

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE
LA PUZOLANA DE LA LOCALIDAD DE
TACNA PARA DETERMINAR SU
PODER CEMENTANTE**

TESIS

Presentada por:

Bach. Edith Eva Cruz Pérez

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2 018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE
LA PUZOLANA DE LA LOCALIDAD DE
TACNA PARA DETERMINAR SU
PODER CEMENTANTE**


TESIS

Tesis sustentada el día 21 de junio de dos mil dieciocho, siendo el Jurado Calificador integrado por:


PRESIDENTE


.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO


.....
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

VOCAL


.....
MSc. Matías Carlos Vivar Colquicocha

ASESOR


.....
Ing. Julián Nieto Quispe

DEDICATORIA

Dedicado en primer lugar a Dios por guiarme y conducirme hacia el camino del éxito.

Dedicado a mis padres: Pedro Cruz Galindo y Natividad Pérez Chura, son mi razón de superación y a quienes agradeceré toda mi vida por el ejemplo de lucha y valentía y por estar conmigo en todo momento, por darme su apoyo incondicional durante mi formación universitaria.

Dedicado a mis hermanas: Zaida Edith y Lizeth Yámely, siempre las tendré presente, por el apoyo y la confianza que me brindan en todo momento.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por guiarme y acompañarme en todo momento, por darme salud, bienestar, por ser mi guía.

Me gustaría expresar mi gran agradecimiento a los ingenieros geólogos Ing. Rubén Cahuana, Ing. Jonathan Zavaleta y a mi asesor Ing. Julián Nieto Quispe por su supervisión minuciosa, orientación y sugerencias continuas a lo largo de esta investigación y preparación de esta tesis.

Muy agradecida con la UNJBG en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, a mis docentes, por su contribución en mi formación profesional, por permitirme realizar las pruebas de la tesis en los laboratorios metalúrgicos.

Agradezco a la Sra. Alicia Quiñones Villagra por los consejos y la muestra de afecto, apoyo y gestión.

Doy las gracias a mis padres y hermanas por su infinita paciencia, estímulo, apoyo y ayuda de toda la vida, durante mi formación universitaria gracias a ellos es este triunfo y para ello es mi agradecimiento.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción del problema	2
1.1.1. Antecedentes del problema	2
1.1.2. Problemática de la investigación	3
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Justificación e importancia	4
1.3.1. Justificación	4
1.3.2. Importancia	4
1.4. Delimitaciones de la investigación	5
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Hipótesis	6
1.6.1. Hipótesis general	6
1.6.2. Hipótesis específica	6
1.7. Variables	6

1.7.1. Identificación de variables	6
1.7.2. Definición y operacionalización de variables	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes del estudio	8
2.2. Marco teórico	10
2.2.1. Puzolana definición, clasificación y usos	10
2.2.1.1. Definición	10
2.2.1.2. Clasificación de las puzolanas	11
2.2.1.3. Usos de las puzolanas	15
2.2.2. Índice de actividad puzolánica	18
2.2.3. Reacciones químicas	20
2.2.3.1. Portland puzolánico	20
2.2.3.2. Reactividad puzolánica	23
2.2.4. Caracterización de las puzolanas	25
2.2.4.1. % de humedad	25
2.2.4.2. Densidades	25
2.2.4.3. Molienda	27
2.2.4.4. Análisis granulométrico	27
2.2.4.5. Pérdida por calcinación	28
2.2.5. Ensayo de resistencia a la compresión	29
2.2.5.1. Fraguado y endurecimiento del concreto	29

2.2.5.2. Resistencia a la compresión	29
2.2.6. Cemento	31
2.2.6.1. Definición	31
2.2.6.2. Cemento Portland	31
2.2.6.3. Componentes del cemento Portland	31
2.3. Definición de términos	32
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	
3.1. Tipo y diseño de la investigación	36
3.1.1. Tipo y nivel de investigación	36
3.1.2. Diseño de la investigación	36
3.2. Procedencia y diseño de la muestra	37
3.2.1. Procedencia ubicación y accesibilidad	37
3.2.2. Diseño experimental	38
3.3. Operacionalización de variables	40
3.4. Procedimientos del muestreo y caracterización de la puzolana natural	40
3.4.1. Procedimiento para la caracterización física	42
3.4.1.1. Determinación del % de humedad	42
3.4.1.2. Determinación de las densidades	43
3.4.1.3. Procedimiento para la molienda	45
3.4.1.4. Análisis granulométrico(ANGRA)	48

3.4.1.5. Pérdida por calcinación	49
3.4.2. Procedimiento para la caracterización química	50
3.4.3. Procedimiento para la preparación de muestra	53
3.4.3.1. Dimensionamiento del mortero a nivel laboratorio	53
3.4.3.2. Cálculo de la cantidad de cemento, agregado agua y puzolana	55
3.4.4. Procedimiento para el diseño de mezcla	57
3.4.5. Procedimiento para el ensayo a la compresión	64
3.4.5.1. Procedimiento de la prueba de compresión a la edad de 7 días	65
3.4.5.2. Procedimiento de la prueba de compresión a la edad de 14 días	67
3.4.5.3. Procedimiento de la prueba de compresión a la edad de 28 días	68
3.5. Procesamiento y análisis de datos	70
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS	
4.1. Resultados	71
4.1.1. Resultados de la caracterización física	71
4.1.1.1. Resultados de la determinación del % de humedad	71
4.1.1.2. Resultados de la densidad aparente y real	72
4.1.1.3. Resultados del análisis granulométrico(ANGRA)	72
4.1.1.4. Resultados de la pérdida por calcinación	76
4.1.2. Resultados de la caracterización química	76

4.1.3. Resultados de las pruebas de compresión a la edad de 7 días	83
4.1.4. Resultados de las pruebas de compresión a la edad de 14 días	84
4.1.5. Resultados de las pruebas de compresión a la edad de 28 días	85
4.1.6. Resultados del poder cementante y/o índice de actividad puzolánica con portland	86
4.1.7. Resultados y comparación de resistencia a la compresión mediante gráficos	88
4.2. Análisis de resultados	95
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos químicos de las puzolanas	15
Tabla 2. Composición química de materiales cementosos	24
Tabla 3. Coordenadas de las muestras recolectadas	38
Tabla 4. Operacionalización de variables en la investigación	40
Tabla 5. Distribución del collar de bolas del molino de la ESME	46
Tabla 6. Proporción de las cantidades para la edad de los 28 días	57
Tabla 7. Resultados del % de humedad	71
Tabla 8. Resultados de la densidad aparente y real	72
Tabla 9. Resultados del ANGRA de la puzolana natural M1	73
Tabla 10. Resultados del ANGRA de la puzolana natural M2	73
Tabla 11. Resultados del ANGRA de la puzolana natural M3	74
Tabla 12. Resultados del ANGRA del Fly Ash	74
Tabla 13. Resultados del ANGRA de la escoria	75
Tabla 14. Resultados del ANGRA de los Rcd	75
Tabla 15. Datos y resultados de la pérdida de calcinación	76
Tabla 16. Resultados del SEM por elemento	77
Tabla 17. Resultados del SEM por compuesto	78
Tabla 18. Resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 7 días	83
Tabla 19. Resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 14 días	84

Tabla 20. Resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 28 días	85
Tabla 21. Resultados de índice de puzolanidad a la edad de 7 días	86
Tabla 22. Resultados de índice de puzolanidad a la edad de 14 días	86
Tabla 23. Resultados de índice de puzolanidad a la edad de 28 días	87
Tabla 24. Resumen de los resultados químicos	92
Tabla 25. Rango de estado con relación al índice de puzolanidad	93
Tabla 26. Resumen de índice de puzolanidad a los 28 días, comparativo con el rango de estado del 1 al 6 de la Tabla 25	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los materiales puzolánicos según Massazza	13
Figura 2. Microestructura del fraguado de 0-7 días	20
Figura 3. Microestructura del fraguado de 7-14 días	21
Figura 4. Microestructura del fraguado mayor de 14 días	21
Figura 5. Cambios en el contenido de hidróxido de calcio Hidratante cemento puzolánico Portland	23
Figura 6. Diagrama indicativo de la resistencia (en %) que adquiere el concreto a los 14; 28; 42 y 56 días	29
Figura 7. Puntos de muestreo de la puzolana natural (M1, M2, M3)	37
Figura 8. Diagrama de flujo del diseño experimental	39
Figura 9. Muestreo de la puzolana natural	41
Figura 10. Secado de las puzolanas en una plancha para determinar el % de humedad	42
Figura 11. Determinación de la densidad aparente	43
Figura 12. Determinación de la densidad real	44
Figura 13. Molinos en funcionamiento de la ESME en el laboratorio de mineralurgia	45
Figura 14. Retiro de las bolas del molino	47
Figura 15. Rotap Tyler modelo R-30050 con el set de mallas utilizadas para la determinación del ANGRA	48
Figura 16. Horno de la marca MRC de la ESME utilizado para la determinación del % de calcinación	49

Figura 17. Muestras de puzolana dentro del horno a una temperatura de 1223,15 K (950 °C)	50
Figura 18. Codificación de las muestras para la caracterización química	51
Figura 19. Secado de las muestras de puzolana natural en la lámpara durante 15 minutos	51
Figura 20. Recolección de la muestra en el accesorio del microscopio...	52
Figura 21. Briquetas en el microscopio electrónico de barrido para el análisis químico	52
Figura 22. Dimensiones del molde	53
Figura 23. Tubos utilizados para el moldeo de las probetas con sus respectivas tapas y codificadas	58
Figura 24. Cemento más la adición de la puzolana natural para el diseño de la mezcla	59
Figura 25. Cantidades de Fly Ash, Escoria y los Rcd usados para el diseño de mezcla a la edad de 28 días	60
Figura 26. Granulometría del agregado supermix utilizado en la mezcla para la probeta	61
Figura 27. Compactación de la probeta dentro del molde durante 10 segundos	62
Figura 28. Moldes con las probetas compactadas frescos	63
Figura 29. Equipo de compresión utilizada para las roturas de las probetas a diferentes edades de 7; 14 y 28 días	64
Figura 30. Encendido del equipo e inicio de la rotura de la primera probeta a la edad de 7 días	65
Figura 31. Rotura de las probetas a la edad de 7 días	66

Figura 32. Datos mostrados de la carga inicial y final de la rotura de la probeta	66
Figura 33. Ajuste de la Probeta en el equipo de compresión a la edad de 14 días	67
Figura 34. Rotura de las probetas a los 14 días	68
Figura 35. Probeta en el ensayo de compresión a la edad de los 28 días	69
Figura 36. Rotura de la muestra (M1, M2, M3, F, E, R y MP) a la edad de 28 días	70
Figura 37. Diagrama ternario de la puzolana M, M2, M3, Escoria, Fly Ash y Rcd	79
Figura 38. Microestructura de la puzolana PA a un aumento de 1000X	80
Figura 39. Microestructura de la puzolana PB a un aumento de 2000X	80
Figura 40. Microestructura de la puzolana PC a un aumento de 2000X	81
Figura 41. Microestructura del Fly Ash a un aumento de 1000X	81
Figura 42. Microestructura de la escoria a un aumento de 1000X	82
Figura 43. Microestructura del RCD a un aumento de 2000X	82
Figura 44. Comparación de Resistencia MP Vs. PA	88
Figura 45. Comparación de Resistencia MP Vs. PB	89
Figura 46. Comparación de Resistencia MP Vs. PC	90
Figura 47. Comparación de Resistencia a los 28 días del Fly Ash, Escoria y Rcd	91

Figura 48. Mezcla del cemento, agregado, agua y un % de reemplazo de puzolana natural	105
Figura 49. Mezcla homogenizada que se usó para ser moldeada en los tubos de plástico PVC	105
Figura 50. Materiales usados para la mezcla, se puede observar el cemento, Rcd, agregado y agua, para la edad de 28 días	106
Figura 51. Vaciado de la mezcla en el molde para luego hacer la compactación utilizando la mesa vibratoria	106
Figura 52. Probetas colocadas en dos bandejas, para que durante 5 días estén en un medio húmedo	107
Figura 53. Las probetas tapadas para que mantengan su humedad	107
Figura 54. Tapado de las muestras dentro de las bandejas con un plástico para que las briquetas tengan una buena hidratación	108
Figura 55. Desmolde después de 5 días de las muestras para el secado y las pruebas a las edades de 7; 17 y 28 días	108
Figura 56. Probetas desmoldadas para el control de 14 y 28 días	109
Figura 57. Análisis por elemento de la muestra PA	110
Figura 58. Análisis por elemento de la muestra PB	111
Figura 59. Análisis por elemento de la muestra PC	111
Figura 60. Análisis por elemento de la muestra FLY ASH	112
Figura 61. Análisis por elemento de la muestra escoria	112
Figura 62. Análisis por elemento de la muestra Rcd	113

RESUMEN

El presente trabajo de tesis es de investigación aplicada y el nivel de estudio es exploratorio, cuenta con un diseño de estudio experimental, se ha llevado un análisis cuantitativo y cualitativo de las características físicas y químicas de las puzolanas naturales en la localidad de Tacna realizadas en los laboratorios de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica, tomando como punto de partida el muestreo de la materia ubicado a unos 10,8 km al norte del centro de la ciudad. Las muestras estudiadas químicamente cumplen con todos los requisitos químicos sobre todo con el principal ($\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3$) mínimo requerido del 70 % y en los resultados se obtuvo para M1 88,92 %, M2 88,46 % y M3 87,76 % superior al mínimo requerido, pero no cumple con el requisito suplementario de máximo % álcalis, también se determinaron la densidad aparente y real, análisis granulométrico de 45 μm un 34 % pasante la malla n°325 se superó el valor con un 50 % pasante. La resistencia a la compresión de la muestra patrón fue una mezcla del cemento portland puzolánico, arena gruesa súper mix y agua, se obtuvieron los siguientes resultados en 7 días fue 142,607 kg/cm^2 para 14 días 209,8 kg/cm^2 y para 28 días 254,7 kg/cm^2 , las pruebas realizadas con las adiciones del 10 %, 20 % y 30 % de puzolana los resultados fueron similares a comparación con la muestra patrón como indica la Tabla 18; 19 y 20. Para cumplir el objetivo principal se realizaron

ensayos para determinar el índice de la puzolana, cuyos resultados muestran que más del 50 % de las muestras están en un rango bueno y suficiente, indicando que la puzolana natural de la localidad de Tacna es un buen material para usar en un porcentaje en la mezcla del concreto.

Palabras clave: *Resistencia a la compresión, aditivo, puzolana, requisitos requeridos, poder cementante.*

INTRODUCCIÓN

Existe un grupo de materiales que contienen una importante actividad química y dentro de ellas está la puzolana natural, puesto que la utilización de puzolana en el campo de la industria cementera viene incrementando, esto es debido a las mejoras en la durabilidad y resistencia que aporta en su adicción. El presente trabajo de tesis tiene por objeto realizar una investigación de la puzolana natural existente en la región de Tacna de la formación Pachía, caracterizar física y químicamente muestras de puzolanas extraídas de la zona mencionada. Los estudios permitieron determinar las características físicas y químicas que confirmaron la presencia de este material en el área seleccionada para el estudio geológico y metalúrgico, adicionalmente, con los resultados obtenidos, se pudo determinar que las características físicas y químicas de las muestras analizadas reúnen los requerimientos que deben cumplir según las normas que indican para su uso como un poder cementante y/o actividad puzolánico. El presente documento está dividido en cuatro capítulos, en el primer capítulo se tiene la problemática de la investigación, en el segundo capítulo se presenta el fundamento teórico, seguidamente se tiene el tercer capítulo que contiene el marco metodológico y por último está el cuarto capítulo donde se muestran los resultados de la investigación.

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

Ante los antecedentes del problema cabe destacar que existen materiales de tipo puzolánico en el departamento de Tacna, sin embargo, por falta de conocimiento, investigación y estudio de los mismos, no se ha podido incorporarlos en el campo constructivo en una magnitud tal que su uso represente un beneficio económico y medioambiental. Es por ello que se ha propuesto esta investigación, de hacer el estudio de las características físicas y químicas de las puzolanas provenientes de la zona de Calana, estos materiales pueden presentar características puzolánicas importantes para la ingeniería de construcción.

1.1.2. Problemática de la investigación

Ante la problemática de la investigación se tiene un alto costo, tanto económico como medioambiental, la producción del cemento es fundamental dar a conocer que el cemento es y seguirá teniendo un uso fundamental a corto, mediano y largo plazo, difícilmente sustituible dentro de la construcción, y que una utilización sostenible del mismo pasa por una reducción efectiva de su empleo. En esta investigación se plantea reducir el uso de cemento añadiendo un % de puzolana natural para mejorar la eficiencia y resistencia del fraguado de un concreto, esto corresponde a otras especialidades ajenas al ámbito de la ingeniería de materiales.

1.2. Formulación del problema

Frente a la problemática se plantea la siguiente interrogante:

¿La puzolana de la localidad de Tacna tendrá las características físicas y química como para usarla por su poder cementante y/o índice de actividad puzolánica con Portland?

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

Se justifica este estudio porque permite conocer propiedades físicas y químicas propias de la puzolana natural, según, los resultados, se puede recomendar el uso y/o industrializar la puzolana para estructuras de mampostería como ladrillos, tejas, entre otros.

La selección de las puzolanas como adición trata de un componente utilizado desde la antigüedad, por lo que se tiene un punto de partida sólido, pero del que no se conoce aún todo su potencial como material no convencional para prefabricados de bajo costo, por lo que resulta buena la investigación.

