.17
5	590424.39	128.87	76089171.99	11932.70	11.93
6	245108.54	192.25	47122116.99	12232.78	12.23
7	344684.07	150.34	51821526.60	6772.17	6.80
8	855201.67	206.67	176747096.0	7165.73	7.20
9	590435.98	216.67	127931535.0	12164.33	12.20
10	174893.32	185.34	32415602.40	12657.62	12.70
11	245113.35	154.34	37832020.80	12232.90	12.20
12	237366.91	195.34	46368439.0	12245.43	12.20
13	130727.56	191.40	25021777.90	12422.06	12.40
14	492699.34	203.54	100288458.0	11545.27	11.50
15	591347.22	151.44	89558945.10	11044.64	11.0
16	1463820.35	130.19	190587946.0	12287.12	12.30
17	1846793.99	127.05	234651798.0	5616.12	5.60
18	668492.45	147.30	98471611.90	3479.36	3.50
19	2149619.19	159.66	343216798.0	3128.99	3.10
20	238441.07	139.19	33189566.30	1399.10	1.40
21	310137.19	74.99	23258428.70	603.16	0.60

Se pueden identificar como 11 de los depósitos se encuentran a menos de 8 kilómetros del municipio de Marulanda y los otros 10 a menos de 13 kilómetros, se contaría aproximadamente con 2.400'000.000 m³ de material para realizar procesos de extracción, ubicados en zonas rurales, lo cual facilita los procesos de actividad minera. En la Figura 7-7 se identifica el perfil geológico que se trazó cercano al municipio de Marulanda con el fin de conocer los espesores probables de los depósitos de material.

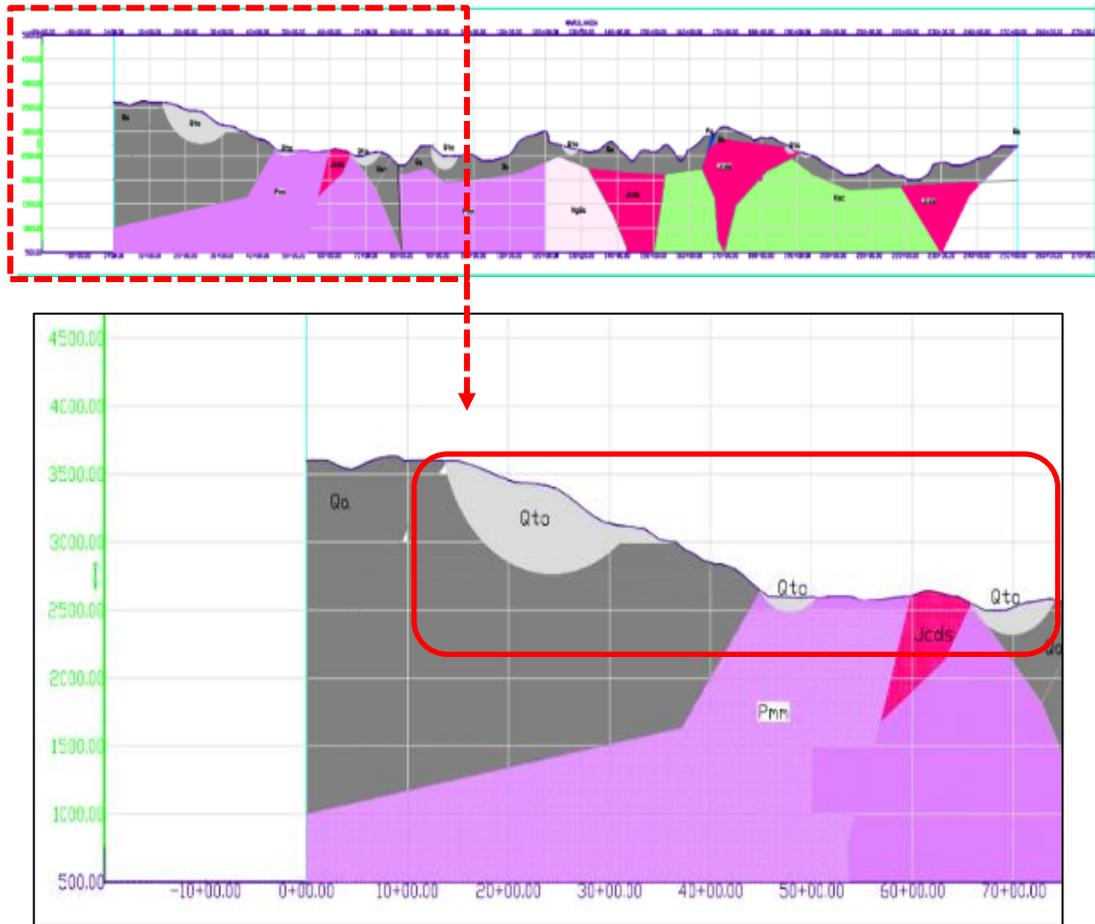


Figura 7-7 Perfil geológico trazado cerca al municipio de Marulanda.

7.4. Ciudad de Manizales.

La ciudad de Manizales es la capital del departamento de Caldas ubicada en el centro occidente de Colombia, sobre la cordillera de los Andes por lo cual sus condiciones geográficas son accidentadas con una población mayor a los 434.000 habitantes, debido a la actividad cafetera de la región, como se había mencionado con anterioridad tiene una adecuada red de comunicación con la Troncal de Occidente que tiene trayecto Manizales- Chinchiná-Pereira y la con la carretera Manizales-Neira-Aránzazu, lo cual facilita los procesos de minería y disminuye los costos del transporte. (Figura 7-8)

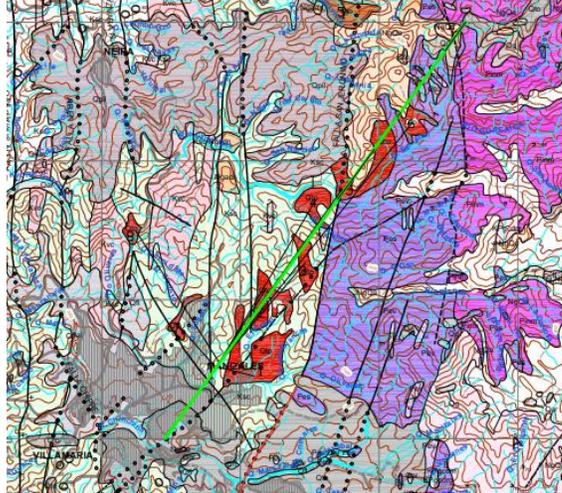


Figura 7-8 Plancha geológica 206 ubicando la ciudad de Manizales y los depósitos de lapilli cercanos.

El material que se usó para este trabajo experimental fue extraído de los depósitos de lapilli ubicados en la zona urbana de la ciudad de Manizales y como se observa en la Figura 7-8 se han marcado de color rojo los depósitos y uno de los depósitos más grande de lapilli se encuentra dentro del casco urbano razón por la cual las labores de explotación en grandes masas en esta zona no son tan viables. En verde se traza el perfil geológico que se utilizó para sacar los espesores aproximados de los depósitos y calcular su cubicación el cual se observa en la Figura 7-9.

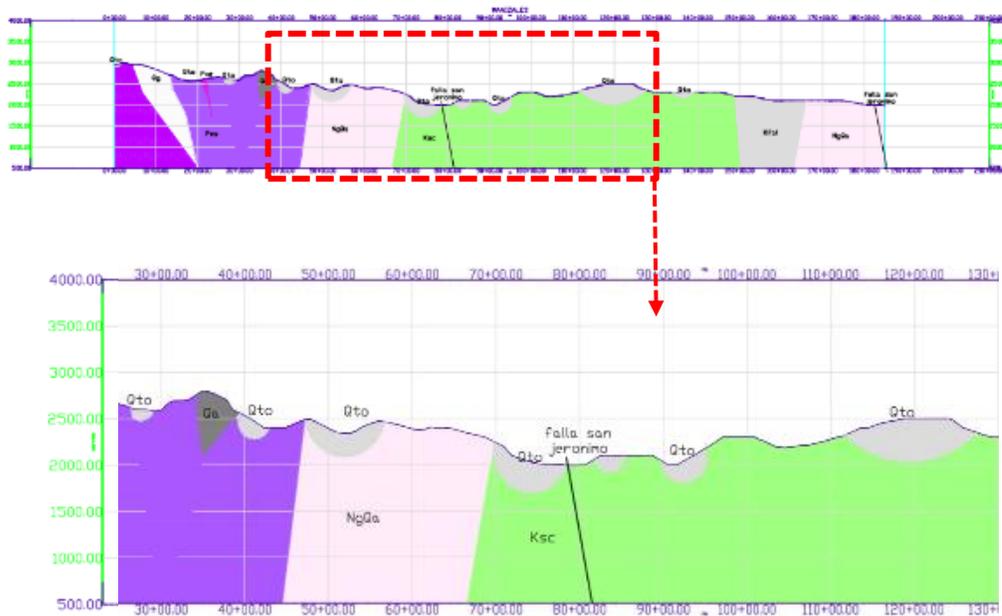


Figura 7-9 Perfil geológico trazado cerca de la ciudad de Manizales.

En la Tabla 7-4 se caracterizan los depósitos cercanos a la ciudad de Manizales, de estos depósitos se puede descartar los depósitos 1, 6 y 7. El depósito 1, es el depósito más extenso y a la vez profundo, pero se encuentra en la zona urbana igual que el depósito 6 y 7, que como se había mencionado con anterioridad dificultan los procesos de minería, los depósitos 2 hasta 9 se encuentran ubicados a menos de 8 kilómetros de la ciudad de Manizales y descartando los depósitos 1, 6 y 7 se contaría con un volumen de excavación de aproximadamente 7.800'000.000 m³.

Tabla 7-4: Caracterización de depósitos cercanos a Manizales.

Depósitos de Manizales					
Depósito	Área (m²)	Espesor (m)	Volumen (m³)	Distancia (m)	Distancia (Km)
1	3082677.04	437.78	1349540520	1890.03	1.89
2	1556875.74	368.41	573571705.1	3208.19	3.21
3	87653.35	187.6252	16445977.7	4804.20	4.80
4	1081383.25	336.652	364049833.9	6843.84	6.84
5	27027338.21	25352.65	6.85215E+11	7712.14	7.71
6	1005242.72	150.252	151039730.1	23.65	0.02
7	224999.99	49.562	11151449.5	17.76	0.02
8	414870.44	59.762	24793487.3	5624.11	5.6
9	414471.03	51.642	21404113.4	2076.86	2.1

Teniendo en cuenta la información planteada para los centros urbanos que tienen afinidad con los depósitos cercanos a la zona de influencia del Nevado del Ruiz se puede concluir que se cuenta con una cantidad considerable de material superficial explotable que daría viabilidad para la producción de concreto a nivel industrial con el uso de estos agregados.

7.5. Evaluación de costos.

El análisis de precios de las diferentes mezclas de concreto que se presentan a continuación en la Tabla 7-5, se realizó con el costo de los materiales usados en el proceso experimental, en el caso de los agregados piroclásticos se contempló el costo de la extracción del material en la ciudad de Manizales y el traslado a la ciudad de Bogotá, cabe aclarar que en el momento en que se industrialice la explotación de los agregados piroclásticos su costo se reducirá considerablemente.

Tabla 7-5: Presupuesto de las mezclas de concreto por metro cúbico.

Concreto convencional relación a/c = 0.47			
Ítem	Cantidad kg/m ³	Valor unitario	Valor total
Cemento Argos Estructural	400	\$ 602.35	\$ 240,941.18
Agua	188	\$ 2.61	\$ 490.69
Arena de río	923	\$ 172.50	\$ 159,217.50
Grava de cantera	852	\$ 192.50	\$ 164,010.00
Total			\$ 564,659.36
Concreto liviano con 25% de remplazo de agregado fino por lapilli			
Ítem	Cantidad kg/m ³	Valor unitario	Valor total
Cemento Argos Estructural	400	\$ 602.35	\$ 240,941.18
Agua	188	\$ 2.61	\$ 490.69
Arena de río	692	\$ 172.50	\$ 119,370.00
Arena lapilli	200	\$ 2,600.00	\$ 520,000.00
Grava de cantera	852	\$ 192.50	\$ 164,010.00
Aditivo Plastol 7000	3	\$ 11,500.00	\$ 34,500.00
Cal Hidratada 85%	4	\$ 847.70	\$ 3,390.80
Total			\$ 1,082,702.67
Concreto liviano con 50% de remplazo de agregado fino por lapilli			
Ítem	Cantidad kg/m ³	Valor unitario	Valor total
Cemento Argos Estructural	400	\$ 602.35	\$ 240,941.18
Agua	188	\$ 2.61	\$ 490.69
Arena de río	462	\$ 172.50	\$ 79,695.00
Arena lapilli	400	\$ 2,600.00	\$ 1,040,000.00
Grava de cantera	852	\$ 192.50	\$ 164,010.00
Aditivo plastol 7000	3	\$ 11,500.00	\$ 34,500.00
Cal Hidratada 85%	8	\$ 847.70	\$ 6,781.60
Total			\$ 1,5566,418.47
Concreto liviano con 75% de remplazo de agregado fino por lapilli			
Ítem	Cantidad kg/m ³	Valor unitario	Valor total
Cemento Argos Estructural	400	\$ 602.35	\$ 240,941.18
Agua	188	\$ 2.61	\$ 490.69
Arena de río	231	\$ 172.50	\$ 39,847.50
Arena lapilli	600	\$ 2,600.00	\$ 1,560,000.00
Grava de cantera	852	\$ 192.50	\$ 164,010.00
Aditivo plastol 7000	3	\$ 11,500.00	\$ 34,500.00
Cal Hidratada 85%	12	\$ 847.70	\$ 10,172.40
Total			\$ 2,049,961.77
Concreto liviano con 100% de remplazo de agregado fino por lapilli			
Ítem	Cantidad kg/m ³	Valor unitario	Valor total
Cemento Argos Estructural	400	\$ 602.35	\$ 240,941.18
Agua	188	\$ 2.61	\$ 490.69
Arena de río	0	\$ 172.50	\$ 0.00
Arena lapilli	855	\$ 2,600.00	\$ 2,223,000.00
Grava de cantera	789	\$ 192.50	\$ 151,882.50
Aditivo plastol 7000	3	\$ 11,500.00	\$ 34,500.00
Cal Hidratada 85%	17.1	\$ 847.70	\$ 14,495.67
Total			\$ 2,665,310.04

Los costos de las mezclas con agregados piroclásticos se incrementan de manera proporcional al incremento del remplazo por agregados convencionales. En el caso de la mezcla con el 25% de remplazo de agregado fino por agregado piroclástico el incremento en costos es del 191.74%, en la mezcla con remplazo del 50% de agregado fino el incremento es del 276.20%, en la mezcla con remplazo del 75% de agregado fino se presenta un incremento del 361.24% y por último cuando se remplaza el 100% del agregado fino por agregado piroclástico el incremento en costos es de 469.65%.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

En la búsqueda de caracterizar los agregados y analizar las propiedades físico-mecánicas de un concreto liviano estructural con los agregados gruesos y finos de origen volcánico que provienen del sector periférico al volcán del nevado del Ruíz, se pudo establecer que:

El material lapilli de origen volcánico se extrae de manera superficial y presenta tamaños tales que puede ser usado como agregado grueso y fino, sin embargo, en los tamaños que puede ser considerado agregado grueso no presenta una distribución adecuada y por lo tanto su granulometría no cumple con las especificaciones dadas por la norma NTC4045. Adicionalmente las partículas de tamaños superiores al tamiz número 4 presentan un comportamiento deleznable mayor que las partículas de lapilli que se considerarían agregado fino.

El lapilli (agregado piroclástico) tiene un pH ácido debido a su alto contenido de sílice proveniente del cuarzo y los feldespatos que lo conforman, lo cual produce bajas resistencias en las mezclas de concreto, con el uso de la cal hidratada de 75% o 85% de pureza se puede disminuir la acidez del material por medio de hidrólisis (saturando durante 24 horas).

El concreto liviano con agregados piroclásticos no supera todas las propiedades físico-mecánicas del concreto convencional y los agregados piroclásticos no cumple con todos los requisitos establecidos por la norma NTC 4045 para agregados livianos; sin embargo, se puede concluir que los agregados piroclásticos generaron menores densidades alcanzando resistencias a la compresión que se encuentran en el rango de concretos de uso estructural según lo establecido en la guía ACI 213R-14.

De las mezclas analizadas se podría seleccionar como la mejor dosificación a la mezcla M10 en la que se reemplazó el 75% de agregado fino convencional por agregado fino piroclástico, la cual presentó una densidad de equilibrio de 1895.5 kg/m^3 con una resistencia a la compresión de 21 MPa, pese a que las propiedades mecánicas de la mezcla M13 están por encima de la mezcla M10, la M13 se descartó como mejor dosificación debido a la poca trabajabilidad que presentó y a su densidad de equilibrio que fue de 1973.1 kg/m^3 valor que está fuera del rango establecido en la guía ACI 213R-14.

Se resalta que el concreto liviano con agregados piroclásticos podría estar sujeto al ataque por sulfatos teniendo en cuenta los resultados del ensayo de solidez de los agregados. Adicionalmente, en el ensayo de petrografía y difracción de rayos x se identifica la presencia de sílice proveniente del cuarzo y los feldespatos que podría desatar una reacción positiva con los álcalis del cemento.

Teniendo en cuenta los análisis realizados sobre la disponibilidad de depósitos explotables de materiales piroclásticos en la zona cafetera, se puede concluir que es viable la extracción del material, debido a la disponibilidad de vías de acceso, a la ubicación de los depósitos cercanos a los cascos urbanos y a la ubicación superficial del material.

8.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis detallado que determine con mayor profundidad el comportamiento de los agregados piroclásticos frente a la reacción álcali-sílice, debido a que en la presente investigación no fue posible realizar el ensayo a edades superiores a los 14 días, esto con el fin de tener un resultado más concluyente en este aspecto, adicionalmente se recomienda realizar el ensayo con la incorporación de humo de sílice para identificar si con esto se mitiga la reacción química.

Se recomienda hacer ensayos que evalúen la durabilidad del concreto liviano con agregados piroclásticos a edades mayores a los 28 días, y realizar ensayos que permitan determinar el desempeño de este concreto como aislante térmico, aislante acústico, material resistente al fuego entre otras características.

Se recomienda analizar otros materiales piroclásticos provenientes de la actividad volcánica de otras zonas del país como Nariño, Huila, Tolima, Cauca entre otros, con el fin

de identificar la posibilidad de obtener agregados naturales livianos en diferentes zonas del País.

9. Bibliografía

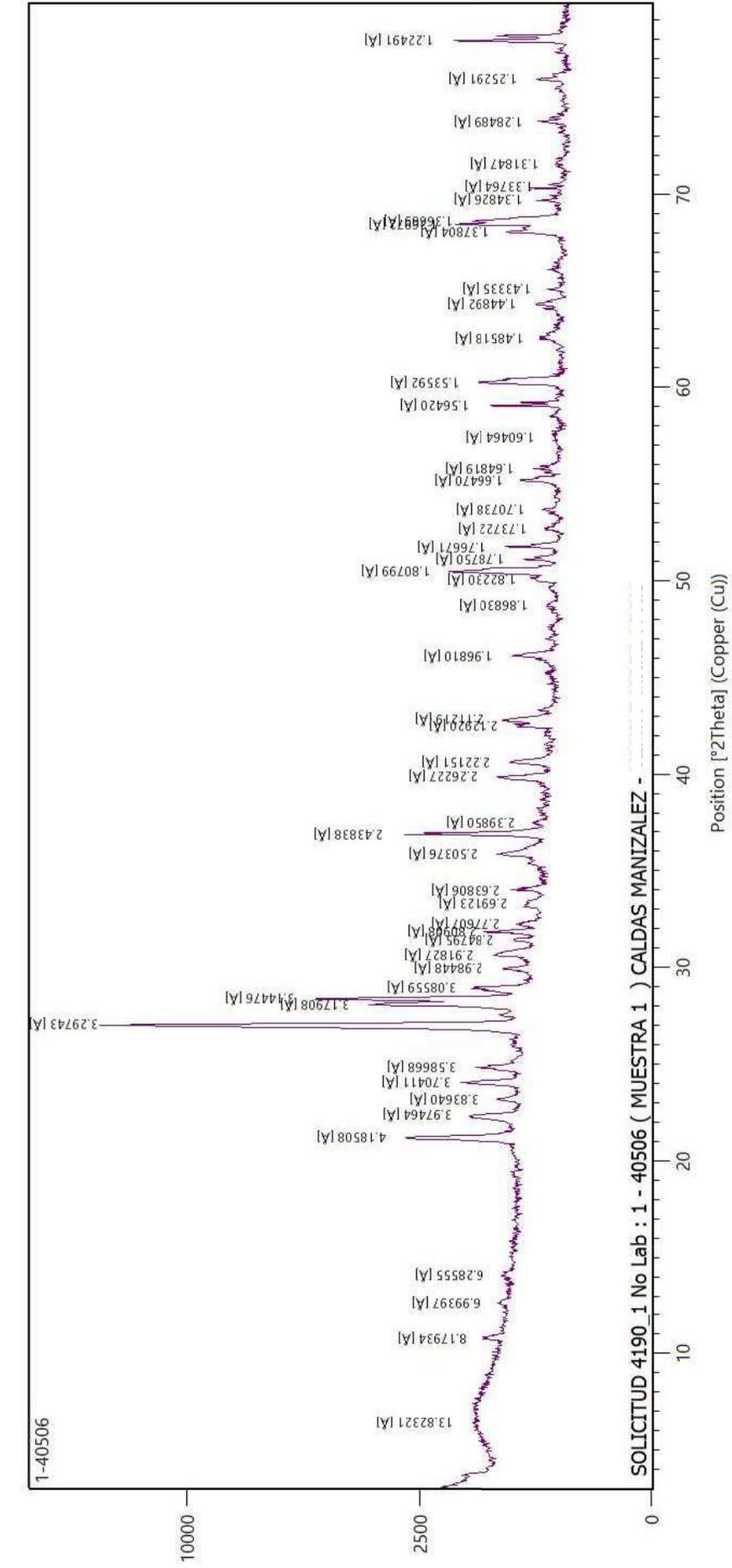
- Chan Yam, J., Solis Carcaño , R., & Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *ISSN: 1665-529X*, 39-46.
- Chávez, H., Alonso, E., Martínez, W., Rubio, J., & Chavez, L. (2006). *Concreto hidráulico elaborado con agregados locales y adicionado con ceniza volcánica*. Michoacán: Segundo Congreso Internacional de Ingeniería.
- Nilsen , & Aitcin. (1992). Properties of High-Strength Concrete Containing Light-, Normal-, and.
- al, Y. e. (2013). AAC-concrete light weight precast composite floor slab.
- Almada Navarro, D., Yeomans Reyna2, F., Nungaray Pérez, C., & Focil, A. (2006). CARACTERIZACIÓN DE CONCRETO CELULAR A BASE DE ESPUMA PREFORMADA. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural* . Puerto Vallarta, Jalisco,.
- Ayala Sánchez, I., & Urrego, J. (2020). *Fabricación de concreto liviano de 21mpa a partir de roca pómez extraída de Flandes-Tolima*. Bogotá: Universidad Francisco Jose de Caldas.
- Ayati, B., Ferradiz-Mas, V., Newport, D. J., & Cheeseman, C. (2018). Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, 124-131. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.018>
- Baquero Sanabria, B. A., Garcia, F. M., & Guiza, R. A. (2019). Estudio exploratorio de arcilla expandida y piedra pómez como agregados en la producción de concretos ligeros. *Ingeniería y desarrollo* , vol 37 .
- Chen, Y., Wu , F., Yu , Q., & Brouwers, H. (2020). Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: Acoustic. *Cement and Concrete Composites*.
- Contrafatto , L., Danzuso , C., Gazzoa , S., & Grecoa, L. (2020). Physical, mechanical and thermal properties of lightweight insulating mortar with recycled Etna volcanic aggregates. *Construction and Building Materials*.

- De la Cruz, F. J., Sáenz López, A., & Cortés Martínez, F. (2015). Concreto ligero utilizando cascara de Nuez. *Arquitectura e ingeniería vol 9, 9, 1-11*.
- Forman, P., Muller, S., Ahrens, M., Schnell, J., Mark, P., Hoffer, R., . . . Kruger, J. (2015). Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy. *Solar Energy*, 364-377.
- García González , C., Yepes , J., & Franesquia, M. (2020). Geomechanical characterization of volcanic aggregates for paving. *Transportation Geotechnics*.
- Giulia Guidobaldi, C. C. (2017). Multi-scale analysis of the mechanical improvement induced by. *Engineering Geology*, 193-201.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.012>
- Gonzalez, H. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz*. Ministerio de Minas y Energía Ingeominas.
- Guevara, D., & Lizarazu, V. (1999). *Estudio de los procesos para la obtencion de concretos ligeros*. Bogotá : U.
- Hendy, B. &. (2005). Planning for sustainable construction aggregate resources in Australia.
- Hertz, K., Castberg, A., & Christensen, J. (2014). Super-light concrete decks for building floor slabs. *Structural Concrete* 15.
- Ince, I., & Fener, M. (2016). A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated pyroclastic rocks. *Journal of African Earth Sciences*.
- Kosmatka, S., Panar, W., Kerkhoff, B., & Jussara, T. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Illinois: PCA.
- Kozo, O., Hiroki , T., & Hendro , S. (2015). Shock-absorbing capability of lightweight concrete utilizing volcanic. *Construction and Building Materials*, 261-274.
- L.Clarke, J. (2005). STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. ISBN 0-203-48766-4, 10.
- Leite, L., & Sousa, H. (2013). Mejoramiento geometrico de la unidad base de la mamposteria de hormigon en bagacina (lapilli) existente y desarrollo de un nuevo sistema de mamposteria compuesto por unidades accesorias para la construccion en las islas azores. *Revista de la construccion*, 62-74.
- Lo, & Cui. (2004). *PROPERTIES OF GREEN LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE*.

- Lomoschitz, A., Jimenez, J., & Yepes, J. (2006). Basaltic Lapilli Used for Construction Purposes in the Canary Islands, Spain. *The Geological society of America*, 327-336.
- López Garavito , L., & Sepúlveda , d. (2014). *Caracterización física de diferentes muestras de agregados pétreos para el concreto - zona norte de bogotá*. Bogotá d.c. : universidad católica de colombia.
- Macias Machin, A., Socorro, M., Verona, J., & Macias, M. (2006). New granular material for hot gas filtration: Use of the "Lapilli". *Chemical Engineering and Processing pg* , 719-727.
- Mazur, W., Drobiec, L., & Jasinski, R. (2016). Research of light concrete precast lintels. *Procedia Engineering*, 611-617.
- Morales Gubio, Santamaría Carrera, Caicedo Barona, & Tipán Quinatoa. (2018). Hormigón estructural de baja densidad para edificaciones. *Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática*.
- Mueller , S., Kueppers, U., Ayrisa , P., Jacob , M., & Dingwella, D. (2016). Experimental volcanic ash aggregation: Internal structuring of. *Earth and Planetary Science Letters*, 232-240.
- Murcia, H. F., Borrero, C. A., Pardo, N., Alvarado, G. E., Arnosio , M., & Scolamacchia, T. (2013). Volcaniclastic deposits: terminology and concepts for a classification in spanish. *Revista Geológica de América Central* 48, 15-39.
- Ortega, J., Camargo, T., Sanchez, C., & Leon, Y. (2015). Estudio de la incorporación de agregados pétreos en resinas para concreto polimérico. *Revista de Energía Química y Física*, 295-300.
- Ortiz, A. M. (2018). *Concreto Estructural Liviano Con Escoria Y Ceniza Volcánicas Del Distrito De Yura*. Arequipa: Universidad Nacional De San Agustín.
- Ospina , e., & molina , j. (2013). Legislación colombiana de cierre de minas. ¿es realmente necesaria? *Boletín de ciencias de la tierra* 34.
- Pineda , d. R. (2010). *Concreto liviano estructural con arcilla expandida termicamente extraída de canteras localizadas en el sur de la sabana de bogota*. 2010: universidad nacional de colombia.
- Poulin. (2006). Aggregate resources: Production and environmental constraints. *Environmental Geology* 23, 221-227.
- Ramirez, m. (2008). *Sostenibilidad de la explotación de materiales de construcción en el valle de aburrá*. Medellín: universidad nacional de colombia.

- Ramos, J. A. (2005). *Caracterización de fuentes de extracción de arcillas expansivas para la elaboración de agregado liviano mediante cocción*. . Medellín .
- Rivera , J., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M. (2000). Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. *Materiales de Construcción* , 39-48.
- Rodriguez , L., & Sanchez , J. (2018). Morfometría, estratigrafía, petrografía y geoquímica del cono de escoria El Morro, municipio La Argentina (Huila, Colombia). *Boletín de Geología*, 49-65.
- Salazar Márquez, h. I. (2018). *Efectos del concreto ligero con agregados de roca volcánica en la fabricación de postes en el Perú*. Lima: universidad cesar vallejo.
- Sánchez Fajardo, V., Torres, M., & Moreno, A. (2015). Hydraulic and hygrothermal properties of lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 398-407.
- Sanchez, V., Torres, M., & Moreno, A. (2013). Study of the pore structure of the lightweight concrete block with lapilli. *Construction and Building Materials*, 225-234.
- Saradar, A., Nemati, P., Shadmani Paskiabi , A., Mohtasham Moein , M., Moez , H., & Hassanzadeh Vishki , E. (2020). Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced. *Journal of Building Engineering*.
- Schumacher, K., Saßmannshausen, N., Pritzel, C., & Trettin, R. (2020). Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density. *Construction and Building Materials*, 120-167.
- Silva Guevara, E. E., & García Mirquez, n. J. (2015). *Estado del arte fenómeno de la subsidencia en Bogotá*. Bogotá: universidad distrital francisco José de caldas.
- Vallejo, J. C. (junio de 2014). Manual de geología: capítulo 6. Vulcanismo. Manizales, colombia: universidad nacional de colombia.
- Verjel, A., & Claro , G. (2017). *Diseño de morteros livianos, utilizando arcilla medianamente expansiva del barrio hatillo en Ocaña Norte de Santander y arcilla altamente expansiva del sector molinos el trigal (vía municipio zulía) en Cúcuta norte de Santander*. Ocaña: Universidad Francisco de Paula Santander.

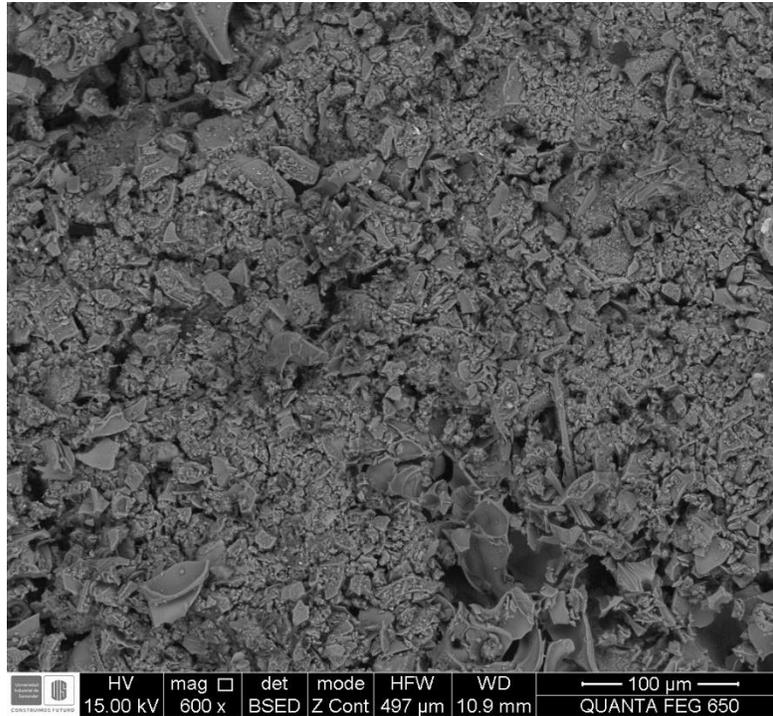
Anexo A: Resultados de difracción de rayos X



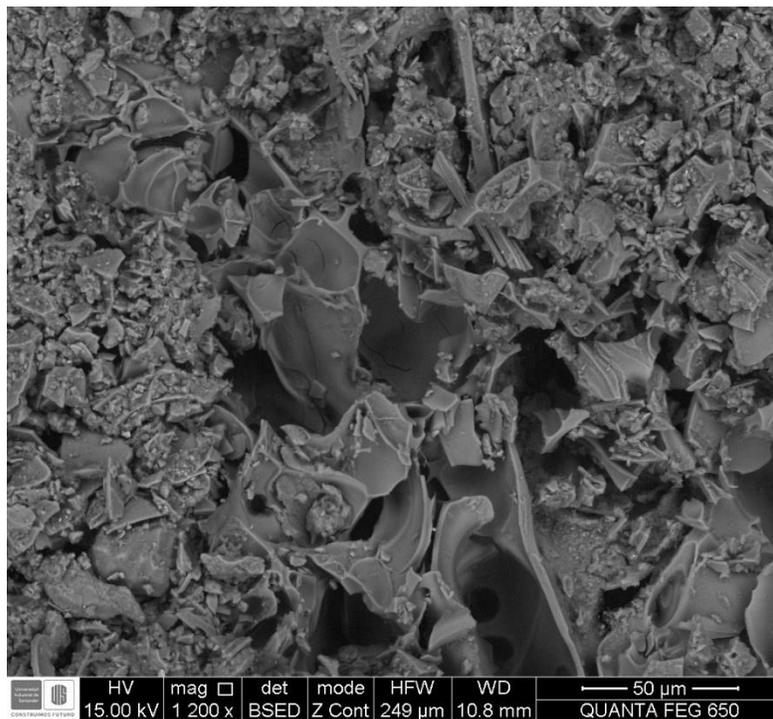
Anexo B. Imágenes SEM en partículas de agregados piroclásticos

Anexo B. Imágenes SEM en partículas de agregados piroclásticos

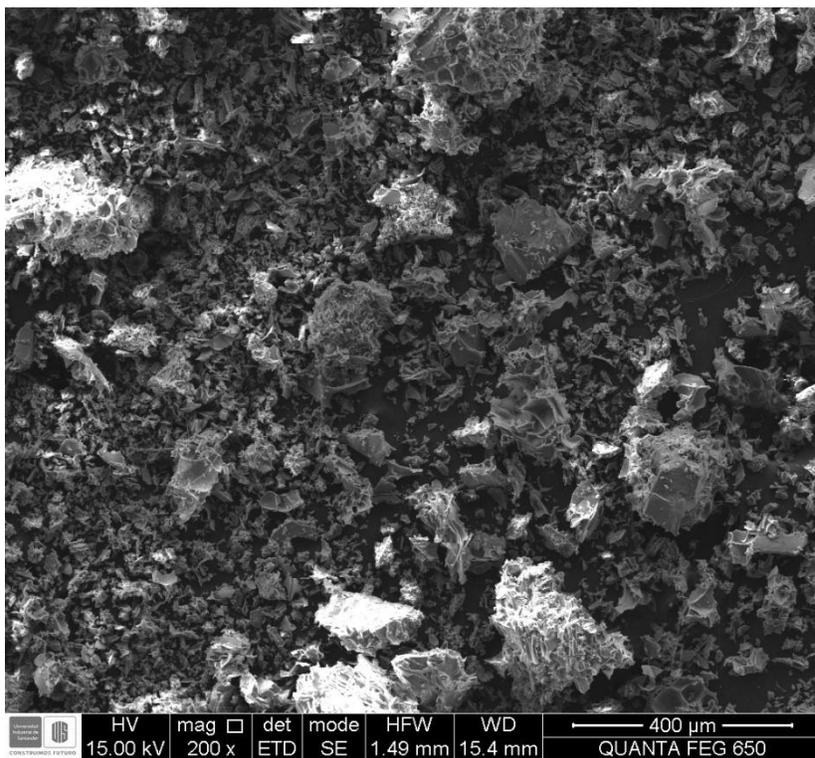
Muestra 1 – 001



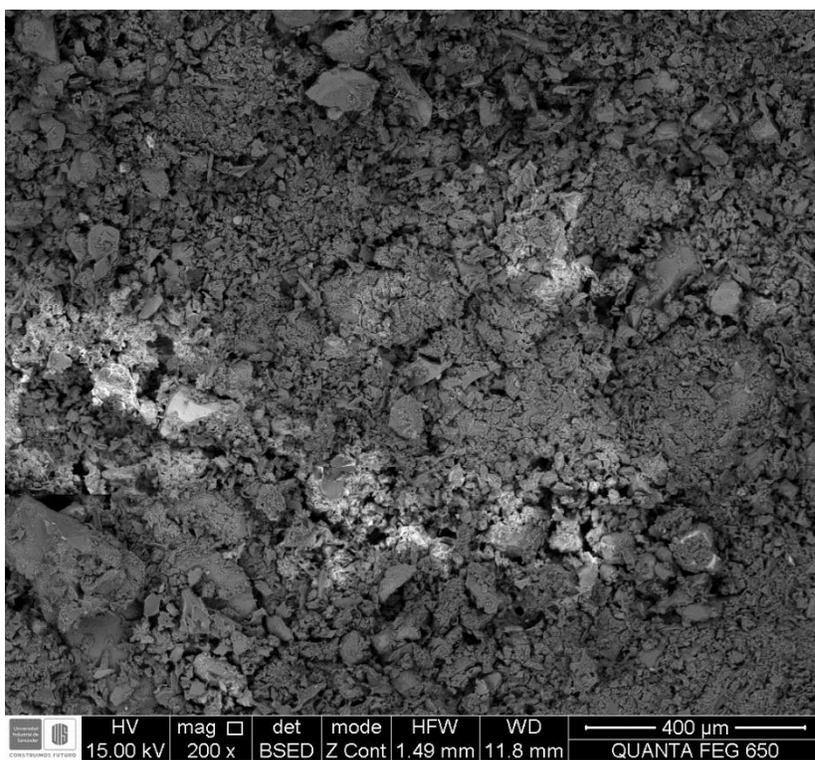
Muestra 1 – 002



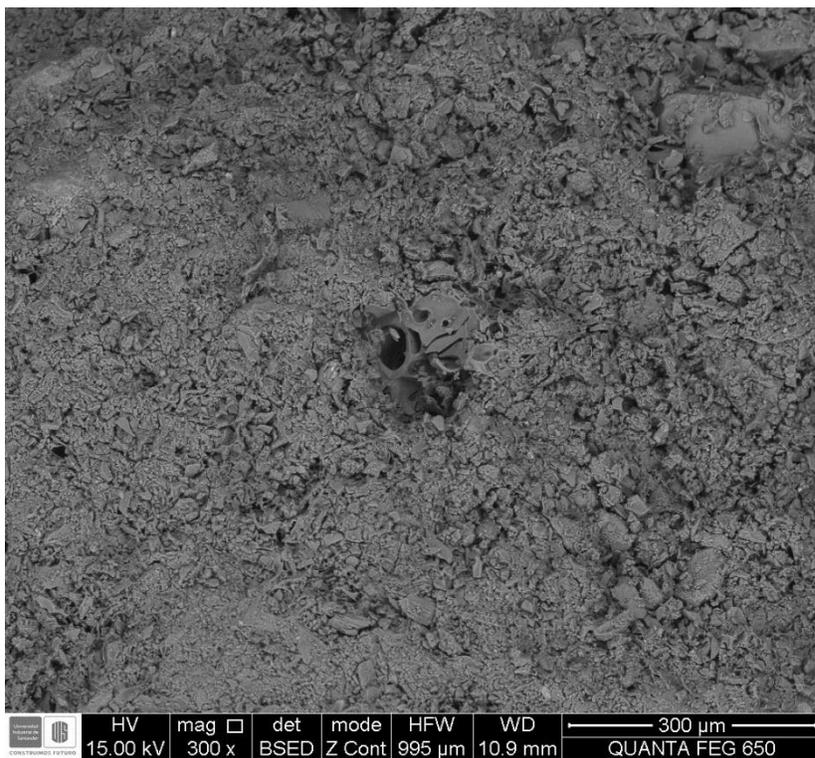
Muestra 1 – 003



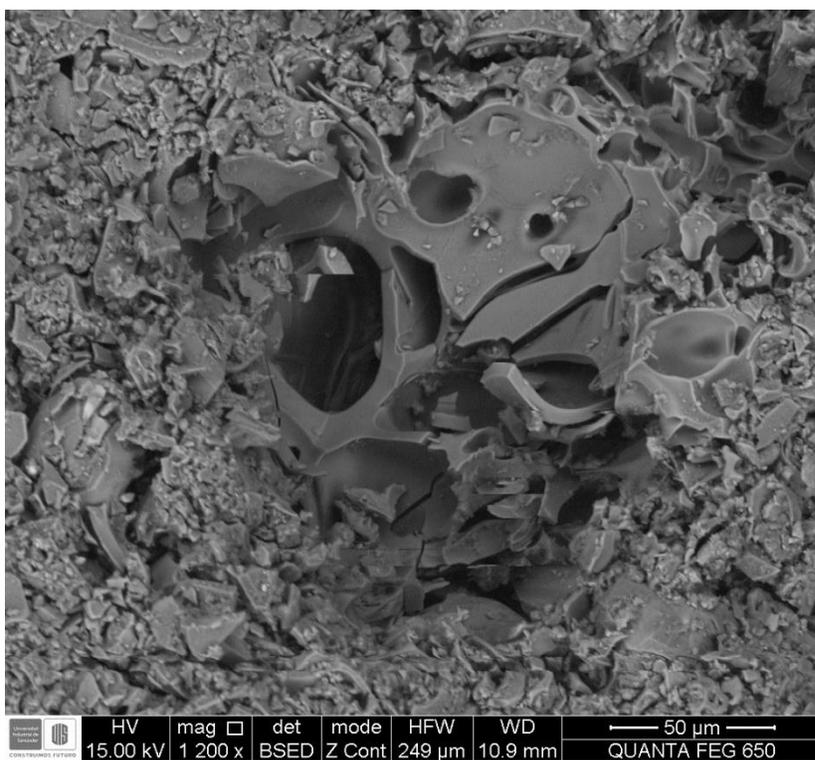
Muestra 1 – 004



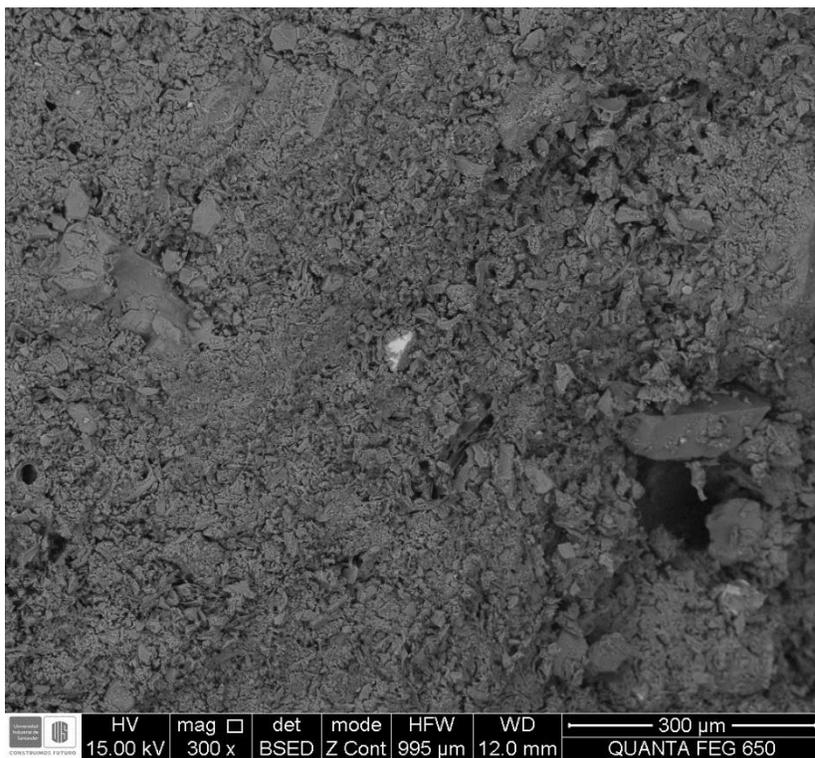
Muestra 1 – 005



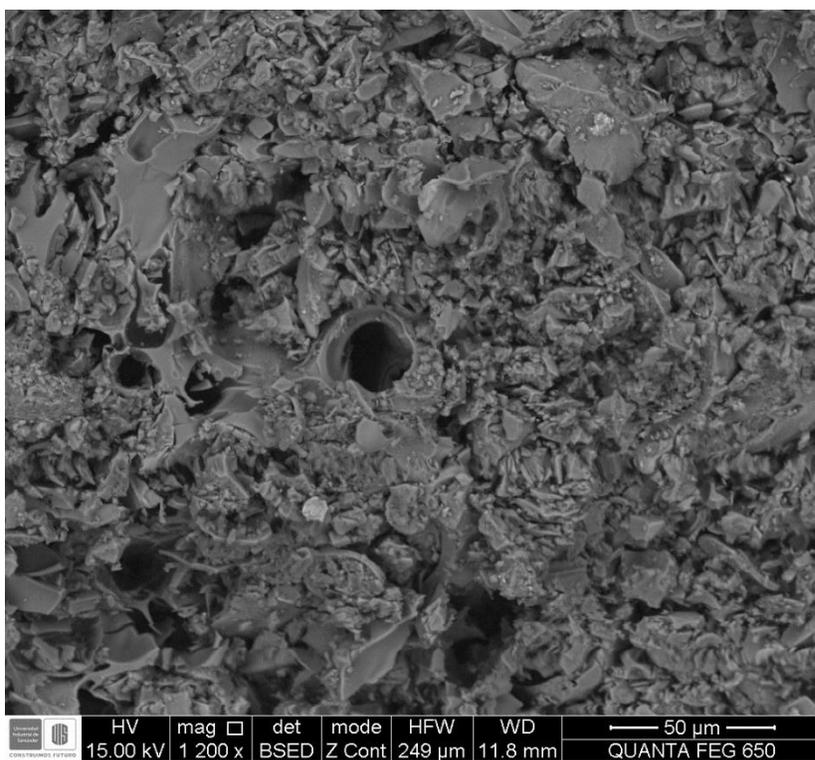
Muestra 1 – 006



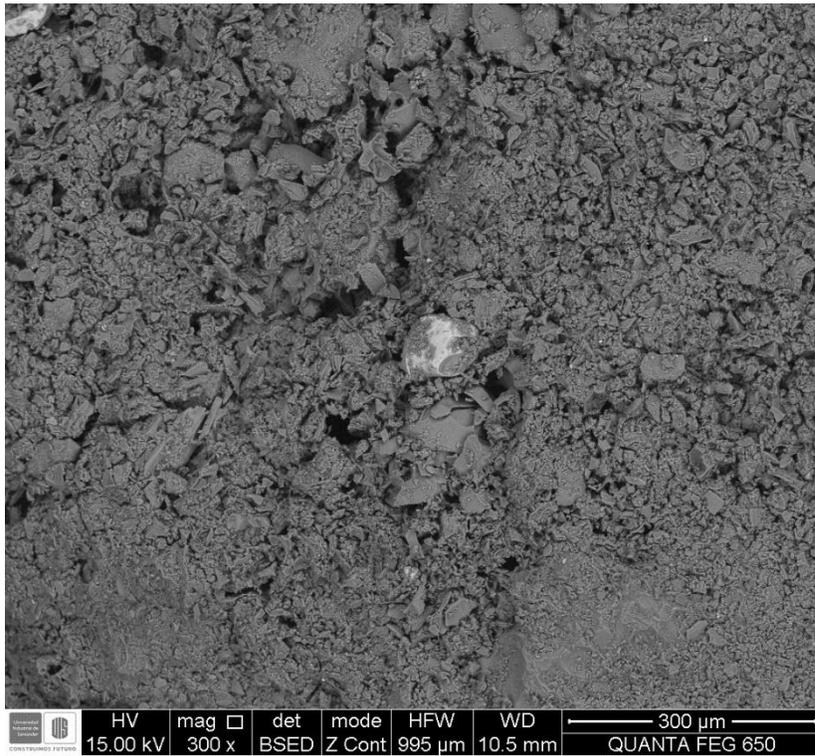
Muestra 1 – 007



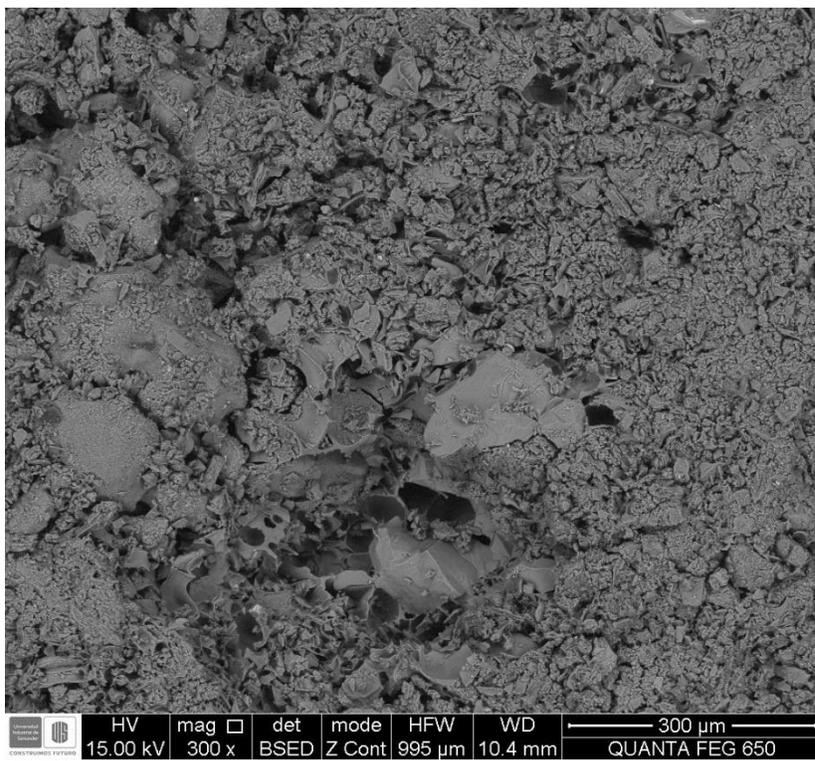
Muestra 1 – 008



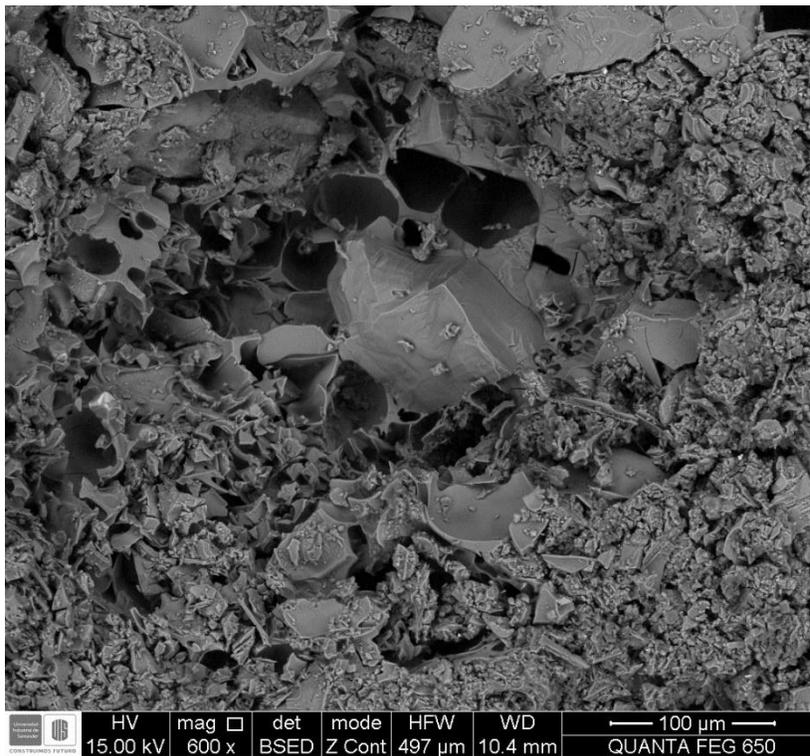
Muestra 1 – 009



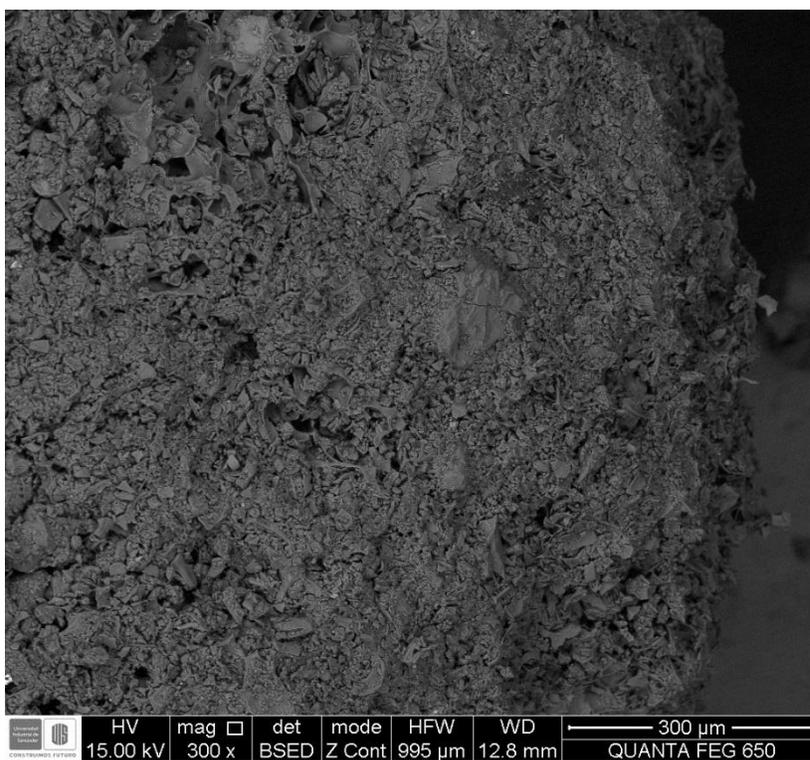
Muestra 1 – 010



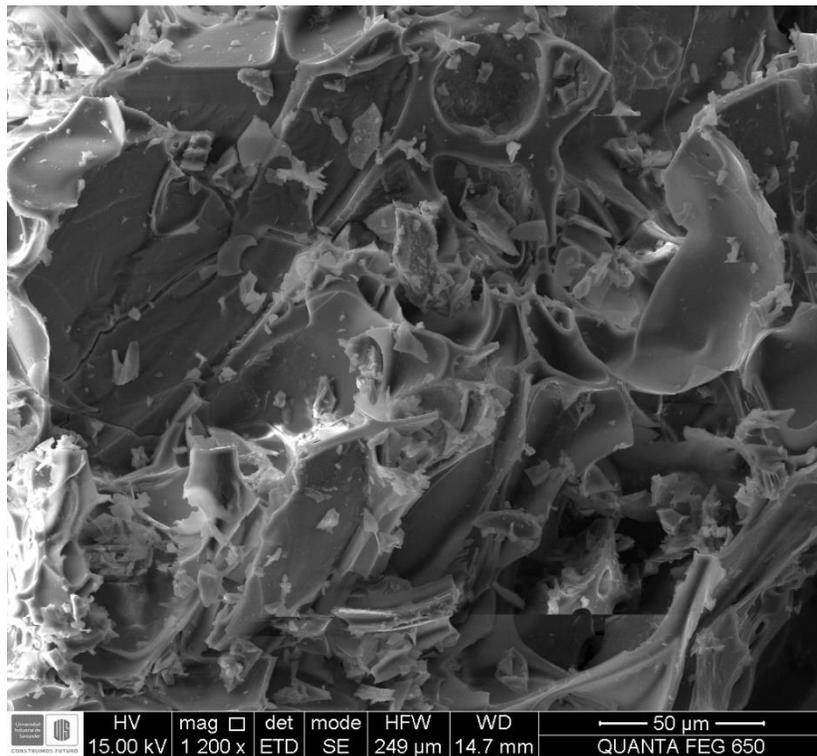
Muestra 1 – 011



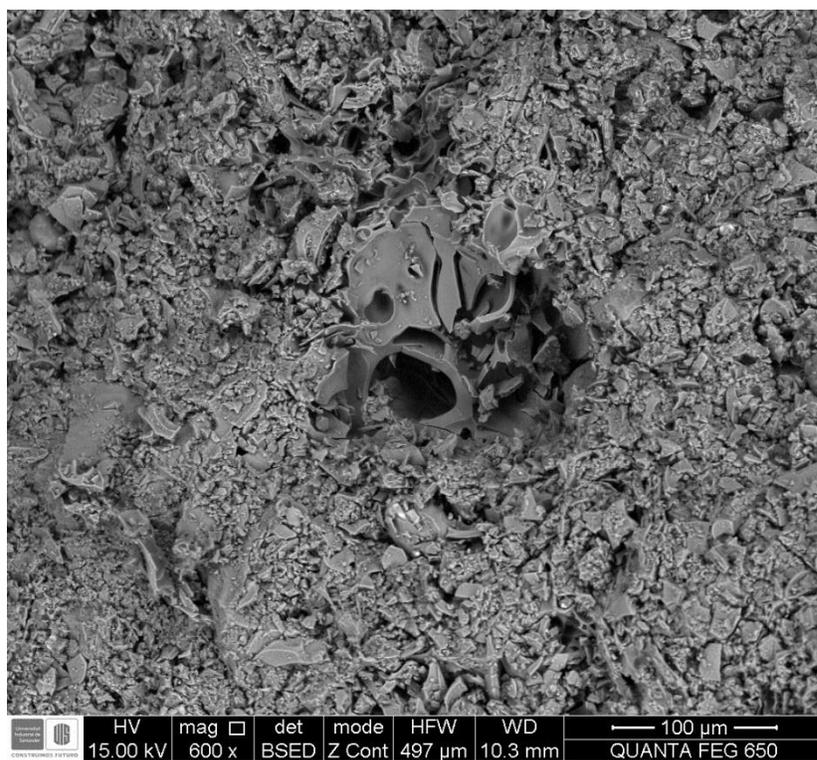
Muestra 1 – 012



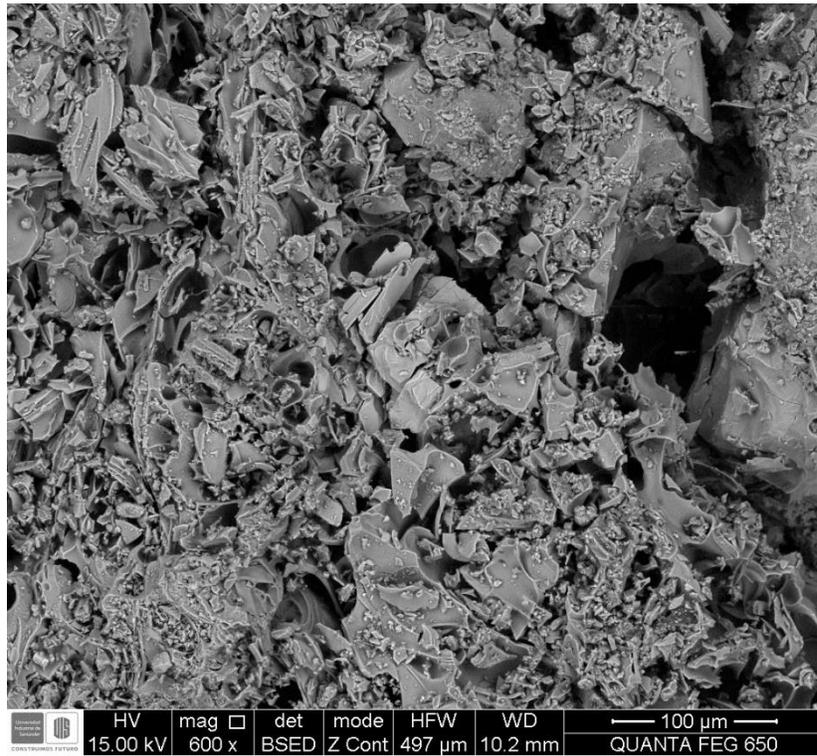
Muestra 1 – 013



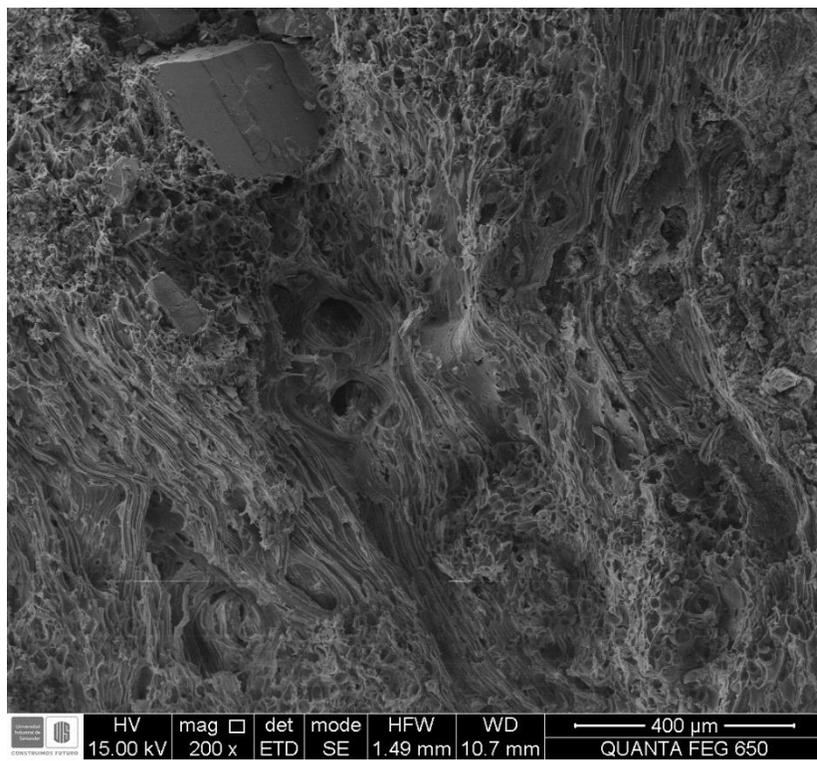
Muestra 1 – 014



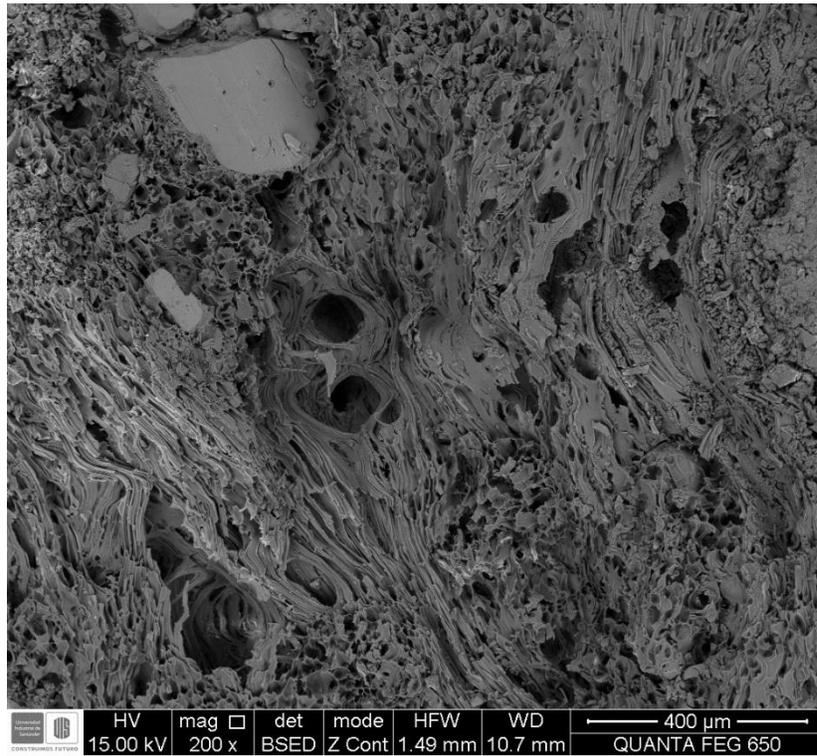
Muestra 1 – 015



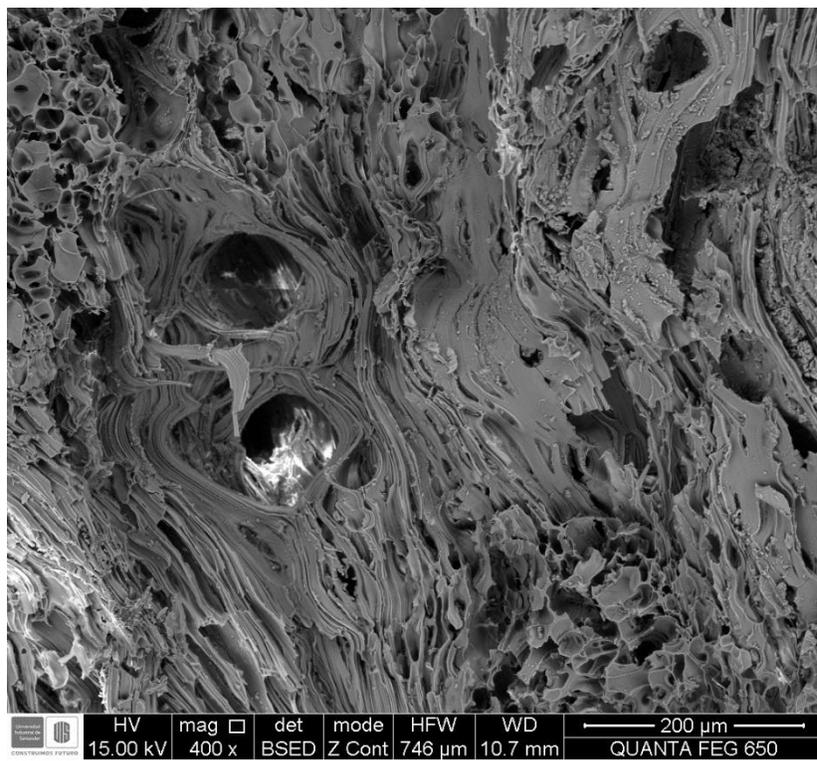
Muestra 1 – 016



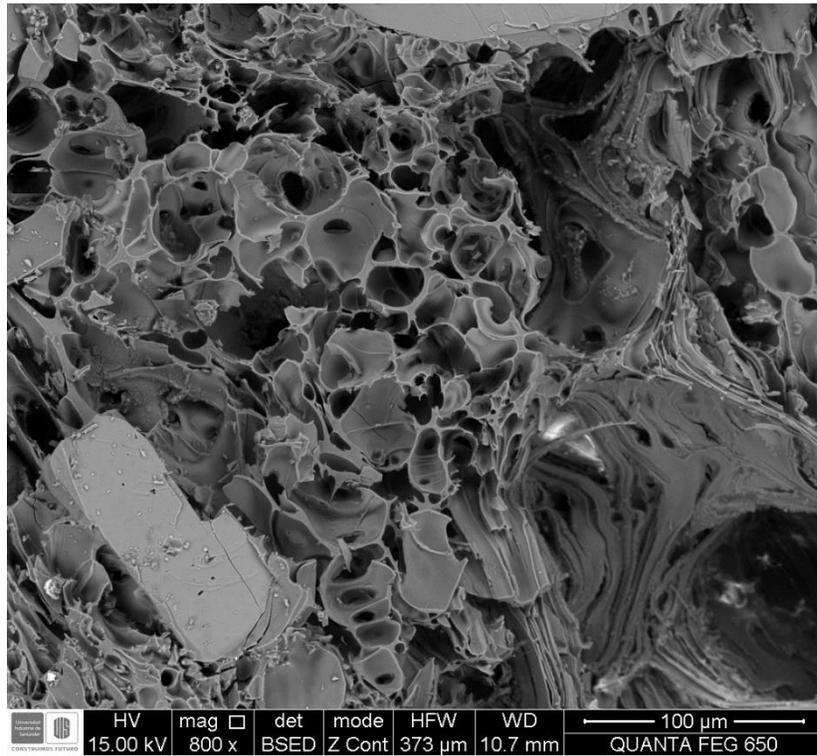
Muestra 1 – 017



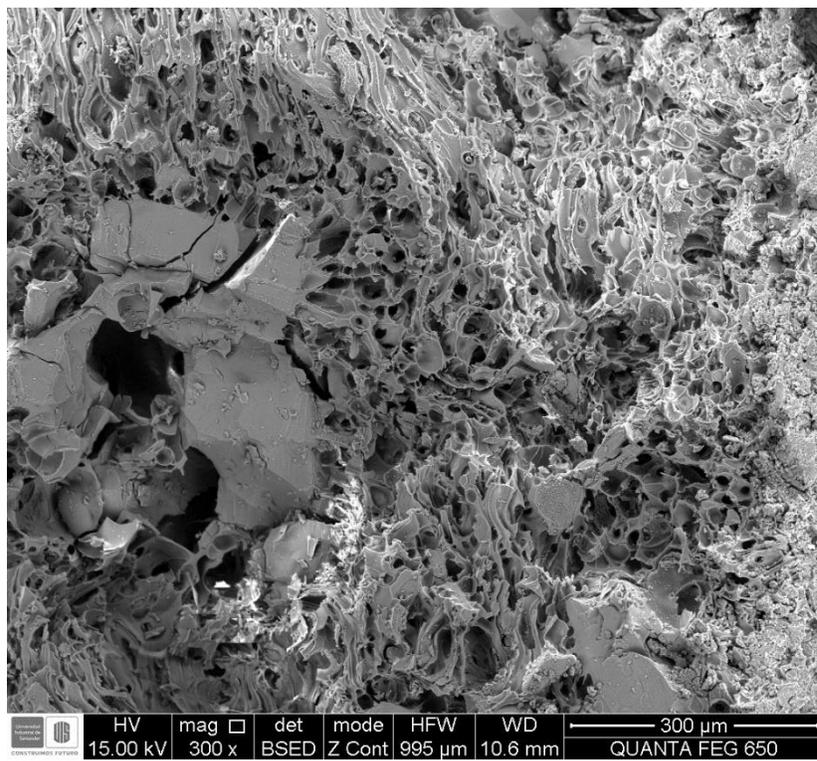
Muestra 1 – 018



Muestra 1 – 019



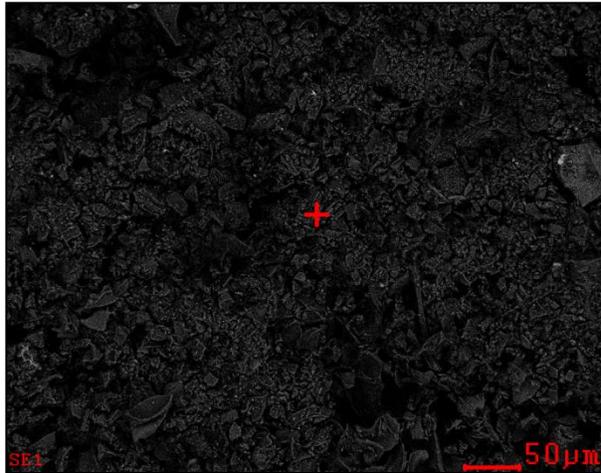
Muestra 1 – 020



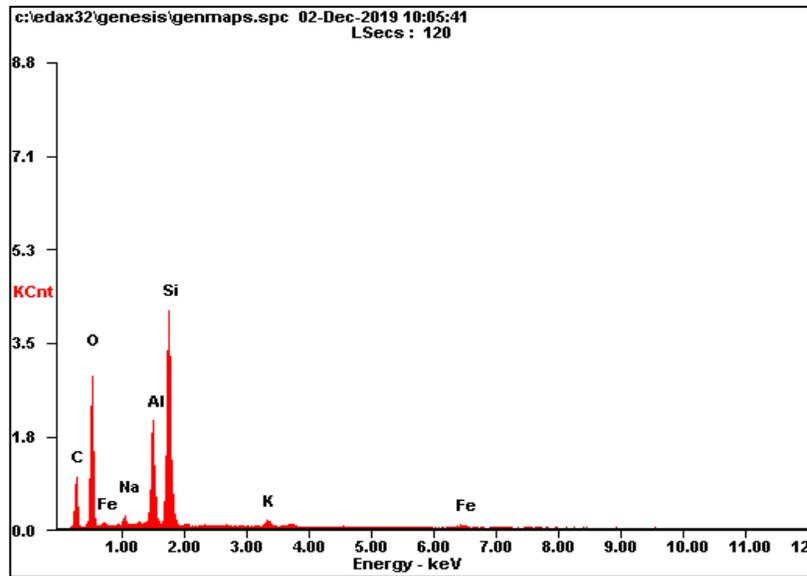
Anexo C. Análisis petrográfico en los agregados piroclásticos