1.3.2. Importancia

La importancia de esta investigación radica en la posibilidad de darle un valor agregado a un material que por muchos años no se le da uso, mediante la caracterización permitirá conocer las propiedades físicas y químicas que presentan la puzolana, existente en la localidad de Tacna, con lo cual se podrá determinar las aplicaciones más importantes que se le pueda dar y sobre todo si es posible utilizarlo por su poder cementante.

1.4. Delimitaciones de la investigación

Delimitación espacial

La investigación y el estudio se desarrolló en la universidad nacional Jorge Basadre Grohmann, en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales.

Delimitación social

Para la ejecución de la presente tesis se contó con el apoyo y colaboración del asesor Ing. Julián Nieto y los Ing. geólogos Rubén Cahuana y Jonathan Zavaleta.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Caracterizar física y químicamente la puzolana de la localidad de Tacna para determinar su poder cementante y/o índice de actividad puzolánica con portland.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar ensayos índices de la puzolana.
- Realizar el análisis químico y microscópico vía SEM.
- Realizar la comparación de resistencias de muestra patrón de portland con muestras adicionadas con puzolana para calcular el lpz.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La puzolana de Calana tiene reactividad puzolánica y es posible caracterizar y determinar su índice de actividad puzolánica.

1.6.2. Hipótesis específica

- a) La caracterización de la puzolana existente en la localidad de Tacna permitirá determinar sus características físico-químicas.
- b) En base a las características físico-químicas, de las puzolanas de la localidad de Tacna, es posible definir sus índices de actividad.
- c) Según los estudios cercanos al área como se ve en (geológica económica) las puzolanas de Calana presentan un buen comportamiento químico.

1.7. Variables

1.7.1. Identificación de variables

Variable independiente (X): Características físico químicas.

Resistencias a la compresión.

Variable dependiente (Y): Índice de actividad puzolánica.

1.7.2. Definición y operacionalización de variables

Características físico químicas

Son las características que presentan las puzolanas en su estado natural, según la norma ASTM C618, el contenido mínimo del 70 % de ($\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3$), y un máximo de 4 % para SO_3 , 3 % para la humedad, y el 10 % para la pérdida por ignición.

Resistencias a la compresión

La resistencia a la compresión es el esfuerzo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de la probeta en un ensayo de resistencia a la compresión.

Poder cementante y/o índice de actividad puzolánica

Es la capacidad que tiene un material al presentar endurecimiento durante un determinado tiempo para obtener una buena resistencia a la compresión, la presencia de la puzolana con cemento es de adición para mejorar el fraguado y mejorar la resistencia de la mezcla con la puzolana, suele convertirse en una reacción insoluble al estar en contacto con agua y así transformándose la masa de concreto a que obtenga una mayor resistencia a la compresión.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

(Tomás, 2013), Según el estudio realizado, los romanos no usaban cemento Portland, hecho de piedra caliza calentada a 1723,15 K (1,450 °C), sino que mezclaban cal con puzolana o cenizas volcánicas. Esto requiere mucha menos energía ya que la cal sólo necesita ser calentada a 1173,15 K (900 °C). Esto sugiere que la aplicación contemporánea del método romano antiguo podría producir un concreto más fuerte y duradero con un impacto medioambiental mucho menor.

(Vicente, 2016) Estudios hechos en base al reemplazamiento de puzolana demuestran las resistencias de los concretos a la compresión Vs. tiempo a las edades de 7; 14 y 28 días, según el Método ACI-Comité 21 con agregado redondeado y según el método Walker con agregado angular, son efectos de la utilización de los diferentes tipos de cemento comercializados en la ciudad de Tacna (Sol Portland Tipo-I, Yura Tipo HE–Alta Resistencia Inicial, y Portland Puzolánico Yura IP-Alta Durabilidad).

(INGEMET, 2011) Estudios geológicos hechos por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico demuestran puzolana en la ciudad de Tacna e indican que los afloramientos se muestran al norte y noreste de la ciudad de Tacna, y se encuentran en el valle del Caplina, donde las cenizas de estos depósitos alcanzan un área de más de 30 km², con una potencia promedio de 10 m. Corresponde a ignimbritas riódacíticas de color rosado, de textura terrosa, perteneciente a depósitos del Cuaternario Holoceno.

Cementos Yura de Arequipa usa en su producción de cementos portland puzolánicos el de tipo portland puzolánico tipo IP que es producido mediante molienda conjunta de clinker portland y puzolana conteniendo puzolana entre el 15 % y 40 % de adición.

La norma ASTM C618 dice que la ley máxima de puzolana utilizada en las mezclas de concreto es de un 34 % de residuo que ha pasado por un tamiz de 45 µm (malla n° 325).

La NTP establece los requisitos que deben cumplir los cementos Portland adicionados, utilizando puzolana, escoria, caliza o cualquier combinación entre estas con el objetivo de que el producto tenga una aceptación para su uso.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Puzolana definición, clasificación y usos

2.2.1.1. Definición

Las puzolanas se definen como materiales silíceos y aluminosos, que en sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero sí poseerán su poder cementante cuando estén finamente dividida las partículas y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el calcio hidróxido a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementosas (ASTM, 1994).

Todos los materiales silíceos y aluminosos no son puzolánicos, los materiales silíceos que se consideran puzolanas son reactivas. Sin embargo; minerales cristalinos, como sílice como el cuarzo, alúmina como corindón y aluminosilicatos como silimanita (SA) y mullita (S_3A_2) no son materiales de combinación de cal a temperatura ambiente. En general, los materiales silíceos y aluminosos pueden mostrar propiedades puzolánicas si son finamente molido y en forma amorfa. Por lo tanto, la composición química de una puzolana no determina claramente su capacidad para combinarse con calcio hidróxido y álcalis (Meral, 2004).

La mejora real impartida por un material puzolánico particular de una mezcla de concreto depende fuertemente no solo de la sustancia química o composición, sino también propiedades físicas y mineralógicas de la puzolana, que varían significativamente tanto dentro como entre los diferentes tipos de material. También para que las puzolanas se usen como sustituto del cemento Portland, tiene que ser barato, de fácil acceso y disponible en grandes cantidades (Meral, 2004).

2.2.1.2. Clasificación de las puzolanas

a) Puzolanas naturales

Las puzolanas se clasifican principalmente en dos grupos en función de sus orígenes como natural y artificial. Las puzolanas naturales son de origen volcánico, tales como algunas tierras de diatomeas; cherts de opalina y esquistos; tobas y cenizas o pumicites volcánicas, cualquiera de los cuales pueden o no ser procesados por calcinación; y diversos materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y pizarras (Meral, 2004).

Las puzolanas naturales procesados o sin procesar han sido utilizados por la humanidad para las construcciones civiles durante

miles de años. Los morteros y hormigones se forman utilizando una mezcla de cal y una puzolana natural - típicamente una ceniza volcánica o un residuo de ladrillos, fueron desarrollados y utilizados por los griegos y más tarde fueron utilizados por los romanos (150 a.C.), para construir durables edificaciones, para el uso de tanques de almacenamiento de agua.

b) Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales son aquellas que se obtienen como subproductos industriales. Entre ellas están las cenizas volantes (finas partículas sólidas de las cenizas llevadas a cabo a partir de la quema de carbón en centrales eléctricas), humos de sílice (finamente divididas, subproductos obtenidos en la fabricación de metal de silicio o aleaciones de silicio), y escorias de alto horno granulado (subproductos generados por el rápido enfriamiento de sustancias no ferrosas en minerales de hierro que se separan a partir del metal caliente en un alto horno) son los ejemplos más comunes de puzolanas artificiales (Erdogan ,1997).

No existe una clasificación detallada única para materiales puzolánicos. El cuadro de clasificación de acuerdo a la fuente de

los materiales hechos por Massazza (Lea, 1970), se muestra en la Figura 1, para tener una mejor comprensión de las puzolanas.

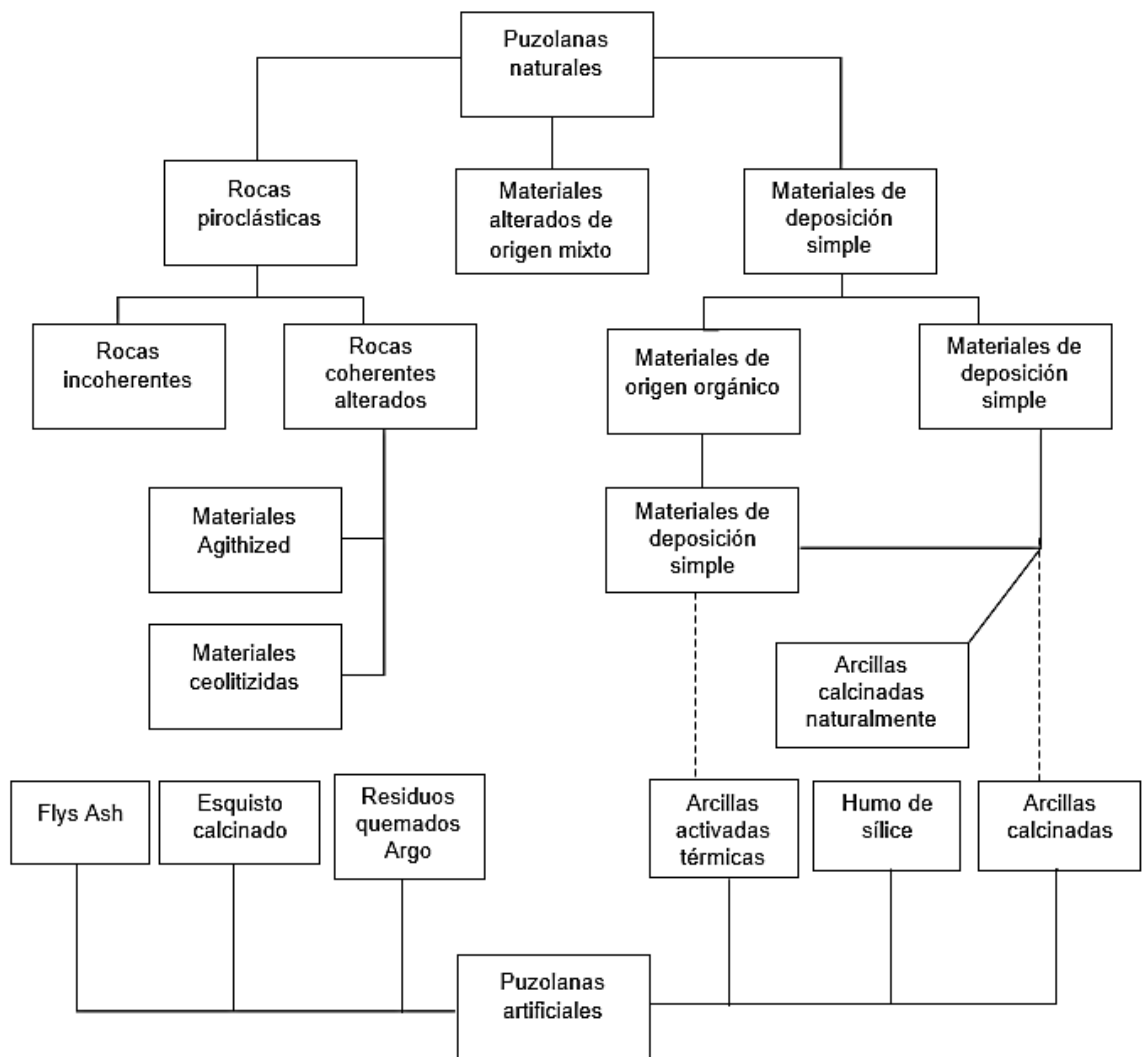


Figura 1. Clasificación de los materiales puzolánicos según Massazza.

Fuente: Lea, F.M., 1970.

Según la NTP 334.104 y ASTM C618 (Cementos. Adiciones minerales del concreto: puzolana natural cruda o calcinada y ceniza volante. Especificaciones). Definen tres clases de cenizas volantes y estas son:

- a) Clase F: Ceniza volante producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Cenizas que poseen propiedades puzolánicas.
- b) Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tufos y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias.
- c) Clase C: Ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementicias.

Tabla 1
Requisitos químicos de las puzolanas

Composición Química	Clase de N	Adición F	Mineral C
mínimo % (Dióxido de silicio + óxido de aluminio + óxido de fierro)	70,0	70,0	50,0
Trióxido de azufre (SO ₃), máx., %	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad. Máximo %	3,0	3,0	3,0
Pérdida por calcinación máximo %	10,0	6,0	6,0

Fuente: Vásquez,2006.

2.2.1.3. Usos de las puzolanas

Las puzolanas se pueden usar en:

a) Subsector construcción

El cemento puzolánico se obtiene de la mezcla del clinker con la puzolana. Es de fraguado lento, por lo que es idóneo en aplicaciones de albañilería. Una de sus propiedades más importantes es su especial resistencia al ataque del agua del mar, lo que lo hace aconsejable para las construcciones costeras (INGEMET, 2011).

El cemento que contiene puzolana se obtiene por la pulverización conjunta de una mezcla de clinker portland y puzolana con la adición eventual de sulfato de calcio. El contenido

de puzolana debe estar comprendido entre 15 % y 40 % del peso total (INGEMET, 2011).

Los hormigones elaborados con este tipo de cemento generalmente tienen altas resistencias finales y puede apreciarse cuando se ensayan probetas luego de 56 y 90 días. Si bien este cemento es apto para casi cualquier tipo de obra, si este material resulta de comprobada eficacia, es especialmente recomendado cuando se requieran propiedades especiales de durabilidad como ataque de sulfatos y bajo calor de hidratación (INGEMET, 2011).

Además, la puzolana en una mezcla puede servir como reemplazo parcial del cemento para reducir la generación del calor y los costos, así como aditivo para aumento de finos y mejorar la maniabilidad al dosificar mezclas, para volúmenes mínimos de pasta.

Asimismo, se emplea en áridos ligeros para la fabricación de hormigones de baja densidad y para la producción de prefabricados, con la ventaja de un aligeramiento en su peso medio y una más fácil maniobrabilidad de los productos, bloques, bovedillas, tuberías, etc.

b) Subsector agroindustrial (Petrofísica Ibérica, 2007)

La puzolana es útil en el control de nutrientes pues posee una serie de parámetros altamente favorables para su empleo como substrato inerte, tales como su capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica prácticamente nulas, así como su pH = 5,5 - 6 que permite que se utilice actualmente como substrato inerte en el que, mediante el agua de riego, se aportan y controlan perfectamente los nutrientes y tratamientos, pudiéndose realizar un seguimiento exhaustivo de la planta. Por su gran estabilidad, durabilidad y baja densidad, las puzolanas se están utilizando como aireantes y soporte (INGEMET, 2011).

c) Otros usos

Se usa como aislante térmico, dada la conductividad de la puzolana en estado natural, con valores medios inferiores a 0,21 kcal/hm² °C, lo que determina que sea un aislante de sumo interés. La gran permeabilidad de los materiales obtenidos permite que sea un filtro natural de líquidos, con la gran ventaja de presentar una mayor porosidad en las granulometrías gruesas. Asimismo, su capacidad de absorción de líquidos permite que se emplee como absorbente en la industria, así

como en preparados olorosos (tierras volcánicas olorosas). También se utiliza como drenaje natural en los campos de fútbol, y en la construcción de pistas de tenis y polideportivos (INGEMET, 2011).

2.2.2. Índice de actividad puzolánica

El índice de actividad puzolánica refiere a la capacidad y la velocidad de la reacción entre los aluminosilicatos en puzolana y CH para formar productos cementosos. La actividad de puzolanas no se entiende bien debido a la estructura heterogénea de puzolanas y la naturaleza compleja de la hidratación (Erdogdu, 1996). Sin embargo, los principales factores que afectan a su actividad se pueden enumerar de la siguiente manera:

- a) La actividad de una puzolana es mayor a medida que su contenido de " $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ " o la cantidad de material reactivo es mayor.
- b) Con el fin de ser químicamente reactivo, el material puzolánico debe tener una estructura amorfa.
- c) Las partículas puzolánicas deben ser lo suficientemente finas para reaccionar con CH.

La actividad puzolánica de una puzolana natural o cenizas volantes se determina mediante la búsqueda de su índice de actividad de la fuerza, que es la relación del cubo de mortero resistencia a la compresión de las muestras de ensayo preparado por 20 % puzolana - mezcla de PC 80 % para controlar especímenes preparados por 100 % PC según la norma ASTM C311. Las pruebas en los cubos de mortero se pueden conducir en cualquiera de 7 días o 28 días o ambos. índice de actividad de la fuerza se calcula como sigue (Erdogan,1997).

$$\text{Índice de actividad puzolánico} = \frac{A}{B} \times 100 \quad [1]$$

Donde:

- ✓ A = Resistencia promedio a la compresión de los cubos de la mezcla de prueba, MPa.
- ✓ B = Resistencia promedio a la compresión de los cubos de la mezcla de control MPa.

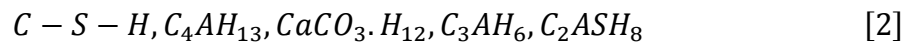
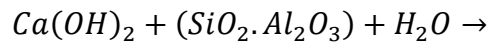
De acuerdo con la norma ASTM C618, el índice de actividad puzolánico debe ser al menos 75 %.

2.2.3. Reacciones químicas

2.2.3.1. Portland puzolánico

Durante el fraguado ocurre las siguientes reacciones con el cemento portland puzolánico:

Portlandita + puzolana → tobermorita + aluminio cálcico



Las reacciones físicas observadas tienen las siguientes microestructuras microscópicas durante el fraguado, para ellos se observa en las Figuras 2; 3 y 4.