18-Jan-21

Muestra 1

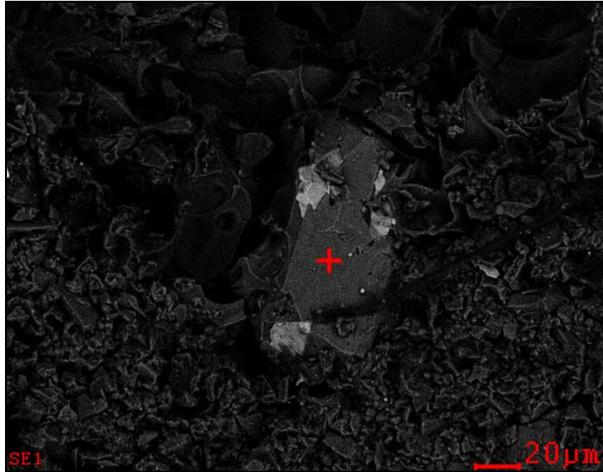


Element	Wt%	At%
<i>CK</i>	24.83	37.07
<i>OK</i>	32.48	36.39
<i>NaK</i>	01.01	00.79
<i>AlK</i>	11.03	07.33
<i>SiK</i>	26.46	16.89
<i>KK</i>	01.41	00.64
<i>FeK</i>	02.77	00.89
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

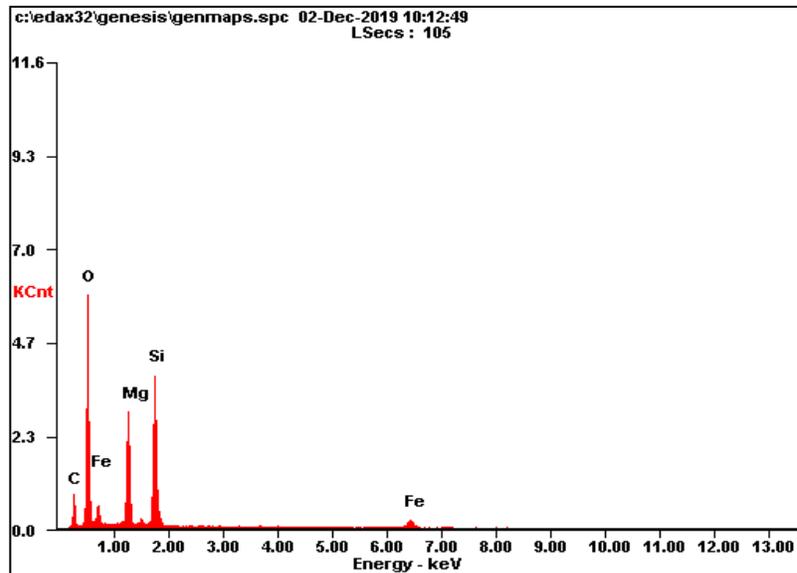


18-Jan-21

Muestra 2

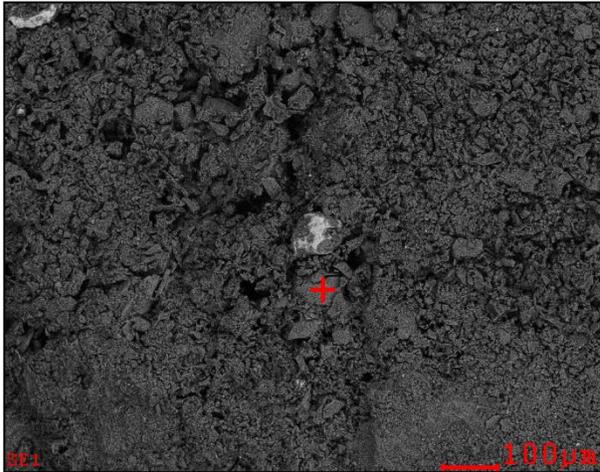


<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	15.28	24.16
<i>OK</i>	39.09	46.41
<i>MgK</i>	14.60	11.41
<i>SiK</i>	22.21	15.02
<i>FeK</i>	08.82	03.00
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

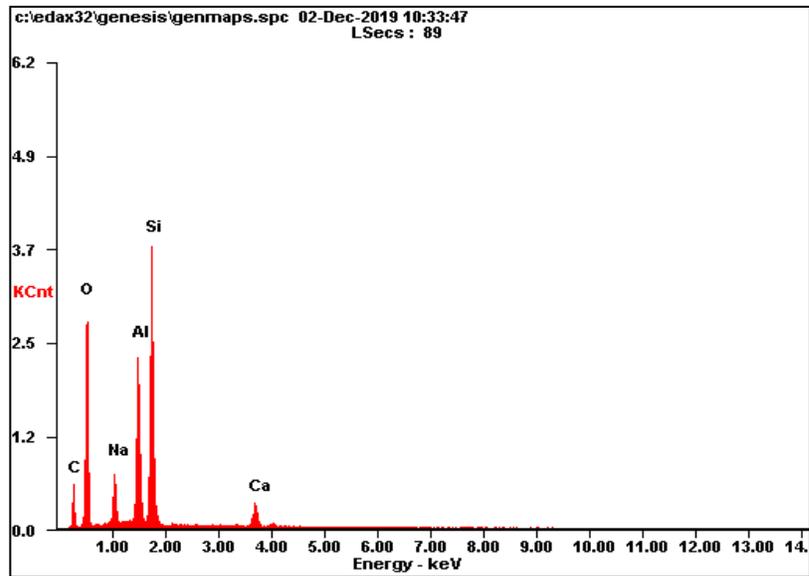


18-Jan-21

Muestra 3

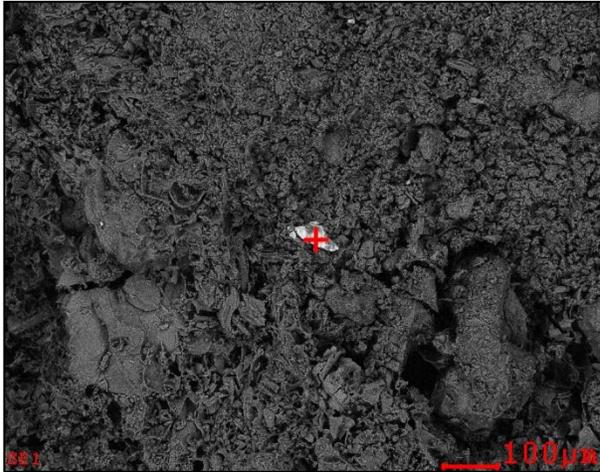


Element	Wt%	At%
CK	15.79	25.18
OK	33.56	40.19
NaK	04.46	03.72
AlK	14.24	10.11
SiK	27.04	18.45
CaK	04.91	02.35
Matrix	Correction	ZAF

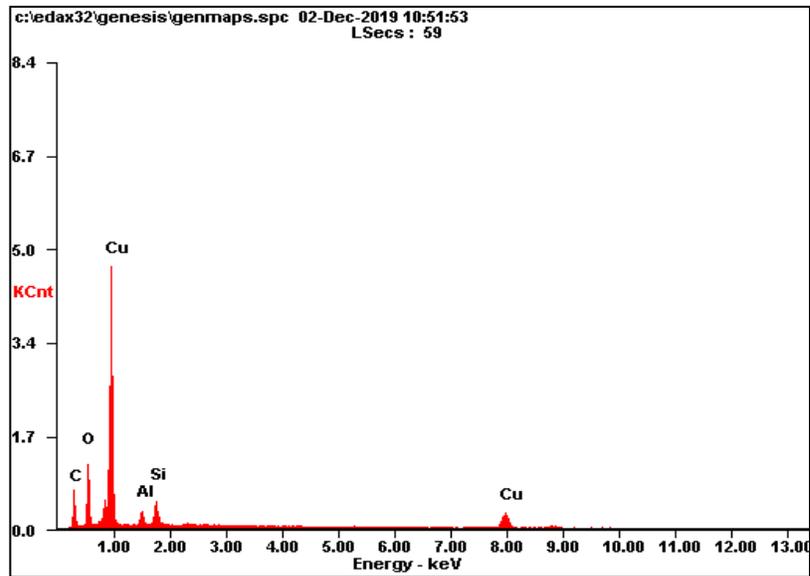


18-Jan-21

Muestra 4

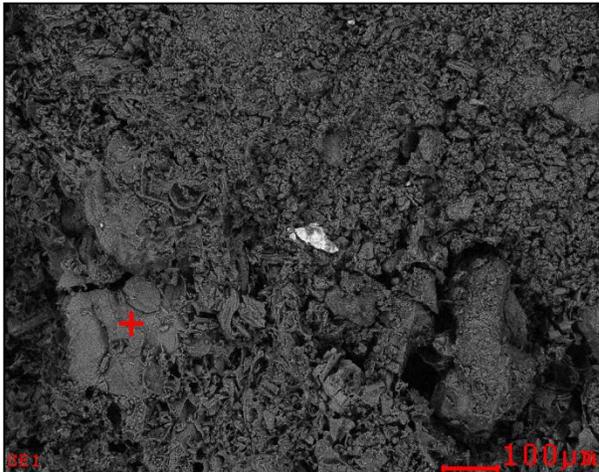


Element	Wt%	At%
CK	20.67	43.27
OK	17.60	27.66
AlK	03.41	03.18
SiK	05.62	05.03
CuK	52.71	20.86
Matrix	Correction	ZAF

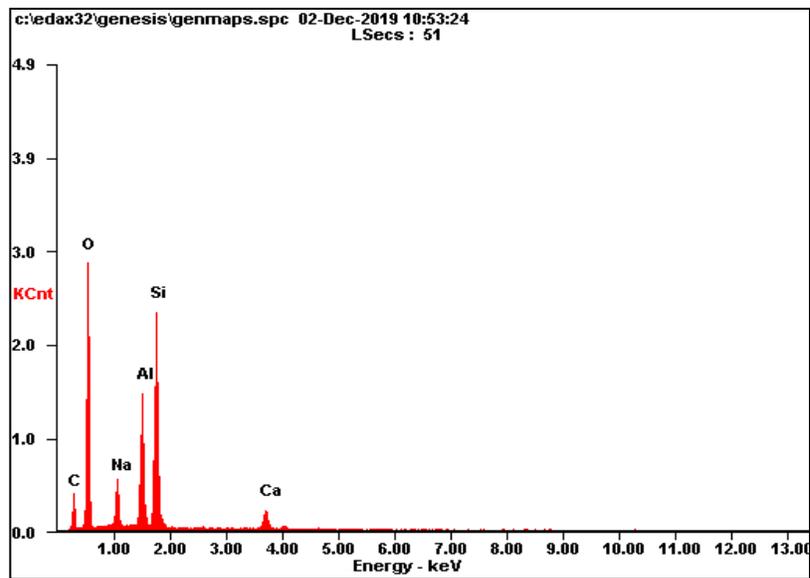


18-Jan-21

Muestra 5

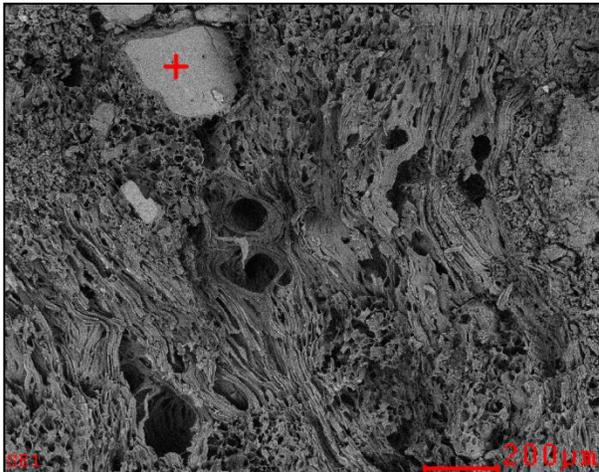


Element	Wt%	At%
<i>CK</i>	13.44	21.06
<i>OK</i>	40.81	48.03
<i>NaK</i>	04.88	04.00
<i>AlK</i>	12.64	08.82
<i>SiK</i>	24.09	16.15
<i>CaK</i>	04.14	01.95
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

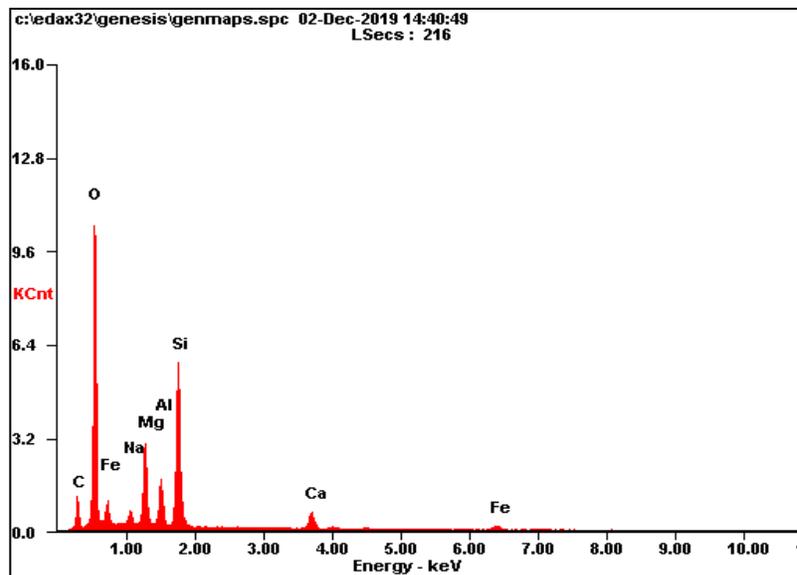


18-Jan-21

Muestra 6

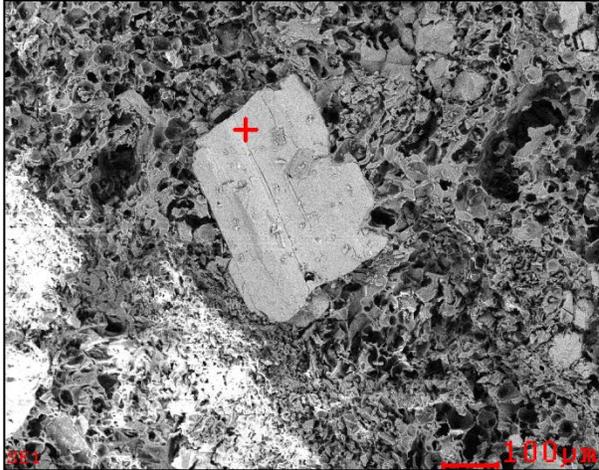


Element	Wt%	At%
<i>CK</i>	11.03	17.37
<i>OK</i>	46.16	54.59
<i>NaK</i>	01.64	01.35
<i>MgK</i>	08.89	06.92
<i>AlK</i>	04.87	03.42
<i>SiK</i>	19.45	13.10
<i>CaK</i>	04.10	01.94
<i>FeK</i>	03.85	01.30
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

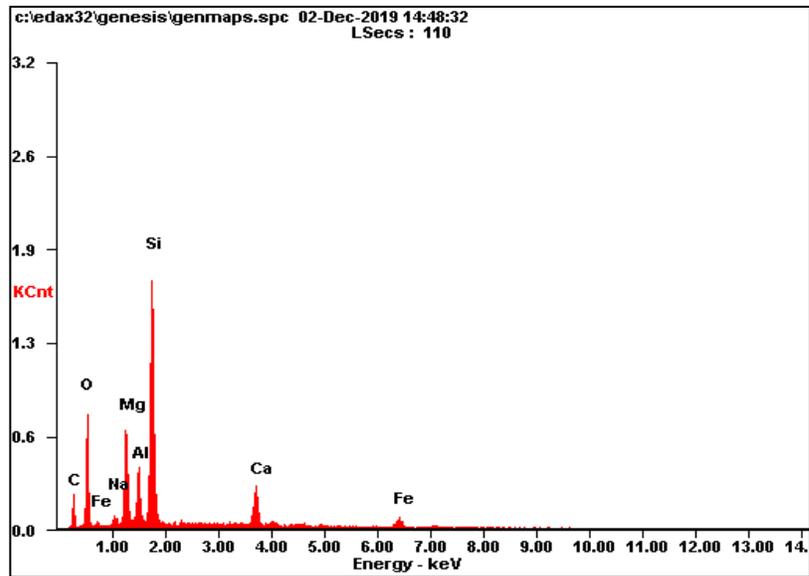


18-Jan-21

Muestra 7



Element	Wt%	At%
<i>CK</i>	13.68	24.39
<i>OK</i>	23.26	31.14
<i>NaK</i>	00.97	00.90
<i>MgK</i>	09.75	08.59
<i>AlK</i>	05.90	04.69
<i>SiK</i>	29.26	22.31
<i>CaK</i>	09.29	04.96
<i>FeK</i>	07.89	03.03
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



Anexo D. Resultados ensayos de caracterización

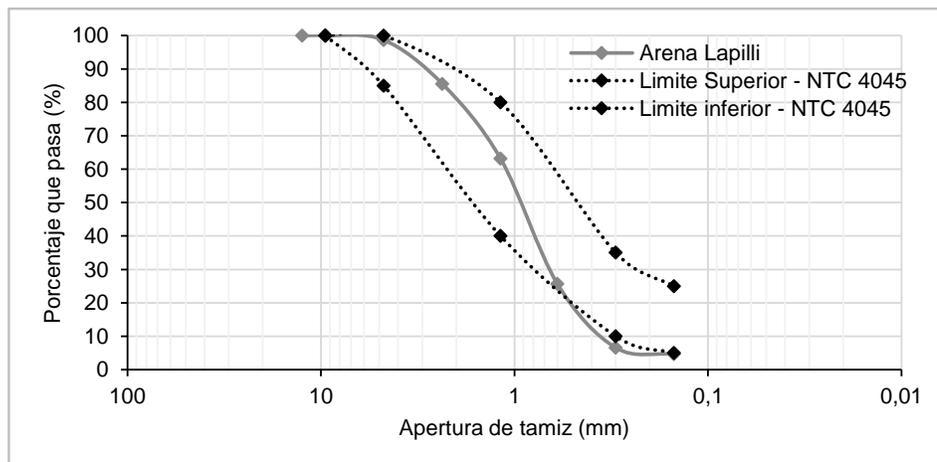
**MÉTODO PARA DETERMINAR POR LAVADO EL MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ 75 μm EN AGREGADOS MINERALES
(NTC 78)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 30 de agosto del 2019
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ N°200			
$M_T =$	2000,00	$P =$	12
$M_L =$	1760,00		
$P = [(M_T - M_L) / M_T] * 100$			
$P =$ Porcentaje del material mas fino que el tamiz N° 200			
$M_T =$ Masa seca total de la muestra (g)			
$M_L =$ Masa seca de la muestra después del lavado (g)			

**MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS
(NTC 77)**

Masa Total Seca (g) =		304,00					
TAMIZ		PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA	Gravas %	
Alternativo	Milímetros					TM	3/8"
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100	TMN	N° 8
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100	Arenas %	95
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100	Arenas gruesas %	
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100	Arenas Medias %	
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100	Arena Finas %	
N° 4	4,75	4,00	1,32	1,32	99	Finos %	
N° 8	2,36	40,00	13,16	14,47	86	Modulo de finura	3,16
N° 16	1,180	68,00	22,37	36,84	63		
N° 30	0,600	114,00	37,50	74,34	26	D10	0,35
N° 50	0,300	58,00	19,08	93,42	7	D30	0,67
N° 100	0,150	6,00	1,97	95,39	5	D60	1,14
N° 200	0,075	4,00	1,32	96,71	3	Cu	3,22
FONDO		4,00				Cc	1,10

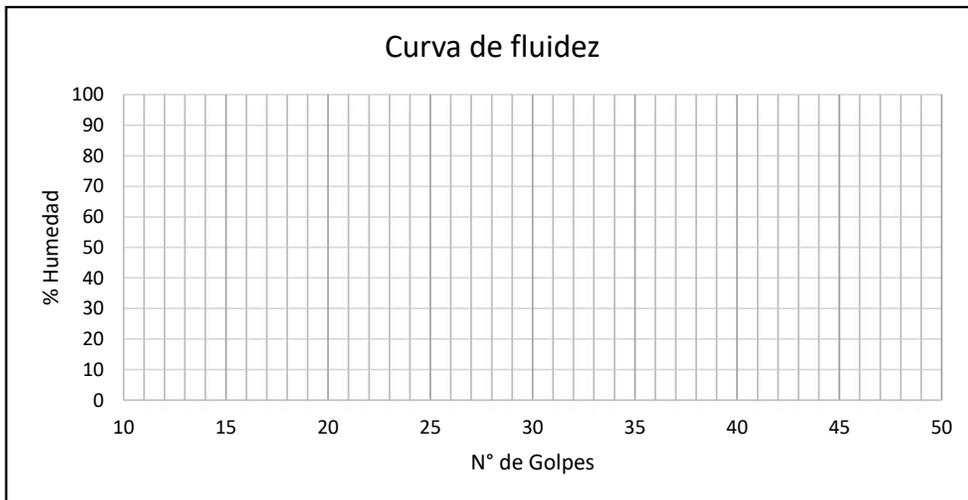


MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, DEL LÍMITE PLÁSTICO Y DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS COHESIVOS (NTC 4630)

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 13 de julio del 2019
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

LÍMITES DE ATTERBERG

Ensayo N°	Limite plástico			Limite liquido			
	1	2	3	1	2	3	4
Capsula N°							
Numero de Golpes							
1 Masa capsula + Muestra Húmeda (g)							
2 Masa Capsula + Muestra Seco (g)							
3 Masa de la capsula							
4 Masa del agua (1-2)							
5 Masa del suelo seco (2-3) (g)							
6 Humedad (4/5)*100							
7 Promedio limite plástico (%)							



Limite liquido % NA Limite plástico % NA Índice de plasticidad % NA

Observaciones: La muestra no presenta limite liquido, no se logro realizar el ensayo, la muestra presentaba exudación de agua, no se lograban armar los rollos, muestra arenosa

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADO FINO PARA CONCRETO
(NTC 127)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 08 de julio del 2019
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

	Placa	Color Gardner estándar N°	Placa orgánica N°	Criterio	Clasificación
Amarillo Claro		5	1	Aceptable	-
Amarillo		8	2	Aceptable	x
Ámbar		11	3 (estándar)	Aceptable	-
Ámbar oscuro		14	4	No Aceptable	-
Negro		16	5	No Aceptable	-



Observaciones: De la muestra original se obtienen un numero de placa N° 5 de color negro no aceptable para muestras de concreto, con el tratamiento de cal reemplazando el 1 y 2% en peso de la muestra se obtiene color de placa N° 5, con reemplazo al 5% de color N° 3, con el reemplazo del 10% color de placa N° 2 y por ultimo con reemplazo del 20% color de placa N° 1.

EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS
INV-E-133-13

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 08 de julio del 2019
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

EQUIVALENTE DE ARENA			
Muestra	1	2	3
Nivel de la arena	78	77	80
Nivel de la arcilla	95	97	98
Equivalente de Arena %	82	79	82
Promedio Equivalente de Arena %	81		

$$\text{Equivalente de arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$



Observaciones:

**MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO
(NTC 237)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 15 de julio del 2019
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

DENSIDAD Y ABSORCIÓN			
Ensayo	1	2	3
A (g)	484,20		
B (g)	688,50		
S (g)	500,00		
C (g)	969,90		
$D_{s \text{ aparente}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,21		
$D_{s \text{ aparente (base sss)}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,28		
$D_{s \text{ nominal}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,38		
Absorción %	3,26		

A	Masa en el aire de la muestra secada al horno (g)
B	Masa del picnómetro lleno con agua (g)
S	Masa de la muestra saturada y superficialmente seca
C	Masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración (g)

$$D_{s \text{ aparente}} = \frac{0,9975 * A}{(B + S - C)}$$

$$D_{s \text{ aparente (base SSS)}} = \frac{0,9975 * S}{(B + S - C)}$$

$$D_{s \text{ nominal}} = \frac{0,9975 * A}{(B + A - C)}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(S - A)}{A} * 100$$

Observaciones:

**DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS
(NTC 92)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 30 de agosto del 2019
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

CALIBRACION DEL MOLDE		
	Masa del molde + Vidrio (kg)	3,256
	Masa del molde + Vidrio + Agua (kg)	6,06
V	Volumen del molde (m ³)	0,0028

Temperatura del agua (°C): 17

Densidad del agua (kg/m³) 998,77

MASA UNITARIA SUELTA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	3,730	3,698	3,760
M	776		
A	3,26		
Msss	801,74		
S	2,21		
% Vacíos	65		

MASA UNITARIA APISONADA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	3,878	3,862	3,898
M	830		
A	3,26		
Msss	856,91		
S	2,21		
% Vacíos	62		

- T Masa del molde (kg)
- V Volumen del molde (m³)
- G Masa del agregado mas el molde (suelta o apisonada) (kg)
- M Masa unitaria del agregado suelta o apisonada (kg/m³)
- A % de absorción
- Msss Masa unitaria en condición SSS (kg/m³)
- S Gravedad especifica aparente (g/cm³)
- W Densidad del agua (kg/m³)
- % Vacíos Porcentaje de vacíos %

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

$$M_{sss} = M * \left[1 + \frac{(A)}{100} \right]$$

$$\%vacios = 100 * \frac{(S * W) - M}{(S * W)}$$

Observaciones:

**METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES EN
LOS AGREGADOS
(NTC 589)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Jeniffer Sánchez
FECHA: 09 de septiembre del 2020
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

Resultados			
M=	50,00	P=	5
R=	47,30		
$P = [(M - R)/M] * 100$			
P= Porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales			
M= masa de la muestra de ensayo (g)			
R = Masa de las partículas retenidas en el tamiz designado (g)			

Observaciones:

**MÉTODOS DE ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS CEMENTOS HIDRÁULICOS
(NTC 184)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Jeniffer Sánchez
FECHA: 09 de septiembre del 2020
MATERIAL: Agregado fino Lapilli

Resultados			
$M_i =$	1,00	$P =$	11
$M_f =$	0,89		
$P = [(M_i - M_f) / M_i] * 100$			
$P =$ Porcentaje de pérdida por calcinación			
$M_i =$ masa inicial (g)			
$M_f =$ masa final (g)			

Observaciones:

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE REACTIVIDAD DE LOS AGREGADOS AL ÁLCALI (MÉTODO DE BARRAS DE MORTERO)
NTC 6222 (VERSIÓN 2017) Y ASTM C 1260**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
 NOMBRE DEL LABORATORISTA: Jeniffer Sánchez
 FECHA: 25 de agosto del 2020
 MATERIAL: Lapilli

	Agregado fino	Cemento
Tipo	Lapilli	Argos estructural
Fuente	Volcán Nevado del Ruíz	Homecenter

Lectura(mm)	Inicial	Cero	1	2	5	7	9	12	14	
Probeta 1	Máximo	4,160	4,168	4,170	4,172	4,175	4,448	4,514	4,529	4,542
	Mínimo	4,150	4,162	4,167	4,170	4,182	4,442	4,494	4,504	4,538
	Promedio	4,155	4,165	4,169	4,171	4,179	4,445	4,504	4,517	4,540
Probeta 2	Máximo	3,347	3,358	3,364	3,386	3,395	3,400	3,425	3,452	3,474
	Mínimo	3,331	3,334	3,342	3,368	3,375	3,388	3,410	3,458	3,460
	Promedio	3,339	3,346	3,353	3,377	3,385	3,394	3,418	3,455	3,467
Probeta 3	Máximo	3,456	3,460	3,468	3,475	3,482	3,484	3,488	3,491	3,571
	Mínimo	3,423	3,435	3,441	3,445	3,457	3,460	3,472	3,481	3,654
	Promedio	3,440	3,448	3,455	3,460	3,470	3,472	3,480	3,486	3,613

Expansión %	Probeta 1			0,001	0,002	0,005	0,110	0,133	0,138	0,148
	Probeta 2			0,003	0,012	0,015	0,019	0,028	0,043	0,048
	Probeta 3			0,003	0,005	0,009	0,010	0,013	0,015	0,065
Expansión promedio %				0,002	0,006	0,010	0,046	0,058	0,065	0,087



Observaciones:

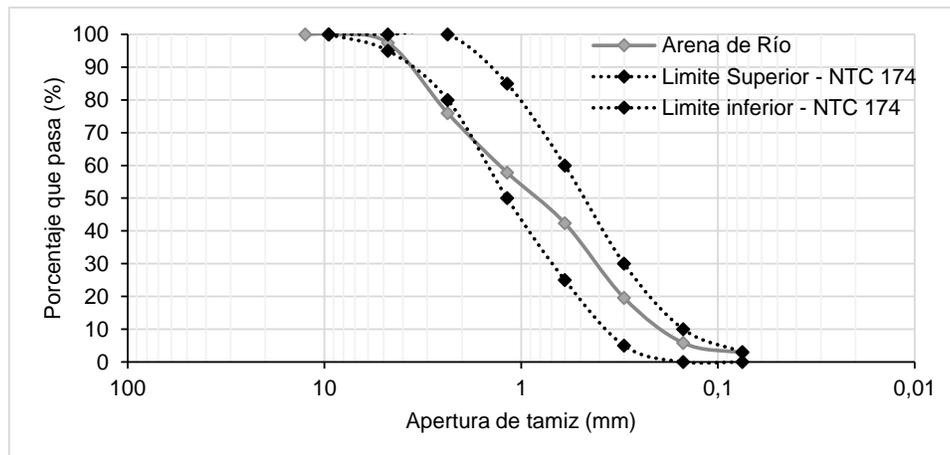
**MÉTODO PARA DETERMINAR POR LAVADO EL MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ 75 μm EN AGREGADOS MINERALES
(NTC 78)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 30 de agosto del 2019
MATERIAL: Arena de rio

MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ N°200			
$M_T =$	500,00	$P =$	7
$M_L =$	464,00		
$P = [(M_T - M_L) / M_T] * 100$			
$P =$ Porcentaje del material mas fino que el tamiz N° 200			
$M_T =$ Masa seca total de la muestra (g)			
$M_L =$ Masa seca de la muestra después del lavado (g)			

**MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS
(NTC 77)**

Masa Total Seca (g) =		465,00					
TAMIZ		PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA		
Alternativo	Milímetros					Gravas %	
						TM	3/8"
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100	TMN	N° 4
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100	Arenas %	95
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100	Arenas gruesas %	
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100	Arenas Medias %	
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100	Arena Finas %	
N° 4	4,75	12,00	2,58	2,58	97	Finos %	
N° 8	2,36	100,00	21,51	24,09	76	Modulo de finura	3,01
N° 16	1,180	84,00	18,06	42,15	58		
N° 30	0,600	72,00	15,48	57,63	42	D10	0,20
N° 50	0,300	106,00	22,80	80,43	20	D30	0,44
N°100	0,150	64,00	13,76	94,19	6	D60	1,32
N° 200	0,075	14,00	3,01	97,20	3	Cu	6,75
FONDO		6,00				Cc	0,74

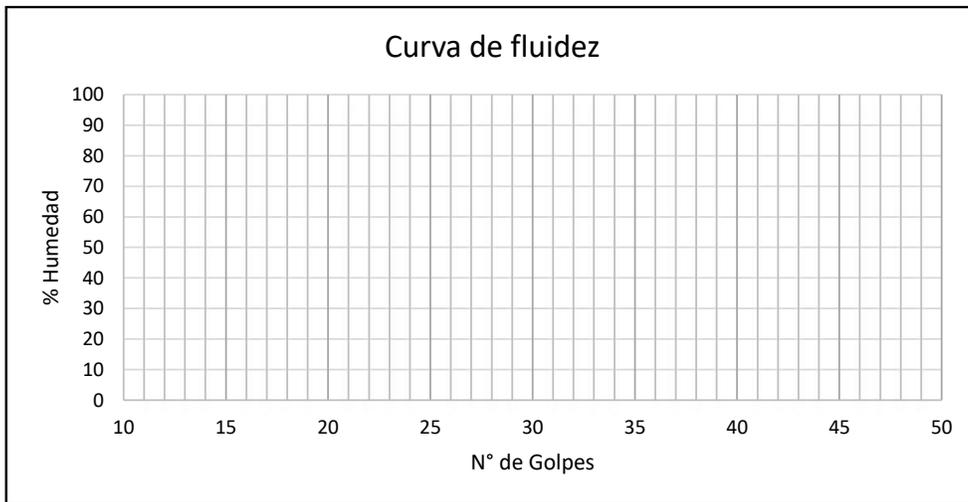


MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, DEL LÍMITE PLÁSTICO Y DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS COHESIVOS (NTC 4630)

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 30 de agosto del 2019
MATERIAL: Arena de rio

LÍMITES DE ATTERBERG

Ensayo N°	Limite plástico			Limite liquido			
	1	2	3	1	2	3	4
Capsula N°							
Numero de Golpes							
1 Masa capsula + Muestra Húmeda (g)							
2 Masa Capsula + Muestra Seco (g)							
3 Masa de la capsula							
4 Masa del agua (1-2)							
5 Masa del suelo seco (2-3) (g)							
6 Humedad (4/5)*100							
7 Promedio limite plástico (%)							



Limite liquido % NA Limite plástico % NA Índice de plasticidad % NA

Observaciones: La muestra no presenta limite liquido, no se logro realizar el ensayo, la muestra presentaba exudación de agua, no se lograban armar los rollos, muestra arenosa, sin limite liquido y limite plástico

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADO FINO PARA CONCRETO
(NTC 127)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 31 de agosto del 2019
MATERIAL: Arena de rio

	Placa	Color Gardner estándar N°	Placa orgánica N°	Criterio	Clasificación
Amarillo Claro		5	1	Aceptable	x
Amarillo		8	2	Aceptable	-
Ámbar		11	3 (estándar)	Aceptable	-
Ámbar oscuro		14	4	No Aceptable	-
Negro		16	5	No Aceptable	-



Observaciones:

EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS
INV-E-133-13

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 31 de agosto del 2019
MATERIAL: Arena de rio

EQUIVALENTE DE ARENA			
Muestra	1	2	3
Nivel de la arena	67	58	58
Nivel de la arcilla	111	111	99
Equivalente de Arena %	60	52	59
Promedio Equivalente de Arena %	57		

$$\text{Equivalente de arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$



Observaciones:

**MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO
(NTC 237)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 05 de septiembre del 2019
MATERIAL: Arena de río

DENSIDAD Y ABSORCIÓN			
Ensayo	1	2	3
A (g)	490,00		
B (g)	690,20		
S (g)	500,00		
C (g)	1000,60		
$D_{s \text{ aparente}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,58		
$D_{s \text{ aparente (base sss)}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,63		
$D_{s \text{ nominal}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,72		
Absorción %	2,04		

A	Masa en el aire de la muestra secada al horno (g)
B	Masa del picnómetro lleno con agua (g)
S	Masa de la muestra saturada y superficialmente seca
C	Masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración (g)

$$D_{s \text{ aparente}} = \frac{0,9975 * A}{(B + S - C)}$$

$$D_{s \text{ aparente (base SSS)}} = \frac{0,9975 * S}{(B + S - C)}$$

$$D_{s \text{ nominal}} = \frac{0,9975 * A}{(B + A - C)}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(S - A)}{A} * 100$$

Observaciones:

**DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS
(NTC 92)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 31 de agosto del 2019
MATERIAL: Arena de rio

CALIBRACION DEL MOLDE		
	Masa del molde + Vidrio (kg)	3,256
	Masa del molde + Vidrio + Agua (kg)	6,06
V	Volumen del molde (m ³)	0,0028

Temperatura del agua (°C): 17

Densidad del agua (kg/m³) 998,77

MASA UNITARIA SUELTA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	5,482	5,640	5,740
M	1450		
A	2,04		
Msss	1479,68		
S	2,58		
% Vacíos	44		

MASA UNITARIA APISONADA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	6,148	6,288	6,296
M	1672		
A	2,04		
Msss	1706,24		
S	2,58		
% Vacíos	35		

- T Masa del molde (kg)
- V Volumen del molde (m³)
- G Masa del agregado mas el molde (suelta o apisonada) (kg)
- M Masa unitaria del agregado suelta o apisonada (kg/m³)
- A % de absorción
- Msss Masa unitaria en condición SSS (kg/m³)
- S Gravedad especifica aparente (g/cm³)
- W Densidad del agua (kg/m³)
- % Vacíos Porcentaje de vacíos %

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

$$M_{sss} = M * \left[1 + \frac{(A)}{100} \right]$$

$$\%vacios = 100 * \frac{(S * W) - M}{(S * W)}$$

Observaciones:

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA SOLIDEZ (SANIDAD) DE AGREGADOS PARA EL USO DE
SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO
(NTC 126)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 15 de julio del 2019
MATERIAL: Arena de Rio

ENSAYO DE SOLIDEZ

SULFATO: Sodio X Magnesio

FRACCION		% GRADACIO	PESO FRACCIONES		% PASA TAMIZ	PÉRDIDA PORCENTU
PASA	RETENIDO		ANTES	DESPUES		
3/8"	N°4	20,01	100,08	91,30	8,77	1,76
No 4	No 8	20,00	100,02	97,00	3,02	0,60
No 8	No 16	20,00	100,01	92,20	7,81	1,56
No 16	No 30	20,00	100,01	84,10	15,91	3,18
No 30	No 50	20,00	100,03	92,50	7,53	1,51
TOTAL		100,00	500,15	457,10		8,61

$$\% \text{ perdida} = \frac{\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100$$