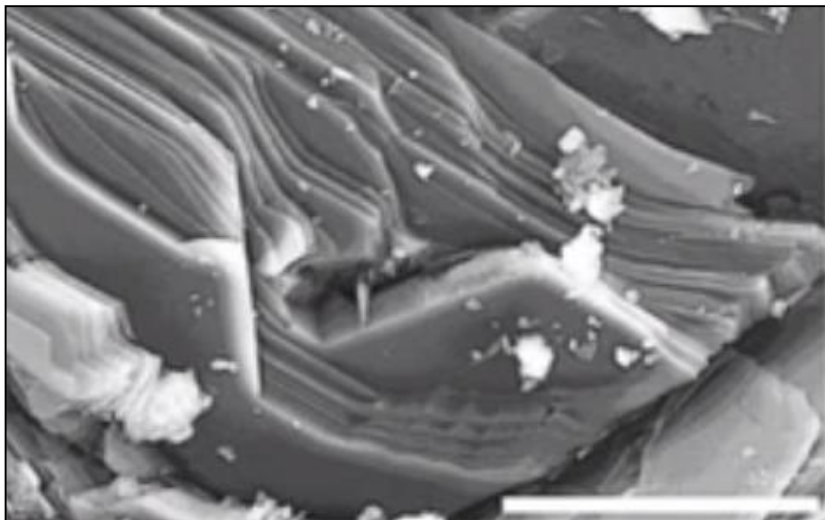


Figura 2. Microestructura del fraguado de 0-7 días.
Fuente: Cahuana, 2017.

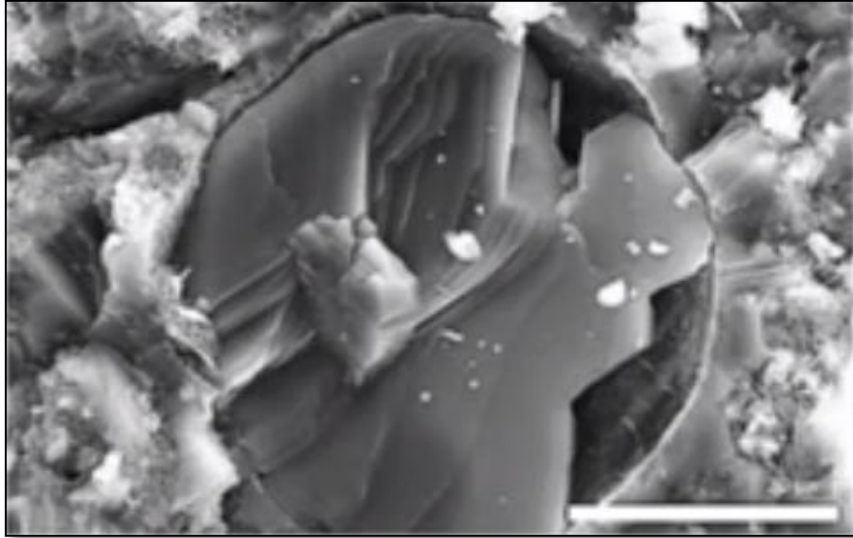


Figura 3. Microestructura del fraguado de 7 – 14 días.
Fuente: Cahuana, 2017.

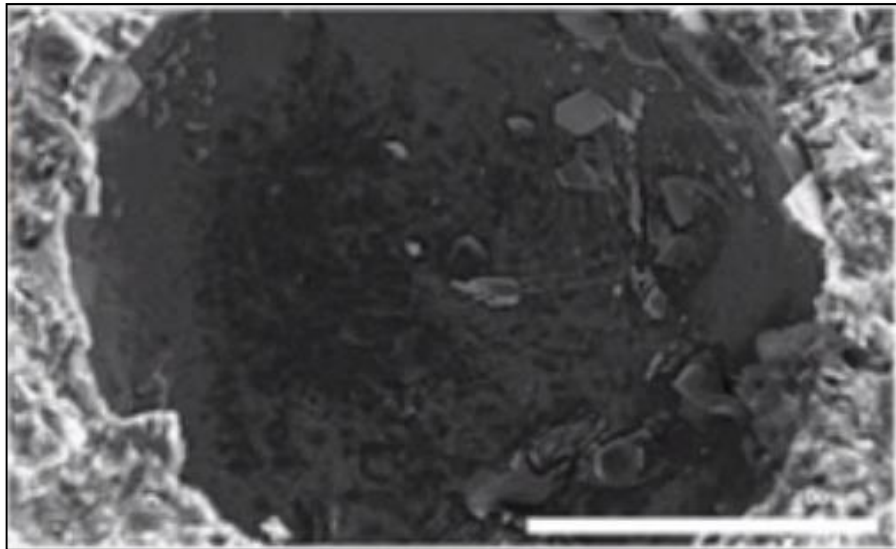


Figura 4: Microestructura del fraguado mayor de 14 días.
Fuente: Cahuana, 2017.

Ventajas:

- Material más usado en la construcción.
- Buena adaptabilidad para cualquier tipo de condición.
- Gran cantidad de aditivos.
- Económico y de gran disponibilidad.

Desventajas:

- Baja durabilidad frente a ataque químico (ej. ácidos)
- No es refractario.
- Responsable de al menos el 5 % emisiones de CO₂
- Usa gran cantidad de agua tanto en su producción como en su fraguado.
- Demora en desarrollar resistencias máximas (28 días).

La reacción química principal tiene lugar entre la sílice de puzolana y CH se puede mostrar en la reacción [2], esta reacción resultará en tanto una disminución en la cantidad de CH libre (Figura 5), y un aumento en la cantidad de CSH y otros productos de baja porosidad.

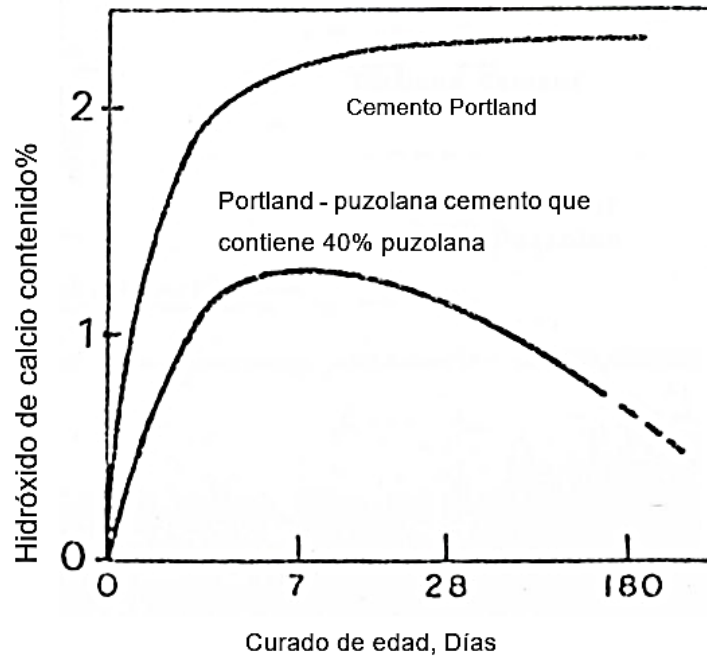


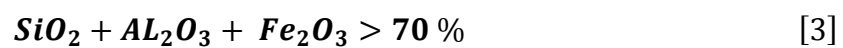
Figura 5. Cambios en el contenido de hidróxido de calcio Hidratante cemento puzolánico Portland.

Fuente: Comité ACI 232, 1994.

2.2.3.2. Reactividad puzolánica

La reactividad puzolánica tiene las siguientes características principales:

- ✓ Composición química:



- ✓ Tamaño de partícula:

El tamaño de partícula debe de ser menor a <45 μ m.

- ✓ Forma cristalográfica:

La formación cristalográfica debe de ser amorfa

- ✓ Temperatura de formación:

La temperatura de formación de la puzolana debe de estar entre el rango de 873,15 – 1173,15 K (600-900 °C).

Tabla 2

Composición química de materiales cementosos

Componente	Escoria de alto horno %	Clase C Fly Ash %	Clase F de Fly Ash %	Metacaolin %	Puzolanas naturales %
SiO ₂	27-40	34,1	42,6-59,8	40-70	45-86
CaO	30-50	38	2,8-7	-	3-10
Al ₂ O ₃	5-35	14,2	21,8-34,5	20-35	2-20
Fe ₂ O ₃	<1	7,2	6,3-18,1	<1	2-10
MgO	1-2	1,5	1,2-2,6	-	0,5-4,5
SO ₃	<3	4,2	0,19-1,9	-	-
Na ₂ O	1-3 (*)	0,44	0,15-0,94	-	0,4-11 (+)
K ₂ O		1,4	0,38-6	-	

(*) La sumatoria de Na₂O Y K₂O

(+) Na₂O plus 0,658 K₂O

Fuente: ACI 232,1994.

2.2.4. Caracterización de las Puzolanas

La característica fundamental para la elaboración de este trabajo de tesis se considera y define de la siguiente manera:

2.2.4.1. % de humedad

Este ensayo que se realizó tiene por finalidad determinar el contenido de humedad de la puzolana natural. El contenido de humedad, está formado por aguas existente en la muestra y para representarlas en %, se usó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad [4]$$

Donde:

P_i : Peso inicial de la muestra.

P_f :Peso final de la muestra seca.

2.2.4.2. Densidades

a) Densidad aparente

La densidad aparente se define como el peso seco de una unidad de volumen de suelo. Los factores que afectan son principalmente tres: la textura, la estructura y la presencia de materia orgánica. Suelos con texturas arenosas tienden a tener densidades mayores que suelos, más finos, al mismo tiempo en

suelos bien estructurados los valores son menores, entre valores promedio de densidad aparente (g/cm^3), para suelos de rocas y minerales 2,65; arena 1,9 – 1,7; textura franca 1,3 – 1,0; suelo rico en humus 0,9 – 0,8. (Donoso, 1992).

La densidad aparente se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_{ap.} = \frac{m (g)}{V (cm^3)} \quad [5]$$

Donde:

$\rho_{ap.}$ = Densidad real

m = masa de la muestra seca en g.

V = volumen del que ocupa la muestra seca en la probeta cm^3 .

b) Densidad real

Se denomina densidad real a la relación entre la masa de un material y el volumen real de dicho material, es decir, omitiendo el volumen de porosidad interna. En la caracterización de una material resulta de gran utilidad conocer la densidad aparente y la densidad real para poder determinar su porosidad que es el porcentaje de huecos o espacios de aire en un material (Gutiérrez, 2017).

La densidad real se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_r = \frac{m (g)}{V (cm^3)} \quad [6]$$

Donde:

ρ_r = Densidad real

m = masa se la muestra seca en g

V =volumen del agua cm^3

2.2.4.3. Molienda

La etapa de molienda como una operación metalúrgica unitaria principal, que efectúa la etapa final de reducción de tamaño de las partículas de mena hasta rangos donde se alcanza la liberación del mineral valioso de la ganga, bajo consideraciones técnicas. De acuerdo a esto, la molienda óptima es aquella malla de molienda en la cual la recuperación del mineral valioso será un 34 % de residuo que han pasado por el tamiz de 45 μm para el reemplazo del % de puzolana natural.

2.2.4.4. Análisis granulométrico

Análisis granulométrico es una operación de control que tiene por objeto la composición granular de una muestra sólida, con el fin de conocer el tamaño promedio de partículas, consiste en hacer

pasar un peso determinado de muestra solida representativa de la muestra original, por una serie de mallas ordenadas según la abertura de la malla, es decir de la malla de mayor abertura hasta la de menor abertura

2.2.4.5. Perdida por calcinación

El ensayo consiste básicamente en colocar una cantidad de material conocido, en recipientes que soporten altas temperaturas. Los crisoles que contienen las muestras se colocan en la mufla, este equipo tiene la propiedad de alcanzar temperaturas tan altas que llegan a los 1273,15 K (1000 °C). Se coloca la mufla para que alcance una temperatura de 1023,15 K (750 °C) durante 20 min. Posteriormente a su enfriamiento se pesó la muestra que aún está contenida en el recipiente.

$$\%p\acute{e}rdida\ por\ calcinaci\acute{o}n = \frac{M_i - M_F}{M_i} \times 100 \quad [7]$$

Donde:

M_i :Masa de la muestra inicial sin calcinar.

M_F :Masa de la muestra calcinada.

2.2.5. Ensayo de resistencia a la compresión

2.2.5.1. Fraguado y endurecimiento del concreto

La pasta del concreto se forma mezclando cemento artificial y agua debiendo embeber totalmente a los áridos. La principal cualidad de esta pasta es que fragua y endurece progresivamente, tanto al aire como bajo el agua (Sánchez & Tapia, 2015).

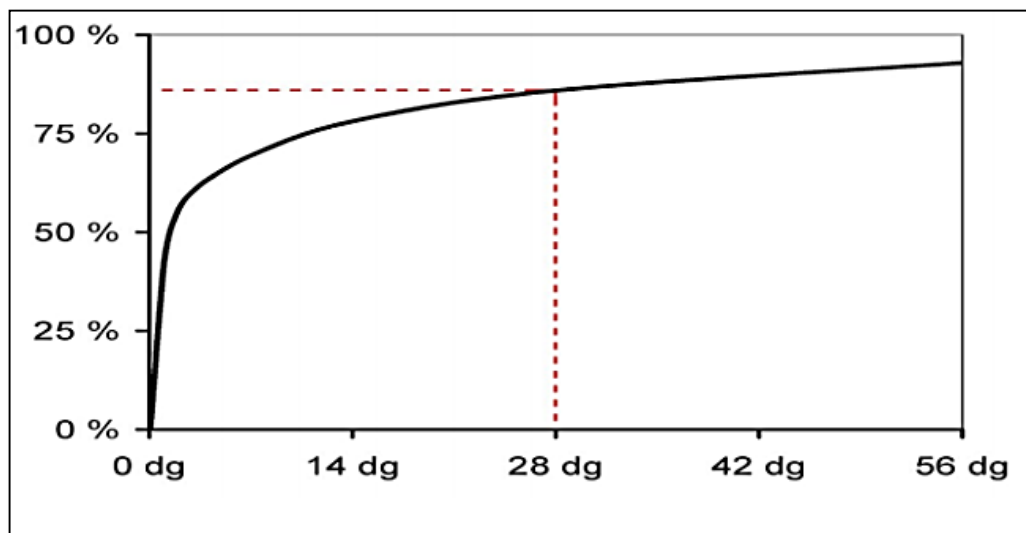


Figura 6. Diagrama indicativo de la resistencia (en %) que adquiere el concreto a los 14; 28; 42 y 56 días.

Fuente: Sánchez & Tapia, 2015.

2.2.5.2. Resistencia a la compresión

La calidad del concreto se establece generalmente por referencia a su resistencia a la compresión y es la capacidad de soportar cargas y esfuerzos, siendo su mejor comportamiento en

compresión en comparación con la tracción, debido a las propiedades adherentes de la pasta de cemento (Sánchez & Tapia, 2015).

La resistencia depende principalmente de la concentración de la pasta de cemento, la cual se expresa en términos de la relación a/c en peso. La resistencia se ve influenciada por el tipo de curado inicial, el tamaño de la probeta, la velocidad de descarga, la esbeltez de la probeta, el estado de humedad, el refrendado, etc.

El proceso de fraguado y endurecimiento es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento. La fase inicial de hidratación se llama fraguado y se caracteriza por el paso de la pasta del estado fluido al estado sólido. Esto se observa de forma sencilla por simple presión con un dedo sobre la superficie del concreto. Posteriormente, continúan las reacciones de hidratación alcanzando a todos los constituyentes del cemento que provocan el endurecimiento de la masa y que se caracteriza por un progresivo desarrollo de resistencias mecánicas (Sánchez & Tapia, 2015).

2.2.6. Cemento

2.2.6.1. Definición

Es un aglomerante hidrófilo, resultante de la calcinación de rocas de calizas, areniscas y arcillas, de manera de obtener un polvo muy fino que en presencia de agua endurece adquiriendo propiedades resistentes y adherentes. (Pasquel, 1998).

2.2.6.2. Cemento Portland

Es un cemento hidráulico producido por la pulverización de clinker, el cual está compuesto esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, conteniendo, además, una o más formas de sulfato de calcio, como un añadido en la etapa de molienda.

Todo cemento Portland que se utilice para su elaboración de concretos, debe cumplir con la norma ASTM C150 "Estándar Specification for Portland Cement", (Galicía & Velásquez, 2016).

2.2.6.3. Componentes del cemento Portland

- ✓ Silicato tricálcico (C_3S)
- ✓ Silicato bicálcico (C_2S)
- ✓ Aluminato Tricálcico (C_3A)
- ✓ Ferro-Aluminato Tetracálcico (C_4AF)

Normalmente el Clinker contiene entre 70 y 75 % de los primeros, entre 7 y 15 % del Aluminato tricálcico y el resto lo conforma el ferro-aluminato tricálcico y los compuestos secundarios como el MgO y el SO₃. La proporción en que estos compuestos se presentan en el Clinker, depende de la cantidad en que estén presentes en la materia prima, los elementos minerales que los conforman, es decir: calcio, silicio, aluminio y fierro. (YURA, 2014).

2.3. Definición de términos

Concreto: Es una mezcla de piedras, arena, agua y cemento que al solidificarse constituye uno de los materiales de construcción más resistente para hacer bases y paredes. La combinación entre la arena, el agua y el cemento en algunos países latinoamericanos se le conoce como Mortero, mientras que cuando el concreto ya está compactado en el lugar que le corresponde recibe el nombre de hormigón.