% perdida =	8,61
-------------	------

Observaciones:

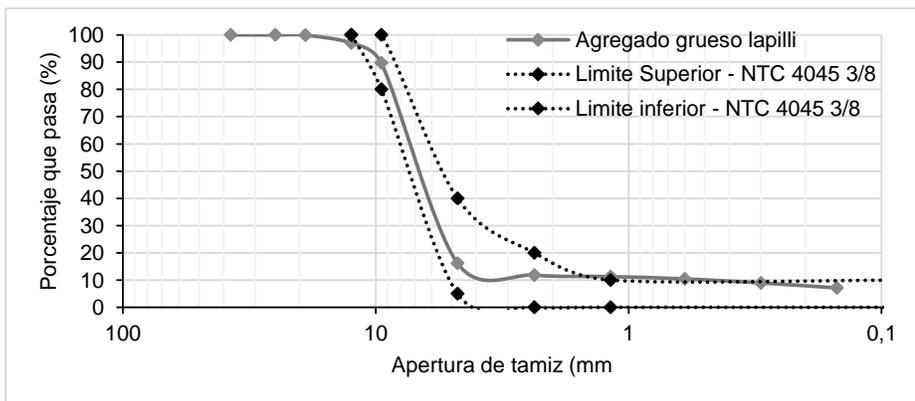
MÉTODO PARA DETERMINAR POR LAVADO EL MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ 75 μm EN AGREGADOS MINERALES (NTC 78)

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 30 de agosto del 2019
MATERIAL: Agregado grueso Lapilli

MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ N°200			
$M_T =$	2000,00	$P =$	12,0
$M_L =$	1760,00		
$P = [(M_T - M_L) / M_T] * 100$			
$P =$ Porcentaje del material mas fino que el tamiz N° 200			
$M_T =$ Masa seca total de la muestra (g)			
$M_L =$ Masa seca de la muestra después del lavado (g)			

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Masa Total Seca (g) =		1878,00					
TAMIZ		PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA	Gravas %	84
Alternativo	Milímetros					TM	3/4"
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100	TMN	3/8"
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100	Arenas %	11
3/4"	19,00	2,00	0,11	0,11	100	Arenas gruesas %	
1/2"	12,50	54,00	2,88	2,98	97	Arenas Medias %	
3/8"	9,50	138,00	7,35	10,33	90	Arena Finas %	
N° 4	4,75	1380,00	73,48	83,81	16	Finos %	5
N° 8	2,36	82,00	4,37	88,18	12	Modulo de finura	5,45
N° 16	1,180	10,00	0,53	88,71	11	D10	0,51
N° 30	0,600	16,00	0,85	89,56	10	D30	5,64
N° 50	0,300	28,00	1,49	91,05	9	D60	7,58
N°100	0,150	34,00	1,81	92,86	7	Cu	14,80
N° 200	0,075	34,00	1,81	94,68	5	Cc	8,20
FONDO		68,00					



PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO
(INV – 227 – 13)

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 19 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso Lapilli

Masa Inicial (g) = 484,70 Porcentaje calculado por = Masa

Partículas Fracturadas					
Tamiz		Gradación original %	Masa inicial de cada fracción (g)	Masa Partículas con caras fracturadas (g)	Porcentaje de caras fracturadas %
Pasa	Retiene				
1 ½ "	1"	0	0,00	0,00	0
1"	¾"	0	0,00	0,00	0
¾"	½"	8	37,80	37,80	100
½"	⅜"	92	444,50	430,50	97
Total		100	482,30	468,30	

Partículas no fracturadas					
Tamiz		Gradación original %	Masa inicial de cada fracción (g)	Masa Partículas sin caras fracturadas (g)	Porcentaje de caras no fracturadas %
Pasa	Retiene				
1 ½ "	1"	0	0,00	0	0
1"	¾"	0	0,00	0,00	0
¾"	½"	8	37,80	0,00	0
½"	⅜"	92	444,50	9,00	2
Total		100	482,30	9,00	

$P = \frac{F}{F + N} * 100$	$P =$	98
P = Porcentaje de partículas con el numero especificado de caras fracturadas		
F = Masa o numero de partículas fracturadas con, al menos, el numero de caras fracturadas especificadas		
N = Masa o numero de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen el criterio de partículas fracturadas		

Observaciones:

ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS
INV – 230 – 13

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 19 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso Lapilli

ÍNDICE DE APLANAMIENTO

Tamices		Masa inicial de cada fracción	Granulometría (Fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos de 5% del total)	Masa de las partículas aplanadas	Índice de aplanamiento por fracción
Pasa	Retiene	g	%	%	g	%
1 ½ "	1"	0	0		0,00	0
1"	¾"	0,00	0		0,00	0
¾"	½"	37,80	8		8,00	21
½"	⅜"	104,50	22		13,70	13
⅜"	¼"	340,10	71		58,20	17
Totales		482,40	100		79,90	
Total corregido						

$IA = \frac{M3}{M1} * 100$	IA =	17
IA = Índice de aplanamiento		
M1 = Masa total de la muestra empleada en la determinación de aplanamiento (g)		
M3 = Masa de todas las partículas que pasaron las barras de los tamices o las ranuras del calibrador de aplanamiento (g)		

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO

Tamices		Masa inicial de cada fracción	Granulometría (Fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos de 5% del total)	Masa de las partículas alargadas	Índice de alargamiento por fracción
Pasa	Retiene	g	%	%	g	%
1 ½ "	1"	0	0		0	0
1"	¾"	0,00	0		0,00	0
¾"	½"	37,80	8		0,00	0
½"	⅜"	104,50	22		10,60	10
⅜"	¼"	340,10	71		33,20	10
Totales		482,40	100		43,80	
Total corregido						

$IL = \frac{M3}{M1} * 100$	IL =	9
IA = Índice de alargamiento		
M1 = Masa total de la muestra empleada en la determinación de alargamiento (g)		
M3 = Masa de todas las partículas que quedaron retenidas en las barras del calibrador de alargamiento (g)		

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
(NTC 176)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 08 de julio del 2019
MATERIAL: Agregado grueso Lapilli

DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Ensayo	1	2	Promedio
A (g)	1868,00		
B (g)	3261,20		
C (g)	1071,30		
$D_{s \text{ aparente}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,85		
$D_{s \text{ aparente (base sss)}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,49		
$D_{s \text{ nominal}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,34		
Absorción %	74,58		

A	Masa en el aire de la muestra secada al horno (g)
B	Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada superficialmente seca (g)
C	Masa en el agua de la muestra de ensayo saturada (g)

$$D_{s \text{ aparente}} = \frac{0,9975 * A}{(B - C)}$$

$$D_{s \text{ aparente (base sss)}} = \frac{0,9975 * B}{(B - C)}$$

$$D_{s \text{ nominal}} = \frac{0,9975 * A}{(A - C)}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

Observaciones:

**DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS
(NTC 92)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 30 de agosto del 2019
MATERIAL: Agregado grueso Lapilli

CALIBRACION DEL MOLDE		
	Masa del molde + Vidrio (kg)	3,256
	Masa del molde + Vidrio + Agua (kg)	6,06
V	Volumen del molde (m ³)	0,0028

Temperatura del agua (°C): 17

Densidad del agua (kg/m³) 998,77

MASA UNITARIA SUELTA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	2,452	2,430	2,426
M	316		
A	74,58		
Msss	551		
S	0,85		
% Vacíos	63		

MASA UNITARIA APISONADA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	2,518	2,530	2,528
M	348		
A	74,58		
Msss	607		
S	0,85		
% Vacíos	59		

- T Masa del molde (kg)
- V Volumen del molde (m³)
- G Masa del agregado mas el molde (suelta o apisonada) (kg)
- M Masa unitaria del agregado suelta o apisonada (kg/m³)
- A % de absorción
- Msss Masa unitaria en condición SSS (kg/m³)
- S Gravedad especifica aparente
- W Densidad del agua (kg/m³)
- % Vacíos Porcentaje de vacíos %

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

$$M_{sss} = M * \left[1 + \frac{(A)}{100} \right]$$

$$\%vacios = 100 * \frac{(S * W) - M}{(S * W)}$$

Observaciones:

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS GRUESOS HASTA DE 37.5MM, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (NTC 98)

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 20 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso (Grava lapilli)

Masa Inicial de la muestra (g) = 4998,50 Gradación = B
Masa Final (g) = 753,00 N° de esferas = 11
Masa de las esferas (g) = 4584,00

$\% \text{ desgaste} = \frac{\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100$	
% desgaste =	85

Observaciones:

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA SOLIDEZ (SANIDAD) DE AGREGADOS PARA EL USO DE
SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO
(NTC 126)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 15 de julio del 2019
MATERIAL: Grava convencional

ENSAYO DE SOLIDEZ

SULFATO: Sodio X Magnesio

FRACCION		% GRADACIO	PESO FRACCIONES		% PASA TAMIZ	PÉRDIDA PORCENTU
PASA	RETENIDO		ANTES	DESPUES		
1"	3/4"	0,00	0,00	0,00	-	-
3/4"	1/2"	0,00	0,00	0,00	-	-
1/2"	3/8"	58,82	500,00	431,00	13,80	8,12
3/8"	No.4	41,18	350,00	315,00	10,00	4,12
TOTAL		100,00	850,00	746,00		12,24

$$\% \text{ perdida} = \frac{\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100$$

% perdida =	12,24
-------------	-------

Observaciones:

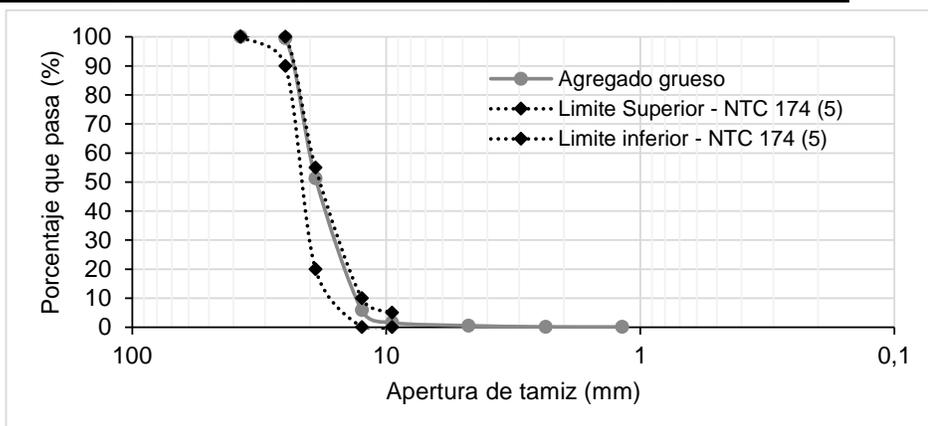
**MÉTODO PARA DETERMINAR POR LAVADO EL MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ 75 μm EN AGREGADOS MINERALES
(NTC 78)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 04 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso (Grava)

MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ N°200			
$M_T =$	2837,40	$P =$	1,8
$M_L =$	2787,50		
$P = [(M_T - M_L) / M_T] * 100$			
$P =$ Porcentaje del material mas fino que el tamiz N° 200			
$M_T =$ Masa seca total de la muestra (g)			
$M_L =$ Masa seca de la muestra después del lavado (g)			

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Masa Total Seca (g) =		5000,00					
TAMIZ		PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA	Gravas %	99
Alterno	Milímetros					TM	1 1/2"
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100	TMN	1"
1"	25,00	22,00	0,44	0,44	100	Arenas %	0
3/4"	19,00	2412,00	48,24	48,68	51	Arenas gruesas %	
1/2"	12,50	2270,00	45,40	94,08	6	Arenas Medias %	
3/8"	9,50	216,00	4,32	98,40	2	Arena Finas %	
N° 4	4,75	52,00	1,04	99,44	1	Finos %	0
N° 8	2,36	20,00	0,40	99,84	0	Modulo de finura	7,46
N° 16	1,180	2,00	0,04	99,88	0	D10	13,08
N° 30	0,600	0,00	0,00	99,88	0	D30	15,95
N° 50	0,300	0,00	0,00	99,88	0	D60	20,08
N°100	0,150	0,00	0,00	99,88	0	Cu	1,53
N° 200	0,075	0,00	0,00	99,88	0	Cc	0,97
FONDO		0,00					



PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO
(INV – 227 – 13)

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
 NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
 FECHA: 18 de septiembre del 2019
 MATERIAL: Agregado grueso (Grava)

Masa Inicial (g) = 4992,40 Porcentaje calculado por = Masa

Partículas Fracturadas					
Tamiz		Gradación original %	Masa inicial de cada fracción (g)	Masa Partículas con caras fracturadas (g)	Porcentaje de caras fracturadas %
Pasa	Retiene				
1 ½ "	1"	0	24,00	24,00	100
1"	¾"	28	1404,50	1177,30	84
¾"	½"	66	3304,40	3001,20	91
½"	⅜"	5	259,20	248,70	96
Total		100	4992,10	4451,20	

Partículas no fracturadas					
Tamiz		Gradación original %	Masa inicial de cada fracción (g)	Masa Partículas sin caras fracturadas (g)	Porcentaje de caras no fracturadas %
Pasa	Retiene				
1 ½ "	1"	0	24,00	0	0
1"	¾"	28	1404,50	227,10	16
¾"	½"	66	3304,40	303,00	9
½"	⅜"	5	259,20	10,40	4
Total		100	4992,10	540,50	

$P = \frac{F}{F + N} * 100$	$P =$	89
P = Porcentaje de partículas con el numero especificado de caras fracturadas		
F = Masa o numero de partículas fracturadas con, al menos, el numero de caras fracturadas especificadas		
N = Masa o numero de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen el criterio de partículas fracturadas		

Observaciones:

ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS
INV – 230 – 13

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 18 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso (Grava)

ÍNDICE DE APLANAMIENTO

Tamices		Masa inicial de cada fracción	Granulometría (Fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos de 5% del total)	Masa de las partículas aplanadas	Índice de aplanamiento por fracción
Pasa	Retiene	g	%	%	g	%
1 ½ "	1"	24	0	0	0,00	0
1"	¾"	1404,50	28	30	244,80	17
¾"	½"	3304,40	66	70	583,90	18
½"	⅜"	207,00	4	0	0,00	0
⅜"	¼"	52,20	1	0	0,00	0
Totales		4992,10	100	100	828,70	
Total corregido		4708,90				

$IA = \frac{M3}{M1} * 100$	IA =	18
IA = Índice de aplanamiento		
M1 = Masa total de la muestra empleada en la determinación de aplanamiento (g)		
M3 = Masa de todas las partículas que pasaron las barras de los tamices o las ranuras del calibrador de aplanamiento (g)		

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO

Tamices		Masa inicial de cada fracción	Granulometría (Fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos de 5% del total)	Masa de las partículas alargadas	Índice de alargamiento por fracción
Pasa	Retiene	g	%	%	g	%
1 ½ "	1"	24	0	0	0	0
1"	¾"	1404,50	28	30	66,80	5
¾"	½"	3304,40	66	70	1109,60	34
½"	⅜"	207,00	4	0	0,00	0
⅜"	¼"	52,20	1	0	0,00	0
Totales		4992,10	100	100	1176,40	
Total corregido		4708,90				

$IL = \frac{M3}{M1} * 100$	IL =	25
IA = Índice de alargamiento		
M1 = Masa total de la muestra empleada en la determinación de alargamiento (g)		
M3 = Masa de todas las partículas que quedaron retenidas en las barras del calibrador de alargamiento (g)		

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
(NTC 176)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 05 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso (Grava)

DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Ensayo	1	2	Promedio
A (g)	2940,80		
B (g)	2983,40		
C (g)	1838,20		
$D_{s \text{ aparente}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,56		
$D_{s \text{ aparente (base sss)}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,60		
$D_{s \text{ nominal}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,66		
Absorción %	1,45		

A	Masa en el aire de la muestra secada al horno (g)
B	Masa en el aire de la muestra de ensayo saturada superficialmente seca (g)
C	Masa en el agua de la muestra de ensayo saturada (g)

$$D_{s \text{ aparente}} = \frac{0,9975 * A}{(B - C)}$$

$$D_{s \text{ aparente (base sss)}} = \frac{0,9975 * B}{(B - C)}$$

$$D_{s \text{ nominal}} = \frac{0,9975 * A}{(A - C)}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

Observaciones:

**DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS
(NTC 92)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 05 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso (Grava)

CALIBRACION DEL MOLDE		
	Masa del molde + Vidrio (kg)	3,256
	Masa del molde + Vidrio + Agua (kg)	6,06
V	Volumen del molde (m ³)	0,0028

Temperatura del agua (°C): 17

Densidad del agua (kg/m³) 998,77

MASA UNITARIA SUELTA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	5,414	5,446	5,426
M	1382		
A	1,45		
Msss	1402		
S	2,56		
% Vacíos	46		

MASA UNITARIA APISONADA			
	1	2	3
T	1,5496		
G	5,758	5,752	5,794
M	1503		
A	1,45		
Msss	1524		
S	2,56		
% Vacíos	41		

- T Masa del molde (kg)
- V Volumen del molde (m³)
- G Masa del agregado mas el molde (suelta o apisonada) (kg)
- M Masa unitaria del agregado suelta o apisonada (kg/m³)
- A % de absorción
- Msss Masa unitaria en condición SSS (kg/m³)
- S Gravedad especifica aparente
- W Densidad del agua (kg/m³)
- % Vacíos Porcentaje de vacíos %

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

$$M_{sss} = M * \left[1 + \frac{(A)}{100} \right]$$

$$\%vacios = 100 * \frac{(S * W) - M}{(S * W)}$$

Observaciones:

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS GRUESOS HASTA DE 37.5MM, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (NTC 98)

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 20 de septiembre del 2019
MATERIAL: Agregado grueso (Grava)

Masa Inicial de la muestra (g) =	<u>5002,20</u>	Gradación =	<u>B</u>
Masa Final (g) =	<u>2640,50</u>	N° de esferas =	<u>11</u>
Masa de las esferas (g) =	<u>4584,00</u>		

$\% \text{ desgaste} = \frac{\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100$	
% desgaste =	47

Observaciones:

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA SOLIDEZ (SANIDAD) DE AGREGADOS PARA EL USO DE
SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO
(NTC 126)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora

FECHA: 15 de julio del 2019

MATERIAL: Grava convencional

ENSAYO DE SOLIDEZ

SULFATO: Sodio X Magnesio _____

FRACCION		% GRADACIO N ORIGINAL	PESO FRACCIONES		% PASA TAMIZ DESIGNAD O DESPUÉS	PÉRDIDA PORCENTU AL PONDERAD
PASA	RETENIDO		ANTES	DESPUES		
1"	3/4"	27,78	500,00	500,00	0,00	0,00
3/4"	1/2"	37,22	670,00	670,00	0,00	0,00
1/2"	3/8"	18,33	330,00	327,00	0,91	0,17
3/8"	No.4	16,67	300,00	300,00	0,00	0,00
TOTAL		100,00	1800,00	1797,00		0,17

$$\% \text{ perdida} = \frac{\text{Masa Inicial} - \text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100$$

% perdida =	0,17
-------------	------

Observaciones:

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO
(NTC 221)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Yamile Mora
FECHA: 05 de septiembre del 2019
MATERIAL: Cemento estructural

DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Ensayo	1	2	3
A (g)	64,00	64,00	64,00
B (g)	21,40	21,42	20,99
ρ (g/cm ³)	3,0	3,0	3,0

A	Masa el cemento (g)
B	Volumen desplazado (cm ³)

$$\rho = \frac{\text{Masa del cemento}}{\text{Volumen desplazado}}$$

Observaciones:

**MÉTODOS DE ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS CEMENTOS HIDRÁULICOS
(NTC 184)**

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz
NOMBRE DEL LABORATORISTA: Jeniffer Sánchez
FECHA: 09 de septiembre del 2020
MATERIAL: Cemento estructural

Resultados			
$M_i =$	1,00	$P =$	3
$M_f =$	0,97		
$P = [(M_i - M_f) / M_i] * 100$			
$P =$ Porcentaje de pérdida por calcinación			
$M_i =$ masa inicial (g)			
$M_f =$ masa final (g)			

Observaciones:

Anexo E. Diseños de mezcla

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero
MEZCLA: MC- 1 - Mezcla de Control Fase I

FECHA: 14/10/2020

Resistencia especificada (MPa):	<u>29</u>	Asentamiento de diseño (mm):	<u>75</u>
Contenido de aire esperado (%):	<u>1,5</u>	Volumen a mezclar (litros):	<u>80</u>
Temperatura ambiente (°C):	<u>17</u>	Relación a/c:	<u>0,51</u>

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	398	133	-	-	398	31,8	11
Agua	EAAB	1,00	203	203	-	-	203	16,2	16
Grava	Cantera	2,40	780	325	0,00	0	780	62,4	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,49	845	339	0,00	0	845	67,6	27
Arena	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	-	-	-	-	-	-	-	-
Total			2226	1000			2226	178,1	80,0

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M1 - Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

FECHA: 9/09/2019

Resistencia especificada (MPa): 29
 Contenido de aire esperado (%): 1,5
 Temperatura ambiente (°C): 17,3

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,51

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Agua	EAAB	1,00	204	204	-	-	135	10,8	11
Grava	Cantera	2,56	837	327	0,81	1,45	844	67,5	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,58	680	264	7,91	2,04	734	58,7	23
Arena	Lapilli	2,21	194	88	20,97	3,26	235	18,8	8
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	19		-	-	19,40	1,6	-
Aditivo Plas	Toxement	-	-	-	-	-	-	-	-
Total			2334	1016			2367	189,3	79,1

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M2 - Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

FECHA: 11/09/2019

Resistencia especificada (MPa): 29
 Contenido de aire esperado (%): 1,5
 Temperatura ambiente (°C): 17,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,51

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Agua	EAAB	1,00	204	204	-	-	162	13,0	13
Grava	Cantera	2,56	628	245	1,18	1,45	635	50,8	20
Grava	Lapilli	0,85	70	82	45,42	74,58	102	8,1	10
Arena	Rio	2,58	680	264	6,49	2,04	724	57,9	22
Arena	Lapilli	2,21	194	88	20,66	3,26	234	18,7	8
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco		26				26	2,1	
Aditivo Plas	Toxement	-	-	-	-	-	-	-	-
Total			2202	1016			2284	182,7	84,0

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M3 - Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

FECHA: 13/09/2019

Resistencia especificada (MPa): 29
 Contenido de aire esperado (%): 1,5
 Temperatura ambiente (°C): 17,6

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,51

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Agua	EAAB	1,00	204	204	-	-	89	7,1	7
Grava	Cantera	2,56	837	327	0,95	1,45	845	67,6	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,58	454	176	5,88	2,04	481	38,5	15
Arena	Lapilli	2,21	389	176	29,39	3,26	503	40,3	18
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	39	-	-	-	39	3,1	-
Aditivo Plas	Toxement	-	-	-	-	-	-	-	-
Total			2323	1016			2357	188,6	77,3

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M4 - Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

FECHA: 12/09/2019

Resistencia especificada (MPa): 29
 Contenido de aire esperado (%): 1,5
 Temperatura ambiente (°C): 17

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,51

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Agua	EAAB	1,00	204	204	-	-	146	11,6	12
Grava	Cantera	2,56	628	245	0,81	1,45	633	50,6	20
Grava	Lapilli	0,85	70	82	41,38	74,58	99	7,9	9
Arena	Rio	2,58	454	176	4,90	2,04	476	38,1	15
Arena	Lapilli	2,21	389	176	21,95	3,26	474	38,0	17
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco		46				46	3,7	-
Aditivo Plas	Toxement	-	-	-	-	-	-	-	-
Total			2191	1017			2274	181,9	83,4

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M5 - Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli

FECHA: 26/10/2019

Resistencia especificada (MPa): 29
 Contenido de aire esperado (%): 1,5
 Temperatura ambiente (°C): 18,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,51

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Agua	EAAB	1,00	204	204	-	-	204	16,3	16
Grava	Cantera	2,56	770	301	1,45	1,45	781	62,5	24
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Lapilli	2,21	835	378	3,26	3,26	862	69,0	31
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco		84				84	6,7	
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,0	2,7			3,0	0,236	0,219
Total			2295	1019			2334	186,7	82,8

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M6 - Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% grava lapilli

FECHA: 10/10/2019

Resistencia especificada (MPa): 29
 Contenido de aire esperado (%): 1,5
 Temperatura ambiente (°C): 17,8

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,51

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Agua	EAAB	1,00	204	204	-	-	204	16,3	16
Grava	Cantera	2,56	578	226	1,45	1,45	586	46,9	18
Grava	Lapilli	0,85	64	75	74,58	74,58	112	8,9	11
Arena	Rio	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Lapilli	2,21	835	378	3,26	3,26	862	69,0	31
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	90	-	-	-	90	7,2	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,0	2,7	-	-	3,0	0,236	0,219
Total			2174	1019			2257	180,6	87,3

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M7 - Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% grava lapilli

FECHA: 12/10/2019

Resistencia especificada (MPa): 29
 Contenido de aire esperado (%): 1,5
 Temperatura ambiente (°C): 18,7

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,51

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Agua	EAAB	1,00	204	204	-	-	204	16,3	16
Grava	Cantera	2,56	385	150	1,45	1,45	391	31,2	12
Grava	Lapilli	0,85	128	151	74,58	74,58	223	17,9	21
Arena	Rio	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Lapilli	2,21	835	378	3,26	3,26	862	69,0	31
Aire		-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco		96				96	7,7	
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,0	2,7			3,0	0,236	0,219
Total			2051	1019			2180	174,4	91,7

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero
MEZCLA: MC -2 Mezcla de control fase II

FECHA: 14/10/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Humo de sílice	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	852	328	0,00	0,00	852	68,2	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	923	351	0,00	0,00	923	73,8	28
Arena	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2366	1003			2366	189,3	80,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M8 - Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

FECHA: 13/07/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Humo de sílice	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	852	328	0,00	0,00	852	68,2	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	692	263	0,00	0,00	692	55,4	21
Arena	Lapilli	2,28	200	88	0,00	0,00	200	16,0	7
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2335	1003			2335	186,8	80,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M9 - Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

FECHA: 14/07/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Humo de sílice	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	852	328	0,00	0,00	852	68,2	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	462	176	0,00	0,00	462	37,0	14
Arena	Lapilli	2,28	400	175	0,00	0,00	400	32,0	14
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2305	1003			2305	184,4	80,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M10 - Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli

FECHA: 22/07/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Humo de sílice	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	852	328	0,00	0,00	852	68,2	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	231	88	0,00	0,00	231	18,5	7
Arena	Lapilli	2,28	600	263	0,00	0,00	600	48,0	21
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2274	1003			2274	181,9	80,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M11 - Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli

FECHA: 21/07/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	400	133	-	-	400	32,0	11
Humo de sílice	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	789	303	0,00	0,00	789	63,1	24
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	0	0	0,00	0,00	0	0,0	0
Arena	Lapilli	2,28	855	375	0,00	0,00	855	68,4	30
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2235	1003			2235	178,8	80,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M12 - Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% humo de sílice

FECHA: 14/10/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	360	120	-	-	360	28,8	10
Humo de sílice	-	-	40	-	-	-	43	3,4	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	852	328	0,00	0,00	852	68,2	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	692	263	0,00	0,00	692	55,4	21
Arena	Lapilli	2,28	200	88	0,00	0,00	200	16,0	7
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2335	989			2338	187,1	79,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M13 - Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% humo de sílice

FECHA: 29/07/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	360	120	-	-	360	28,8	10
Humo de sílice	-	-	40	-	-	-	40	3,2	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	852	328	0,00	0,00	852	68,2	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	462	176	0,00	0,00	462	37,0	14
Arena	Lapilli	2,28	400	175	0,00	0,00	400	32,0	14
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2305	990			2305	184,4	79,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M14 - Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% humo de sílice

FECHA: 23/07/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	360	120	-	-	360	28,8	10
Humo de sílice	-	-	40	-	-	-	40	3,2	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	852	328	0,00	0,00	852	68,2	26
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	231	88	0,00	0,00	231	18,5	7
Arena	Lapilli	2,28	600	263	0,00	0,00	600	48,0	21
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2274	990			2274	181,9	79,2

MEZCLA DE CONCRETO. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

PROYECTO: Tesis: Concreto ligero

MEZCLA: M15 - Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% humo de sílice

FECHA: 29/07/2020

Resistencia especificada (MPa): 21
 Contenido de aire esperado (%): 1,5

Asentamiento de diseño (mm): 75
 Volumen a mezclar (litros): 80
 Relación a/c: 0,47

Material	Procedencia	Densidad (g/cm ³)	Diseño en Seco (kg/m ³)	Volumen (litros)	Humedad %	Absorción %	Diseño corregido por humedad (kg/m ³)	Peso Mezcla Húmedo (kg)	Volumen Mezcla (litros)
Cemento	ARGOS	3,00	360	120	-	-	360	28,8	10
Humo de sílice	-	-	40	-	-	-	40	3,2	-
Agua	EAAB	1,00	188	188	-	-	188	15,0	15
Grava	Cantera	2,60	789	303	0,00	0,00	789	63,1	24
Grava	Lapilli	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	Rio	2,63	0	0	0,00	0,00	0	0,0	0
Arena	Lapilli	2,28	855	375	0,00	0,00	855	68,4	30
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cal	Calco	-	-	-	-	-	-	-	-
Aditivo Plas	Toxement	1,08	3,20	3	-	-	3,20	0,256	0,237
Total			2235	989			2235	178,8	79,2

**Anexo F. Resultados ensayos en
concreto estado fresco y endurecido**

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

PROYECTO:

Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Resistencia a compresión

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kN)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio Esfuerzo (%)	Tipo de falla
MC - 1	Mezcla de Control. Fase I	7	1	20,0	10,0	16688,0	227	23	3240	108	2
		7	2	20,1	10,0	18170,0					2
		7	2	20,0	9,9	19250,0					2
MC - 1	Mezcla de Control. Fase I	14	1	20,0	9,9	18500,0	261	26	3731	124	1
		14	2	20,1	10,0	21700,0					2
		14	2	20,0	9,9	21700,0					2
MC - 1	Mezcla de Control. Fase I	28	1	20,0	9,9	27400,0	323	32	4608	154	2
		28	2	20,1	10,0	23200,0					2
		28	2	20,0	9,9	26000,0					2
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	7	1	15,3	7,6	41,7	92	9	1319	44	5
		7	2	15,3	7,6	40,7					5
		7	2	15,4	7,6	43,0					5

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

PROYECTO:

Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Resistencia a compresión

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kN)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio Esfuerzo (%)	Tipo de falla
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	14	1	15,2	7,6	55,7	131	13	1877	63	5
		14	2	15,3	7,6	63,5					5
		14	2	15,4	7,6	58,6					5
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	28	1	15,4	7,6	62,5	144	14	2060	69	5
		28	2	15,3	7,6	68,2					3
		28	2	15,4	7,5	64,4					3
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	7	1	15,3	7,6	42,7	97	10	1383	46	2
		7	2	15,3	7,6	43,6					5
		7	3	15,3	7,6	45,1					5
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	14	1	15,4	7,6	54,9	114	11	1634	54	5
		7	2	15,2	7,5	50,1					5
		14	3	15,5	7,5	48,9					2

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

PROYECTO:

Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Resistencia a compresión

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kN)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio Esfuerzo (%)	Tipo de falla
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	28	1	15,6	7,6	50,5	120	12	1710	57	4
		7	2	15,2	7,5	57,3					5
		28	3	15,3	7,5	53,0					5
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	7	1	15,4	7,6	31,3	67	7	956	32	5
		7	2	15,3	7,6	28,4					2
		7	3	15,3	7,6	31,0					2
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	14	1	15,4	7,5	37,1	86	9	1227	41	5
		14	2	15,4	7,6	38,4					4
		14	3	15,3	7,6	39,7					2
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	28	1	15,4	7,6	41,4	87	9	1246	42	5
		28	2	15,5	7,5	38,1					2
		28	3	15,5	7,6	38,5					5

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

PROYECTO:

Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Resistencia a compresión

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kN)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio Esfuerzo (%)	Tipo de falla
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	7	1	15,4	7,6	33,9	72	7	1026	34	5
		7	2	15,5	7,6	30,4					2
		7	3	15,5	7,6	33,0					5
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	14	1	15,4	7,5	42,3	89	9	1273	42	5
		7	2	15,4	7,6	35,8					2
		14	3	15,4	7,5	41,8					6
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	28	1	15,7	7,5	34,8	86	9	1231	41	6
		7	2	15,5	7,6	40,1					4
		28	3	15,7	7,5	40,9					5
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	7	1	15,6	7,6	28,6	72	7	1023	34	5
		7	2	15,3	7,6	33,9					5
		7	3	15,4	7,6	34,2					5

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

PROYECTO:

Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Resistencia a compresión

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kN)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio Esfuerzo (%)	Tipo de falla
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	14	1	15,4	7,5	39,8	97	10	1383	46	5
		14	2	15,6	7,5	46,2					4
		14	3	15,5	7,6	44,3					2
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	28	1	15,3	7,6	47,8	107	11	1524	51	5
		28	2	15,1	7,6	47,0					2
		28	3	15,5	7,6	50,7					5
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	7	1	15,8	7,4	23,3	51	5	722	24	5
		7	2	15,1	7,1	17,9					2
		7	3	15,6	7,7	24,5					5
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	14	1	15,4	7,6	17,3	45	5	645	21	4
		14	2	15,5	7,5	25,2					4
		14	3	15,4	7,6	18,5					4

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

PROYECTO:

Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Resistencia a compresión

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kN)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio Esfuerzo (%)	Tipo de falla
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	28	1	15,5	7,6	27,4	61	6	873	29	4
		28	2	15,7	7,6	30,9					5
		28	3	15,5	7,5	23,8					4
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	7	1	15,6	7,6	23,9	56	6	801	27	2
		7	2	15,5	7,6	25,0					5
		7	3	15,4	7,6	27,2					2
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	14	1	15,5	7,6	28,0	61	6	878	29	5
		14	2	15,6	7,6	28,6					4
		14	3	15,6	7,6	27,0					6
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	28	1	15,4	7,6	30,2	61	6	876	29	5
		28	2	15,7	7,5	23,7					2
		28	3	15,5	7,5	27,8					5

ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN

PROYECTO: Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Muestra	Mezcla	Módulo de Rotura teórico (MPa)	Viga	Promedio Longitud de fractura (mm)	Promedio Altura (mm)	Promedio Ancho (mm)	Longitud entre apoyos (mm)	Carga Máxima (kgf)	Carga Máxima (N)	Promedio de Carga (N)	Módulo de Rotura (MPa)	Promedio (MPa)
MC - 1	Mezcla de Control. Fase I	2,4	1	260	154	153	450	2875,55	28200,0	28325,0	3,50	3,5
	Mezcla de Control. Fase I	2,4	2	253	153	154	450	2901,05	28450,0		3,54	
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	2,4	1	252	152	155	450	893,77	8765,0	8210,0	1,1	1,0
	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	2,4	2	257	152	152	450	780,58	7655,0		1,0	
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	2,4	1	266	151	155	450	964,64	9460,0	8972,5	1,2	1,1
	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	2,4	2	307	153	153	450	865,22	8485,0		1,1	
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	2,4	1	260	151	152	480	705,12	6915,0	7095,0	1,0	1,0
	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	2,4	2	287	152	153	480	741,83	7275,0		1,0	
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	2,4	1	250	152	153	450	680,65	6675,0	7085,0	0,9	0,9
	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	2,4	2	252	153	154	450	764,27	7495,0		0,9	
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	2,4	1	287	153	156	450	693,4	6800,0	6675,0	0,8	0,8
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	2,4	2	263	151	154	450	667,9	6550,0		0,8	
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	2,4	1	248	151	152	450	637,31	6250,0	6125,0	0,8	0,8
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	2,4	2	303	152	154	450	611,82	6000,0		0,8	
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	2,4	1	278	151	155	450	601,62	5900,0	5825,0	0,8	0,7
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	2,4	2	299	150	155	450	586,33	5750,0		0,7	

ENSAYO DE DENSIDAD, ABSORCION Y VACIOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO

PROYECTO:		Tesis: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz											
Muestra	Mezcla	Espécimen	A. Masa seca al horno (g)	B. Masa saturada después de inmersión (g)	C. Masa saturada después de ebullición (g)	D. Masa aparente inmersa (g)	Promedio Absorción después de inmersión %	Promedio Absorción después de inmersión y ebullición %	Promedio Densidad Bulk Seca (Mg/m ³)	Promedio Densidad Bulk después de inmersión (Mg/m ³)	Promedio Densidad Bulk después de inmersión y ebullición (Mg/m ³)	Promedio Densidad Aparente (Mg/m ³)	Promedio Volumen de poros y vacíos (%)
MC - 1	Mezcla de Control. Fase I	A	734	776	771,4	446,2	5,80	5,30	2,28	2,41	2,40	2,59	12,07
	Mezcla de Control. Fase I	B	716	758	754,7	443							
M1	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	A	1352	1494	1488,6	800,4	10,28	9,93	1,99	2,19	2,19	2,48	19,75
	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	B	1393	1533	1528,8	836,8							
M2	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	A	1206	1367	1363,6	674,6	12,98	12,71	1,77	2,00	2,00	2,29	22,53
	Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli	B	1226	1381	1377,3	695							
M3	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	A	1155	1342	1337,5	646	15,76	15,42	1,69	1,95	1,95	2,28	26,01
	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	B	1172	1352	1348,4	660,7							
M4	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	A	1135	1309	1306	613,4	15,64	15,36	1,64	1,89	1,89	2,19	25,14
	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	B	1136	1317	1313,7	618,6							
M5	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	A	1082	1301	1296,6	597,1	20,27	19,86	1,54	1,86	1,85	2,22	30,64
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	B	1076	1295	1290,6	591,1							
M6	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	A	877	1083	1078,6	398,4	23,63	23,12	1,28	1,59	1,58	1,83	29,70
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli	B	871	1077	1072,6	392,4							
M7	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	A	907	1130	1129,6	435,9	24,69	24,61	1,30	1,63	1,62	1,92	32,70
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli	B	901	1124	1123,6	429,9							

ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

PROYECTO:

Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kgf)	Esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio esfuerzo (%)	Tipo de falla
MC -2	Mezcla de control. Fase II	7	1	20.0	10.0	21060.0	26.3	265	26	3779	126	5
			2	20.0	10.0	21670.0	27.1					2
			2	20.0	10.0	20799.9	26.0					2
		14	1	20.0	10.2	24400.0	29.6	312	31	4460	149	5
			2	20.0	10.1	25900.0	32.0					2
			2	20.0	10.0	25400.0	32.0					6
		28	1	20.0	10.0	27400.0	34.2	347	35	4962	165	3
			2	20.0	10.0	27900.0	34.8					2
			2	20.0	10.1	28400.0	35.1					2
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	7	1	20.3	10.0	14250.0	17.8	181	18	2586	86	5
			2	20.1	10.0	14580.0	18.4					5
			2	20.0	10.0	14355.0	18.1					5
		14	1	20.1	10.0	17984.0	22.7	223	22	3191	106	3
			2	20.0	10.1	17598.0	21.5					3
			2	20.1	9.9	17875.0	22.8					2
		28	1	20.1	10.0	18780.4	23.5	242	24	3460	115	1
			2	20.1	10.0	18600.0	23.2					5
			2	20.1	10.1	21000.0	26.0					5

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kgf)	Esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio esfuerzo (%)	Tipo de falla
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	7	1	20.2	10.1	12100.0	14.8	158	16	2252	75	4
			2	20.2	10.1	12300.0	15.1					6
			2	20.1	10.0	13800.0	17.4					5
		14	1	20.0	10.0	15300.0	19.1	196	20	2802	93	5
			2	20.1	10.0	16400.0	20.7					2
			2	20.1	10.1	15400.0	19.0					6
		28	1	20.2	10.1	17431.2	21.6	222	22	3167	106	2
			2	20.2	10.1	16700.0	20.7					5
			2	20.1	10.1	19849.9	24.3					5
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	7	1	20.1	10.2	10700.0	13.0	150	15	2140	71	2
			2	20.0	10.1	12900.0	16.0					5
			2	20.0	10.0	12700.0	16.0					2
		14	1	20.2	10.1	15952.3	19.5	189	19	2693	90	3
			2	20.2	10.1	14568.9	18.0					1
			2	19.9	10.0	15213.6	19.0					1
		28	1	20.0	10.0	17568.2	21.9	214	21	3062	102	5
			2	20.0	10.0	17690.2	22.1					5
			2	20.0	10.0	16215.6	20.3					5

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kgf)	Esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio esfuerzo (%)	Tipo de falla
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	7	1	20.2	10.2	9500.0	11.5	103	10	1476	49	3
			2	20.2	10.0	8900.0	11.2					5
			2	20.3	10.0	6600.0	8.2					3
		14	1	20.1	10.0	11529.1	14.4	146	15	2092	70	2
			2	20.1	10.0	11111.1	13.9					1
			2	20.1	10.0	12528.0	15.6					1
		28	1	20.1	10.0	12589.2	15.7	168	17	2406	80	2
			2	20.1	10.0	13978.5	17.5					5
			2	20.1	10.0	13745.2	17.3					2
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% humo de sílice	7	1	20.0	10.0	15350.0	19.2	196	20	2793	93	5
			2	20.0	9.9	15680.0	20.0					5
			2	20.0	10.0	15455.0	19.5					5
		14	1	20.0	10.1	19084.0	23.6	230	23	3288	110	4
			2	20.0	10.2	18698.0	22.4					5
			2	20.0	10.2	18975.0	23.0					5
		28	1	20.0	10.1	19880.4	24.3	254	25	3634	121	5
			2	19.9	10.1	19700.0	24.4					6
			2	20.1	10.0	22100.0	27.6					5

Muestra	Mezcla	Edad	Espécimen	Altura Promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)	Carga (kgf)	Esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (kg/cm ²)	Promedio esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (PSI)	Promedio esfuerzo (%)	Tipo de falla
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% humo de sílice	7	1	20.1	10.0	17461.8	21.8	210	21	2993	100	1
			2	20.3	10.1	16044.9	19.8					1
			2	20.1	10.0	16972.5	21.2					2
		14	1	20.2	10.1	17889.9	22.1	225	23	3217	107	1
			2	20.0	10.1	19092.8	23.4					1
			2	20.0	10.0	17655.5	22.1					1
		28	1	20.0	10.0	19425.4	24.3	246	25	3513	117	2
			2	20.0	10.0	19857.5	24.8					3
			2	20.0	10.0	19773.4	24.7					2
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% humo de sílice	7	1	20.1	10.2	10000.0	12.1	123	12	1756	59	5
			2	20.0	10.1	9600.0	11.9					5
			2	20.0	10.0	10309.0	12.9					2
		14	1	20.3	10.1	16467.0	20.4	193	19	2759	92	1
			2	20.2	10.1	15178.4	18.8					1
			2	19.9	10.1	15209.0	18.8					1
		28	1	20.0	10.0	16923.4	21.1	215	22	3075	103	5
			2	20.0	10.0	17658.2	22.1					5
			2	20.0	10.0	16948.6	21.4					2

M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% humo de sílice	7	1	20.2	10.0	8063.2	10.1	101	10	1445	48	2
			2	20.1	10.0	7808.4	9.8					2
			2	20.3	10.1	8593.3	10.5					2
		14	1	20.2	10.3	12599.4	15.0	157	16	2247	75	1
			2	20.1	10.1	13139.7	16.1					2
			2	20.1	10.1	13170.2	16.1					2
		28	1	20.0	10.0	13923.4	17.4	177	18	2530	84	5
			2	20.0	10.0	14658.2	18.3					2
			2	20.0	10.0	13948.6	17.4					2

Ensayo de masa unitaria de concreto liviano estructural

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Muestra	Mezcla	Esfuerzo de Diseño (MPa)	Fecha de fundida	Espécimen	Densidad en fresco				
					Masa molde (kg)	Volumen Molde (m3)	Masa molde + concreto (kg)	Densidad en fresco (kg/m3)	Promedio Densidad en fresco (kg/m3)
MC - 2	Mezcla de control. Fase II	21	14/10/2020	1	0.218	0.0016	3.824	2295.7	2305.8
				2	0.216	0.0016	3.854	2316.0	
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	21	13/7/2020	1	0.216	0.0016	3.700	2218.0	2225.6
				2	0.212	0.0016	3.720	2233.3	
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	21	14/7/2020	1	0.214	0.0016	3.496	2089.4	2087.2
				2	0.210	0.0016	3.485	2084.9	
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21	22/7/2020	1	0.212	0.0016	3.260	1940.4	1941.7
				2	0.206	0.0016	3.258	1943.0	
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	21	21/7/2020	1	0.214	0.0016	3.086	1828.4	1850.0
				2	0.212	0.0016	3.152	1871.7	
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	14/10/2020	1	0.214	0.0016	3.602	2156.9	2155.0
				2	0.222	0.0016	3.604	2153.0	
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	1	0.214	0.0016	3.472	2074.1	2067.7
				2	0.210	0.0016	3.448	2061.4	
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	23/7/2020	1	0.212	0.0016	3.250	1934.1	1939.1
				2	0.206	0.0016	3.260	1944.2	
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	1	0.214	0.0016	3.138	1861.5	1857.7
				2	0.212	0.0016	3.124	1853.8	

Muestra	Mezcla	Esfuerzo de Diseño (MPa)	Fecha de fundida	Espécimen	Densidad de equilibrio				Promedio Densidad de equilibrio (kg/m3)
					Masa espécimen SSS (kg)	Masa espécimen sumergido (kg)	Masa espécimen seco (kg)	Densidad de equilibrio (kg/m3)	
MC - 2	Mezcla de control. Fase II	21	14/10/2020	1	3.562	1.991	3.488	2213.6	2212.4
				2	3.596	2.008	3.522	2211.3	
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	21	13/7/2020	1	3.500	1.907	3.483	2179.2	2174.3
				2	3.500	1.897	3.488	2169.4	
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	21	14/7/2020	1	3.230	1.642	3.198	2008.2	1998.8
				2	3.210	1.613	3.186	1989.5	
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21	22/7/2020	1	3.032	1.434	3.030	1890.0	1895.5
				2	3.020	1.438	3.016	1900.9	
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	21	21/7/2020	1	2.858	1.272	2.856	1795.7	1800.4
				2	2.926	1.311	2.924	1805.2	
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	14/10/2020	1	3.330	1.736	3.286	2055.5	2032.4
				2	3.326	1.732	3.212	2009.2	
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	1	3.184	1.600	3.134	1972.6	1973.1
				2	3.159	1.590	3.106	1973.7	
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	23/7/2020	1	3.090	1.489	3.066	1909.8	1908.3
				2	3.060	1.468	3.044	1906.9	
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	1	2.819	1.295	2.748	1797.7	1804.8
				2	2.825	1.315	2.744	1811.8	

Muestra	Mezcla	Esfuerzo de Diseño (MPa)	Fecha de fundida	Espécimen	Densidad de secado al horno				Promedio Densidad de secado al horno (kg/m3)
					Masa espécimen SSS (kg)	Masa espécimen sumergido (kg)	Masa espécimen seco (kg)	Densidad de secado al horno (kg/m3)	
MC - 2	Mezcla de control. Fase II	21	14/10/2020	1	3.528	1.994	3.220	2092.8	2081.7
				2	3.560	1.989	3.262	2070.7	
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	21	13/7/2020	1	3.420	1.837	3.176	1999.7	1996.2
				2	3.430	1.827	3.204	1992.8	
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	21	14/7/2020	1	3.160	1.572	2.864	1798.4	1784.7
				2	3.140	1.543	2.836	1770.9	
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21	22/7/2020	1	2.962	1.364	2.610	1628.0	1633.4
				2	2.950	1.368	2.600	1638.7	
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	21	21/7/2020	1	2.788	1.202	2.358	1482.6	1517.3
				2	2.856	1.241	2.514	1552.1	
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	14/10/2020	1	3.300	1.666	2.975	1815.4	1811.6
				2	3.330	1.662	3.024	1807.7	
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	1	3.114	1.530	2.863	1802.0	1809.1
				2	3.089	1.520	2.858	1816.1	

M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	23/7/2020	1	3.020	1.419	2.680	1669.4	1658.4
				2	2.990	1.398	2.630	1647.5	
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	1	2.749	1.225	2.502	1636.8	1651.3
				2	2.755	1.245	2.523	1665.8	

Muestra	Mezcla	Esfuerzo de Diseño (MPa)	Fecha de fundida	Densidad de secado al horno, aproximada					Densidad de equilibrio, aproximada (kg/m3)
				Masa del agregado fino seco (kg)	Masa del agregado grueso seco (kg)	Masa del cemento (kg)	Volumen de concreto producido (m3)	Densidad del secado al horno, aproximada (kg/m3)	
MC - 2	Mezcla de control. Fase II	21	14/10/2020	72.3	67.2	32.0	0.1	2223.8	2273.8
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	21	13/7/2020	69.7	67.2	32.0	0.1	2191.3	2241.3
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	21	14/7/2020	67.2	67.2	32.0	0.1	2160.0	2210.0
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21	22/7/2020	64.5	67.2	32.0	0.1	2126.3	2176.3
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	21	21/7/2020	66.2	62.2	32.0	0.1	2085.0	2135.0
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	14/10/2020	69.7	67.2	32.0	0.1	2191.3	2241.3
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	67.2	67.2	32.0	0.1	2160.0	2210.0
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	23/7/2020	64.5	67.2	32.0	0.1	2126.3	2176.3
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	29/7/2020	66.2	62.2	32.0	0.1	2085.0	2135.0

ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN FASE DOS

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Muestra	Mezcla	Edad	Modulo de Rotura teórico (MPa)	Altura (mm)	Promedio Altura (mm)	Ancho (mm)	Promedio Ancho (mm)	Longitud entre apoyos (mm)	Carga Máxima (kgf)	Carga Máxima (N)	Promedio de carga (N)	Modulo de Rotura (MPa)	Modulo de Rotura promedio (MPa)	Desviacion estandar
MC - 2	Mezcla de control. Fase II	28	2.4	154	154	153	153	450	2960.63	29034	29250.00	3.6	3.68	0.130
				154		154								
				154		153								
	Mezcla de control. Fase II	28	2.4	151	151	154	154	451	3004.62	29466	29250.00	3.8		
				152		153								
				151		154								
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	28	2.4	151	151	153	153	450	2431.25	23843	22000.00	3.0	2.79	0.361
				152		153								
				151		153								
	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	28	2.4	153	153	153	152	450	2055.43	20157	22000.00	2.5		
				154		151								
				152		151								
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	28	2.4	151	153	151	153	450	1431.92	14043	16200.00	1.8	2.04	0.388
				154		154								
				154		153								
	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	28	2.4	152	153	155	152	450	1871.91	18357	16200.00	2.3		
				153		151								
				154		151								
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	28	2.4	154	154	151	151	450	1297.89	12728	11747.00	1.6	1.49	0.167
				154		151								
				153		151								
	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	28	2.4	154	152	151	152	450	1097.79	10766	11747.00	1.4		
				152		153								
				151		153								
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	28	2.4	153	153	151	151	450	1085.20	10642	11296.00	1.4	1.42	0.097
				153		151								
				153		151								
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	28	2.4	153	153	153	153	450	1218.51	11950	11296.00	1.5		
				153		155								
				154		152								
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	154	154	153	152	450	2454.52	24071	22600.00	3.0	2.83	0.239
				154		151								
				154		153								
	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	153	153	152	152	450	2154.52	21129	22600.00	2.7		
				153		151								
				154		153								
M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	154	153	151	151	450	1565.56	15353	16775.00	1.9	2.12	0.251
				153		151								
				153		151								
	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	153	153	153	152	450	1855.53	18197	16775.00	2.3		
				153		151								
				153		151								
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	153	153	153	152	450	1452.44	14244	13214.00	1.8	1.68	0.180
				153		151								
				153		151								
	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	153	153	151	152	450	1242.42	12184	13214.00	1.6		
				153		153								
				152		153								
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	153	153	151	151	450	1153.20	11309	12223.00	1.4	1.56	0.165
				153		151								
				153		151								
	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	28	2.4	153	153	151	151	450	1339.56	13137	12223.00	1.7		
				153		151								
				153		151								

ENSAYO DE DENSIDAD, ABSORCION Y VACIOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz

Muestra	Mezcla	Espécimen	A. Masa seca al horno (g)	B. Masa saturada después de inmersión (g)	C. Masa saturada después de ebullición (g)	D. Masa aparente inmersa (g)	Absorción después de inmersión %	Promedio Absorción después de inmersión %	Absorción después de inmersión y ebullición %	Promedio Absorción después de inmersión y ebullición %	Densidad Bulk Seca (Mg/m ³)	Promedio Densidad Bulk Seca (Mg/m ³)	Densidad Bulk después de inmersión (Mg/m ³)	Promedio Densidad Bulk después de inmersión (Mg/m ³)	Densidad Bulk después de inmersión y ebullición (Mg/m ³)	Promedio Densidad Bulk después de inmersión y ebullición (Mg/m ³)	Densidad Aparente (Mg/m ³)	Promedio Densidad Aparente (Mg/m ³)	Volumen de poros y vacíos (%)	Promedio Volumen de poros y vacíos (%)
MC - 2	Mezcla de control. Fase II	1	809.80	838.30	831.40	506.00	3.52	4.10	2.67	3.11	2.49	2.40	2.58	2.50	2.56	2.48	2.67	2.60	6.64	7.47
		2	771.60	814.20	805.80	482.20	5.52		4.43		2.38		2.52		2.49		2.67		10.57	
		3	788.70	818.40	809.40	466.20	3.77		2.62		2.30		2.38		2.36		2.45		6.03	
		4	794.80	823.30	816.40	491.00	3.59		2.72		2.44		2.53		2.51		2.62		6.64	
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	1	793.86	817.03	816.98	441.60	2.92	3.74	2.91	3.89	2.11	2.08	2.18	2.16	2.18	2.16	2.25	2.26	6.16	8.07
		2	783.52	817.62	818.84	437.90	4.35		4.51		2.06		2.15		2.15		2.27		9.27	
		3	803.38	835.58	837.19	450.13	4.01		4.21		2.08		2.16		2.16		2.27		8.74	
		4	792.72	822.05	823.88	440.13	3.70		3.93		2.07		2.14		2.15		2.25		8.12	
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	1	739.37	794.62	800.04	408.90	7.47	7.34	8.21	8.02	1.89	1.85	2.03	1.99	2.05	2.00	2.24	2.18	15.51	14.86
		2	720.32	771.74	777.76	385.40	7.14		7.97		1.84		1.97		1.98		2.15		14.64	
		3	700.80	757.13	761.68	375.56	8.04		8.69		1.81		1.96		1.97		2.15		15.77	
		4	725.02	773.74	777.37	390.79	6.72		7.22		1.88		2.00		2.01		2.17		13.54	
M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	1	694.35	741.96	745.48	365.74	6.86	8.05	7.36	8.65	1.83	1.78	1.95	1.92	1.96	1.93	2.11	2.10	13.46	15.31
		2	652.98	710.27	715.20	328.50	8.77		9.53		1.69		1.84		1.85		2.01		16.09	
		3	687.16	741.58	745.08	382.40	7.92		8.43		1.89		2.04		2.05		2.25		15.97	
		4	654.91	711.67	715.67	329.11	8.67		9.28		1.69		1.84		1.85		2.01		15.72	
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	1	614.13	679.69	684.81	301.64	10.68	9.76	11.51	10.60	1.60	1.64	1.77	1.80	1.79	1.81	1.97	1.98	18.45	17.36
		2	654.97	713.07	718.55	328.10	8.87		9.71		1.68		1.83		1.84		2.00		16.28	
		3	624.13	689.69	694.81	311.64	10.50		11.32		1.63		1.80		1.81		2.00		18.45	
		4	644.97	703.07	708.55	318.10	9.01		9.86		1.65		1.80		1.81		1.97		16.28	
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	1	779.86	803.03	802.98	431.60	2.97	3.81	2.96	3.96	2.10	2.06	2.16	2.14	2.16	2.14	2.24	2.25	6.23	8.16
		2	769.52	803.62	804.84	427.90	4.43		4.59		2.04		2.13		2.14		2.25		9.37	
		3	789.38	821.58	823.19	440.13	4.08		4.28		2.06		2.14		2.15		2.26		8.83	
		4	778.72	808.05	809.88	430.13	3.77		4.00		2.05		2.13		2.13		2.23		8.21	

M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	1	735.92	754.74	758.16	370.80	2.56	6.12	3.02	6.50	1.90	1.86	1.95	1.97	1.96	1.98	2.02	2.12	5.74	12.02
		2	712.96	780.94	783.08	391.77	9.53		9.84		1.82		2.00		2.00		2.22		17.92	
		3	719.59	765.55	767.82	384.90	6.39		6.70		1.88		2.00		2.01		2.15		12.60	
		4	717.54	760.53	763.75	372.66	5.99		6.44		1.83		1.94		1.95		2.08		11.82	
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	1	672.97	725.43	728.09	336.90	7.80	8.33	8.19	8.80	1.72	1.73	1.85	1.85	1.86	1.88	2.00	2.04	14.09	15.17
		2	676.09	735.91	739.48	347.95	8.85		9.38		1.73		1.88		1.89		2.06		16.19	
		3	766.10	821.39	824.22	390.06	7.22		7.59		1.76		1.89		1.90		2.04		13.39	
		4	630.93	690.49	694.34	322.04	9.44		10.05		1.69		1.85		1.87		2.04		17.03	
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	1	621.22	684.06	690.00	299.55	10.12	10.99	11.07	11.86	1.59	1.59	1.75	1.76	1.77	1.78	1.93	1.96	17.62	18.83
		2	604.63	675.28	680.90	291.04	11.68		12.61		1.55		1.73		1.75		1.93		19.56	
		3	619.25	692.73	698.03	309.40	11.87		12.72		1.59		1.78		1.80		2.00		20.27	
		4	615.77	679.22	683.62	304.20	10.30		11.02		1.62		1.79		1.80		1.98		17.88	

ENSAYO TENSION INDIRECTA FASE DOS

PROYECTO: Concreto Estructural Liviano con Agregados Volcánicos del Nevado del Ruíz									
Muestra	Mezcla	Esfuerzo de Diseño (MPa)	Espécimen	Promedio Longitud del cilindro (mm)	Promedio Diámetro del cilindro (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	Promedio Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	Desviacion estandar
MC - 2	Mezcla de control. Fase II	21	1	200.3	100.5	127.2	4.0	4.8	2.3
			2	200.8	100.8	155.5	4.9		
			3	200.3	100.5	154.7	4.9		
			4	200.7	100.9	154.5	4.9		
			5	200.3	100.0	151.2	4.8		
			6	200.5	100.3	159.5	5.0		
			7	200.3	100.7	150.4	4.7		
			8	200.0	100.3	151.8	4.8		
M8	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli	21	1	200.3	100.2	101.2	3.2	3.7	2.2
			2	201.0	100.0	119.4	3.8		
			3	200.5	100.3	130.5	4.1		
			4	200.0	100.7	143.6	4.5		
			5	200.3	100.3	110.2	3.5		
			6	201.7	101.0	109.7	3.4		
			7	201.0	100.3	113.2	3.6		
			8	201.2	100.3	116.2	3.7		
M9	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli	21	1	200.7	100.3	63.4	2.0	2.4	1.2
			2	806.2	100.0	85.2	0.7		
			3	201.5	100.7	83.5	2.6		
			4	201.5	100.5	89.2	2.8		
			5	201.5	100.5	92.1	2.9		
			6	201.5	100.7	78.7	2.5		
			7	202.0	100.3	86.7	2.7		
			8	202.0	100.0	95.6	3.0		

M10	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli	21	1	201.0	100.7	39.2	1.2	1.8	0.9
			2	200.0	100.7	54.7	1.7		
			3	201.3	100.2	63.8	2.0		
			4	201.3	100.5	49.1	1.5		
			5	201.3	100.8	51.0	1.6		
			6	201.0	100.5	73.6	2.3		
			7	200.3	100.4	62.8	2.0		
			8	200.3	100.5	57.9	1.8		
M11	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli	21	1	200.7	100.3	70.1	2.2	1.4	0.7
			2	200.3	100.3	51.5	1.6		
			3	200.7	100.3	30.4	1.0		
			4	201.7	100.3	35.3	1.1		
			5	201.0	100.3	46.9	1.5		
			6	200.3	100.3	50.0	1.6		
			7	200.0	100.7	35.3	1.1		
			8	201.0	100.3	31.4	1.0		
M12	Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	1	200.0	100.7	151.1	4.8	3.2	1.6
			2	200.7	100.9	140.3	4.4		
			3	201.3	100.7	82.4	2.6		
			4	200.3	100.7	60.3	1.9		
			5	201.0	100.3	93.8	3.0		
			6	201.0	100.7	62.0	2.0		
			7	200.0	100.7	102.0	3.2		
			8	200.7	100.3	119.7	3.8		

M13	Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	1	201.3	100.3	75.5	2.4	2.2	1.1
			2	201.7	100.8	72.5	2.3		
			3	201.3	100.3	90.2	2.8		
			4	201.0	100.8	59.8	1.9		
			5	201.0	100.0	53.9	1.7		
			6	200.3	100.8	52.1	1.6		
			7	201.7	100.7	68.6	2.2		
			8	201.0	100.0	93.1	2.9		
M14	Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	1	200.3	100.7	52.0	1.6	1.4	0.7
			2	201.3	100.5	34.7	1.1		
			3	200.7	100.3	35.3	1.1		
			4	201.0	100.8	44.1	1.4		
			5	200.3	100.3	43.2	1.4		
			6	200.3	100.5	45.1	1.4		
			7	200.7	100.7	74.6	2.3		
			8	200.3	100.2	31.4	1.0		
M15	Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice	21	1	201.7	100.3	34.3	1.1	1.3	0.7
			2	200.3	100.7	36.8	1.2		
			3	200.3	100.0	62.3	2.0		
			4	200.7	400.3	50.0	0.4		
			5	200.3	100.7	61.8	2.0		
			6	201.7	100.7	32.4	1.0		
			7	200.3	100.7	47.1	1.5		
			8	200.0	100.3	44.1	1.4		

Anexo G. Resultados ensayo de modulo elástico

MC

Mezcla de Control

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	99.9
Carga Máxima (kN)	251
40% Carga (kN)	100
40% Carga (MPa)	12.80
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	38.21
Promedio de trazos - g (μm)	81.89
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	1.25	12.51	0.005	0.0025	0.000024
19.6	2.50	25.01	0.022	0.1110	0.001067
29.4	3.75	37.52	0.027	0.0127	0.000122
39.2	5.00	50.03	0.035	0.0166	0.000159
49.1	6.25	62.54	0.057	0.0266	0.000256
58.9	7.50	75.04	0.081	0.0379	0.000365
68.7	8.76	87.55	0.100	0.0467	0.000449
78.5	10.01	100.06	0.122	0.0568	0.000546
88.3	11.26	112.56	0.154	0.0718	0.000690
98.1	12.51	125.07	0.172	0.0802	0.000771
107.9	13.76	137.58	0.207	0.0966	0.000929

Modulo Elástico (MPa)	E	15191
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	12.80
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.28
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.0008

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	14648
	Desviación estandar	2305.610366

MC
Mezcla de Control

Especimen	2
Diámetro espécimen (mm)	99.9
Carga Máxima (kN)	247
40% Carga (kN)	99
40% Carga (MPa)	12.60
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	32.85
Promedio de trazos - g (μm)	70.40
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	1.25	12.51	0.005	0.0022	0.000021
19.6	2.50	25.01	0.014	0.0063	0.000061
29.4	3.75	37.52	0.024	0.0110	0.000106
39.2	5.00	50.03	0.031	0.0143	0.000138
49.1	6.25	62.54	0.049	0.0230	0.000221
58.9	7.50	75.04	0.070	0.0328	0.000316
68.7	8.76	87.55	0.087	0.0404	0.000389
78.5	10.01	100.06	0.105	0.0491	0.000472
88.3	11.26	112.56	0.133	0.0621	0.000597
98.1	12.51	125.07	0.149	0.0694	0.000667
107.9	13.76	137.58	0.179	0.0835	0.000803

Modulo Elástico (MPa)	E	16633
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	12.60
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	2.17
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.0007

MC

Mezcla de Control

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	99.9
Carga Máxima (kN)	264
40% Carga (kN)	106
40% Carga (MPa)	13.48
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	44.14
Promedio de trazos - g (μm)	94.58
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	1.25	12.51	0.006	0.0029	0.000028
19.6	2.50	25.01	0.025	0.0117	0.000112
29.4	3.75	37.52	0.031	0.0147	0.000141
39.2	5.00	50.03	0.041	0.0191	0.000184
49.1	6.25	62.54	0.066	0.0307	0.000296
58.9	7.50	75.04	0.094	0.0438	0.000421
68.7	8.76	87.55	0.116	0.0540	0.000519
78.5	10.01	100.06	0.141	0.0656	0.000631
88.3	11.26	112.56	0.178	0.0829	0.000797
98.1	12.51	125.07	0.199	0.0927	0.000891
107.9	13.76	137.58	0.239	0.1115	0.001072

Modulo Elástico (MPa)	E	12119
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	13.48
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.58
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.0010

M1

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	102.5
Carga Máxima (kN)	107
40% Carga (kN)	43
40% Carga (MPa)	5.18
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	20.39
Promedio de trazos - g (μm)	43.39
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	53.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	47.00
Longitud efectiva (mm)	106.5
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	1.19	11.90	0.018	0.0086	0.000081
19.6	2.38	23.79	0.031	0.0144	0.000135
29.4	3.57	35.69	0.047	0.0221	0.000207
39.2	4.76	47.59	0.070	0.0331	0.000311
49.1	5.95	59.48	0.094	0.0442	0.000415

Modulo Elástico (MPa)	E	14932
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	5.18
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.73
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00035

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	13504
	Desviacion estandar	1458.539166

M1

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	102.5
Carga Máxima (kN)	115
40% Carga (kN)	46
40% Carga (MPa)	5.60
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	22.14
Promedio de trazos - g (μm)	47.10
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	53.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	47.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	1.19	11.90	0.021	0.0099	0.000093
19.6	2.38	23.79	0.033	0.0155	0.000146
29.4	3.57	35.69	0.051	0.0239	0.000224
39.2	4.76	47.59	0.076	0.0358	0.000336
49.1	5.95	59.48	0.102	0.0478	0.000448

Modulo Elástico (MPa)	E	13563
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	5.60
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.64
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00042

M1

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	102.5
Carga Máxima (kN)	120
40% Carga (kN)	48
40% Carga (MPa)	5.81
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	24.55
Promedio de trazos - g (μm)	52.23
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	53.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	47.00
Longitud efectiva (mm)	106.5
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	1.19	11.90	0.023	0.0106	0.000100
19.6	2.38	23.79	0.037	0.0172	0.000162
29.4	3.57	35.69	0.056	0.0265	0.000249
39.2	4.76	47.59	0.085	0.0398	0.000374
49.1	5.95	59.48	0.113	0.0531	0.000498

Modulo Elástico (MPa)	E	12017
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	5.81
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.60
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00048

M2
Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli

Especimen	1
Diámetro espécimen (mm)	153.7
Carga Máxima (kN)	218
40% Carga (kN)	87
40% Carga (MPa)	4.71
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	26.51
Promedio de trazos - g (μm)	63.93
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	51.00
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.29	0.010	0.0042	0.000021
19.6	1.06	10.58	0.022	0.0092	0.000045
29.4	1.59	15.87	0.038	0.0159	0.000078
39.2	2.12	21.16	0.054	0.0226	0.000111
49.1	2.64	26.45	0.071	0.0293	0.000144
58.9	3.17	31.74	0.085	0.0351	0.000173
68.7	3.70	37.03	0.101	0.0418	0.000206
78.5	4.23	42.32	0.121	0.0502	0.000247
88.3	4.76	47.61	0.137	0.0569	0.000280

Modulo Elástico (MPa)	E	15649
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	4.71
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.16
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00028

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	12578
	Desviacion estandar	2925.355399

M2

Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	153.7
Carga Máxima (kN)	229
40% Carga (kN)	91
40% Carga (MPa)	4.93
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	51.05
Promedio de trazos - g (μm)	123.13
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	51.00
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.29	0.021	0.0085	0.000042
19.6	1.06	10.58	0.055	0.0228	0.000112
29.4	1.59	15.87	0.064	0.0265	0.000131
39.2	2.12	21.16	0.091	0.0377	0.000186
49.1	2.64	26.45	0.118	0.0488	0.000241
58.9	3.17	31.74	0.141	0.0586	0.000289
68.7	3.70	37.03	0.168	0.0698	0.000344
78.5	4.23	42.32	0.202	0.0837	0.000412
88.3	4.76	47.61	0.229	0.0949	0.000467
98.1	5.29	52.90	0.266	0.1102	0.000543

Modulo Elástico (MPa)	E	9824
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	4.93
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.59
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00049

M2

Mezcla con reemplazo del 25% de arena y grava Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	153.7
Carga Máxima (kN)	223
40% Carga (kN)	89
40% Carga (MPa)	4.80
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	37.80
Promedio de trazos - g (μm)	91.17
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	51.00
Longitud efectiva (mm)	203.0
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.29	0.013	0.0053	0.000026
19.6	1.06	10.58	0.025	0.0104	0.000051
29.4	1.59	15.87	0.048	0.0200	0.000099
39.2	2.12	21.16	0.069	0.0284	0.000140
49.1	2.64	26.45	0.089	0.0369	0.000182
58.9	3.17	31.74	0.107	0.0442	0.000218
68.7	3.70	37.03	0.127	0.0527	0.000259
78.5	4.23	42.32	0.152	0.0632	0.000311
88.3	4.76	47.61	0.173	0.0716	0.000353
98.1	5.29	52.90	0.201	0.0832	0.000410

Modulo Elástico (MPa)	E	12261
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	4.80
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.04
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00036

M3
Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

Especimen	1
Diámetro espécimen (mm)	154.1
Carga Máxima (kN)	168
40% Carga (kN)	67
40% Carga (MPa)	3.60
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	32.88
Promedio de trazos - g (μm)	80.22
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	50.00
Longitud efectiva (mm)	213.0
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.26	0.022	0.0090	0.000042
19.6	1.05	10.52	0.038	0.0156	0.000073
29.4	1.58	15.78	0.056	0.0229	0.000108
39.2	2.10	21.04	0.079	0.0323	0.000152
49.1	2.63	26.30	0.104	0.0427	0.000200
58.9	3.16	31.56	0.152	0.0625	0.000293
68.7	3.68	36.82	0.191	0.0781	0.000367

Modulo Elástico (MPa)	E	9762
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	3.60
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.62
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00036

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	10035
	Desviacion estandar	728.0528118

M3

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	154.1
Carga Máxima (kN)	155
40% Carga (kN)	62
40% Carga (MPa)	3.32
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	32.82
Promedio de trazos - g (μm)	80.07
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	50.00
Longitud efectiva (mm)	213.0
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.26	0.029	0.0118	0.000056
19.6	1.05	10.52	0.038	0.0154	0.000072
29.4	1.58	15.78	0.055	0.0226	0.000106
39.2	2.10	21.04	0.078	0.0319	0.000150
49.1	2.63	26.30	0.103	0.0421	0.000198
58.9	3.16	31.56	0.150	0.0616	0.000289
68.7	3.68	36.82	0.188	0.0771	0.000362

Modulo Elástico (MPa)	E	10860
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	3.32
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.47
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00031

M3

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	154.1
Carga Máxima (kN)	171
40% Carga (kN)	68
40% Carga (MPa)	3.67
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	34.70
Promedio de trazos - g (μm)	84.67
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	213.0
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (um)	Deformación unitaria (um)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.26	0.027	0.0109	0.000051
19.6	1.05	10.52	0.040	0.0164	0.000077
29.4	1.58	15.78	0.059	0.0240	0.000113
39.2	2.10	21.04	0.083	0.0339	0.000159
49.1	2.63	26.30	0.109	0.0448	0.000210
58.9	3.16	31.56	0.160	0.0656	0.000308
68.7	3.68	36.82	0.200	0.0820	0.000385

Modulo Elástico (MPa)	E	9482
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	3.67
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.51
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00038

M4

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	155.5
Carga Máxima (kN)	167
40% Carga (kN)	67
40% Carga (MPa)	3.51
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	26.02
Promedio de trazos - g (μm)	62.66
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	69.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	203.5
	0.42

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.52	5.16	0.018	0.0074	0.000036
19.6	1.03	10.33	0.026	0.0107	0.000052
29.4	1.55	15.49	0.049	0.0203	0.000100
39.2	2.07	20.65	0.067	0.0277	0.000136
49.1	2.58	25.82	0.091	0.0378	0.000186
58.9	3.10	30.98	0.116	0.0480	0.000236
68.7	3.61	36.14	0.136	0.0563	0.000277

Modulo Elástico (MPa)	E	11691
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	3.51
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.96
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00027

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	10572
	Desviacion estandar	988.3453561

M4

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	155.5
Carga Máxima (kN)	171
40% Carga (kN)	68
40% Carga (MPa)	3.60
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	29.56
Promedio de trazos - g (μm)	71.20
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	69.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	203.5
	0.42