NTP: Son las siglas de la norma técnica peruana.

Mortero: Es un compuesto de conglomerantes inorgánicos, agregados finos y agua, y posibles aditivos que sirven para aparejar elementos de la vida como ladrillos, piedras, bloques de hormigón, etc. Además, se usa para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para el

revestimiento de paredes. Los conglomerantes más comunes en la actualidad son los de cemento aunque históricamente han sido la cal, la tierra y el yeso los más utilizados.

Hormigón: Es un material de construcción formado por una mezcla de cemento, arena, agua y grava o piedra machacada. Además, el hormigón puede llevar algún tipo de aditivo para mejorar sus características dependiendo del uso que se le vaya a dar a la mezcla.

Cenizas volantes: Son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.

RCD: Son producto de residuos de construcción y demolición, son ladrillo de construcción.

Escoria: Es un subproducto de la fundición de la mena para purificar los metales. Se pueden considerar como una mezcla de óxidos metálicos; sin embargo, pueden contener sulfuros de metal y átomos de metal en forma de elemento. Aunque la escoria suele utilizarse como un mecanismo de eliminación de residuos en la fundición del metal, también pueden servir para otros propósitos, como

ayudar en el control de la temperatura durante la fundición y minimizar el re oxidación del metal líquido final antes de pasar al molde.

Calcinación: Es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. El proceso, que suele llevarse a cabo en largos hornos cilíndricos, tiene a menudo el efecto de volver frágiles las sustancias.

Clinker: es un material que se obtiene previamente en la fabricación del cemento. El crudo de cemento es sometido a molienda, después calcinado en un horno rotatorio a temperaturas superiores a 1673,15 K (1,400 °C), y posteriormente enfriado hasta obtener el clinker.

Hidratación: Se denomina hidratación al proceso mediante el cual se agrega agua a un compuesto en concreto para que este tenga una buena compactación en el sector de la construcción.

Ataque químico: Aumento de la rugosidad de la superficie de un material, por disolución generalizada o selectiva, en un medio ácido o alcalino.

Porosidad: Es una fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0-1, o como un porcentaje entre 0-100 %. El

término se utiliza en varios campos, incluyendo farmacia, cerámica, metalurgia, materiales, fabricación, ciencias de la tierra, mecánica de suelos e ingeniería.

Amorfo: Se dice que algo es amorfo cuando se presenta sin una forma regular, o en su defecto carece de formas.

Ipz: Índice de actividad puzolánico.

Rcd: Son residuos de ladrillo de las demoliciones de una construcción.

Fly Ash: Son cenizas volantes producto de la quema de carbón, estos productos se producen en una termoeléctrica.

CH: Es un $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

CSH: Es la formación de la tobermorita.

ESME: Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo

Por el tipo de investigación, el presente estudio reúne las condiciones metodológicas de una **investigación aplicada**, en razón, que se utilizaron conocimientos de las ciencias geológicas, a fin de aplicarlas en el proceso de la caracterización de minerales.

Nivel

De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación, se utilizó el nivel de las características de un estudio descriptivo – **exploratorio**.

3.1.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación por la naturaleza del estudio se desarrolló el **experimental**. Este tipo de estudio consistió en caracterizar propiedades físicas de la puzolana natural de la localidad de Tacna; en base a ensayos y pruebas en laboratorio.

3.2. Procedencia y diseño de la muestra

3.2.1. Procedencia ubicación y accesibilidad

El área de estudio se encuentra en la región de Tacna, distrito de Calana. El acceso es por vía asfaltada a 10,8 km al Norte del centro de la Ciudad. La cota del área está entre 843 a 753 m.s.n.m, En la siguiente figura se muestran los puntos de muestreo.

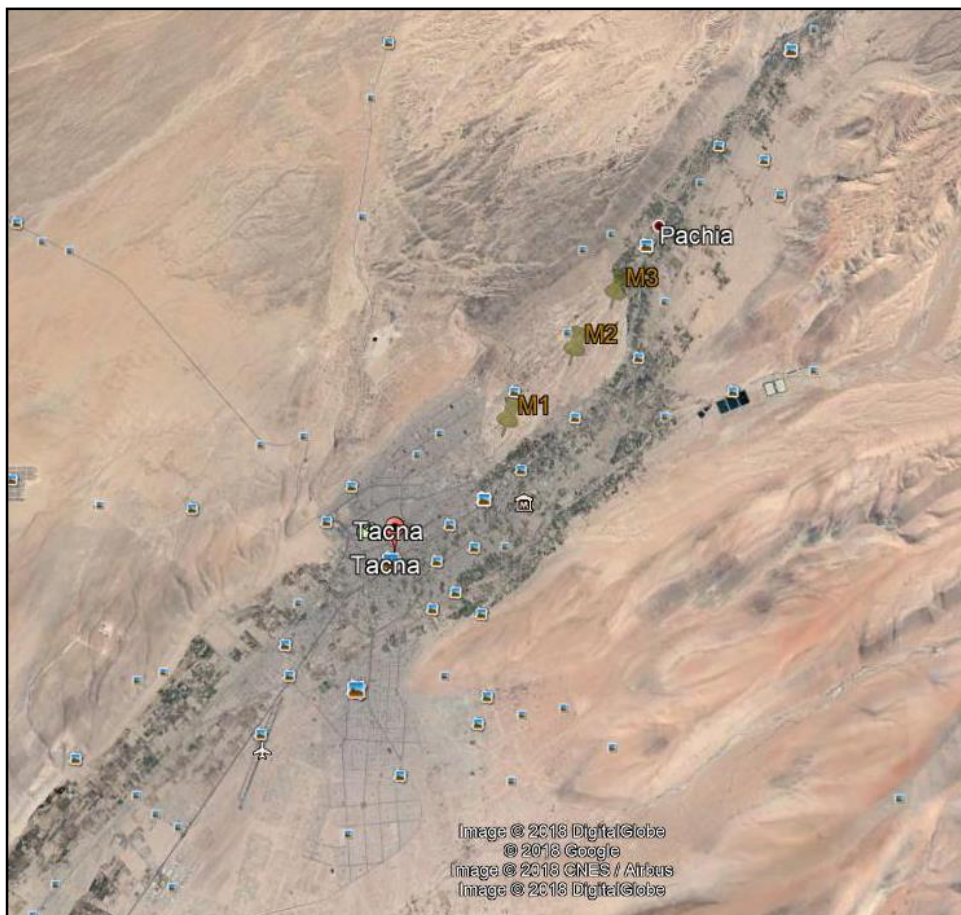


Figura 7. Puntos de muestreo de la puzolana natural (M1, M2, M3).

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se indican las coordenadas de la procedencia de los tres puntos de muestreo que se realizaron.

Tabla 3
Coordenadas de las muestras recolectadas

Muestra	Distancia (km)	SE	Altitud (m)
M1	8,016	130°	843
M2	8,017	130°	812
M3	8,017	130°	753

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Diseño experimental

El diseño experimental fue desarrollado de la siguiente manera:

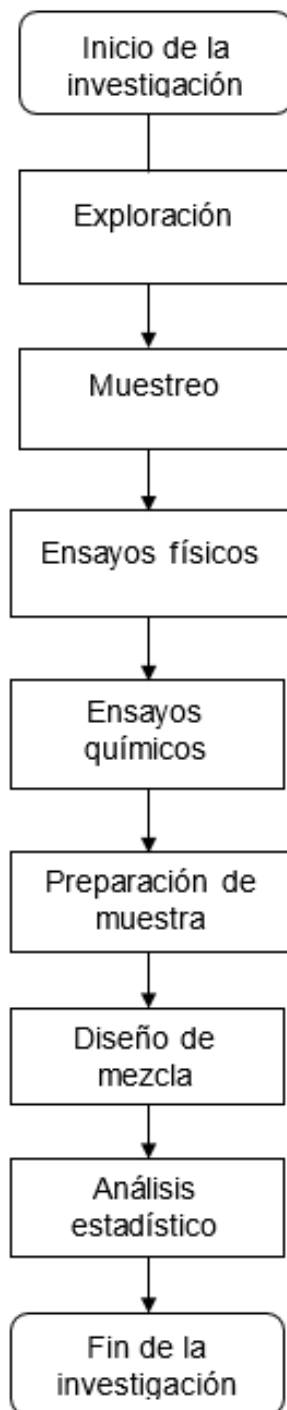


Figura 8. Diagrama de flujo del diseño experimental.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Operacionalización de variables

En la operacionalización se muestra las variables de la investigación.

Tabla 4
Operacionalización de variables en la investigación

Dimensión	Descripción	Indicador	Escala de medición	Nivel o rango
– VI: Características físico químicas	Son las características que presentan las puzolanas en su estado natural	• Índice puzolanidad	%	0-70
		• Humedad	%	0-2
– Resistencia a la compresión		• Densidad	g/cm ³	20-400
		• Granulometría	n° malla	
– VD: Poder cementante	Capacidad de reacción de la puzolana	Factor de actividad o índice de	%	0-100

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Procedimientos del muestreo y caracterización de la puzolana natural

A continuación, se detalla el procedimiento de la toma de muestras, como referencia se vio las NTP 333.127.

Indica que se debe tomar 2 kg de muestra solida por cada 400 Ton de material, una vez identificado los puntos de muestreo se procedió a tomar muestra en los tres puntos, es decir, el muestreo lleva a la obtención de una muestra representativa que permita estimar, a

través de ella, todas las características de un gran conjunto de material del que se extrae.

El tipo de muestreo que se efectuó para la muestra M1 fue muestreo manual, es decir, cono y cuarteo, para la obtención de los 2 kg de muestras solidas se obtuvo primero 35 kg de material puzolánico, estos 35 kg son homogenizados con una pala en donde se cuartea y se obtiene 10 kg del cual se siguió reduciendo la cantidad hasta obtener los 2 kg según las indicaciones de la NTP 333.127, seguidamente las muestras en los diferentes puntos se trasladaron al laboratorio para hacer las pruebas respectivas, la misma secuencia se realizó para las muestras M2 y M3.



Figura 9. Muestreo de la puzolana natural.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Procedimiento para la caracterización física

3.4.1.1. Determinación del % de humedad

El procedimiento para la determinación del % de humedad se realizó con el uso de una balanza analítica modelo PATRICK'S de la ESME, primeramente se pesó la bandeja seguidamente se pesó 200 g de muestras homogenizada, luego se colocó la bandeja con la muestra en la plancha eléctrica (Figura 10) y se mantuvo a una temperatura de 373,15 K (100 °C) durante 3 horas, después del tiempo transcurrido, se retiró la bandeja y se esperó a que alcance la temperatura ambiente aproximadamente 25 minutos, finalmente se pesó las muestras y se reemplazaron en la ecuación para la determinación del % de humedad.



Figura 10. Secado de las puzolanas en una plancha para determinar el % de humedad.

Fuente: Elaboración propia.

Para tener un buen dato de la determinación del % de humedad, se realizó 3 pruebas para cada muestra y así poder promediar cada dato y sea más verás el resultado.

3.4.1.2 Determinación de las densidades

a) Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente de las muestras a estudiar se pesó en una balanza analítica modelo PATRICK'S, 200 g de muestra y se pesó la probeta de 200 ml de capacidad, luego se agrega cuidadosamente la muestra pesada a la probeta, seguidamente se hizo la lectura del volumen que ocupa la muestra en la probeta (Figura 11).



Figura 11. Determinación de la densidad aparente.
Fuente: Elaboración propia

b) Densidad real

Para la determinación de la densidad real, se pesó 200 gramos de la muestra, se llenó la probeta con agua destilada hasta un volumen conocido, en este caso fue de 500 ml, para el cálculo de la densidad real es con la diferencia de los volúmenes de agua, antes y después de que la muestra de los 200 g se introduzca dentro de la probeta, se observó el incremento del volumen (Figura 12), se realiza el mismo procedimiento para las demás muestras, para tener un valor exacto se realizaron 5 veces las pruebas.

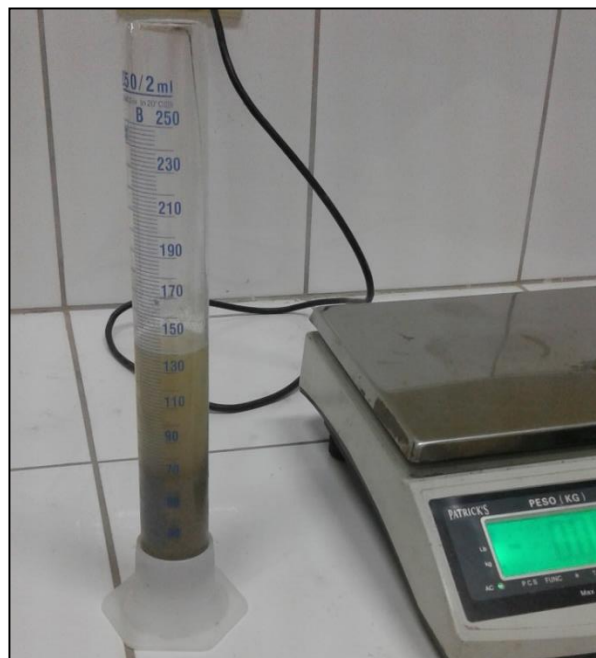


Figura 12. Determinación de la densidad real.
Fuente: Elaboración propia

3.4.1.3. Procedimiento para la molienda

Seguidamente se realizó la molienda de las muestras (puzolana natural M1, M2, M3). Primeramente, se calculó el collar de bolas que se utilizó en la molienda de las muestras, estos cálculos se realizaron según a las dimensiones del molino que se usó dentro del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.



Figura 13. Molinos en funcionamiento de la ESME en el laboratorio de mineralurgia.

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de collar de bolas utilizadas en la etapa de molienda:

Datos y cálculos del molino:

Diámetro	=23,5 cm
Altura	=16 cm
Densidad Acero	= 7,82 g/cm ³
Volumen total del molino	=6 939,7944 cm ³
Volumen al 45 %	=3 122,907 cm ³
Volumen al 60 %	=1 873,744 cm ³
Peso de bolas necesarias para el molino	= 14 652,681 g
expresado en kg	= 14,65 kg

Tabla 5
Distribución del collar de bolas del molino de la ESME

Tamaño de	cantidad	
bolas	%	kg
Pequeños	20	2,931
Medianos	30	4,396
Grandes	50	7,326
total		14,653

Fuente: Elaboración propia.

Luego se colocó 2 kg de muestra en el molino junto al collar de bolas calculado según indica la tabla, se aseguró la tapa del

molino y se procedió al encendido del equipo, el tiempo de molienda fue de 30 minutos.

Una vez cumplido con el tiempo de molienda, se apagó el molino y se esperó 5 minutos para que los sólidos sedimenten y evitar pérdidas del polvo fino, luego se retiró las bolas limpiando con una brocha (Figura 14) las muestras molidas fueron colocadas en una bandeja.



Figura 14. Retiro de las bolas del molino.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.4. Análisis granulométrico (ANGRA)

Para la determinación de análisis granulométrico se pesó en la balanza analítica modelo PATRICK'S 400 g de muestra (puzolana) y se colocó en el set de mallas, seguidamente se colocó el set de mallas más la muestra en el rotap TYLER modelo R-30050 durante 20 minutos el equipo estuvo ubicado en el Laboratorio de Mineralurgia de la ESME, transcurrido el tiempo se retiró el set de mallas, cuidadosamente luego se retiró cada malla y se pesó el material retenido en cada malla.



Figura 15. Rotap TYLER modelo R-30050 con el set de mallas utilizadas para la determinación del ANGRA.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.5. Pérdida por calcinación

Para la determinación de la pérdida por calcinación se pesó 10 g de muestra y se pesó los crisoles para cada muestra, se hizo uso del horno del laboratorio metalúrgico de la ESME de la marca MRC, el procedimiento desarrollado fue paso a paso, para su cálculo respectivo se usó la fórmula [7] .



Figura 16. Horno de la marca MRC de la ESME utilizado para la determinación del % de calcinación.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. muestras de puzolana dentro del horno a una temperatura de 1223,15 K (950 °C).
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Procedimiento para la caracterización Química

Los análisis químicos se llevaron a cabo en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, en el laboratorio de microscopia, con el material debidamente molido y pasante de la malla n° 325, donde se utilizó la técnica del microscopio electrónico de barrido (SEM), para su respectivo análisis.

La prueba consiste en preparar pequeñas briquetas, antes de la preparación, las muestras estaban homogenizadas, cada muestra

se codificó tal como se muestra (Figura 18) y luego se llevó a una campana para que esté completamente seco durante 15 minutos (Figura 19), seguidamente se procedió a briquetear con el accesorio del microscopio electrónico de barrido las muestras (Figura 20), y por último se colocó cuidadosamente las muestras briqueteadas al microscopio electrónico de barrido para su respectiva caracterización química (Figura 21).