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.52	5.16	0.020	0.0084	0.000041
19.6	1.03	10.33	0.026	0.0108	0.000053
29.4	1.55	15.49	0.056	0.0232	0.000114
39.2	2.07	20.65	0.076	0.0316	0.000155
49.1	2.58	25.82	0.104	0.0432	0.000213
58.9	3.10	30.98	0.132	0.0548	0.000270
68.7	3.61	36.14	0.155	0.0643	0.000316

Modulo Elástico (MPa)	E	10207
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	3.60
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.90
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00031

M4

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	155.5
Carga Máxima (kN)	176
40% Carga (kN)	70
40% Carga (MPa)	3.71
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	38.89
Promedio de trazos - g (μm)	93.66
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	69.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	203.5
	0.42

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	(kN)	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (um)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.52	5.16	0.023	0.0095	0.000047
19.6	1.03	10.33	0.032	0.0131	0.000064
29.4	1.55	15.49	0.063	0.0262	0.000129
39.2	2.07	20.65	0.086	0.0357	0.000175
49.1	2.58	25.82	0.117	0.0488	0.000240
58.9	3.10	30.98	0.149	0.0619	0.000304
68.7	3.61	36.14	0.175	0.0726	0.000357
78.5	4.13	41.31	0.198	0.0824	0.000405

Modulo Elástico (MPa)	E	9818
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	3.71
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.61
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00037

M5

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	154.0
Carga Máxima (kN)	195
40% Carga (kN)	78
40% Carga (MPa)	4.18
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	44.28
Promedio de trazos - g (μm)	108.85
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	70.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	48.00
Longitud efectiva (mm)	203.5
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.27	0.009	0.0038	0.000018
19.6	1.05	10.53	0.040	0.0161	0.000079
29.4	1.58	15.80	0.069	0.0281	0.000138
39.2	2.11	21.07	0.108	0.0441	0.000217
49.1	2.63	26.33	0.140	0.0571	0.000281
58.9	3.16	31.60	0.170	0.0691	0.000340
68.7	3.69	36.87	0.202	0.0821	0.000403
78.5	4.21	42.13	0.241	0.0981	0.000482

Modulo Elástico (MPa)	E	6452
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	4.18
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.43
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00048

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	6580
	Desviacion estandar	273.5101997

M5

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	154.0
Carga Máxima (kN)	211
40% Carga (kN)	84
40% Carga (MPa)	4.52
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	55.06
Promedio de trazos - g (μm)	135.36
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	70.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	48.00
Longitud efectiva (mm)	203.5
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.27	0.011	0.0044	0.000022
19.6	1.05	10.53	0.043	0.0173	0.000085
29.4	1.58	15.80	0.074	0.0301	0.000148
39.2	2.11	21.07	0.116	0.0473	0.000232
49.1	2.63	26.33	0.150	0.0612	0.000301
58.9	3.16	31.60	0.182	0.0740	0.000364
68.7	3.69	36.87	0.216	0.0879	0.000432
78.5	4.21	42.13	0.258	0.1051	0.000516
88.3	4.74	47.40	0.303	0.1233	0.000606

Modulo Elástico (MPa)	E	6394
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	4.52
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.21
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00057

M5

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	154.0
Carga Máxima (kN)	205
40% Carga (kN)	82
40% Carga (MPa)	4.40
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	53.21
Promedio de trazos - g (μm)	130.80
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	70.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	48.00
Longitud efectiva (mm)	203.5
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
9.8	0.53	5.27	0.012	0.0049	0.000024
19.6	1.05	10.53	0.041	0.0167	0.000082
29.4	1.58	15.80	0.072	0.0291	0.000143
39.2	2.11	21.07	0.112	0.0456	0.000224
49.1	2.63	26.33	0.145	0.0591	0.000290
58.9	3.16	31.60	0.176	0.0715	0.000351
68.7	3.69	36.87	0.209	0.0849	0.000417
78.5	4.21	42.13	0.249	0.1014	0.000498
88.3	4.74	47.40	0.292	0.1190	0.000585

Modulo Elástico (MPa)	E	6894
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	4.40
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.10
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00053

M6

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	152.5
Carga Máxima (kN)	110
40% Carga (kN)	44
40% Carga (MPa)	2.40
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	59.47
Promedio de trazos - g (μm)	143.43
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	51.00
	217.5
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.27	2.69	0.025	0.0105	0.000048
9.8	0.54	5.37	0.050	0.0207	0.000095
14.7	0.81	8.05	0.086	0.0358	0.000165
19.6	1.07	10.74	0.127	0.0527	0.000242
24.5	1.34	13.42	0.160	0.0663	0.000305
29.4	1.61	16.11	0.191	0.0790	0.000363
34.3	1.88	18.79	0.224	0.0927	0.000426
39.2	2.15	21.47	0.264	0.1095	0.000504
44.1	2.42	24.16	0.307	0.1274	0.000586

Modulo Elástico (MPa)	E	3996
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	2.40
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.28
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00058

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	4000
	Desviacion estandar	221.4563127

M6

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	152.5
Carga Máxima (kN)	102
40% Carga (kN)	41
40% Carga (MPa)	2.23
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	57.77
Promedio de trazos - g (μm)	139.32
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	51.00
	217.5
Excentricidad (d/g)	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.27	2.69	0.025	0.0102	0.000047
9.8	0.54	5.37	0.056	0.0232	0.000107
14.7	0.81	8.05	0.083	0.0346	0.000159
19.6	1.07	10.74	0.123	0.0509	0.000234
24.5	1.34	13.42	0.155	0.0641	0.000295
29.4	1.61	16.11	0.184	0.0763	0.000351
34.3	1.88	18.79	0.216	0.0895	0.000412
39.2	2.15	21.47	0.255	0.1058	0.000486
44.1	2.42	24.16	0.297	0.1231	0.000566

Modulo Elástico (MPa)	E	4223
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	2.23
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.28
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00051

M6

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 25% de grava Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	152.5
Carga Máxima (kN)	118
40% Carga (kN)	47
40% Carga (MPa)	2.58
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	70.41
Promedio de trazos - g (μm)	169.82
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	72.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	51.00
Excentricidad (d/g)	217.5
	0.41

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.27	2.69	0.026	0.0110	0.000050
9.8	0.54	5.37	0.058	0.0241	0.000111
14.7	0.81	8.05	0.090	0.0372	0.000171
19.6	1.07	10.74	0.132	0.0548	0.000252
24.5	1.34	13.42	0.166	0.0690	0.000317
29.4	1.61	16.11	0.198	0.0821	0.000378
34.3	1.88	18.79	0.232	0.0964	0.000443
39.2	2.15	21.47	0.275	0.1139	0.000524
44.1	2.42	24.16	0.320	0.1325	0.000609
49.0	2.68	26.84	0.370	0.1535	0.000706

Modulo Elástico (MPa)	E	3781
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	2.58
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.27
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00066

M7

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	154.2
Carga Máxima (kN)	105
40% Carga (kN)	42
40% Carga (MPa)	2.24
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	70.99
Promedio de trazos - g (μm)	170.95
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	69.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	202.5
Excentricidad (d/g)	0.42

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.26	2.63	0.030	0.0134	0.000066
9.8	0.52	5.25	0.043	0.0181	0.000089
14.7	0.79	7.87	0.094	0.0390	0.000192
19.6	1.05	10.49	0.137	0.0570	0.000282
24.5	1.31	13.12	0.172	0.0713	0.000352
29.4	1.57	15.74	0.206	0.0855	0.000422
34.3	1.84	18.36	0.252	0.1045	0.000516
39.2	2.10	20.98	0.343	0.1425	0.000704
44.1	2.36	23.61	0.432	0.1796	0.000887

Modulo Elástico (MPa)	E	2708
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	2.24
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.20
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00081

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	2286
	Desviacion estandar	411.7812009

M7

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	154.2
Carga Máxima (kN)	112
40% Carga (kN)	45
40% Carga (MPa)	2.40
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	93.41
Promedio de trazos - g (μm)	224.94
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	69.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	202.5
	0.42

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.26	2.63	0.030	0.0125	0.000062
9.8	0.52	5.25	0.048	0.0200	0.000099
14.7	0.79	7.87	0.104	0.0432	0.000214
19.6	1.05	10.49	0.152	0.0633	0.000313
24.5	1.31	13.12	0.191	0.0791	0.000391
29.4	1.57	15.74	0.229	0.0949	0.000469
34.3	1.84	18.36	0.279	0.1160	0.000573
39.2	2.10	20.98	0.381	0.1582	0.000781
44.1	2.36	23.61	0.480	0.1993	0.000984
49.0	2.62	26.23	0.580	0.2408	0.001189

Modulo Elástico (MPa)	E	2266
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	2.40
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.21
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00102

M7

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 50% de grava Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	154.2
Carga Máxima (kN)	121
40% Carga (kN)	48
40% Carga (MPa)	2.58
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	107.55
Promedio de trazos - g (μm)	258.99
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	69.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.42

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.26	2.63	0.038	0.0158	0.000078
9.8	0.52	5.25	0.055	0.0230	0.000114
14.7	0.79	7.87	0.120	0.0497	0.000246
19.6	1.05	10.49	0.175	0.0728	0.000359
24.5	1.31	13.12	0.219	0.0910	0.000449
29.4	1.57	15.74	0.263	0.1092	0.000539
34.3	1.84	18.36	0.321	0.1334	0.000659
39.2	2.10	20.98	0.438	0.1819	0.000898
44.1	2.36	23.61	0.552	0.2292	0.001132
49.0	2.62	26.23	0.667	0.2770	0.001368

Modulo Elástico (MPa)	E	1885
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	2.58
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.17
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.00133

MC2

Mezcla control Fase II

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	273
40% Carga (kN)	109
40% Carga (MPa)	13.90
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	42.52
Promedio de trazos - g (μm)	91.11
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	104.0
	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2 \cdot 0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.010	0.0047	0.000045
9.8	1.25	12.49	0.016	0.0075	0.000072
14.7	1.87	18.74	0.020	0.0094	0.000090
19.6	2.50	24.98	0.024	0.0112	0.000108
24.5	3.12	31.23	0.033	0.0155	0.000149
29.4	3.75	37.47	0.042	0.0195	0.000188
34.3	4.37	43.72	0.049	0.0229	0.000220
39.2	5.00	49.96	0.056	0.0262	0.000252
44.1	5.62	56.21	0.066	0.0306	0.000294
49.1	6.25	62.45	0.073	0.0339	0.000326
54.0	6.87	68.70	0.083	0.0387	0.000372
58.9	7.49	74.94	0.088	0.0413	0.000397
63.8	8.12	81.19	0.097	0.0453	0.000436
68.7	8.74	87.43	0.107	0.0498	0.000479
73.6	9.37	93.68	0.112	0.0524	0.000503
78.5	9.99	99.92	0.122	0.0568	0.000546
83.4	10.62	106.17	0.136	0.0634	0.000610
88.3	11.24	112.41	0.151	0.0704	0.000677
93.2	11.87	118.66	0.162	0.0756	0.000727
98.1	12.49	124.90	0.171	0.0796	0.000766
103.0	13.12	131.15	0.180	0.0841	0.000808
107.9	13.74	137.40	0.189	0.0881	0.000847
112.8	14.36	143.64	0.201	0.0936	0.000900

Modulo Elástico (MPa)	E	16285
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	13.90
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.69
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000861

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	16838
	Desviacion estandar	655.4663301

MC2

Mezcla control Fase II

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	229
40% Carga (kN)	92
40% Carga (MPa)	11.68
$d = \frac{g \cdot er}{(er + eg)}$ d (μm)	29.70
Promedio de trazos - g (μm)	63.64
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(E_2 - 0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.009	0.0041	0.000040
9.8	1.25	12.49	0.014	0.0066	0.000063
14.7	1.87	18.74	0.018	0.0082	0.000079
19.6	2.50	24.98	0.021	0.0099	0.000095
24.5	3.12	31.23	0.029	0.0136	0.000131
29.4	3.75	37.47	0.037	0.0172	0.000165
34.3	4.37	43.72	0.043	0.0201	0.000193
39.2	5.00	49.96	0.049	0.0230	0.000221
44.1	5.62	56.21	0.058	0.0269	0.000259
49.1	6.25	62.45	0.064	0.0298	0.000287
54.0	6.87	68.70	0.073	0.0341	0.000328
58.9	7.49	74.94	0.078	0.0363	0.000349
63.8	8.12	81.19	0.086	0.0399	0.000384
68.7	8.74	87.43	0.094	0.0438	0.000421
73.6	9.37	93.68	0.099	0.0461	0.000443
78.5	9.99	99.92	0.107	0.0500	0.000480
83.4	10.62	106.17	0.120	0.0558	0.000537
88.3	11.24	112.41	0.133	0.0620	0.000596
93.2	11.87	118.66	0.143	0.0665	0.000639

Modulo Elástico (MPa)	E	17562
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	11.68
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.79
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000670

MC2

Mezcla control Fase II

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	238
40% Carga (kN)	95
40% Carga (MPa)	12.14
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	35.58
Promedio de trazos - g (μm)	76.23
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.010	0.0046	0.000045
9.8	1.25	12.49	0.016	0.0074	0.000071
14.7	1.87	18.74	0.020	0.0093	0.000089
19.6	2.50	24.98	0.024	0.0111	0.000107
24.5	3.12	31.23	0.033	0.0153	0.000147
29.4	3.75	37.47	0.041	0.0193	0.000186
34.3	4.37	43.72	0.048	0.0226	0.000218
39.2	5.00	49.96	0.056	0.0259	0.000249
44.1	5.62	56.21	0.065	0.0303	0.000291
49.1	6.25	62.45	0.072	0.0336	0.000323
54.0	6.87	68.70	0.082	0.0383	0.000368
58.9	7.49	74.94	0.088	0.0409	0.000393
63.8	8.12	81.19	0.096	0.0449	0.000432
68.7	8.74	87.43	0.106	0.0493	0.000474
73.6	9.37	93.68	0.111	0.0518	0.000498
78.5	9.99	99.92	0.120	0.0562	0.000540
83.4	10.62	106.17	0.135	0.0628	0.000604
88.3	11.24	112.41	0.149	0.0697	0.000670
93.2	11.87	118.66	0.160	0.0748	0.000719
98.1	12.49	124.90	0.169	0.0788	0.000758

Modulo Elástico (MPa)	E	16667
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	12.14
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.70
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000736

M8
Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

Especimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	189
40% Carga (kN)	75
40% Carga (MPa)	9.60
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	25.94
Promedio de trazos - g (μm)	55.59
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.005	0.0024	0.000023
9.8	1.25	12.49	0.010	0.0047	0.000045
14.7	1.87	18.74	0.015	0.0070	0.000067
19.6	2.50	24.98	0.020	0.0093	0.000089
24.5	3.12	31.23	0.030	0.0138	0.000133
29.4	3.75	37.47	0.034	0.0160	0.000154
34.3	4.37	43.72	0.039	0.0183	0.000176
39.2	5.00	49.96	0.049	0.0229	0.000220
44.1	5.62	56.21	0.059	0.0274	0.000264
49.1	6.25	62.45	0.064	0.0297	0.000286
54.0	6.87	68.70	0.069	0.0320	0.000308
58.9	7.49	74.94	0.083	0.0387	0.000373
63.8	8.12	81.19	0.093	0.0433	0.000416
68.7	8.74	87.43	0.107	0.0500	0.000481
73.6	9.37	93.68	0.122	0.0568	0.000546
78.5	9.99	99.92	0.147	0.0687	0.000661

Modulo Elástico (MPa)	E	15261
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	9.60
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.38
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000589

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	14557
	Desviacion estandar	2420.598997

M8

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	174
40% Carga (kN)	70
40% Carga (MPa)	8.88
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (µm)	23.74
Promedio de trazos - g (µm)	50.86
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (µm)	Deformación unitaria (µm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.005	0.0024	0.000023
9.8	1.25	12.49	0.010	0.0048	0.000046
14.7	1.87	18.74	0.015	0.0071	0.000069
19.6	2.50	24.98	0.020	0.0094	0.000091
24.5	3.12	31.23	0.030	0.0141	0.000135
29.4	3.75	37.47	0.035	0.0164	0.000157
34.3	4.37	43.72	0.040	0.0187	0.000180
39.2	5.00	49.96	0.050	0.0233	0.000224
44.1	5.62	56.21	0.060	0.0280	0.000269
49.1	6.25	62.45	0.065	0.0303	0.000291
54.0	6.87	68.70	0.070	0.0326	0.000314
58.9	7.49	74.94	0.085	0.0395	0.000380
63.8	8.12	81.19	0.095	0.0441	0.000424
68.7	8.74	87.43	0.109	0.0510	0.000491
73.6	9.37	93.68	0.124	0.0579	0.000557

Modulo Elástico (MPa)	E	16547
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	8.88
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.35
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (µm)	E2	0.000505

M8

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	195
40% Carga (kN)	78
40% Carga (MPa)	9.91
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	31.81
Promedio de trazos - g (μm)	68.17
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.006	0.0029	0.000028
9.8	1.25	12.49	0.012	0.0058	0.000056
14.7	1.87	18.74	0.018	0.0086	0.000083
19.6	2.50	24.98	0.024	0.0114	0.000109
24.5	3.12	31.23	0.036	0.0169	0.000163
29.4	3.75	37.47	0.042	0.0197	0.000189
34.3	4.37	43.72	0.048	0.0225	0.000216
39.2	5.00	49.96	0.060	0.0281	0.000270
44.1	5.62	56.21	0.072	0.0336	0.000323
49.1	6.25	62.45	0.078	0.0364	0.000350
54.0	6.87	68.70	0.084	0.0392	0.000377
58.9	7.49	74.94	0.102	0.0475	0.000457
63.8	8.12	81.19	0.114	0.0530	0.000510
68.7	8.74	87.43	0.131	0.0613	0.000590
73.6	9.37	93.68	0.149	0.0696	0.000669
78.5	9.99	99.92	0.181	0.0843	0.000810

Modulo Elástico (MPa)	E	11862
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	9.91
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.12
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000791

M9

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	164
40% Carga (kN)	66
40% Carga (MPa)	8.35
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	40.18
Promedio de trazos - g (μm)	86.11
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	49.00
Longitud efectiva (mm)	104.0
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.019	0.0089	0.000086
9.8	1.25	12.49	0.038	0.0178	0.000171
14.7	1.87	18.74	0.048	0.0222	0.000214
19.6	2.50	24.98	0.052	0.0245	0.000235
24.5	3.12	31.23	0.067	0.0311	0.000299
29.4	3.75	37.47	0.071	0.0334	0.000321
34.3	4.37	43.72	0.081	0.0378	0.000364
39.2	5.00	49.96	0.095	0.0445	0.000428
44.1	5.62	56.21	0.110	0.0512	0.000492
49.1	6.25	62.45	0.119	0.0556	0.000535
54.0	6.87	68.70	0.129	0.0601	0.000577
58.9	7.49	74.94	0.143	0.0667	0.000642
63.8	8.12	81.19	0.153	0.0712	0.000684
68.7	8.74	87.43	0.167	0.0778	0.000749

Modulo Elástico (MPa)	E	12132
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	8.35
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.37
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000708

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	11217
	Desviacion estandar	1327.147086

M9

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	186
40% Carga (kN)	74
40% Carga (MPa)	9.47
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	55.21
Promedio de trazos - g (μm)	118.31
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	49.00
Longitud efectiva (mm)	104.0
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.023	0.0107	0.000103
9.8	1.25	12.49	0.046	0.0213	0.000205
14.7	1.87	18.74	0.057	0.0267	0.000256
19.6	2.50	24.98	0.063	0.0293	0.000282
24.5	3.12	31.23	0.080	0.0373	0.000359
29.4	3.75	37.47	0.086	0.0400	0.000385
34.3	4.37	43.72	0.097	0.0453	0.000436
39.2	5.00	49.96	0.114	0.0533	0.000513
44.1	5.62	56.21	0.131	0.0613	0.000590
49.1	6.25	62.45	0.143	0.0667	0.000641
54.0	6.87	68.70	0.154	0.0720	0.000692
58.9	7.49	74.94	0.171	0.0800	0.000769
63.8	8.12	81.19	0.183	0.0853	0.000821
68.7	8.74	87.43	0.200	0.0933	0.000898
73.6	9.37	93.68	0.217	0.1013	0.000974
78.5	9.99	99.92	0.245	0.1145	0.001100

Modulo Elástico (MPa)	E	9695
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	9.47
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.30
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000996

M9

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	173
40% Carga (kN)	69
40% Carga (MPa)	8.80
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	43.49
Promedio de trazos - g (μm)	93.20
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	49.00
Longitud efectiva (mm)	104.0
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.019	0.0090	0.000087
9.8	1.25	12.49	0.039	0.0180	0.000173
14.7	1.87	18.74	0.048	0.0225	0.000217
19.6	2.50	24.98	0.053	0.0248	0.000238
24.5	3.12	31.23	0.068	0.0315	0.000303
29.4	3.75	37.47	0.072	0.0338	0.000325
34.3	4.37	43.72	0.082	0.0383	0.000368
39.2	5.00	49.96	0.097	0.0450	0.000433
44.1	5.62	56.21	0.111	0.0518	0.000498
49.1	6.25	62.45	0.121	0.0563	0.000541
54.0	6.87	68.70	0.130	0.0608	0.000585
58.9	7.49	74.94	0.145	0.0676	0.000650
63.8	8.12	81.19	0.154	0.0721	0.000693
68.7	8.74	87.43	0.169	0.0788	0.000758
73.6	9.37	93.68	0.183	0.0856	0.000823

Modulo Elástico (MPa)	E	11824
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	8.80
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.36
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000763

M10

Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	148
40% Carga (kN)	59
40% Carga (MPa)	7.54
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	43.05
Promedio de trazos - g (μm)	92.24
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.012	0.0058	0.000055
9.8	1.25	12.49	0.025	0.0115	0.000111
14.7	1.87	18.74	0.037	0.0173	0.000166
19.6	2.50	24.98	0.049	0.0230	0.000221
24.5	3.12	31.23	0.062	0.0288	0.000277
29.4	3.75	37.47	0.074	0.0345	0.000332
34.3	4.37	43.72	0.086	0.0403	0.000387
39.2	5.00	49.96	0.099	0.0460	0.000443
44.1	5.62	56.21	0.116	0.0541	0.000520
49.1	6.25	62.45	0.128	0.0598	0.000575
54.0	6.87	68.70	0.148	0.0691	0.000664
58.9	7.49	74.94	0.168	0.0783	0.000753
63.8	8.12	81.19	0.180	0.0840	0.000808
68.7	8.74	87.43	0.200	0.0932	0.000896

Modulo Elástico (MPa)	E	9872
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	7.54
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.56
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000756

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	9540
	Desviacion estandar	722.6223926

M10

Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	165
40% Carga (kN)	66
40% Carga (MPa)	8.40
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	42.11
Promedio de trazos - g (μm)	90.25
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	104.0
	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (um)	Deformación unitaria (um)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.012	0.0056	0.000054
9.8	1.25	12.49	0.024	0.0113	0.000108
14.7	1.87	18.74	0.036	0.0169	0.000162
19.6	2.50	24.98	0.048	0.0225	0.000217
24.5	3.12	31.23	0.060	0.0282	0.000271
29.4	3.75	37.47	0.072	0.0338	0.000325
34.3	4.37	43.72	0.084	0.0394	0.000379
39.2	5.00	49.96	0.097	0.0450	0.000433
44.1	5.62	56.21	0.113	0.0529	0.000509
49.1	6.25	62.45	0.125	0.0586	0.000563
54.0	6.87	68.70	0.145	0.0676	0.000650
58.9	7.49	74.94	0.164	0.0766	0.000736
63.8	8.12	81.19	0.176	0.0822	0.000790
68.7	8.74	87.43	0.195	0.0912	0.000877

Modulo Elástico (MPa)	E	10037
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	8.40
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.58
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000830

M10

Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	174
40% Carga (kN)	70
40% Carga (MPa)	8.86
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	51.58
Promedio de trazos - g (μm)	110.53
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	104.0
	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.014	0.0064	0.000061
9.8	1.25	12.49	0.027	0.0127	0.000122
14.7	1.87	18.74	0.041	0.0191	0.000183
19.6	2.50	24.98	0.054	0.0254	0.000244
24.5	3.12	31.23	0.068	0.0318	0.000306
29.4	3.75	37.47	0.082	0.0381	0.000367
34.3	4.37	43.72	0.095	0.0445	0.000428
39.2	5.00	49.96	0.109	0.0509	0.000489
44.1	5.62	56.21	0.128	0.0597	0.000575
49.1	6.25	62.45	0.142	0.0661	0.000636
54.0	6.87	68.70	0.163	0.0763	0.000733
58.9	7.49	74.94	0.185	0.0864	0.000831
63.8	8.12	81.19	0.199	0.0928	0.000892
68.7	8.74	87.43	0.221	0.1030	0.000990
73.6	9.37	93.68	0.240	0.1121	0.001078

Modulo Elástico (MPa)	E	8711
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	8.86
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.51
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.001009

M11

Mezcla con reemplazo del 100 % de arena Lapilli

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	123
40% Carga (kN)	49
40% Carga (MPa)	6.25
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	37.89
Promedio de trazos - g (μm)	81.20
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (um)	Deformación unitaria (um)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.025	0.0118	0.000114
9.8	1.25	12.49	0.038	0.0178	0.000171
14.7	1.87	18.74	0.051	0.0237	0.000228
19.6	2.50	24.98	0.063	0.0296	0.000285
24.5	3.12	31.23	0.079	0.0367	0.000353
29.4	3.75	37.47	0.101	0.0474	0.000455
34.3	4.37	43.72	0.112	0.0521	0.000501
39.2	5.00	49.96	0.127	0.0592	0.000569
44.1	5.62	56.21	0.140	0.0651	0.000626
49.1	6.25	62.45	0.157	0.0734	0.000706

Modulo Elástico (MPa)	E	9101
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	6.25
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.27
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000707

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	8847
	Desviacion estandar	644.1787751

M11

Mezcla con reemplazo del 100 % de arena Lapilli

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	150
40% Carga (kN)	60
40% Carga (MPa)	7.66
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	44.74
Promedio de trazos - g (μm)	95.88
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.027	0.0127	0.000122
9.8	1.25	12.49	0.041	0.0191	0.000184
14.7	1.87	18.74	0.055	0.0254	0.000245
19.6	2.50	24.98	0.068	0.0318	0.000306
24.5	3.12	31.23	0.085	0.0394	0.000379
29.4	3.75	37.47	0.109	0.0509	0.000489
34.3	4.37	43.72	0.120	0.0560	0.000538
39.2	5.00	49.96	0.136	0.0636	0.000612
44.1	5.62	56.21	0.150	0.0700	0.000673
49.1	6.25	62.45	0.169	0.0789	0.000759
54.0	6.87	68.70	0.191	0.0891	0.000856
58.9	7.49	74.94	0.208	0.0972	0.000934
63.8	8.12	81.19	0.232	0.1082	0.001040

Modulo Elástico (MPa)	E	8115
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	7.66
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.26
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000962

M11

Mezcla con reemplazo del 100 % de arena Lapilli

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	134
40% Carga (kN)	53
40% Carga (MPa)	6.80
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	39.60
Promedio de trazos - g (μm)	84.86
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	104.0
	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.024	0.0113	0.000108
9.8	1.25	12.49	0.036	0.0169	0.000162
14.7	1.87	18.74	0.048	0.0225	0.000217
19.6	2.50	24.98	0.060	0.0282	0.000271
24.5	3.12	31.23	0.075	0.0349	0.000336
29.4	3.75	37.47	0.097	0.0450	0.000433
34.3	4.37	43.72	0.106	0.0495	0.000476
39.2	5.00	49.96	0.121	0.0563	0.000541
44.1	5.62	56.21	0.133	0.0619	0.000596
49.1	6.25	62.45	0.150	0.0698	0.000671
54.0	6.87	68.70	0.169	0.0788	0.000758

Modulo Elástico (MPa)	E	9326
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	6.80
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.29
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000748

M12

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	196
40% Carga (kN)	79
40% Carga (MPa)	10.00
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	25.98
Promedio de trazos - g (μm)	55.67
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.005	0.0024	0.000023
9.8	1.25	12.49	0.010	0.0047	0.000045
14.7	1.87	18.74	0.015	0.0070	0.000067
19.6	2.50	24.98	0.020	0.0093	0.000089
24.5	3.12	31.23	0.030	0.0138	0.000133
29.4	3.75	37.47	0.034	0.0160	0.000154
34.3	4.37	43.72	0.039	0.0183	0.000176
39.2	5.00	49.96	0.049	0.0229	0.000220
44.1	5.62	56.21	0.059	0.0274	0.000264
49.1	6.25	62.45	0.064	0.0297	0.000286
54.0	6.87	68.70	0.069	0.0320	0.000308
58.9	7.49	74.94	0.074	0.0343	0.000330
63.8	8.12	81.19	0.078	0.0366	0.000352
68.7	8.74	87.43	0.088	0.0411	0.000396
73.6	9.37	93.68	0.103	0.0479	0.000461
78.5	9.99	99.92	0.128	0.0599	0.000575
83.4	10.62	106.17	0.138	0.0643	0.000618

Modulo Elástico (MPa)	E	16394
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	10.00
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.38
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000576

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	15624
	Desviacion estandar	3832.309689

M12

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	183
40% Carga (kN)	73
40% Carga (MPa)	9.32
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	22.15
Promedio de trazos - g (μm)	47.45
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.005	0.0024	0.000023
9.8	1.25	12.49	0.010	0.0049	0.000047
14.7	1.87	18.74	0.015	0.0072	0.000069
19.6	2.50	24.98	0.020	0.0095	0.000092
24.5	3.12	31.23	0.030	0.0142	0.000137
29.4	3.75	37.47	0.035	0.0166	0.000159
34.3	4.37	43.72	0.041	0.0189	0.000182
39.2	5.00	49.96	0.051	0.0236	0.000227
44.1	5.62	56.21	0.061	0.0283	0.000272
49.1	6.25	62.45	0.066	0.0306	0.000295
54.0	6.87	68.70	0.071	0.0330	0.000317
58.9	7.49	74.94	0.076	0.0354	0.000340
63.8	8.12	81.19	0.081	0.0378	0.000363
68.7	8.74	87.43	0.091	0.0424	0.000408
73.6	9.37	93.68	0.106	0.0494	0.000475

Modulo Elástico (MPa)	E	19013
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	9.32
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	1.33
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000470

M12

Mezcla con reemplazo del 25% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	204
40% Carga (kN)	82
40% Carga (MPa)	10.40
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	37.64
Promedio de trazos - g (μm)	80.66
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.007	0.0034	0.000033
9.8	1.25	12.49	0.015	0.0068	0.000066
14.7	1.87	18.74	0.022	0.0101	0.000098
19.6	2.50	24.98	0.029	0.0134	0.000129
24.5	3.12	31.23	0.043	0.0200	0.000192
29.4	3.75	37.47	0.050	0.0233	0.000224
34.3	4.37	43.72	0.057	0.0266	0.000255
39.2	5.00	49.96	0.071	0.0331	0.000319
44.1	5.62	56.21	0.085	0.0397	0.000382
49.1	6.25	62.45	0.092	0.0430	0.000414
54.0	6.87	68.70	0.099	0.0464	0.000446
58.9	7.49	74.94	0.107	0.0497	0.000478
63.8	8.12	81.19	0.114	0.0530	0.000510
68.7	8.74	87.43	0.128	0.0596	0.000573
73.6	9.37	93.68	0.149	0.0694	0.000667
78.5	9.99	99.92	0.186	0.0867	0.000834
83.4	10.62	106.17	0.200	0.0931	0.000896

Modulo Elástico (MPa)	E	11465
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	10.40
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.95
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000875

M13

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	184
40% Carga (kN)	74
40% Carga (MPa)	9.37
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	36.38
Promedio de trazos - g (μm)	77.96
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	49.00
Longitud efectiva (mm)	104.0
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.007	0.0033	0.000032
9.8	1.25	12.49	0.019	0.0089	0.000085
14.7	1.87	18.74	0.024	0.0111	0.000107
19.6	2.50	24.98	0.031	0.0144	0.000139
24.5	3.12	31.23	0.040	0.0188	0.000181
29.4	3.75	37.47	0.050	0.0233	0.000224
34.3	4.37	43.72	0.062	0.0288	0.000277
39.2	5.00	49.96	0.071	0.0332	0.000320
44.1	5.62	56.21	0.078	0.0366	0.000352
49.1	6.25	62.45	0.093	0.0432	0.000416
54.0	6.87	68.70	0.100	0.0465	0.000447
58.9	7.49	74.94	0.112	0.0521	0.000501
63.8	8.12	81.19	0.119	0.0554	0.000533
68.7	8.74	87.43	0.131	0.0609	0.000586
73.6	9.37	93.68	0.142	0.0665	0.000639
78.5	9.99	99.92	0.157	0.0731	0.000703
83.4	10.62	106.17	0.169	0.0787	0.000756

Modulo Elástico (MPa)	E	14476
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	9.37
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.84
Deformación unitaria longitudinal producida por	E2	0.000640

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	13091
	Desviacion estandar	1836.000905

M13

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	196
40% Carga (kN)	79
40% Carga (MPa)	10.00
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	36.97
Promedio de trazos - g (μm)	79.23
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.007	0.0034	0.000032
9.8	1.25	12.49	0.019	0.0090	0.000087
14.7	1.87	18.74	0.024	0.0113	0.000108
19.6	2.50	24.98	0.031	0.0146	0.000141
24.5	3.12	31.23	0.041	0.0191	0.000184
29.4	3.75	37.47	0.051	0.0236	0.000227
34.3	4.37	43.72	0.063	0.0293	0.000282
39.2	5.00	49.96	0.072	0.0338	0.000325
44.1	5.62	56.21	0.080	0.0372	0.000357
49.1	6.25	62.45	0.094	0.0439	0.000422
54.0	6.87	68.70	0.101	0.0473	0.000455
58.9	7.49	74.94	0.113	0.0529	0.000509
63.8	8.12	81.19	0.121	0.0563	0.000541
68.7	8.74	87.43	0.133	0.0619	0.000596
73.6	9.37	93.68	0.145	0.0676	0.000650
78.5	9.99	99.92	0.159	0.0743	0.000715
83.4	10.62	106.17	0.171	0.0800	0.000769

Modulo Elástico (MPa)	E	13789
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	10.00
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.83
Deformación unitaria longitudinal producida por	E2	0.000715

M13

Mezcla con reemplazo del 50% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	200
40% Carga (kN)	80
40% Carga (MPa)	10.19
$d = \frac{g \cdot er}{(er + eg)}$ d (μm)	46.02
Promedio de trazos - g (μm)	98.62
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical -	49.00
Longitud efectiva (mm)	104.0
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2 - S1)}{(E2 - 0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.009	0.0042	0.000040
9.8	1.25	12.49	0.024	0.0112	0.000108
14.7	1.87	18.74	0.030	0.0140	0.000135
19.6	2.50	24.98	0.039	0.0182	0.000175
24.5	3.12	31.23	0.051	0.0238	0.000229
29.4	3.75	37.47	0.063	0.0294	0.000283
34.3	4.37	43.72	0.078	0.0364	0.000350
39.2	5.00	49.96	0.090	0.0421	0.000404
44.1	5.62	56.21	0.099	0.0463	0.000445
49.1	6.25	62.45	0.117	0.0547	0.000526
54.0	6.87	68.70	0.126	0.0589	0.000566
58.9	7.49	74.94	0.141	0.0659	0.000633
63.8	8.12	81.19	0.150	0.0701	0.000674
68.7	8.74	87.43	0.165	0.0771	0.000741
73.6	9.37	93.68	0.180	0.0841	0.000809
78.5	9.99	99.92	0.198	0.0925	0.000890
83.4	10.62	106.17	0.213	0.0995	0.000957

Modulo Elástico (MPa)	E	11009
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	10.19
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.71
Deformación unitaria longitudinal producida por	E2	0.000910

M14

Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	168
40% Carga (kN)	67
40% Carga (MPa)	8.56
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	45.47
Promedio de trazos - g (μm)	97.43
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.021	0.0098	0.000094
9.8	1.25	12.49	0.031	0.0147	0.000141
14.7	1.87	18.74	0.042	0.0196	0.000188
19.6	2.50	24.98	0.055	0.0255	0.000245
24.5	3.12	31.23	0.063	0.0294	0.000283
29.4	3.75	37.47	0.080	0.0372	0.000358
34.3	4.37	43.72	0.097	0.0451	0.000433
39.2	5.00	49.96	0.105	0.0490	0.000471
44.1	5.62	56.21	0.120	0.0559	0.000537
49.1	6.25	62.45	0.139	0.0647	0.000622
54.0	6.87	68.70	0.151	0.0706	0.000678
58.9	7.49	74.94	0.176	0.0823	0.000791
63.8	8.12	81.19	0.185	0.0862	0.000829
68.7	8.74	87.43	0.197	0.0921	0.000886