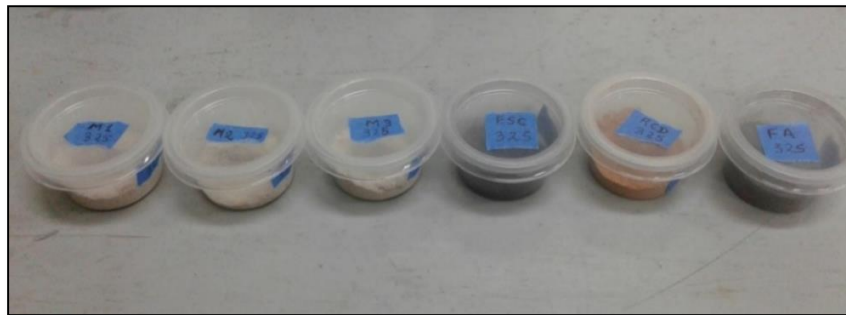


Figura 18. Codificación de las muestras para la caracterización química.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 19. Secado de las muestras de puzolana natural en la lámpara durante 15 minutos.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Recolección de la muestra en el accesorio del microscopio.
Fuente: Elaboración propia

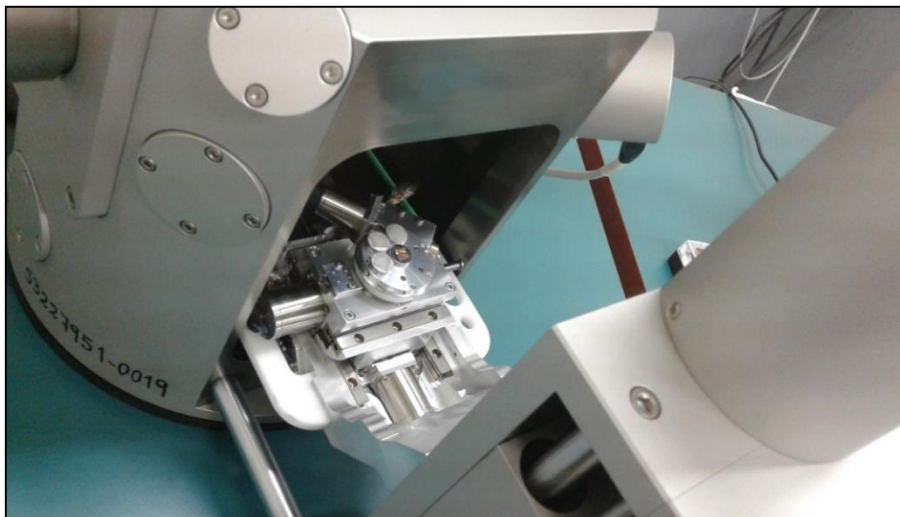


Figura 21. Briquetas en el microscopio electrónico de barrido para el análisis químico.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Procedimiento para la preparación de muestra

Seguidamente se realizó la preparación del molde y los cálculos de la cantidad de muestra que se utilizó, para esto se usó las muestras molidas pasante de la malla n° 325, cemento, arena supermix que cumple con la NTP 400.037 (ASTM C33) y agua, para realizar la mezcla se calculó las cantidades que se utilizó para cada mortero, a continuación, se indica los cálculos efectuados.

3.4.3.1. Dimensionamiento del mortero a nivel laboratorio

Dimensiones del molde a utilizar:

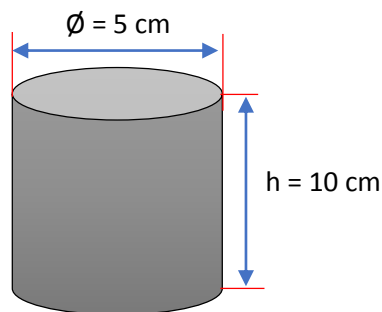


Figura 22. Dimensiones del molde.
Fuente: Elaboración propia.

$$V_{cilindro} = \pi r^2 \times H \quad [8]$$

Donde:

$V_{cilindro}$ = volumen total del cilindro

r = radio del cilindro

h = altura del cilindro

Reemplazando a la fórmula [8] se tuvo el volumen del cilindro:

$$V_{cilindro} = 196,35 \text{ cm}^3$$

Se usó la fórmula de la densidad [9] para hacer el cálculo del peso (m) para la fabricación del mortero, como dato calculado se tiene un valor para la densidad 2,1 g/cm³.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [9]$$

Donde:

$$\rho = \text{densidad g/cm}^3$$

$$m = \text{masa en g}$$

$$v = \text{volumen en cm}^3$$

Para la obtención de la masa del mortero se despejó la fórmula [9] y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$m = \rho \times v \quad [10]$$

$$m = 412,335 \text{ g de mortero}$$

Considerando una pérdida del 10 %, entonces se tendrá el siguiente valor:

$$m = 453,56 \text{ g aprox. un total de 455 g de mortero.}$$

Para la preparación de 3 morteros, cada mortero se hizo en diferentes tiempos de control en 7; 14 y 28 días de edades, entonces se necesitaron:

$$455 \times 3 = 1365 \text{ g (peso para 3 morteros)}$$

3.4.3.2. Cálculo de la cantidad de cemento, agregado, agua y puzolana

Se realizaron los siguientes cálculos para obtener las cantidades de cemento, agregado, agua y puzolana:

Cálculo del binder en proporción al peso:

$$1 \text{ binder} + 1 \text{ arena} + 0,5 \text{ agua}$$

Cálculo de los pesos de la arena, cemento y puzolana para la preparación al 10 % de reemplazo para 3 morteros:

$$1365 \div 2,5 = 546 \text{ g binder de cemento}$$

$$546 \times 0,1 = 54,6 \text{ g de puzolana natural}$$

$$546 \text{ g} - 54,6 = 491,4 \text{ g de cemento}$$

$$546 \div 2 = 273 \text{ g de agua .}$$

$$546 \times 1 = 546 \text{ g de arena gruesa supermix}$$

Cálculo de los pesos de la arena, cemento y puzolana para la preparación al 20 % de reemplazo para 3 morteros:

$$546 \times 0,2 = 109,2 \text{ g de puzolana natural}$$

$$546 \text{ g} - 109,2 = 436,8 \text{ g de cemento}$$

$$546 \div 2 = 273 \text{ g de agua}$$

$$546 \times 1 = 546 \text{ g de arega gruesa supermix}$$

Cálculo de los pesos de la arena, cemento y puzolana para la preparación al 30 % de reemplazo para 3 morteros:

$$546 \times 0,3 = 163,8 \text{ g de puzolana natural}$$

$$546 \text{ g} - 163,8 = 382,2 \text{ g de cemento}$$

$$546 \div 2 = 273 \text{ g de agua}$$

$$546 \times 1 = 546 \text{ g de arega gruesa supermix}$$

Cálculo de los morteros para el control de los 28 días de las muestras Fly Ash, escoria y Rcd proporcionadas por los ingenieros geólogos para hacer un análisis comparativo.

Tabla 6
 Proporción de las cantidades para la edad de los 28 días

Reemplazo	Muestra	puzolana (g)	cemento (g)	arena (g)	agua (g)
al 10 % de reemplazo	F	18,2	163,8	182	91
	R	18,2	163,8	182	91
	E	18,2	163,8	182	91
al 20 % de reemplazo	F	36,4	145,6	182	91
	R	36,4	145,6	182	91
	E	36,4	145,6	182	91
al 30 % de reemplazo	F	54,6	127,4	182	91
	R	54,6	127,4	182	91
	E	54,6	127,4	182	91

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4. Procedimiento para el diseño de mezcla

Para la realización del diseño de mezcla se trabajó con los pesos calculados en el punto 3.4.3.2, después se utilizó tubos de plástico PVC con las dimensiones del punto 3.4.3.1, estos tubos se cortaron de acuerdo a las medidas indicadas anteriormente, se colocaron sus respectivas tapas y se codificaron (Figura 23).



Figura 23. Tubos utilizados para el moldeo de las probetas con sus respectivas tapas y codificadas.
Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se pesó las cantidades de las puzolanas naturales calculados en el punto 3.4.3.2, según la figura se puede observar el cemento más la adición de la puzolana natural para el diseño de mezcla (Figura 24).



Figura 24. Cemento más la adición de la puzolana natural para el diseño de la mezcla.

Fuente: Elaboración propia.

Luego se procedió a pesar las cantidades calculadas según la Tabla 6, para las muestras proporcionadas por los Ing. Rubén Cahuana y Jonathan Zavaleta, Fly Ash, escoria y Rcd (Figura 25), para las muestras mencionadas se hicieron el diseño de mezcla para poder comparar los resultados a la edad de los 28 días.



Figura 25. Cantidades de Fly Ash, Escoria y los Rcd usados para el diseño de mezcla a la edad de 28 días.
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al uso de la arena gruesa supermix, la cantidad usada fue según el cálculo que se hizo en el punto 3.4.3.2 y la Tabla 6 para el diseño de muestras (Fly Ash, escoria y Rcd) y la granulometría del agregado se puede observar (Figura 26).



Figura 26. Granulometría del agregado supermix utilizado en la mezcla para la probeta.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener la masa (g) de los materiales necesarios para el diseño de mezcla, estas necesitaban una buena compactación y para ello se utilizó una mesa vibratoria (Figura 27), con el fin de obtener una mezcla compactada y sin poros o encapsulamiento de oxígeno, las mezclas dentro del molde se tuvieron que pasar por la mesa vibratoria durante 10 segundos cada probeta.



Figura 27. Compactación de la probeta dentro del molde durante 10 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

Los moldes compactados (Figura 28) se dejaron hasta el día siguiente para colocarlos en una bandeja con agua, luego se tapó con un trapo húmedo, seguidamente con un plástico hermético se cubrieron las bandejas durante 5 días con este procedimiento se logra una buena hidratación del mortero (ANEXO 1).



Figura 28. Moldes con las probetas compactadas.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez cumplido con los 5 días, se retiró las muestras de la bandeja para ser desmoldado y codificados para el control de resistencia a la compresión en las edades de 7; 14 y 28 días de rotura, las probetas que se codificaron fueron las siguiente: M1=PA; M2=PB; M3=PC; Fly Ash =F; Escoria= E y Rcd=R.

3.4.5. Procedimiento para el ensayo a la compresión

Para este procedimiento de la resistencia a la compresión se utilizó un equipo de compresión (Figura 29), las primeras roturas se hicieron a 6 muestras diseñados con reemplazos de 10; 20 y 30 % de puzolana natural más la muestra de control sin ningún reemplazo a la edad de 7 días.



Figura 29. Equipo de compresión utilizada para las roturas de las probetas a diferentes edades de 7; 14 y 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5.1. Procedimiento de la prueba de compresión a la edad de 7 días

Para la realización de la rotura de las probetas a la edad de 7 días, se utilizó una lija con el cual se hizo el lijado para que las superficies de las bases sean iguales, seguidamente se colocó en el equipo de compresión la probeta (Figura 30), luego se procedió al encendido del equipo y finalmente a la rotura de la probeta (Figura 31), los datos se obtuvieron del tablero digital del equipo (Figura 32), en el tablero digital se mostraron la carga inicial y final de la resistencia, estos son anotados en la tabla de resultados.



Figura 30. Encendido del equipo e inicio de la rotura de la primera probeta a la edad de 7 días.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 31. Rotura de las probetas a la edad de 7 días.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 32. Datos mostrados de la carga inicial y final de la rotura de la probeta.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.5.1. Procedimiento de la prueba de compresión a la edad de 14 días

días

Para la prueba de compresión a la edad de 14 días se utilizó una lija para el lijado de las probetas para que las superficies de las bases sean iguales, seguidamente se colocó en el equipo de compresión la probeta acomodando en el centro (Figura 33), luego se procedió al encendido del equipo y finalmente a la rotura de la probeta (Figura 34), los datos obtenidos del tablero digital indicaron la carga inicial y final, estos son anotados en la tabla de resultados.



Figura 33. Ajuste de la probeta en el equipo de compresión a la edad de 14 días.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 34. Rotura de las probetas a los 14 días.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.5.1. Procedimiento de la prueba de compresión a la edad de 28 días

Para la prueba final de compresión a la edad de los 28 días se hicieron las roturas de las probetas que contienen adiciones de puzolana natural más las muestras proporcionadas por los ingenieros geólogos (Fly Ash, Escoria y Rcd) para la comparación de resultados.

Se utilizó una lija para el lijado de las probetas para que las superficies de las bases sean iguales, seguidamente se colocó en el equipo de compresión la probeta acomodando en el centro (Figura 35), luego se procedió al encendido del equipo y finalmente

a la rotura de las probetas (Figura 36), los datos obtenidos del tablero digital indicaron la carga inicial y final, estos son anotados en la tabla de resultados.



Figura 35. Probeta en el ensayo de compresión a la edad de los 28 días.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 36. Rotura de la muestra (M1, M2, M3, F, E, R y la MP) a la edad de 28 días.

Fuente: Elaboración propia

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Para la investigación de las características físicas y químicas de las puzolanas naturales se usó el programa c. Microsoft office (Excel), para el procesamiento y análisis cuantitativo de datos, también se usó d. google earth para identificar la zona de toma de muestra. En base a las características es posible definir el índice de actividad puzolánico según al comportamiento químico y físico de las puzolanas naturales de la localidad de Tacna.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados de la caracterización física

4.1.1.1. Resultados de la determinación del % de humedad

Utilizando la fórmula [4] para el cálculo del % de humedad se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 7
Resultados del % de humedad

Muestra	% humedad
Puzolana M1	5
Puzolana M2	5,8
Puzolana M3	5,3
Rcd	-
Fly Ash	14
Escoria	-

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.2. Resultados de la densidad aparente y real

Reemplazando a la fórmula [5] y [6] se obtuvieron los siguientes resultados de la densidad aparente y real, cada prueba se realizó 5 veces para tener un valor promedio.

Tabla 8
Resultados de la densidad aparente y real

Muestra	Densidad g/cm ³	
	Aparente	Real
Puzolana M1	1,156	1,419
Puzolana M2	1,143	1,410
Puzolana M3	1,150	1,420
Rcd	1,023	2,154
Fly Ash	0,618	1,534
Escoria	2,053	3,179

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.3. Resultados del análisis granulométrico (ANGRA).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis granulométrico de la puzolana natural después de la molienda realizado en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de la UNJBG.

Tabla 9
Resultados del ANGRA de la puzolana natural M1

ANGRA puzolana M1						
N° de malla Tyler	Abertura μm	Peso kg	Peso g	% Parcial	% Acumulado retenido	% Acumulado pasante
30	595	0,002	2	0,5	0,5	99,5
50	297	0,005	5	1,25	1,75	98,25
70	210	0,017	17	4,25	6	94,00
100	150	0,014	14	3,5	9,5	90,50
140	120	0,059	59	14,75	24,25	75,75
200	75	0,022	22	5,5	29,75	70,25
325	45	0,077	77	19,25	49	51,00
Ciega		0,204	204	51	100	0,00
Total			400	100		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10
Resultados del ANGRA de la puzolana natural M2

ANGRA puzolana M2						
N° de malla Tyler	Abertura μm	Peso kg	Peso g	% Parcial	% Acumulado retenido	% Acumulado pasante
30	595	0,003	3	0,75	0,75	99,25
50	297	0,004	4	1	1,75	98,25
70	210	0,019	19	4,75	6,5	93,50
100	150	0,017	17	4,25	10,75	89,25
140	120	0,059	59	14,75	25,5	74,50
200	75	0,023	23	5,75	31,25	68,75
325	45	0,07	70	17,5	48,75	51,25
Ciega		0,205	205	51,25	100	0,00
Total			400	100		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11
Resultados del ANGRA de la puzolana natural M3

N° de malla Tyler	Abertura µm	ANGRA puzolana M3				
		Peso kg	Peso g	% Parcial	% Acumulado retenido	% Acumulado pasante
30	595	0,002	2	0,5	0,5	99,50
50	297	0,004	4	1	1,5	98,50
70	210	0,017	17	4,25	5,75	94,25
100	150	0,016	16	4	9,75	90,25
140	120	0,06	60	15	24,75	75,25
200	75	0,021	21	5,25	30	70,00
325	45	0,079	79	19,75	49,75	50,25
Ciega		0,201	201	50,25	100	0,00
Total			400	100		

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se mostrará los resultados obtenidos del análisis granulométrico de las muestras suministradas, se realizó en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de la UNJBG.

Tabla 12
Resultados del ANGRA del Fly Ash

N° de malla Tyler	Abertura µm	ANGRA FLY ASH				
		Peso kg	Peso g	% Parcial	%Acumulado retenido	% Acumulado pasante
30	595	0,006	6	1,63	1,63	98,37
50	297	0,001	1	0,27	1,90	98,10
70	210	0,001	1	0,27	2,17	97,83
100	150	0,003	3	0,81	2,98	97,02
140	120	0,017	17	4,61	7,59	92,41
200	75	0,021	21	5,69	13,28	86,72
325	45	0,070	70	18,97	32,25	67,75
Ciega		0,250	250	67,75	100,00	0,00
Total			369	100		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13
Resultados del ANGRA de la escoria

ANGRA escoria						
N° de malla Tyler	Abertura µm	Peso kg	Peso g	% Parcial	% Acumulado retenido	% Acumulado pasante
30	595	0,053	53	10,60	10,60	89,40
50	297	0,006	6	1,20	11,80	88,20
70	210	0,025	25	5,00	16,80	83,20
100	150	0,021	21	4,20	21,00	79,00
140	120	0,096	96	19,20	40,20	59,80
200	75	0,04	40	8,00	48,20	51,80
325	45	0,094	94	18,80	67,00	33,00
Ciega		0,165	165	33,00	100,00	0,00
Total			500	100		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14
Resultados del ANGRA de los Rcd

ANGRA Rcd						
N° de malla Tyler	Abertura µm	Peso kg	Peso g	% Parcial	% Acumulado retenido	% Acumulado pasante
30	595	0,003	3	0,75	0,75	99,25
50	297	0,002	2	0,5	1,25	98,75
70	210	0,003	3	0,75	2	98,00
100	150	0,017	17	4,25	6,25	93,75
140	120	0,068	68	17	23,25	76,75
200	75	0,06	60	15	38,25	61,75
325	45	0,12	120	30	68,25	31,75
Ciega		0,127	127	31,75	100	0,00
Total			400	100		

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.4. Resultados de la pérdida por calcinación

Con los datos obtenidos del procedimiento y aplicando la fórmula [7], se obtuvieron los siguientes resultados tanto para la puzolana y las muestras suministradas para su respectiva comparación.