Modulo Elástico (MPa)	E	10046
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	8.56
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.33
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000869

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	8297
	Desviacion estandar	2007.605491

M14

Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	182
40% Carga (kN)	73
40% Carga (MPa)	9.27
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	80.20
Promedio de trazos - g (μm)	171.86
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Longitud efectiva (mm)	104.0
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.035	0.0161	0.000155
9.8	1.25	12.49	0.052	0.0242	0.000233
14.7	1.87	18.74	0.069	0.0322	0.000310
19.6	2.50	24.98	0.090	0.0419	0.000403
24.5	3.12	31.23	0.104	0.0484	0.000465
29.4	3.75	37.47	0.131	0.0613	0.000589
34.3	4.37	43.72	0.159	0.0742	0.000713
39.2	5.00	49.96	0.173	0.0806	0.000775
44.1	5.62	56.21	0.197	0.0919	0.000884
49.1	6.25	62.45	0.228	0.1064	0.001023
54.0	6.87	68.70	0.249	0.1161	0.001116
58.9	7.49	74.94	0.290	0.1354	0.001302
63.8	8.12	81.19	0.304	0.1419	0.001364
68.7	8.74	87.43	0.325	0.1515	0.001457
73.6	9.37	93.68	0.345	0.1612	0.001550

Modulo Elástico (MPa)	E	6105
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	9.27
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.20
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.001535

M14

Mezcla con reemplazo del 75% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	173
40% Carga (kN)	69
40% Carga (MPa)	8.80
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	56.02
Promedio de trazos - g (μm)	120.05
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	104.0
	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.024	0.0113	0.000108
9.8	1.25	12.49	0.036	0.0169	0.000162
14.7	1.87	18.74	0.048	0.0225	0.000217
19.6	2.50	24.98	0.063	0.0293	0.000282
24.5	3.12	31.23	0.072	0.0338	0.000325
29.4	3.75	37.47	0.092	0.0428	0.000411
34.3	4.37	43.72	0.111	0.0518	0.000498
39.2	5.00	49.96	0.121	0.0563	0.000541
44.1	5.62	56.21	0.138	0.0642	0.000617
49.1	6.25	62.45	0.159	0.0743	0.000715
54.0	6.87	68.70	0.174	0.0811	0.000780
58.9	7.49	74.94	0.203	0.0946	0.000910
63.8	8.12	81.19	0.212	0.0991	0.000953
68.7	8.74	87.43	0.227	0.1059	0.001018
73.6	9.37	93.68	0.241	0.1126	0.001083

Modulo Elástico (MPa)	E	8742
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	8.80
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.29
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.001024

M15

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	1
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	141
40% Carga (kN)	57
40% Carga (MPa)	7.20
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	38.98
Promedio de trazos - g (μm)	83.53
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.005	0.0023	0.000022
9.8	1.25	12.49	0.017	0.0079	0.000076
14.7	1.87	18.74	0.029	0.0135	0.000130
19.6	2.50	24.98	0.043	0.0203	0.000195
24.5	3.12	31.23	0.058	0.0270	0.000260
29.4	3.75	37.47	0.077	0.0360	0.000346
34.3	4.37	43.72	0.097	0.0450	0.000433
39.2	5.00	49.96	0.116	0.0541	0.000520
44.1	5.62	56.21	0.133	0.0619	0.000596
49.1	6.25	62.45	0.150	0.0698	0.000671
54.0	6.87	68.70	0.169	0.0788	0.000758
58.9	7.49	74.94	0.193	0.0901	0.000866

Modulo Elástico (MPa)	E	8166
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	7.20
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.95
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000815

Promedio Modulo Elástico (MPa)	E	7768
	Desviación estandar	1321.213356

M15

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	2
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	138
40% Carga (kN)	55
40% Carga (MPa)	7.03
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	36.35
Promedio de trazos - g (μm)	77.89
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Longitud efectiva (mm)	104.0
Excentricidad (d/g)	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.005	0.0021	0.000020
9.8	1.25	12.49	0.016	0.0074	0.000071
14.7	1.87	18.74	0.027	0.0126	0.000121
19.6	2.50	24.98	0.041	0.0189	0.000182
24.5	3.12	31.23	0.054	0.0252	0.000242
29.4	3.75	37.47	0.072	0.0336	0.000323
34.3	4.37	43.72	0.090	0.0420	0.000404
39.2	5.00	49.96	0.108	0.0504	0.000485
44.1	5.62	56.21	0.124	0.0578	0.000555
49.1	6.25	62.45	0.140	0.0651	0.000626
54.0	6.87	68.70	0.158	0.0735	0.000707
58.9	7.49	74.94	0.180	0.0840	0.000808

Modulo Elástico (MPa)	E	8844
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	7.03
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.99
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.000732

M15

Mezcla con reemplazo del 100% de arena Lapilli y 10% Humo de sílice

Espécimen	3
Diámetro espécimen (mm)	100.0
Carga Máxima (kN)	151
40% Carga (kN)	60
40% Carga (MPa)	7.66
$d = \frac{g*er}{(er+eg)}$ d (μm)	56.09
Promedio de trazos - g (μm)	120.19
Distancia entre deformímetro y el plano vertical - eg (mm)	56.00
Distancia entre barra pivote y el plano vertical - Longitud efectiva (mm)	49.00
Excentricidad (d/g)	104.0
	0.47

$$E = \frac{(S2-S1)}{(E2-0,000050)}$$

CARGA (kN)	ESFUERZO		DEFORMACION AXIAL		
	MPa	(kg/cm ²)	Trazos (mm)	Deformación total (μm)	Deformación unitaria (μm)
0.0	0.00	0.00	0.000	0.0000	0.000000
4.9	0.62	6.25	0.007	0.0032	0.000031
9.8	1.25	12.49	0.024	0.0113	0.000109
14.7	1.87	18.74	0.042	0.0194	0.000187
19.6	2.50	24.98	0.062	0.0292	0.000280
24.5	3.12	31.23	0.083	0.0389	0.000374
29.4	3.75	37.47	0.111	0.0519	0.000499
34.3	4.37	43.72	0.139	0.0648	0.000623
39.2	5.00	49.96	0.167	0.0778	0.000748
44.1	5.62	56.21	0.191	0.0891	0.000857
49.1	6.25	62.45	0.215	0.1005	0.000966
54.0	6.87	68.70	0.243	0.1134	0.001091
58.9	7.49	74.94	0.278	0.1296	0.001246
63.8	8.12	81.19	0.309	0.1442	0.001386

Modulo Elástico (MPa)	E	6293
Esfuerzo correspondiente al 40% (MPa)	S2	7.66
Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas (MPa)	S1	0.78
Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2 (μm)	E2	0.001145

**Anexo H. Resultados de ensayo
permeabilidad al ion cloruro**

ANEXO H. RESULTADOS DE ENSAYO PERMEABILIDAD AL ION CLORURO

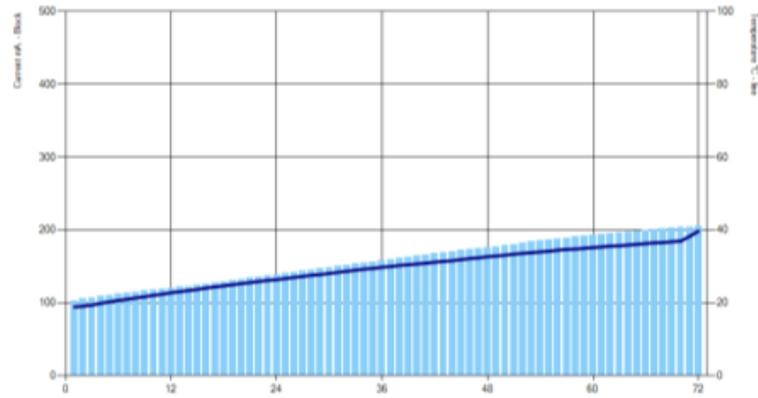
MC2-A



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 3013,85 coulomb
 Penetrability class: Moderate
 Instrument number: 090603
 Channel number: 4
 Report saved: jueves, 26 de noviembre de 2020 07:27 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _FIN
 System ID: 10336
 Test ID: MC2-PROBETA 1

Time	°C	mA									
00:30	21	113,8	02:00	27	140,7	03:30	31	169,2	05:00	35	194,2
00:35	21	115,2	02:05	27	142,2	03:35	32	170,6	05:05	36	195,3
00:40	22	116,4	02:10	27	143,8	03:40	32	172,0	05:10	36	196,5
00:45	22	117,7	02:15	28	145,4	03:45	32	173,4	05:15	36	197,5
00:50	22	119,1	02:20	28	147,0	03:50	32	174,8	05:20	36	198,4
00:55	23	120,5	02:25	28	148,7	03:55	33	176,2	05:25	36	199,6
01:00	23	121,9	02:30	28	150,3	04:00	33	177,2	05:30	37	200,6
01:05	23	122,9	02:35	29	151,8	04:05	33	178,9	05:35	37	201,4
01:10	24	124,5	02:40	29	153,6	04:10	33	180,3	05:40	37	202,5
01:15	24	126,1	02:45	29	155,2	04:15	34	182,4	05:45	37	203,6
01:20	24	127,9	02:50	30	156,7	04:20	34	184,0	05:50	38	204,5
01:25	25	129,4	02:55	30	158,4	04:25	34	185,5	05:55	40	205,5



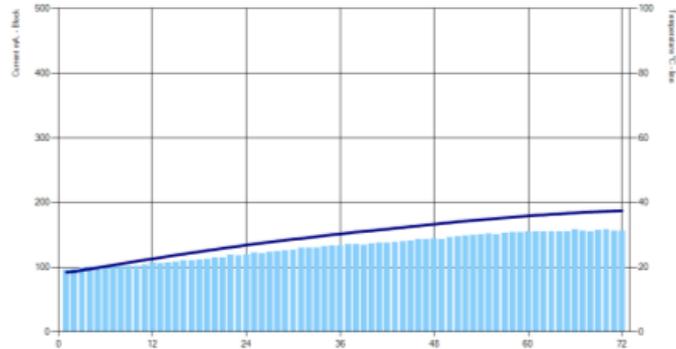
Time	°C	mA									
00:00	19	102,7	01:30	25	131,0	03:00	30	159,9	04:30	34	186,9
00:05	19	105,9	01:35	25	132,5	03:05	30	161,6	04:35	35	188,3
00:10	19	107,6	01:40	26	134,1	03:10	31	163,2	04:40	35	189,4
00:15	20	109,4	01:45	26	135,7	03:15	31	164,6	04:45	35	190,7
00:20	20	110,9	01:50	26	137,4	03:20	31	166,0	04:50	35	191,9
00:25	21	112,3	01:55	26	139,0	03:25	31	167,7	04:55	35	193,1

M8-A



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 2556.32 coulomb
 Penetrability class: Moderate
 Instrument number: 090603
 Channel number: 5
 Report saved: jueves, 10 de septiembre de 2020 05:46 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 100 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: FIN
 System ID: 10333
 Test ID: M14-2



Time	°C	mA									
00:00	19	96,5	01:30	25	112,5	03:00	31	135,8	04:30	35	151,4
00:05	19	97,5	01:35	26	114,4	03:05	31	135,3	04:35	35	151,2
00:10	19	99,4	01:40	26	114,8	03:10	31	134,8	04:40	35	153,1
00:15	20	100,1	01:45	26	118,7	03:15	31	137,1	04:45	36	153,5
00:20	20	100,7	01:50	27	118,3	03:20	32	137,5	04:50	36	153,7
00:25	20	101,0	01:55	27	118,8	03:25	32	138,0	04:55	36	154,7

Time	°C	mA									
00:30	21	101,4	02:00	27	122,2	03:30	32	138,5	05:00	36	154,9
00:35	21	101,5	02:05	28	121,8	03:35	32	140,2	05:05	36	155,1
00:40	22	101,2	02:10	28	123,3	03:40	33	140,8	05:10	36	155,3
00:45	22	102,2	02:15	28	124,6	03:45	33	143,3	05:15	37	154,7
00:50	22	103,5	02:20	28	125,7	03:50	33	143,2	05:20	37	155,1
00:55	23	106,6	02:25	29	126,5	03:55	33	144,6	05:25	37	158,3
01:00	23	105,9	02:30	29	129,9	04:00	34	143,6	05:30	37	156,7
01:05	23	106,9	02:35	29	130,0	04:05	34	146,2	05:35	37	155,5
01:10	24	108,3	02:40	30	129,7	04:10	34	147,6	05:40	37	157,2
01:15	24	110,7	02:45	30	131,9	04:15	34	148,9	05:45	37	158,1
01:20	25	110,8	02:50	30	132,9	04:20	35	149,9	05:50	37	156,5
01:25	25	111,5	02:55	30	132,8	04:25	35	151,1	05:55	38	156,6

M8-B

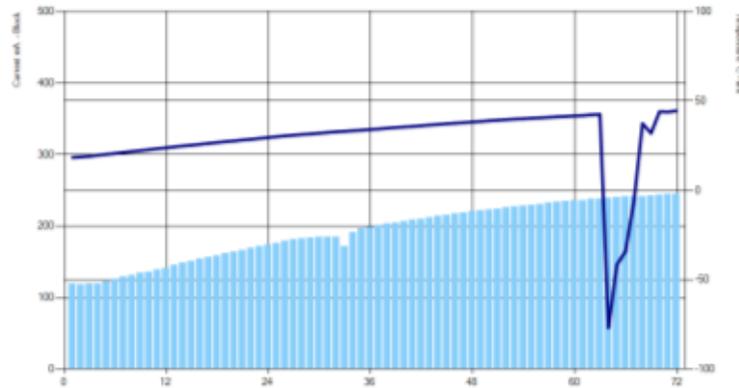


Test-company
Testing street 45
CompanyCity
Some Country



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 3670,45 coulomb
 Penetrability class: Moderate
 Instrument number: 090603
 Channel number: 6
 Report saved: martes, 08 de septiembre de 2020 06:04 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _FIN
 System ID: 10326
 Test ID: M14-1



Time	°C	mA									
00:00	18	119,2	01:30	27	161,9	03:00	34	200,6	04:30	40	229,5
00:05	19	118,4	01:35	28	163,9	03:05	35	203,0	04:35	41	230,8
00:10	19	119,0	01:40	28	166,4	03:10	35	204,5	04:40	41	232,5
00:15	20	119,4	01:45	29	168,8	03:15	35	205,9	04:45	41	233,1
00:20	20	122,9	01:50	29	171,5	03:20	36	208,5	04:50	41	234,7
00:25	21	125,5	01:55	30	173,7	03:25	36	209,8	04:55	42	235,5

Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:30	21	128,6	02:00	30	176,3	03:30	37	211,3	05:00	42	236,0
00:35	22	131,2	02:05	30	178,7	03:35	37	213,4	05:05	42	237,4
00:40	22	134,0	02:10	31	181,0	03:40	37	215,3	05:10	42	238,2
00:45	23	135,8	02:15	31	182,8	03:45	38	216,7	05:15	-77	239,5
00:50	23	138,2	02:20	32	183,7	03:50	38	218,3	05:20	-42	240,1
00:55	24	140,5	02:25	32	184,9	03:55	38	220,0	05:25	-34	241,5
01:00	24	144,9	02:30	32	184,9	04:00	39	221,6	05:30	-6	241,6
01:05	25	148,5	02:35	33	184,7	04:05	39	222,9	05:35	37	241,7
01:10	25	150,5	02:40	33	171,3	04:10	39	224,0	05:40	32	242,6
01:15	26	153,7	02:45	33	190,7	04:15	40	225,6	05:45	44	243,2
01:20	26	156,2	02:50	34	196,6	04:20	40	227,0	05:50	44	244,3
01:25	27	158,6	02:55	34	198,7	04:25	40	228,3	05:55	44	244,6

M9-A

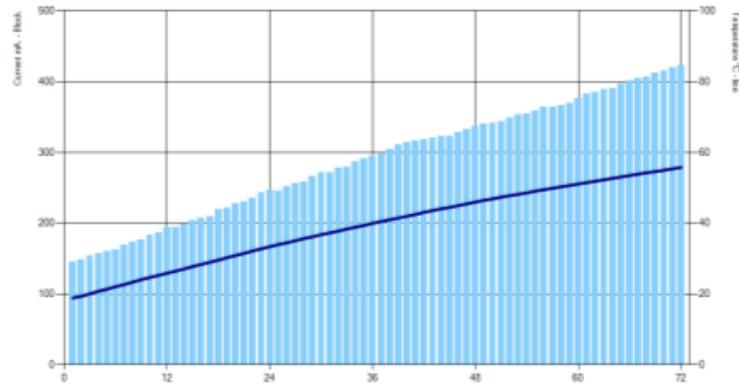


Test-company
Testing street 45
CompagnyCity
Some Country



Test report

Voltage used: 60 V.
Testing time: 6:00 hour
Charge passed (adjusted): 5532,48 coulomb
Penetrability class: High
Instrument number: 090603
Channel number: 4
Report saved: miércoles, 09 de septiembre de 2020 06:04 p.m.
Testing by: JENIFFER SANCHEZ
Reference:
Sample diameter: 101 mm.
Sample length: 50 mm.
Instrument status: FIN
System ID: 10329
Test ID: M8-1



Time	°C	mA									
00:00	19	145,3	01:30	30	221,1	03:00	41	298,3	04:30	49	358,9
00:05	19	148,5	01:35	31	227,6	03:05	41	304,5	04:35	50	364,6
00:10	20	153,5	01:40	32	230,8	03:10	42	310,7	04:40	50	364,4
00:15	21	157,3	01:45	32	236,2	03:15	42	313,9	04:45	50	366,3
00:20	21	161,0	01:50	33	243,0	03:20	43	316,6	04:50	51	370,0
00:25	22	162,8	01:55	33	247,1	03:25	43	318,2	04:55	51	376,7

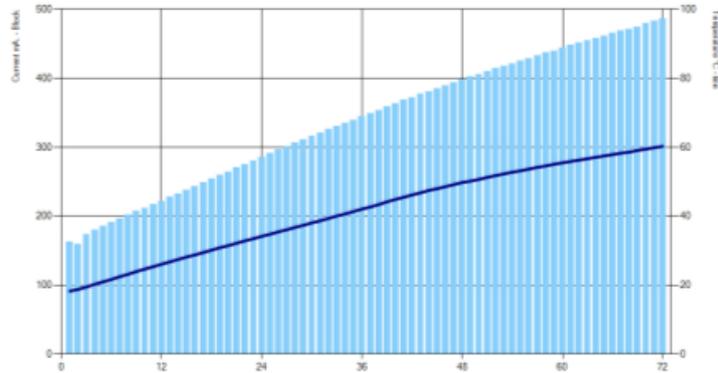
Time	°C	mA									
00:30	23	168,9	02:00	34	246,0	03:30	44	320,9	05:00	52	382,5
00:35	23	173,7	02:05	35	251,6	03:35	44	322,4	05:05	52	385,5
00:40	24	176,5	02:10	35	256,2	03:40	45	323,2	05:10	52	389,4
00:45	25	183,4	02:15	36	258,9	03:45	45	328,7	05:15	53	390,7
00:50	25	186,8	02:20	36	266,1	03:50	46	332,4	05:20	53	397,4
00:55	26	194,6	02:25	37	271,3	03:55	46	337,6	05:25	54	401,4
01:00	27	194,7	02:30	37	271,2	04:00	47	340,5	05:30	54	405,0
01:05	27	199,2	02:35	38	277,8	04:05	47	341,5	05:35	54	406,6
01:10	28	204,0	02:40	38	279,5	04:10	47	343,5	05:40	55	412,5
01:15	28	207,8	02:45	39	286,4	04:15	48	348,7	05:45	55	415,2
01:20	29	209,9	02:50	39	291,7	04:20	48	353,5	05:50	55	420,0
01:25	30	219,6	02:55	40	295,0	04:25	49	354,0	05:55	56	423,4

M9-B



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 6471,55 coulomb
 Penetrability class: High
 Instrument number: 090603
 Channel number: 1
 Report saved: Lunes, 07 de septiembre de 2020 06:57 p.m.
 Testing by: jeniffer sanchez
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _FIN
 System ID: 10322
 Test ID: M8



Time	°C	mA									
00:00	18	162,7	01:30	31	259,4	03:00	43	349,2	04:30	53	425,6
00:05	19	159,2	01:35	32	264,3	03:05	43	353,8	04:35	54	429,0
00:10	20	173,8	01:40	32	270,1	03:10	44	359,0	04:40	54	433,3
00:15	20	179,8	01:45	33	275,5	03:15	45	363,7	04:45	55	437,0
00:20	21	185,6	01:50	34	280,5	03:20	46	368,3	04:50	55	440,0
00:25	22	191,3	01:55	34	285,7	03:25	46	372,3	04:55	56	443,8

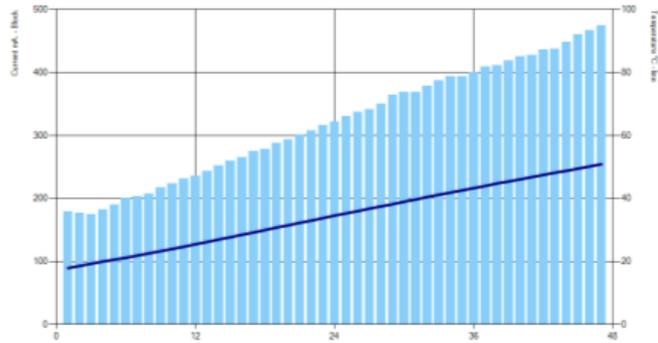
Time	°C	mA									
00:30	23	196,5	02:00	35	291,0	03:30	47	377,1	05:00	56	448,1
00:35	23	201,6	02:05	36	296,8	03:35	48	381,0	05:05	56	451,3
00:40	24	206,9	02:10	36	301,5	03:40	48	385,4	05:10	57	454,5
00:45	25	212,0	02:15	37	306,5	03:45	49	389,3	05:15	57	458,0
00:50	25	216,9	02:20	37	311,0	03:50	49	393,6	05:20	58	461,1
00:55	26	222,0	02:25	38	316,1	03:55	50	398,5	05:25	58	465,3
01:00	27	227,6	02:30	39	320,9	04:00	50	402,3	05:30	58	468,5
01:05	28	232,7	02:35	39	326,2	04:05	51	406,0	05:35	59	471,1
01:10	28	238,1	02:40	40	330,4	04:10	51	409,8	05:40	59	474,9
01:15	29	243,5	02:45	41	335,3	04:15	52	413,9	05:45	60	479,8
01:20	30	248,9	02:50	41	339,7	04:20	52	418,0	05:50	60	483,0
01:25	30	253,9	02:55	42	344,9	04:25	53	421,2	05:55	60	486,6

M10-A



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 3994,78 coulomb
 Penetrability class: N.A.
 Instrument number: 090603
 Channel number: 4
 Report saved: martes, 08 de septiembre de 2020 04:02 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: OVF
 System ID: 10323
 Test ID: M9-2



Time	°C	mA									
00:00	18	178,6	01:00	26	243,7	02:00	35	330,0	03:00	44	409,1
00:05	19	176,8	01:05	27	252,1	02:05	36	336,8	03:05	45	410,9
00:10	19	175,2	01:10	28	259,5	02:10	37	340,9	03:10	45	419,3
00:15	20	181,8	01:15	29	264,9	02:15	38	350,3	03:15	46	425,6
00:20	21	189,9	01:20	29	274,6	02:20	38	363,8	03:20	47	427,9
00:25	21	200,8	01:25	30	277,9	02:25	39	368,4	03:25	48	436,1

Time	°C	mA									
00:30	22	202,8	01:30	31	287,9	02:30	40	368,5	03:30	48	437,4
00:35	23	207,6	01:35	32	294,0	02:35	41	378,9	03:35	49	447,7
00:40	23	217,5	01:40	32	300,7	02:40	41	387,5	03:40	50	460,5
00:45	24	223,9	01:45	33	307,6	02:45	42	393,2	03:45	50	466,4
00:50	25	231,4	01:50	34	316,2	02:50	43	393,4	03:50	51	474,6
00:55	26	236,0	01:55	35	322,0	02:55	43	400,5			

M10-B

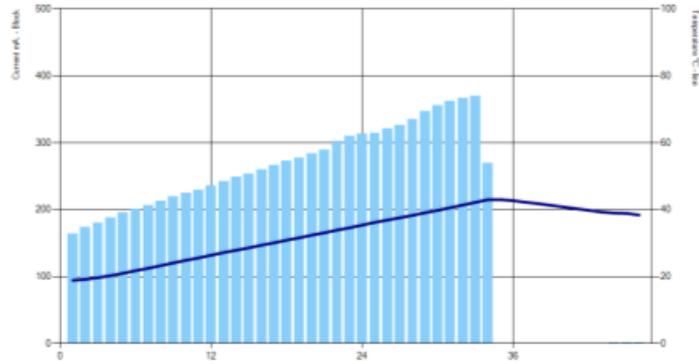


Test-company
Testing street 45
CompanyCity
Some Country



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 2418,65 coulomb
 Penetrability class: N.A.
 Instrument number: 090603
 Channel number: 2
 Report saved: lunes, 07 de septiembre de 2020 04:54 p.m.
 Testing by:
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: STOP
 System ID: 10320
 Test ID:



Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:00	19	163,3	01:00	27	242,0	02:00	36	314,7	03:00	42	0,0
00:05	19	173,2	01:05	28	248,4	02:05	37	320,8	03:05	42	0,0
00:10	20	180,5	01:10	29	252,9	02:10	38	326,4	03:10	41	0,0
00:15	20	187,9	01:15	29	260,1	02:15	38	334,5	03:15	41	0,0
00:20	21	195,0	01:20	30	266,4	02:20	39	347,4	03:20	40	0,0
00:25	22	201,2	01:25	31	272,4	02:25	40	355,3	03:25	40	0,0

Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:30	23	206,6	01:30	32	276,9	02:30	41	362,0	03:30	39	0,0
00:35	23	213,0	01:35	32	283,2	02:35	41	366,4	03:35	39	0,1
00:40	24	219,4	01:40	33	288,9	02:40	42	369,6	03:40	39	0,1
00:45	25	224,4	01:45	34	302,5	02:45	43	269,0	03:45	38	0,1
00:50	26	229,4	01:50	35	309,6	02:50	43	0,0			
00:55	26	235,7	01:55	35	313,5	02:55	43	0,0			

M11-A

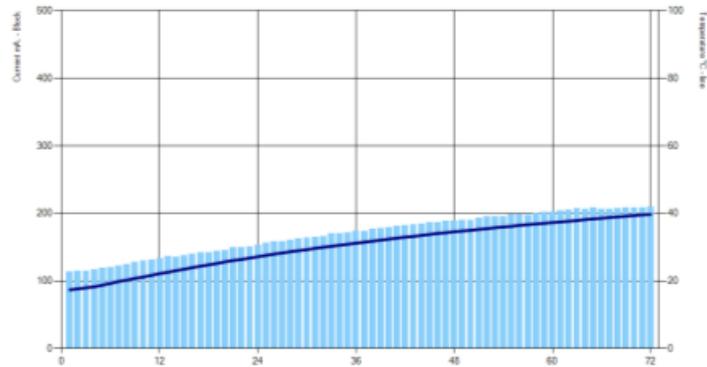


Test-company
Testing street 45
CompagnyCity
Some Country



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 3240,17 coulomb
 Penetrability class: Moderate
 Instrument number: 090603
 Channel number: 1
 Report saved: martes, 08 de septiembre de 2020 06:03 p.m.
 Testing by:
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _FIN
 System ID: 10324
 Test ID: M10-2



Time	°C	mA									
00:00	17	114,0	01:30	25	144,4	03:00	32	174,0	04:30	36	199,0
00:05	18	114,8	01:35	26	145,8	03:05	32	176,8	04:35	37	199,2
00:10	18	115,2	01:40	26	149,5	03:10	32	178,3	04:40	37	198,0
00:15	18	116,4	01:45	26	149,6	03:15	32	178,8	04:45	37	200,4
00:20	19	119,1	01:50	27	151,2	03:20	33	181,0	04:50	37	202,1
00:25	19	120,7	01:55	27	152,9	03:25	33	182,1	04:55	37	202,3

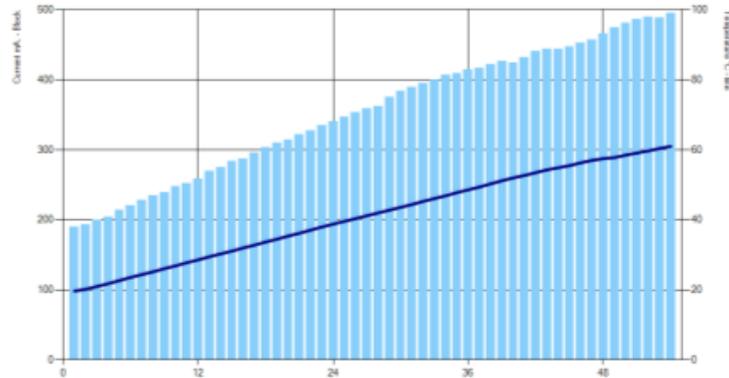
Time	°C	mA									
00:30	20	122,6	02:00	28	155,9	03:30	33	183,6	05:00	38	203,7
00:35	20	124,9	02:05	28	158,2	03:35	34	184,0	05:05	38	205,3
00:40	21	127,5	02:10	28	158,1	03:40	34	186,2	05:10	38	207,1
00:45	21	129,8	02:15	29	160,3	03:45	34	187,0	05:15	38	206,2
00:50	22	130,7	02:20	29	162,6	03:50	34	188,7	05:20	38	208,4
00:55	22	133,1	02:25	29	164,0	03:55	35	188,7	05:25	39	206,7
01:00	23	136,3	02:30	30	164,4	04:00	35	189,5	05:30	39	206,5
01:05	23	135,5	02:35	30	166,1	04:05	35	189,7	05:35	39	207,9
01:10	24	137,7	02:40	30	170,2	04:10	35	193,0	05:40	39	208,6
01:15	24	139,4	02:45	31	170,1	04:15	36	195,8	05:45	39	208,9
01:20	24	142,3	02:50	31	171,8	04:20	36	195,1	05:50	40	208,9
01:25	25	142,5	02:55	31	173,4	04:25	36	195,9	05:55	40	209,7

M11-B



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 5075,22 coulomb
 Penetrability class: N.A.
 Instrument number: 090603
 Channel number: 4
 Report saved: Lunes, 07 de septiembre de 2020 05:30 p.m.
 Testing by: jeniffer sánchez
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _OVF
 System ID: 10321
 Test ID: M10



Time	°C	mA									
00:00	20	190,4	01:10	31	283,2	02:20	43	374,9	03:30	54	443,7
00:05	20	193,2	01:15	32	287,2	02:25	44	384,0	03:35	55	443,9
00:10	21	199,7	01:20	33	296,1	02:30	44	389,6	03:40	56	446,8
00:15	22	203,6	01:25	34	303,7	02:35	45	394,7	03:45	56	452,3
00:20	23	213,7	01:30	35	309,3	02:40	46	400,6	03:50	57	456,6
00:25	24	220,0	01:35	35	314,1	02:45	47	407,3	03:55	58	465,4

Time	°C	mA									
00:30	24	227,8	01:40	36	321,6	02:50	48	409,0	04:00	58	474,7
00:35	25	234,3	01:45	37	327,3	02:55	49	414,4	04:05	59	480,7
00:40	26	238,8	01:50	38	334,6	03:00	49	416,7	04:10	59	485,9
00:45	27	247,2	01:55	39	339,9	03:05	50	422,2	04:15	60	489,8
00:50	28	251,8	02:00	40	347,1	03:10	51	425,9	04:20	60	488,9
00:55	29	258,5	02:05	40	353,3	03:15	52	424,7	04:25	61	494,8
01:00	30	269,9	02:10	41	358,6	03:20	53	431,9			
01:05	30	274,9	02:15	42	361,9	03:25	54	440,7			

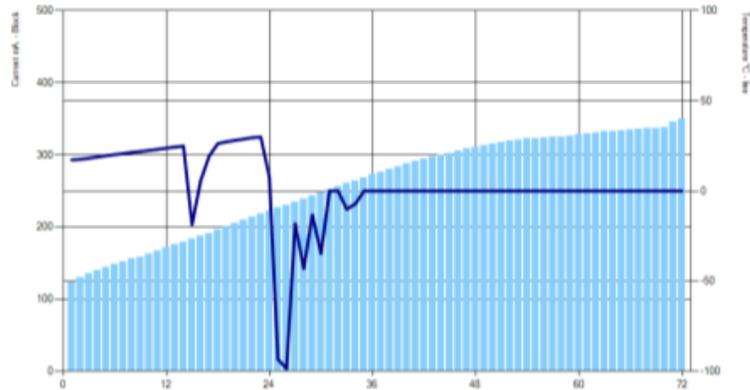
M12-A



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 5038,16 coulomb
 Penetrability class: High
 Instrument number: 090603
 Channel number: 5
 Report saved: jueves, 26 de noviembre de 2020 07:27 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 100 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: FIN
 System ID: 10337
 Test ID: M15 PROBETA 1

Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:30	21	152,2	02:00	-93	226,5	03:30	0	297,5	05:00	0	329,7
00:35	21	156,0	02:05	-99	230,8	03:35	0	300,1	05:05	0	330,7
00:40	22	158,8	02:10	-18	235,1	03:40	0	302,7	05:10	0	332,5
00:45	23	163,0	02:15	-43	239,4	03:45	0	305,5	05:15	0	332,9
00:50	23	166,9	02:20	-13	243,7	03:50	0	308,2	05:20	0	334,2
00:55	24	171,0	02:25	-35	248,0	03:55	0	311,0	05:25	0	334,8
01:00	24	175,4	02:30	0	252,2	04:00	0	313,3	05:30	0	335,9
01:05	25	179,0	02:35	0	256,3	04:05	0	315,5	05:35	0	336,7
01:10	-19	183,2	02:40	-10	260,6	04:10	0	317,6	05:40	0	337,3
01:15	6	187,3	02:45	-7	264,6	04:15	0	320,0	05:45	0	337,8
01:20	20	191,3	02:50	0	268,8	04:20	0	320,9	05:50	0	346,2
01:25	26	196,1	02:55	0	272,7	04:25	0	322,6	05:55	0	350,6



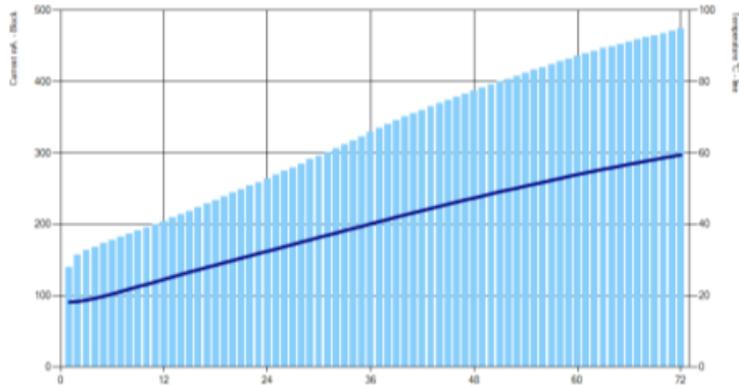
Time	°C	mA									
00:00	17	123,6	01:30	27	200,4	03:00	0	276,5	04:30	0	322,9
00:05	18	130,4	01:35	28	204,8	03:05	0	280,5	04:35	0	323,7
00:10	18	135,4	01:40	29	209,1	03:10	0	284,0	04:40	0	324,7
00:15	19	140,0	01:45	30	213,5	03:15	0	287,5	04:45	0	325,5
00:20	20	144,3	01:50	30	217,8	03:20	0	291,1	04:50	0	326,7
00:25	20	148,3	01:55	8	222,2	03:25	0	294,4	04:55	0	328,0

M12-B



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 6201.48 coulomb
 Penetrability class: High
 Instrument number: 090605
 Channel number: 6
 Report saved: jueves, 26 de noviembre de 2020 07:27 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _FIN
 System ID: 10338
 Test ID: M15-PROBETA 2



Time	°C	mA									
00:30	21	182,0	02:00	33	269,5	03:30	45	365,4	05:00	55	439,2
00:35	22	186,4	02:05	34	274,5	03:35	45	370,0	05:05	55	443,2
00:40	23	190,8	02:10	34	279,7	03:40	46	374,3	05:10	56	446,7
00:45	23	195,3	02:15	35	285,1	03:45	46	378,6	05:15	56	449,8
00:50	24	200,0	02:20	36	291,0	03:50	47	383,1	05:20	56	452,9
00:55	25	204,6	02:25	36	296,0	03:55	47	387,5	05:25	57	456,0
01:00	25	209,2	02:30	37	301,4	04:00	48	391,6	05:30	57	459,0
01:05	26	214,0	02:35	38	307,0	04:05	49	395,8	05:35	58	462,1
01:10	27	218,8	02:40	38	312,4	04:10	49	400,0	05:40	58	465,0
01:15	27	223,7	02:45	39	317,9	04:15	50	404,0	05:45	59	468,0
01:20	28	228,7	02:50	40	323,3	04:20	50	408,2	05:50	59	471,0
01:25	29	233,6	02:55	40	328,9	04:25	51	412,1	05:55	60	474,2