Tabla 15
Datos y resultados de la pérdida de calcinación

Muestras	Peso crisol g	Peso muestra inicial g	Peso del crisol más la muestra calcinado g	Peso muestra final g	Pérdida por calcinación %
Puzolana	41,77	10,0078	51,6588	9,89	1,14
Escoria	45,68	10,0744	56,1573	10,48	-4,03
Rcd	43,83	10,0781	53,8796	10,05	0,31
Fly Ash	40,70	10,0057	49,8774	9,17	8,32

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Resultados de la caracterización química

En la Tabla 16 se muestra los resultados obtenidos del análisis con el microscopio electrónico de barrido (SEM), el análisis es por elemento tanto para las puzolanas y las muestras suministradas por los ingenieros geólogos para su respectivo análisis comparativo.

Tabla 16
Resultados del SEM por elemento

Análisis por elemento	Muestras					
	Puzolana natural			Rcd	Escoria	Fly Ash
	M1	M2	M3			
Na	2,75	2,78	2,75	1,52	0,00	0,00
Mg	0,32	0,24	0,36	1,45	0,00	0,61
Al	6,70	6,41	6,21	9,11	0,00	12,00
Si	35,03	35,03	34,82	27,73	16,12	23,16
Cl	0,00	0,87	0,89	0,00	0,00	0,00
K	4,47	4,31	4,51	2,81	1,68	1,94
Ca	1,03	0,94	1,15	5,22	3,75	0,58
Fe	1,04	1,12	1,20	5,58	41,47	3,03
Co	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01	0,00
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,99
O	48,66	48,30	48,11	46,12	34,34	52,82
S	0,00	0,00	0,00	0,46	1,26	0,00
Total	100	100	100	100	100	100

Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

En la Tabla 17 se muestra los resultados obtenidos del análisis con el microscopio electrónico de barrido (SEM), los resultados obtenidos es por compuesto estos resultados son para validar con la norma AST C618 donde indica que la suma de (% SiO₂+% Al₂O₃+% Fe₂O₃) debe de tener un mínimo del 70 %.

Tabla 17
Resultados del SEM por compuesto

Análisis por compuesto	Muestras			Rcd	Escoria	Fly Ash
	Puzolanas naturales M1	M2	M3			
Na ₂ O	3,71	3,74	3,70	2,04	0,00	0,00
MgO	0,53	0,40	0,60	2,41	0,00	1,01
Al ₂ O ₃	12,66	12,1	11,73	17,22	0,00	22,67
SiO ₂	74,93	74,92	74,49	59,32	3,17	49,53
K ₂ O	5,39	5,20	5,43	3,39	2,02	2,34
CaO	1,44	1,32	1,62	7,31	5,25	0,82
Fe ₂ O ₃	1,33	1,44	1,54	7,17	53,35	3,90
SO ₃	0,00	0,00	0,00	1,14	3,17	0,00
CoO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00
CuO	0,00	0,00	0,00	0,00	1,26	0,00
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,28
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,45

Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

En el diagrama ternario se identificaron la clase de puzolana estudiada en este trabajo de tesis, con los datos de la Tabla 17 se construye la siguiente figura:

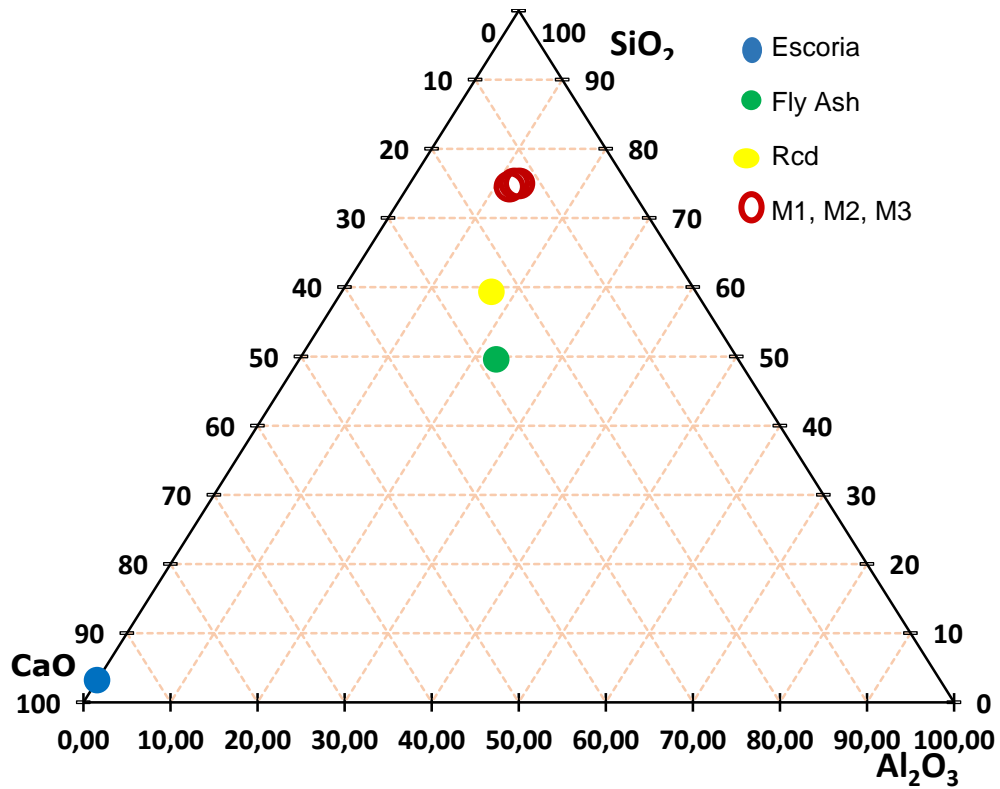


Figura 37: Diagrama ternario de la puzolana M1; M2; M3; escoria; Fly Ash y Rcd.

Fuente: Elaboración propia.

Se observaron las microestructuras de la puzolana natural y estas presentan cristales más finos y amorfos que el resto como se muestran en las figuras (Figura 38; 39 y 40), lo cual da un buen indicio de un importante contenido de sílice reactiva en su composición, de la misma manera se observan las microestructuras de las muestras de Fly Ash, escoria y Rcd (Figura 41; 42 y 43).

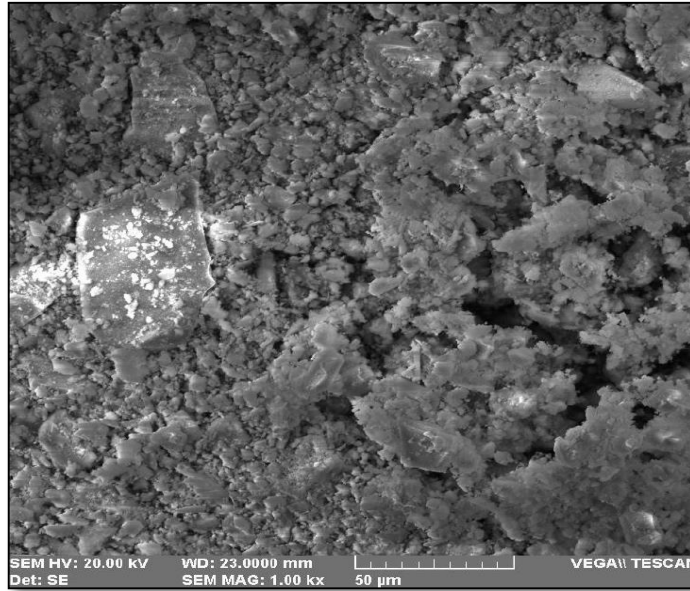


Figura 38. Microestructura de la puzolana M1 a un aumento de 1000X.
Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

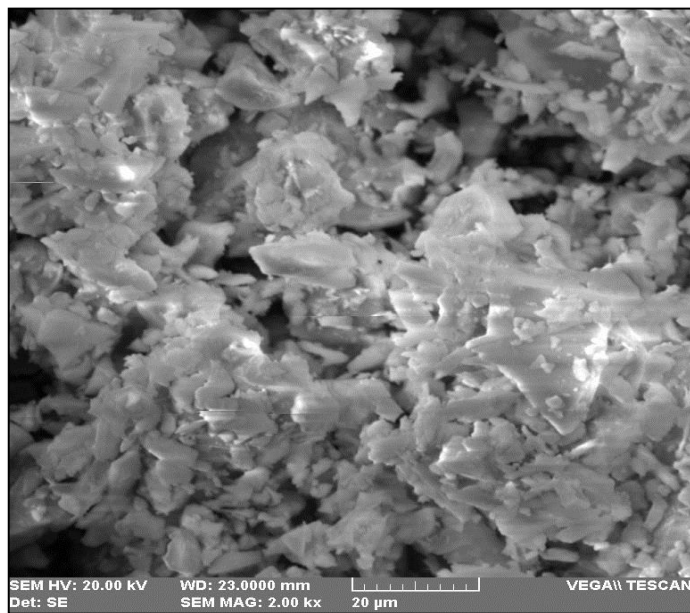


Figura 39. Microestructura de la puzolana M2 a un aumento de 2000X.
Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

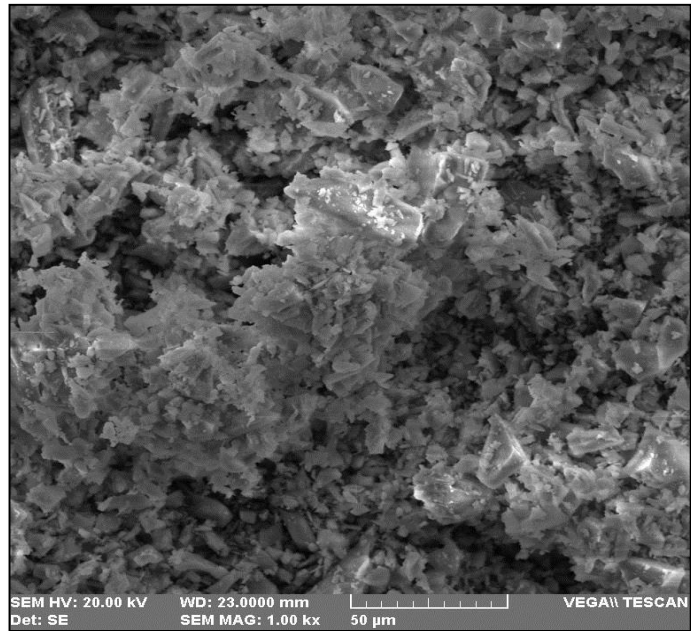


Figura 40. Microestructura de la puzolana M3 a un aumento de 2000X.
Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

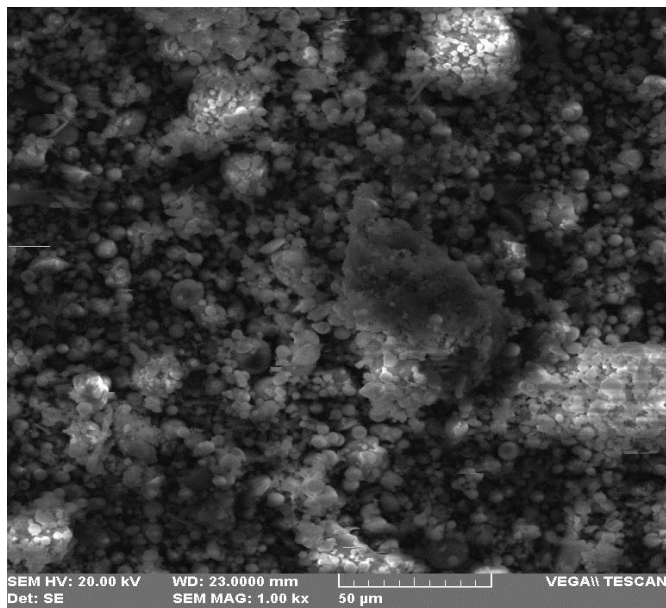


Figura 41. Microestructura del Fly Ash a un aumento de 1000X.
Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

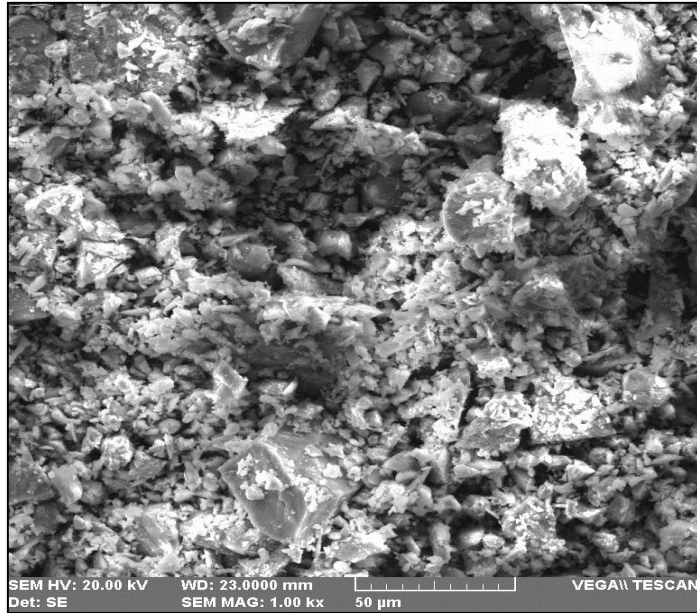


Figura 42. Microestructura de la escoria a un aumento de 1000X.

Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

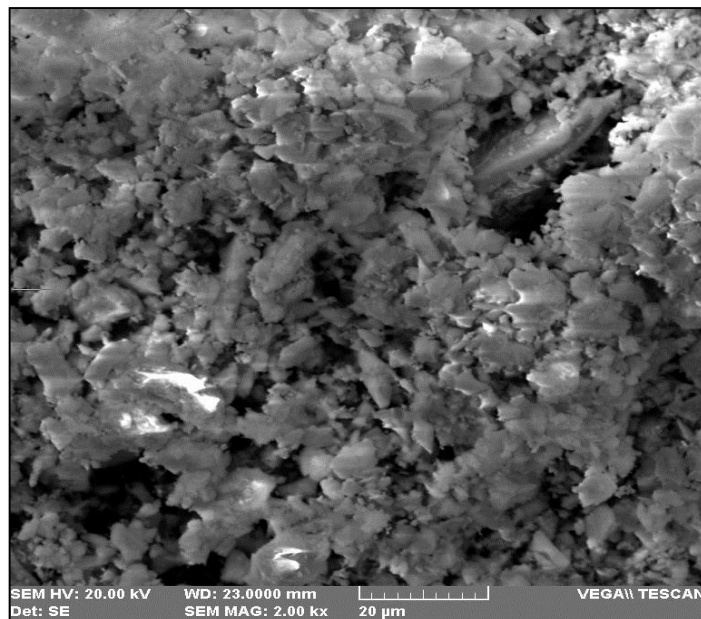


Figura 43. Microestructura del Rcd a un aumento de 2000X.

Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

4.1.3. Resultados de las pruebas de compresión a la edad de 7 días

La puzolana M1, M2 y M3 son reemplazados por PA, PB y PC para los resultados de la resistencia a la compresión.

Tabla 18
Resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 7 días.

Muestra	Reemplazo %	Control a los 7 días			Área de la base cm ²	Resistencia kg/cm ²	Resistencia %
		Carga Final kg	Carga Inicial kg	Carga neta kg			
Puzolana	10	3550	1060	2490	19,634	126,818	60,390
PA	20	3940	1040	2900	19,634	147,700	70,333
	30	3560	1050	2510	19,634	127,837	60,875
Puzolana	10	4590	1070	3520	19,634	179,277	85,370
PB	20	4460	1070	3390	19,634	172,656	82,217
	30	3170	1070	2100	19,634	106,955	50,931
Puzolana	10	4220	1150	3070	19,634	156,358	74,456
PC	20	3470	1160	2310	19,634	117,651	56,024
	30	3430	1070	2360	19,634	120,197	57,237
Muestra patrón		3850	1100	2750	19,634	140,060	66,695
Muestra patrón		3950	1100	2850	19,634	145,154	69,121

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Resultados de la prueba de compresión a la edad de 14 días

Tabla 19

Resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 14 días.

Control a los 14 días							
Muestra	Reemplazo	Carga Final	Carga Inicial	Carga neta	Área del cilindro	Resistencia	Resistencia
	%	kg	kg	kg	cm ²	kg/cm ²	%
	10	6290	1050	5240	19,634	266,9	127,085
Puzolana	20	5580	1050	4530	19,634	230,7	109,866
PA	30	4660	1060	3600	19,634	183,4	87,310
	10	5850	1030	4820	19,634	245,5	116,899
Puzolana	20	5300	1030	4270	19,634	217,5	103,560
PB	30	4610	990	3620	19,634	184,4	87,795
	10	4240	1040	3200	19,634	163,0	77,609
Puzolana	20	4730	980	3750	19,634	191,0	90,948
PC	30	3990	960	3030	19,634	154,3	73,486
Muestra patrón		5190	1070	4120	19,634	209,8	99,922
Muestra patrón		5350	1070	4280	19,634	218,0	103,802

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Resultados de la prueba de compresión a la edad de 28 días

Tabla 20

Resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 28 días.

Control a los 28 días							
Muestra	Reemplazo	Carga final	Carga inicial	Carga neta	Área de la base	Resistencia	Resistencia
	%	kg	kg	kg	cm ²	kg/cm ²	%
	10	5110	1030	4080	19,634	207,8	98,952
Puzolana	20	5020	1030	3990	19,634	203,2	96,769
PA	30	5350	1030	4320	19,634	220,0	104,773
	10	5280	910	4370	19,634	222,6	105,985
Puzolana	20	6160	1060	5100	19,634	259,7	123,690
PB	30	4160	1000	3160	19,634	160,9	76,639
	10	5430	990	4440	19,634	226,1	107,683
Puzolana	20	4130	920	3210	19,634	163,5	77,852
PC	30	4910	930	3980	19,634	202,7	96,527
	10	4730	910	3820	19,634	194,6	92,646
Rcd	20	4770	920	3850	19,634	196,1	93,374
R	30	4360	900	3460	19,634	176,2	83,915
	10	5040	940	4100	19,634	208,8	99,437
Escoria	20	4930	910	4020	19,634	204,7	97,497
F	30	4420	920	3500	19,634	178,3	84,885
	10	4810	870	3940	19,634	200,7	95,556
Fly Ash	20	5200	840	4360	19,634	222,1	105,743
F	30	5070	970	4100	19,634	208,8	99,437
muestra patrón		6030	1030	5000	19,634	254,7	121,264

Fuente: elaboración propia.

4.1.6. Resultados del poder cementante y/o índice de actividad puzolánica con portland.

Tabla 21

Resultados de índice de puzolanidad a la edad de 7 días

Muestra	Reemplazo %	índice de actividad puzolánica
Puzolana PA	10	88,929
	20	103,571
	30	89,643
Puzolana PB	10	125,714
	20	121,071
	30	75,000
Puzolana PC	10	109,643
	20	82,500
	30	84,286

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

Resultados de índice de puzolanidad a la edad de 14 días

Muestra	Reemplazo %	índice de actividad puzolánica
Puzolana PA	10	127,184
	20	109,951
	30	87,379
Puzolana PB	10	116,990
	20	103,641
	30	87,864
Puzolana PC	10	77,670
	20	91,019
	30	73,544

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23
Resultados de índice de puzolanidad a la edad de 28 días.

Muestra	Reemplazo %	índice de actividad puzolánica
	10	81,60
	20	79,80
Puzolana PA	30	86,40
	10	87,40
	20	102,00
Puzolana PB	30	63,20
	10	88,80
	20	64,20
Puzolana PC	30	79,60
	10	76,40
	20	77,00
Rcd R	30	69,20
	10	82,00
	20	80,40
Escoria F	30	70,00
	10	78,80
	20	87,20
Fly Ash F	30	82,00

Fuente: Elaboración propia.

4.1.7. Resultados y comparación de resistencia a la compresión mediante gráficos

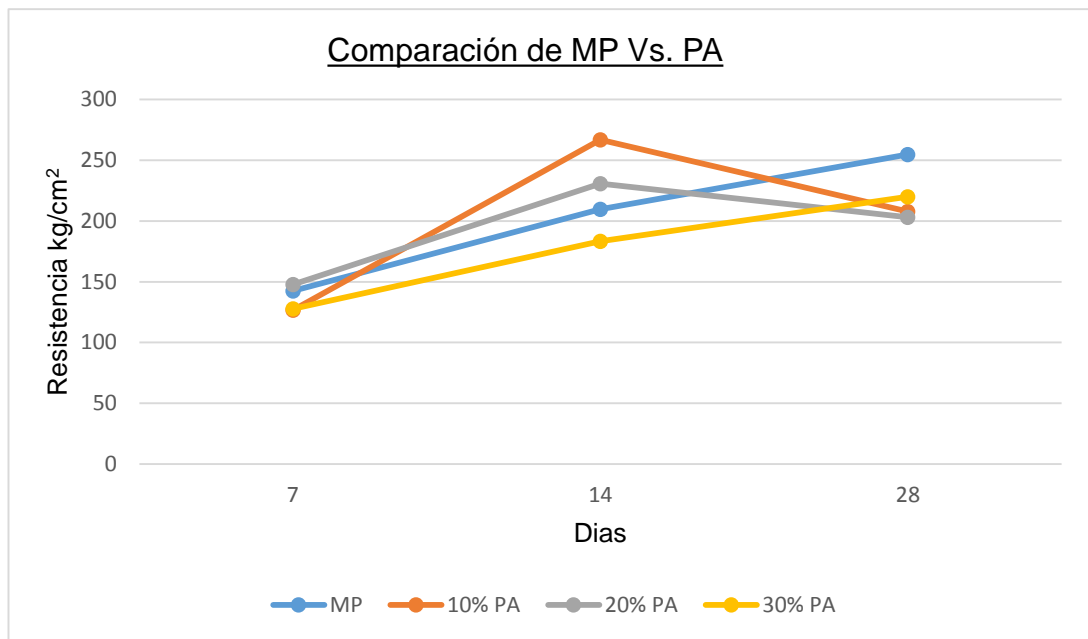


Figura 44. Comparación de Resistencia MP Vs. PA.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 44, la comparación de la PM (muestra patrón) con la muestra PA (adición de puzolana M1) de resistencias, el mejor comportamiento se puede observar que es la de adición al 30 % de PA.

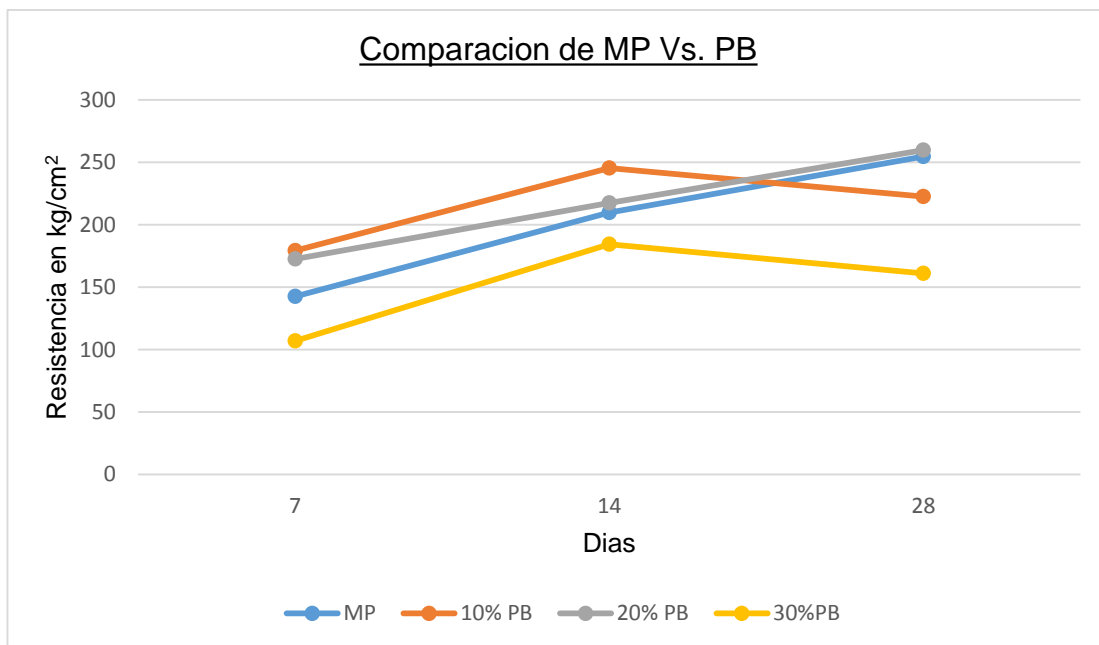


Figura 45. Comparación de Resistencia MP Vs. PB.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 45 se observa que la adición de PB (Puzolana M2) al 20 % presenta una resistencia ascendente frente a la muestra patrón, mientras las demás muestras tienden a disminuir.

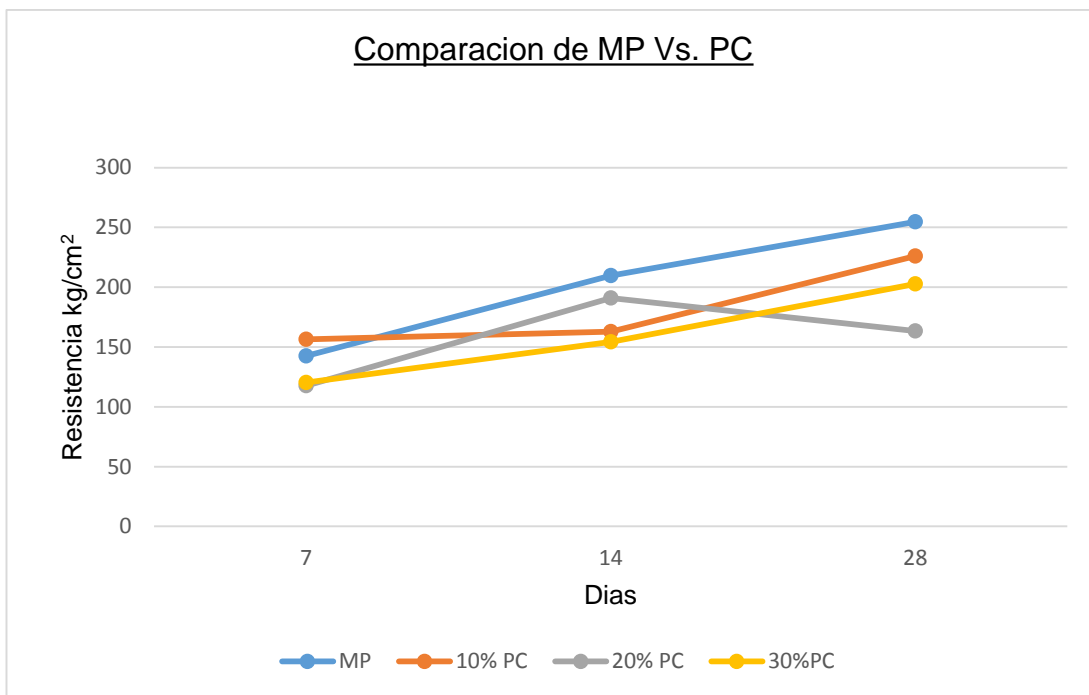


Figura 46. Comparación de Resistencia MP Vs. PC.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 46 se observa la resistencia de la MP (muestra patrón) con las muestras PC (puzolana M3), la figura indica que tiene una buena resistencia las adiciones al 10 % y 30 % de PC, y la resistencia aumenta en la edad de 14 y 28 días.

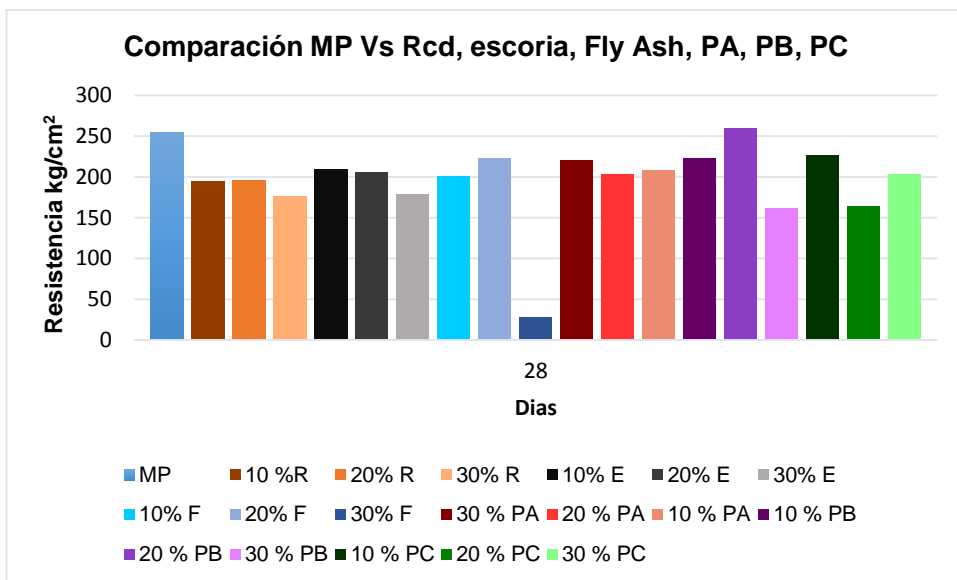


Figura 47. Comparación de Resistencia a los 28 días del Fly Ash, Escoria y Rcd.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 47 se puede observar que la adición de Fly Ash (F) al 20 % muestra una resistencia a la compresión con un valor de 222,1 kg/cm² frente a las demás muestras, la muestra patrón tiene una resistencia de 254,71 kg/cm², la adición de puzolana natural de la muestra PB al 10 %; 20 % y PC al 10 % presentan resistencias superiores a los 210 kg/cm².

Tabla 24

Resumen de los resultados químicos

Muestra	Tipo Puzolana	Clasificación según ASTM C618	Requisitos (%SiO ₂ + %Al ₂ O ₃ + %Fe ₂ O ₃)	Químicos requeridos para la puzolana			
				% SO ₃	% LOI	% Humedad	% Álcalis Na ₂ O
M1	Natural	Clase N	88,92	0,00	1,14	5,0	3,71
M2	Natural	Clase N	88,46	0,00	1,14	5,8	3,74
M3	Natural	Clase N	87,76	0,00	1,14	5,3	3,70
Rcd	Sintética	Clase N	83,71	1,14	0,31	0,0	2,04
Esc	Sintética	N/A	56,52	3,17	-4,03	0,0	0,00
FA	Sintética	Clase C	76,10	0,00	8,32	14,0	0,00

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 24 se muestran los resultados de los análisis químicos realizados a las muestras M1, M2, M3, Fly Ash, Escoria y Rcd, se analizó los requisitos de cumplimiento para cada muestra y a continuación se mencionan si cumple o no con los requerimientos.

a) Requisito químico:

M1, M2, M3 y Rcd: Cumple (% SiO₂+% Al₂O₃+% Fe₂O₃ > 70 %)

FA: Cumple (% SiO₂+% Al₂O₃+% Fe₂O₃ > 70 %)

ESC: No cumple (% SiO₂+% Al₂O₃+% Fe₂O₃ > 70 %)

b) Requisito químico: Máximo % SO₃

M1, M2, M3, Rcd, FA y ESC = Cumple

c) Requisito químico: Máximo % de humedad

M1, M2, M3 y FA = No Cumple

Rcd y ESC = Cumple

d) Requisito químico: Máximo % LOI

M1, M2, M3, ESC y Rcd: Cumple

FA = No Cumple

e) Requisito químico: Máximo % Álcalis

M1, M2, M3 y Rcd = No Cumple

FA y ESC = Cumple

Tabla 25

Rango de estado con relación al índice de puzolanidad.

Muy malo (<65)	1
Malo (66-73)	2
Suficiente (74-82)	3
Bueno (83-91)	4
Muy bueno (92-100)	5
Excelente(>100)	6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Resumen de índice de puzolanidad a los 28 días, comparativo con el rango de estado del 1 al 6 de la Tabla 25

Muestra	Reemplazo %	Índice de actividad puzolánica	Rango de estado
	10	81,6	3
Puzolana	20	79,8	3
PA	30	86,4	4
	10	87,4	4
Puzolana	20	102,0	6
PB	30	63,2	1
	10	88,8	4
Puzolana	20	64,2	1
PC	30	79,6	3
	10	76,4	3
Rcd	20	77,0	3
R	30	69,2	2
	10	82,0	3
Escoria	20	80,4	3
E	30	70,0	2
	10	78,8	3
Fly Ash	20	87,2	4
F	30	82,0	3

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Análisis de resultados

- Las puzolanas naturales M1, M2 y M3 cumplen con todos los requisitos químicos menos con el requisito suplementarios de máximo % álcalis, como indica la Tabla 24, este requisito se debe evaluar con el tipo de cemento que se va a utilizar y así evitar reacciones químicas que generen mayor eflorescencia de sales alcalinas. Por otro lado, el % humedad no es muy alto, pero sí se debe tener en cuenta ya que afectaría el proceso de molienda y adición al cemento, por lo que se recomienda un secado previo.
- El Fly Ash, según el diagrama ternario corresponde a la puzolana clase C, por el mayor contenido en CaO, producto de la quema de carbón sub bituminoso o lignito en la planta termoeléctrica del cual proviene. Cumple con todos los requisitos menos con máximo % LOI (pérdida por ignición), esto se atribuye a que esta ceniza volante no ha tenido un buen proceso de quemado, por lo cual aún presenta partículas volátiles, lo cual es una gran desventaja como aditivo para cemento ya que los compuestos volátiles podrían generar reacciones químicas que disminuyen la resistencia final del cemento. Y máximo % álcalis al igual que en las puzolanas naturales se tiene que evaluar el tipo de cemento al que se

adicionará. Por otro lado, el % humedad es muy alto, por lo que se debe secar previamente antes de utilizarse como adición.