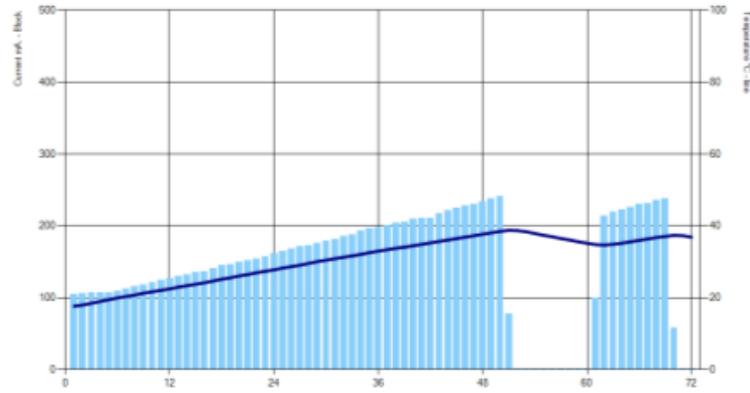
Time	°C	mA									
00:00	18	140,0	01:30	29	238,7	03:00	41	334,4	04:30	51	416,2
00:05	18	157,7	01:35	30	243,9	03:05	41	339,8	04:35	52	420,2
00:10	19	163,6	01:40	31	248,7	03:10	42	345,3	04:40	52	424,4
00:15	19	168,7	01:45	31	253,9	03:15	43	350,7	04:45	53	428,5
00:20	20	173,2	01:50	32	259,0	03:20	43	355,7	04:50	54	432,2
00:25	21	177,6	01:55	33	264,4	03:25	44	360,5	04:55	54	435,9

M13-A



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 2817,68 coulomb
 Penetrability class: Moderate
 Instrument number: 090603
 Channel number: 5
 Report saved: miércoles, 09 de septiembre de 2020 06:04 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 100 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: FIN
 System ID: 10330
 Test ID: M11-2



Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:00	18	105,5	01:30	26	146,5	03:00	33	200,9	04:30	37	0,3
00:05	18	106,1	01:35	26	149,1	03:05	34	203,6	04:35	37	0,2
00:10	19	107,1	01:40	27	151,8	03:10	34	205,3	04:40	37	0,3
00:15	19	107,4	01:45	27	153,8	03:15	35	209,6	04:45	36	0,3
00:20	20	107,2	01:50	27	157,8	03:20	35	210,3	04:50	36	0,3
00:25	20	109,2	01:55	28	161,6	03:25	35	210,7	04:55	35	0,3

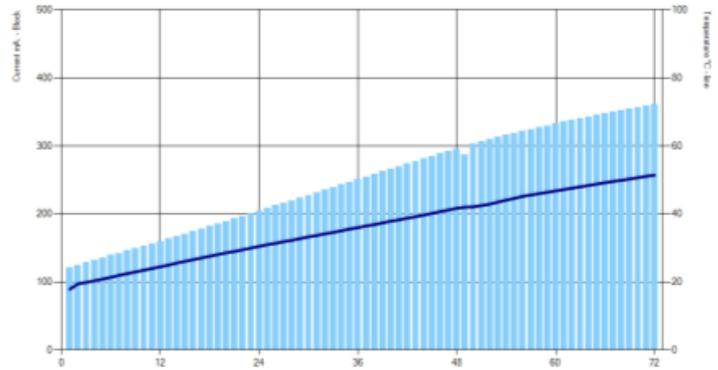
Time	°C	mA									
00:30	20	112,5	02:00	28	165,1	03:30	36	217,0	05:00	35	100,0
00:35	21	116,0	02:05	29	167,8	03:35	36	222,0	05:05	35	214,1
00:40	21	118,2	02:10	29	171,3	03:40	37	225,0	05:10	35	219,2
00:45	22	121,1	02:15	30	173,0	03:45	37	227,6	05:15	35	223,0
00:50	22	124,6	02:20	30	176,2	03:50	37	229,9	05:20	36	226,4
00:55	23	127,1	02:25	31	179,0	03:55	38	233,8	05:25	36	230,2
01:00	23	130,3	02:30	31	181,6	04:00	38	237,3	05:30	36	231,6
01:05	23	132,4	02:35	31	185,7	04:05	39	240,7	05:35	37	235,6
01:10	24	135,0	02:40	32	187,4	04:10	39	77,7	05:40	37	237,4
01:15	24	137,1	02:45	32	193,2	04:15	39	0,4	05:45	37	57,7
01:20	25	140,9	02:50	33	196,1	04:20	38	0,3	05:50	37	0,2
01:25	25	145,3	02:55	33	197,4	04:25	38	0,3	05:55	37	0,1

M13-B



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 4854,64 coulomb
 Penetrability class: High
 Instrument number: 090603
 Channel number: 5
 Report saved: martes, 08 de septiembre de 2020 06:04 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 100 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: FIN
 System ID: 10325
 Test ID: M11-1



Time	°C	mA									
00:00	18	121,6	01:30	28	185,6	03:00	37	254,6	04:30	45	318,6
00:05	20	124,4	01:35	29	189,3	03:05	37	258,7	04:35	45	321,8
00:10	20	128,6	01:40	29	193,0	03:10	37	262,6	04:40	46	324,5
00:15	20	132,0	01:45	30	196,8	03:15	38	266,3	04:45	46	327,7
00:20	21	135,7	01:50	30	200,7	03:20	38	269,9	04:50	46	329,9
00:25	21	139,3	01:55	31	204,2	03:25	39	273,8	04:55	47	332,8

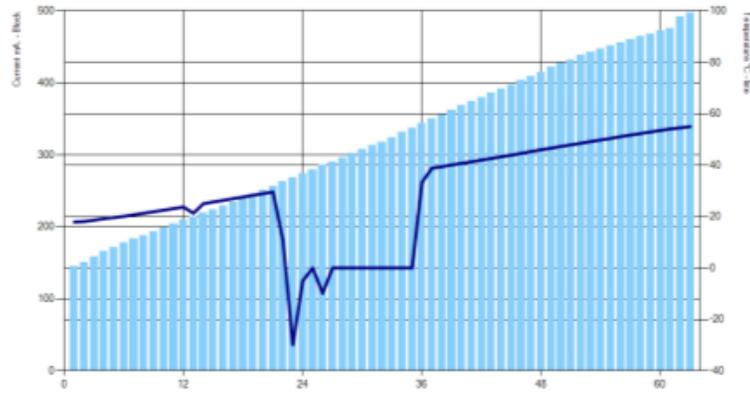
Time	°C	mA									
00:30	22	142,5	02:00	31	208,2	03:30	39	277,4	05:00	47	335,7
00:35	23	145,9	02:05	31	212,4	03:35	40	281,2	05:05	48	338,1
00:40	23	149,3	02:10	32	216,1	03:40	40	284,9	05:10	48	340,1
00:45	24	152,8	02:15	32	219,8	03:45	41	288,8	05:15	48	343,0
00:50	24	156,3	02:20	33	223,8	03:50	41	292,3	05:20	49	346,0
00:55	25	159,8	02:25	33	227,5	03:55	42	295,6	05:25	49	348,0
01:00	25	163,3	02:30	34	231,3	04:00	42	286,8	05:30	50	350,3
01:05	26	167,1	02:35	34	235,6	04:05	42	302,8	05:35	50	352,8
01:10	26	170,7	02:40	35	239,2	04:10	43	306,4	05:40	50	355,0
01:15	27	174,4	02:45	35	242,9	04:15	43	309,8	05:45	51	357,1
01:20	27	178,2	02:50	36	246,8	04:20	44	312,9	05:50	51	359,2
01:25	28	181,8	02:55	36	250,8	04:25	44	316,0	05:55	51	361,1

M14-A



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 5370,78 coulomb
 Penetrability class: N.A.
 Instrument number: 090603
 Channel number: 1
 Report saved: jueves, 10 de septiembre de 2020 05:01 p.m.
 Testing by: jeniffer sanchez
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _OVF
 System ID: 10331
 Test ID: m12-1



Time	°C	mA									
00:00	18	145,3	01:20	27	234,4	02:40	0	324,5	04:00	47	422,1
00:05	18	150,7	01:25	28	239,6	02:45	0	331,2	04:05	47	427,6
00:10	19	158,4	01:30	28	245,7	02:50	0	337,3	04:10	48	432,4
00:15	19	165,6	01:35	29	251,3	02:55	33	343,6	04:15	49	438,0
00:20	20	171,8	01:40	30	256,8	03:00	39	350,1	04:20	49	442,9
00:25	20	177,5	01:45	11	262,5	03:05	39	356,1	04:25	50	447,3

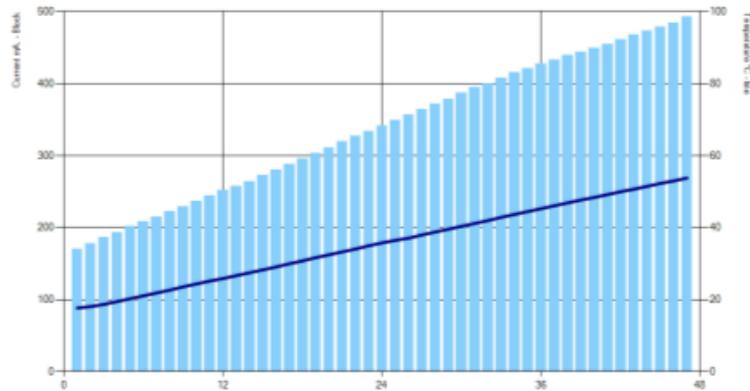
Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:30	21	183,0	01:50	-30	268,2	03:10	40	361,9	04:30	50	451,5
00:35	21	188,2	01:55	-5	273,9	03:15	41	368,3	04:35	51	455,9
00:40	22	193,6	02:00	0	279,5	03:20	41	374,6	04:40	52	460,2
00:45	23	198,6	02:05	-10	285,4	03:25	42	380,1	04:45	52	464,3
00:50	23	204,1	02:10	0	290,6	03:30	43	386,3	04:50	53	468,2
00:55	24	209,2	02:15	0	296,2	03:35	43	391,6	04:55	54	472,2
01:00	21	213,8	02:20	0	302,0	03:40	44	397,3	05:00	54	475,4
01:05	25	219,2	02:25	0	307,8	03:45	45	403,6	05:05	55	491,8
01:10	26	224,2	02:30	0	313,3	03:50	45	409,3	05:10	55	497,2
01:15	26	229,1	02:35	0	318,0	03:55	46	414,7			

M14-B



Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 4217,41 coulomb
 Penetrability class: N.A.
 Instrument number: 090603
 Channel number: 6
 Report saved: miércoles, 09 de septiembre de 2020 04:02 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _OVF
 System ID: 10328
 Test ID: M12-2



Time	°C	mA									
00:00	18	170,2	01:00	27	257,6	02:00	37	349,3	03:00	46	433,4
00:05	18	178,3	01:05	28	264,1	02:05	37	356,9	03:05	47	439,1
00:10	19	186,2	01:10	28	272,9	02:10	38	364,4	03:10	48	444,2
00:15	20	193,7	01:15	29	280,7	02:15	39	371,9	03:15	48	449,4
00:20	20	201,4	01:20	30	288,0	02:20	40	378,7	03:20	49	455,1
00:25	21	208,5	01:25	31	295,7	02:25	40	386,7	03:25	50	460,9

Time	°C	mA									
00:30	22	215,5	01:30	32	303,5	02:30	41	394,4	03:30	51	467,9
00:35	23	222,7	01:35	33	311,4	02:35	42	400,5	03:35	52	473,7
00:40	24	229,7	01:40	33	319,4	02:40	43	407,8	03:40	52	479,2
00:45	24	237,1	01:45	34	326,9	02:45	44	415,2	03:45	53	484,3
00:50	25	244,7	01:50	35	333,9	02:50	45	421,3	03:50	54	493,0
00:55	26	251,7	01:55	36	341,1	02:55	45	427,7			

M15-A

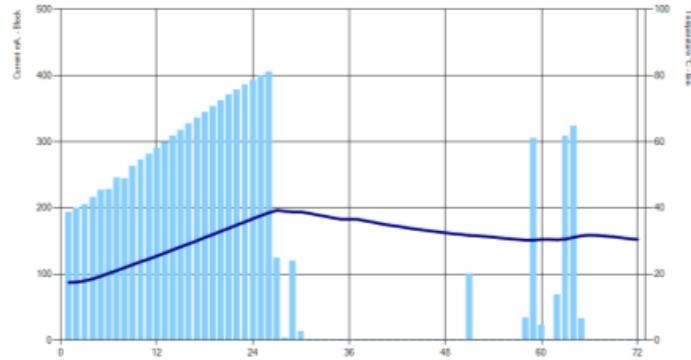


Test-compagny
Testing street 45
Compagny City
Some Country



Test report

Voltage used: 60 V.
Testing time: 6:00 hour
Charge passed (adjusted): 2476,34 coulomb
Penetrability class: Moderate
Instrument number: 090603
Channel number: 4
Report saved: jueves, 10 de septiembre de 2020 05:46 p.m.
Testing by: JENIFFER SANCHEZ
Reference:
Sample diameter: 101 mm.
Sample length: 50 mm.
Instrument status: FIN
System ID: 10332
Test ID: M13-1



Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA	Time	°C	mA
00:00	18	192,9	01:30	32	353,9	03:00	37	0,9	04:30	31	0,6
00:05	18	199,9	01:35	33	361,7	03:05	36	0,9	04:35	31	0,6
00:10	18	204,7	01:40	34	370,4	03:10	36	0,9	04:40	31	0,5
00:15	19	216,4	01:45	35	378,0	03:15	35	0,9	04:45	30	33,6
00:20	19	227,0	01:50	36	386,6	03:20	35	0,9	04:50	30	105,3
00:25	20	227,9	01:55	37	392,7	03:25	35	0,8	04:55	31	23,5

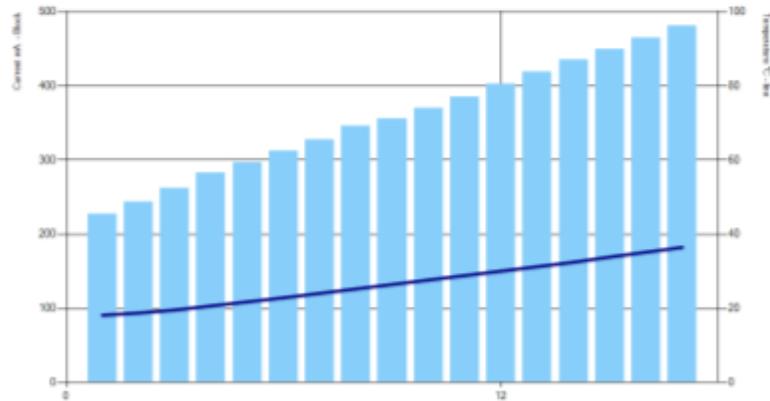
Time	°C	mA									
00:30	21	245,1	02:00	38	400,1	03:30	34	0,8	05:00	31	0,4
00:35	22	244,3	02:05	39	406,0	03:35	34	0,9	05:05	30	68,8
00:40	23	263,0	02:10	39	124,4	03:40	33	0,9	05:10	31	309,1
00:45	24	272,3	02:15	39	3,2	03:45	33	0,8	05:15	31	323,8
00:50	25	281,5	02:20	39	120,7	03:50	33	0,5	05:20	32	32,6
00:55	26	290,3	02:25	39	13,9	03:55	33	0,5	05:25	32	0,2
01:00	26	299,3	02:30	38	1,1	04:00	32	0,5	05:30	32	0,2
01:05	27	308,5	02:35	38	1,5	04:05	32	0,5	05:35	32	0,3
01:10	28	317,0	02:40	38	1,4	04:10	32	100,8	05:40	31	0,3
01:15	29	326,8	02:45	37	1,3	04:15	32	0,5	05:45	31	0,3
01:20	30	335,5	02:50	37	1,2	04:20	31	0,5	05:50	31	0,3
01:25	31	344,5	02:55	37	0,8	04:25	31	0,6	05:55	31	0,4

M15-B



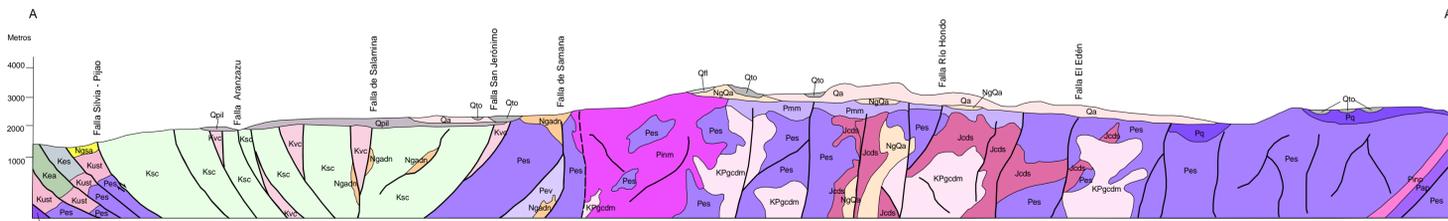
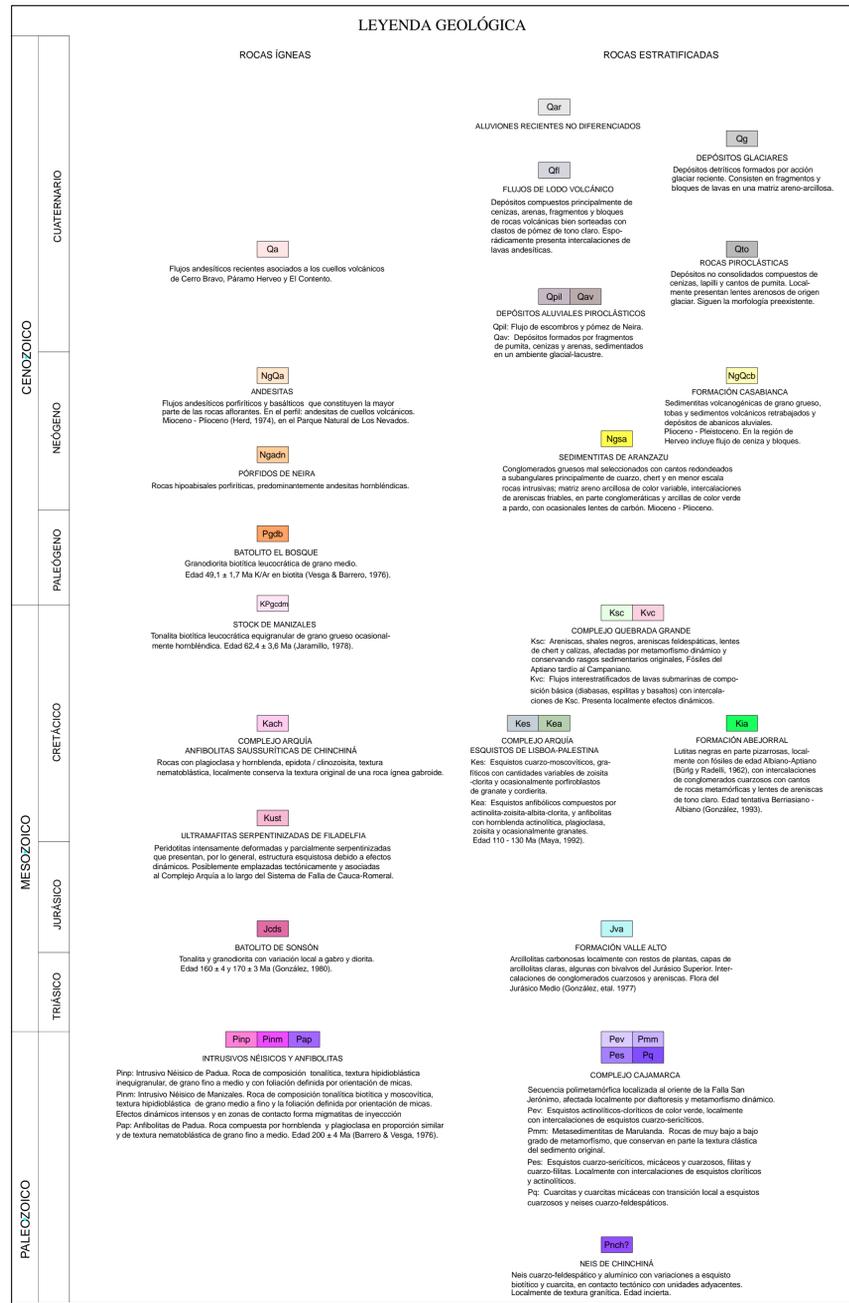
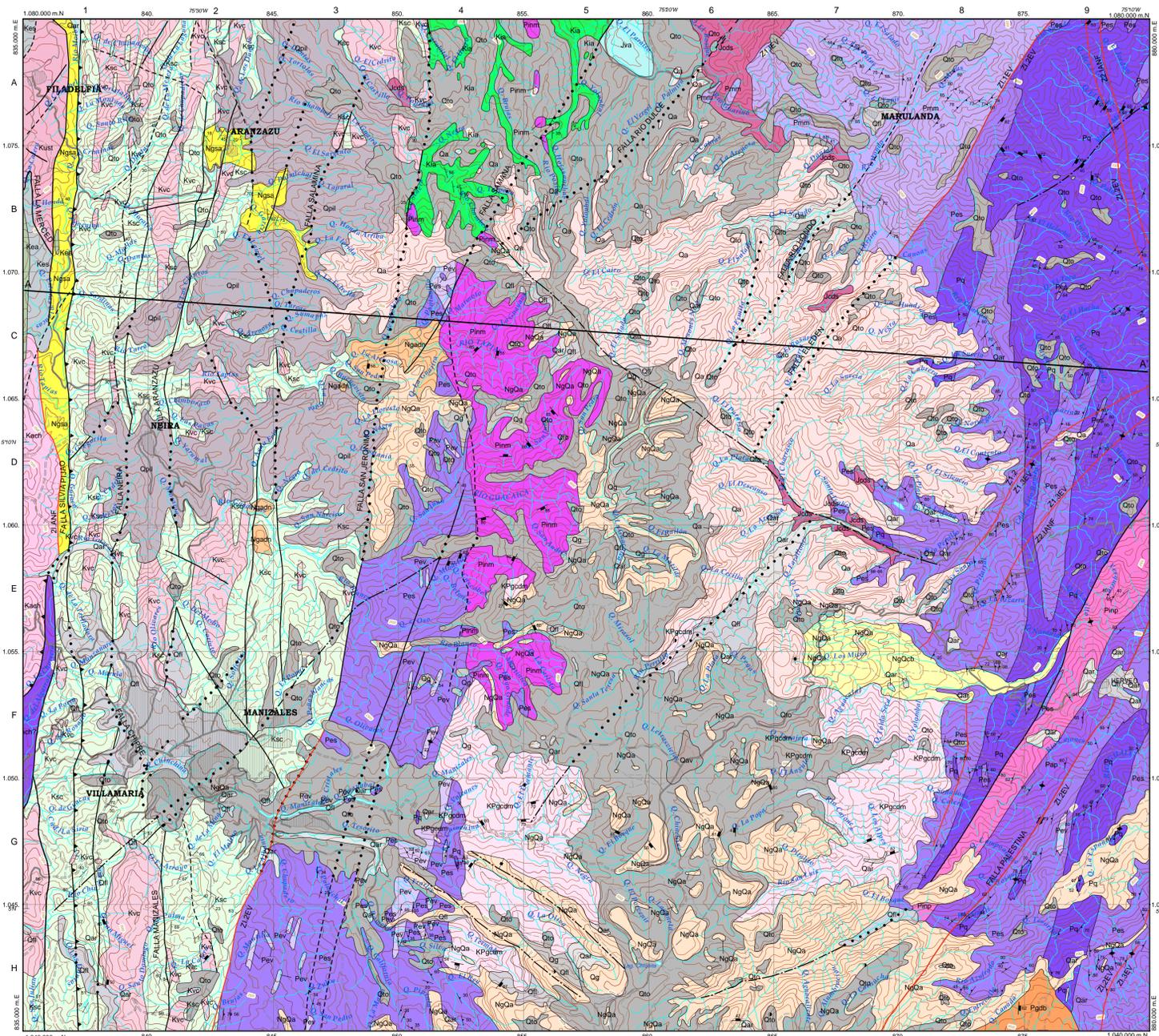
Test report

Voltage used: 60 V.
 Testing time: 6:00 hour
 Charge passed (adjusted): 1607,99 coulomb
 Penetrability class: N.A.
 Instrument number: 090603
 Channel number: 1
 Report saved: miércoles, 09 de septiembre de 2020 01:33 p.m.
 Testing by: JENIFFER SANCHEZ
 Reference:
 Sample diameter: 101 mm.
 Sample length: 50 mm.
 Instrument status: _OVP
 System ID: 10327
 Test ID: M15-2



Time	°C	mA									
00:00	18	227,2	00:25	23	312,1	00:50	29	385,2	01:15	35	464,8
00:05	19	243,2	00:30	24	327,5	00:55	30	402,3	01:20	36	481,1
00:10	20	261,9	00:35	25	345,6	01:00	31	418,4			
00:15	21	282,8	00:40	26	355,6	01:05	32	435,2			
00:20	22	297,2	00:45	28	369,6	01:10	34	448,8			

Anexo I. Información Geológica



MINERALES ÍNDICES DE FACIES Y ZONAS DE METAMORFISMO REGIONAL

Mineral	F. ESQUISTO VERDE			F. ANFIBOLITA		
	Z 1.1	Z 1.2	Z 1.3	Z 2.1	Z 2.2	Z 2.3
Clorita						
Biotta						
Granate						
Andalucita						
Sillimanita-Biotita						
Sillimanita-Primitas						
Cordierita						
Plagioclasa_Anc-20						
Plagioclasa_Anc-20						
Estaurolita						
Sericita						
Moscovita						

Ministerio de Minas y Energía
Servicio Geológico Colombiano
República de Colombia

Geología de la Plancha 206 Manizales

Por: Darío Mosquera, Pedro Marín, Carlos Vesga y Humberto González.
Actualización tectonostratigráfica: Humberto González, Mario Maya S.

© 1998 - INGEOMINAS

Transformada a Datum MAGNA SIRGAS 2013

Escala 1: 100.000

Base cartográfica tomada de las planchas a escala 1:100.000 del IGAC - 2008
DATUM MAGNA SIRGAS
ORIGEN EN LA ZONA BOGOTÁ
Coordenadas Geográficas: N = 5°35'46.3215" N, W = 74°14'39.0285" W
Coordenadas Planas: N = 11000.000, E = 11000.000

CONTACTOS Y FALLAS

- Contacto definido
- - - Contacto fallado
- Falda definida
- - - Falda inferida
- Falda cubierta
- ↔ Falda inversa o de cabalgamiento
- ↔ Falda de rumbo dextral
- ↔ Falda de rumbo dextral inferida
- - - Lineamiento Foto geológico

DATOS MEDIDOS

EN ROCAS SEDIMENTARIAS	DIACLASAS
15 — Capa inclinada	15 — Diaclasa inclinada
	15 — Diaclasa vertical

EN ROCAS METAMÓRFICAS

15 — Foliación inclinada
15 — Foliación vertical

RASGOS GEOMORFOLÓGICOS, RECURSOS NATURALES Y OTROS

- Isógrada
- Punto de muestreo para datación radiométrica

BASE CARTOGRÁFICA

- ▨ Área construida
- Curva de nivel
- Drenaje sencillo, canal
- Carretera sin pavimentar
- Sendero

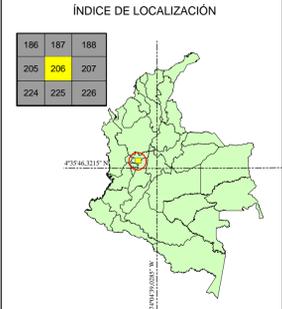
MINAS Y MANIFESTACIONES MINERALES

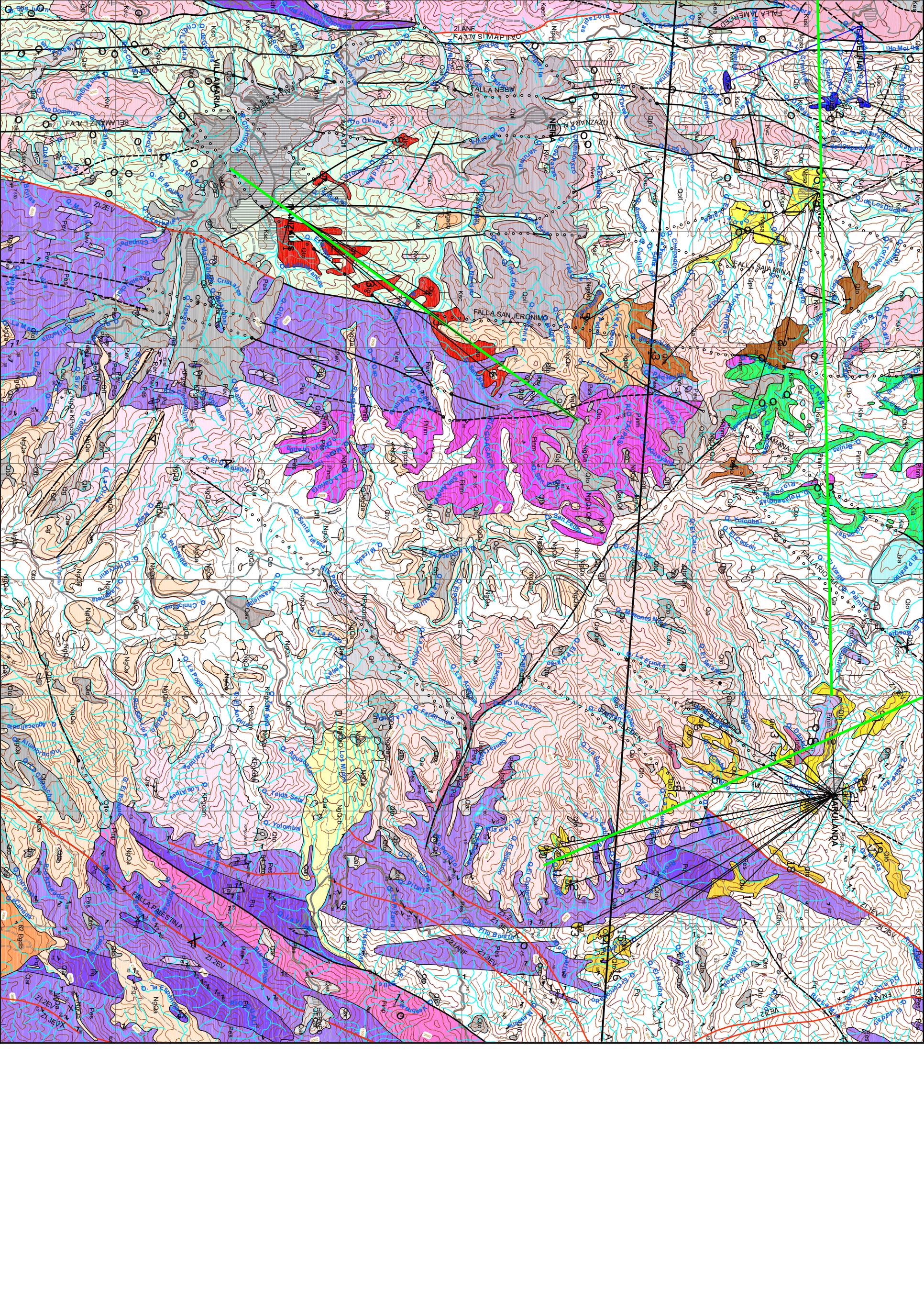
- ✱ Mina activa

ÍNDICE DE PARTICIPACIÓN

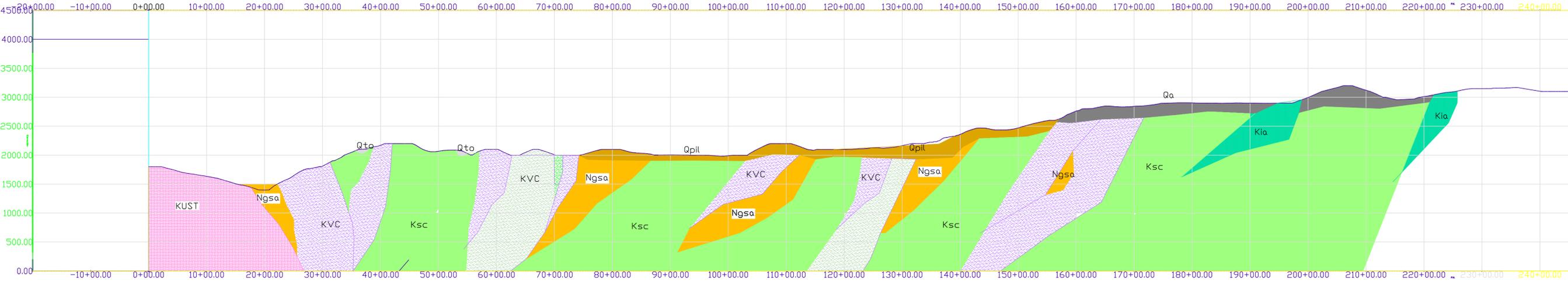
1, 13, 17	5, 9, 10	5, 9, 10, 11
19, 20	13, 16, 20	13, 16, 20
1, 2, 8, 13	6, 11, 12	5, 9, 10
14, 17, 19	18, 20	11, 13, 20
2, 7, 11	6, 11, 12	5, 9, 10
13, 15	18, 20	13, 20
11, 12, 13	4, 11, 12	3, 4, 11
20		12, 13

- Alfredo Andrade
- Jairo Álvarez
- Gabriel Beltráczar
- José María Buenaventura
- Carlos Buitrago
- Humberto Cáceres
- Jorge Checa
- Jaime Durán
- José H. López
- Hernando Lozano
- Pedro Marín
- Jaime Martínez
- Darío Mosquera
- Francisco Mosquera
- Jorge Muñoz
- Humberto Pérez
- Oscar Pulido
- Jorge Valderrama
- Carlos J. Vesga
- Humberto González

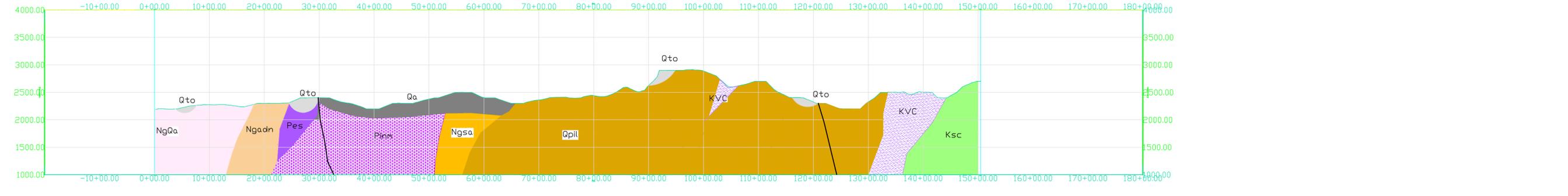




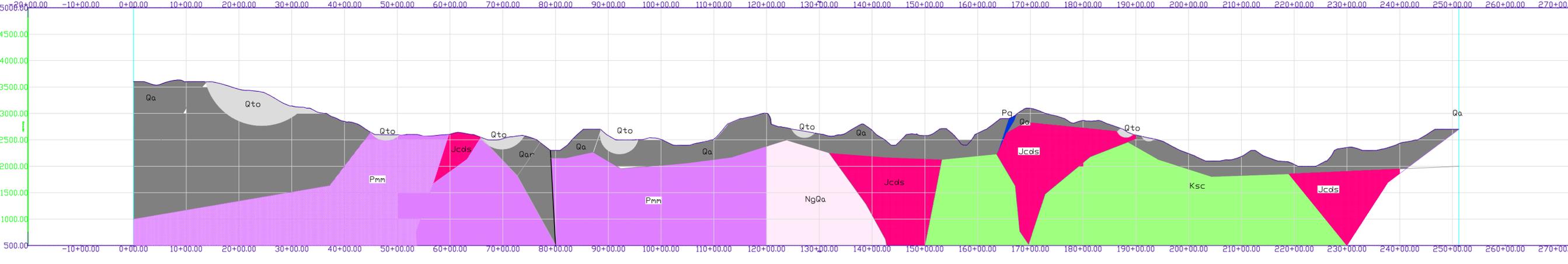
FILADELFIA



ARANAZU



MARULANDA



MANIZALES