- El Rcd: Presenta un comportamiento químico similar a las puzolanas naturales, esto debido a que su origen procede principalmente de residuos de ladrillos fabricados con arcilla natural calcinada. Cumple con todos los requisitos químicos menos con el requisito suplementario de máximo % álcalis, como indica la Tabla 24, este requisito se debe evaluar con el tipo de cemento que se va a utilizar y así evitar reacciones químicas que generen mayor eflorescencia de sales alcalinas.
- Escoria: La escoria de fundición de cobre, presenta un comportamiento químico que no clasificaría como un tipo de puzolana conocida, por la falta de Al_2O_3 y bajo contenido en SiO_2 ; sin embargo, su alto contenido en Fe_2O_3 , permitiría clasificarla como puzolana clase C con lo cual cumpliría con todos los requisitos químicos.
- En los ensayos de resistencia a la compresión en diferentes tiempos de fraguado se obtuvo los resultados mostrados en la Tabla 18 y 19 en kg/cm^2 a los 7 y 14 días de edad, en % a la compresión a los 7 días debe de tener un % mínimo de 67,50 % de resistencia y a los 14 días un mínimo del 90 % como la carga al 100 % del equipo de

compresión en 210 kg/cm^2 , entonces a los 28 días se debe obtener valores iguales o mayores al 100 %, estos % se cumplen en la mayoría de los resultados de la Tabla 18; 19 y 20.

- El índice de actividad puzolánica y/o poder cementante a los 7 días de edad están en un rango bueno requerido para la adición de la puzolana natural, y el índice de puzolana a los 14 días de la misma manera están dentro del rango aceptable para su uso.
- Los resultados de las muestras a los 28 días sirven para obtener el índice de actividad puzolánica, como se observa en la Tabla 26, la PB al 30 % y PC al 20 % de remplazado en los resultados indican muy malo y Rcd al 30 %, escoria al 30 % indica con un rango de malo esto quiere decir que no cumple con el requerimiento, y la gran mayoría de las muestras con diferentes % de adición están en el rango suficiente y bueno y esto demuestra que algunas adiciones cumplen con el requerimiento a los 28 días de edad (Tablas 21 y 22).

CONCLUSIONES

- Dentro de la tesis realizada se concluye que los resultados de la caracterización física y química de la muestra de puzolana natural de la localidad de Tacna tiene valor cementante como material puzolánico, con respecto al análisis físico y químico se determinó la densidad aparente y real, % de humedad y sobretodo se superó en el análisis granulométrico requerido de un 34 % pasante de la malla n°325 a un 50 % pasante, esto se logró con una molienda en un tiempo de 30 minutos.
- Se concluye que la realización del análisis químico y microscópico vía SEM las puzolanas cumplen con los requerimientos químicos de un mínimo del 70 % ($\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3$), se obtuvo para M1 (99,92 %); M2 (88,46 %) y para M3 (87,76 %), % LOI para las tres muestras se tiene un valor de 1,14 % y el % de humedad promedio es 5,37 %, pero no cumple con el requisito suplementario de máximo % álcalis.
- Se concluye que con los resultados del poder cementante, se puede decir que más del 50 % de las muestras están en un rango bueno y suficiente, indicando que la puzolana natural de la localidad de Tacna es un buen material para usar en un porcentaje en la mezcla del concreto.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda completar ensayos físicos con otros métodos para evaluar la puzolanidad. Para determinar la actividad puzolánica de las muestras existentes dentro de la localidad de Tacna existen diferentes métodos tanto de carácter químico como mecánico. Otros métodos mecánicos para evaluar la puzolanidad son los de Feret y Pauli (módulo de la efectividad de la puzolana).
- Completar los ensayos de diseño de mezcla para ver la funcionalidad del concreto adicionado en otras condiciones de humedad como son ensayo de slump, durabilidad, ataque por sales.
- Completar las evaluaciones con espectroscopia DRX (Difracción de rayos X) a detalle de las puzolanas naturales, también hacer pruebas de los 7 y 14 días de edad de las cenizas volantes, Rcd y escoria, porque estos son materiales que existen en abundancia y la reutilización como material aditivo sería una buena forma de reciclar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C 618, (1994). “*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in portland Cement Concrete,*” Annual Book of ASTM Standards.
- Cahuana, Rubén, (octubre, 2017). *Potencial para la fabricación de cementos alcalinos y geopolímeros en el sur del Perú*, IV Semana geológica – geotécnica, UNJBG Tacna.
- Comité ACI 232, (1994). “*El uso de puzolanas naturales en concreto*”, Materiales ACI Diario, Vol. 91, No. 4, pp. 410-426.
- Díaz, A., Carpio, M. & Ramírez, J. (2011). *Estudio geológico económico de las rocas y minerales industriales en las regiones de Moquegua y Tacna*. INGEMMET, Boletín, Serie B: *Geología Económica*, 26, 166 p., 3 mapas.
- Donoso Zegers, C. (1992). *Ecología forestal*. Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Erdogan, TY, (1997). *Aditivo para hormigón*, Universidad Técnica del Medio Este Prensa, Ankara.
- Erdogdu, K., Tokyay, M., Türker, P., (1999). *Traslar ve Traslı Çimentolar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, AR-GE, Y99-2.

Erdogdu, K., (1996) *Efectos de Cementos puzolánicos de diferentes valores de finura y Algunas propiedades mecánicas de los cementos puzolánicos de diferentes valores de finura*, Tesis, Universidad Técnica de Oriente Medio, Ankara.

Galicia Pérez, Mónica A. & Velásquez Curo, Marco A., (2016). *Análisis comparativo de la resistencia a la compresión de un concreto adicionado con ceniza de rastrojo de maíz elaborado con agregados de las canteras de cunyac y vicho con respecto a un concreto patrón de calidad $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$* . Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil de la Universidad Andina del Cuzco Perú. Recuperado el 20 de abril del 2018 de :http://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/UAC/348/3/M%C3%B3nica_Marco_Tesis_bachiller_2016.pdf

Gutiérrez, Kelvin (2017). *Práctica n°5 densidad aparente y densidad real*, Recuperado y revisado el 28 de mayo de 2018 de: <https://es.scribd.com/document/333992351/Densidad-aparente-y-densidad-real-del-suelo-edafologia>.

José Tomás Franco (2013). *El concreto Romano sería mucho más sustentable que el concreto que fabricamos hoy*. ArchDaily Perú. Accedido el 27 mayo 2018 al <<https://www.archdaily.pe/pe/02-304525/el-concreto-romano-seria-mucho-mas-sustentable-que-el-concreto-que-fabricamos-hoy>> ISSN 0719-8914

Lea, F.M., (1970). *The Chemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnold Ltd.

Meral, Cagla (2004). *Use of perlite as a pozzolanic addition in blended cement production*, Tesis de grado para maestro de ciencia en ingeniería civil, escuela de ciencias naturales y aplicadas de la universidad técnica del medio este Turquía. Recuperado el 03 de marzo 2018 de:

<https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/3/12605259/index.pdf>

Pasquel Carbajal, E. (1998). *Tópicos de Tecnología de Concreto*. Colegio de Ingenieros del Perú Consejo Nacional, Lima.

Sánchez Muñoz, Fernando L. & Tapia Medina, Robinson D. (2015).

Relación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto a edades de 3; 7; 14; 28 y 56 días respecto a la resistencia a la compresión de cilindros de concreto a edad de 28 días, tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil de la Universidad Privada Antenor Orrego Trujillo – Perú. Recuperado el 25 de mayo de 2018 de:

http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/688/1/SANCHEZ_FERNANDO_RESISTENCIA_COMPRENSI%C3%93N_CILINDROS.pdf

Vásquez Rosaura, (2006). *Puzolanas*, Jefe de control de calidad de Cementos Pacasmayo, curso de Materiales de Construcción, curso de posgrado UNI-FIC en Tecnología de la Construcción Lima.

Vicente Mercado Rodrigo A. (2016). *Diferencia en la resistencia de los concretos por efecto de los tipos de cemento comercializados en la ciudad de Tacna*”, tesis para optar el título de Ingeniero Civil de la Universidad Privada de Tacna. Recuperado el 04 de mayo de 2018 de: <http://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/UPT/160/1/Vicente-Mercado-Rodrigo-Alexander%20.pdf>

Villegas Martínez, Carlos Alberto (2012) *utilización de puzolanas naturales en la elaboración de prefabricados con base cementicia destinados a la construcción de viviendas de bajo costo*, tesis de grado de maestro en tecnología de la construcción, Lima-Perú .Recuperado el 15 de mayo de 2018 de :http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1304/1/villegas_mc.pdf

YURA, C. (2014). *Manual Digital - Cemento Portland Tipo IP*. Arequipa.

ANEXOS

ANEXO 1: Galería de fotos del diseño de mezcla



Figura 48. Mezcla del cemento, agregado, agua y un % de reemplazo de puzolana natural.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 49: Mezcla homogenizada que se usó para ser moldeada en los tubos de plástico PVC.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 50. Materiales usados para la mezcla, se puede observar el cemento, Rcd, agregado y agua, para la edad de 28 días.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 51. Vaciado de la mezcla en el molde para luego hacer la compactación utilizando la mesa vibratoria.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 52. Probetas colocadas en dos bandejas, para que durante 5 días estén en un medio húmedo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 53. Las probetas tapadas para que mantengan su humedad.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 54. Tapado de las muestras dentro de las bandejas con un plástico para que las briquetas tengan una buena hidratación.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 55. Desmolde después de 5 días de las muestras para el secado y las pruebas a las edades de 7; 17 y 28 días.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 56. Probetas desmoldadas para el control de 14 y 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2: Análisis en el microscopio electrónico de barrido SEM

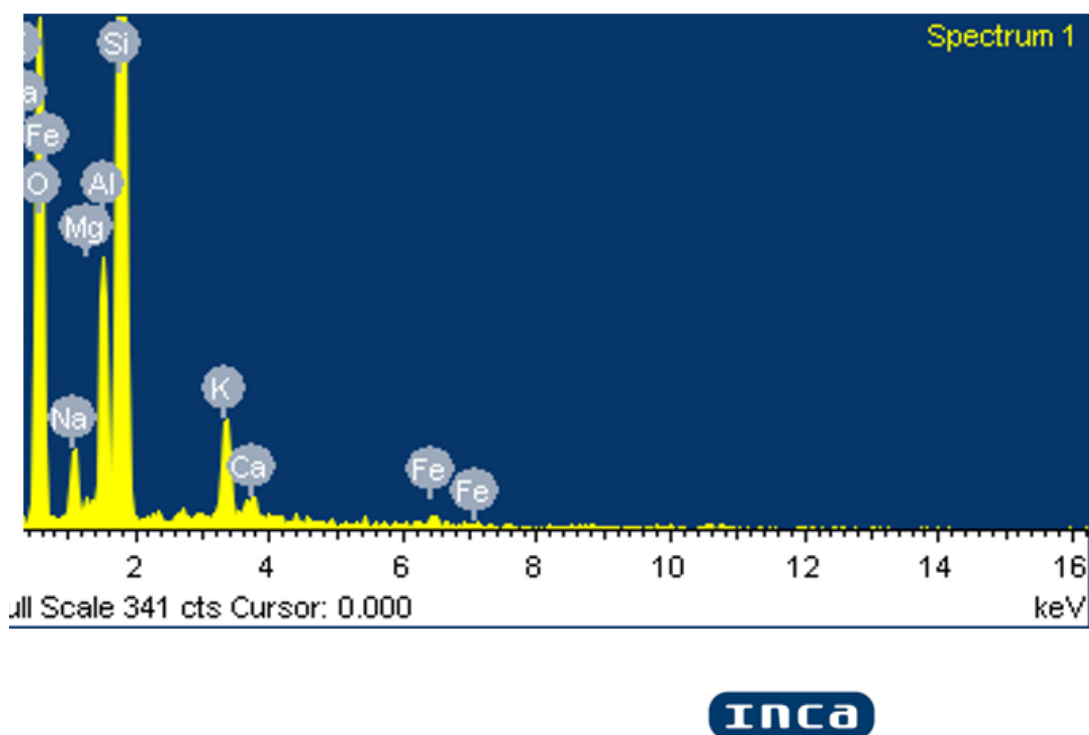


Figura 57. Análisis por elemento de la muestra PA.

Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

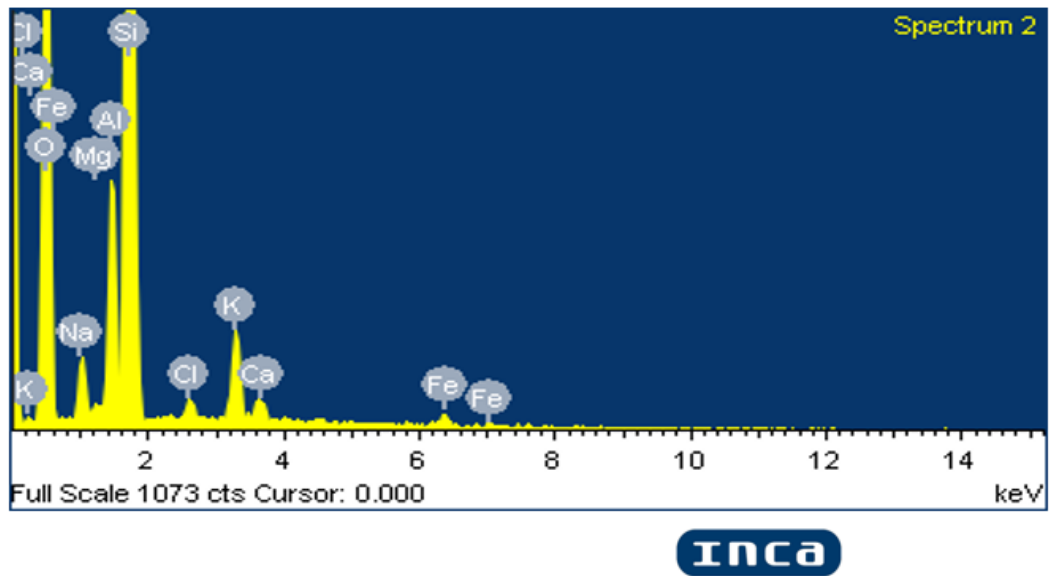


Figura 58. Análisis por elemento de la muestra PB.

Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

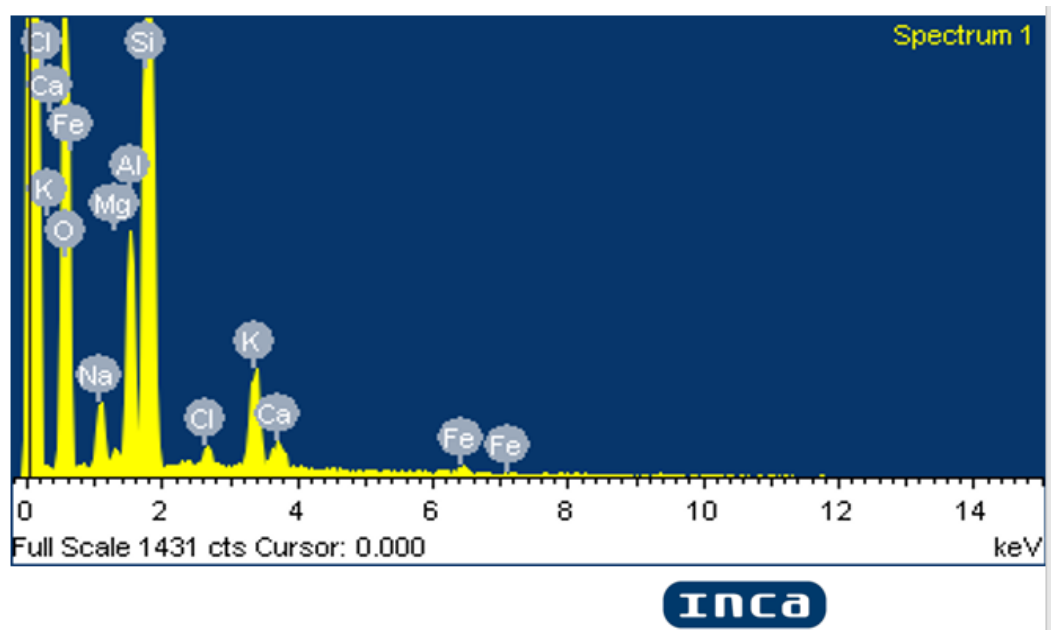
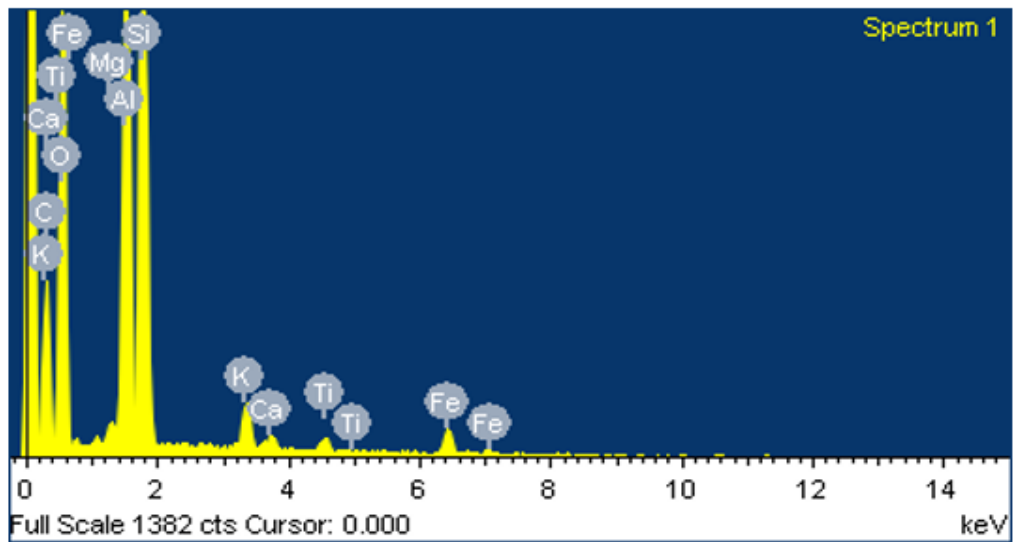


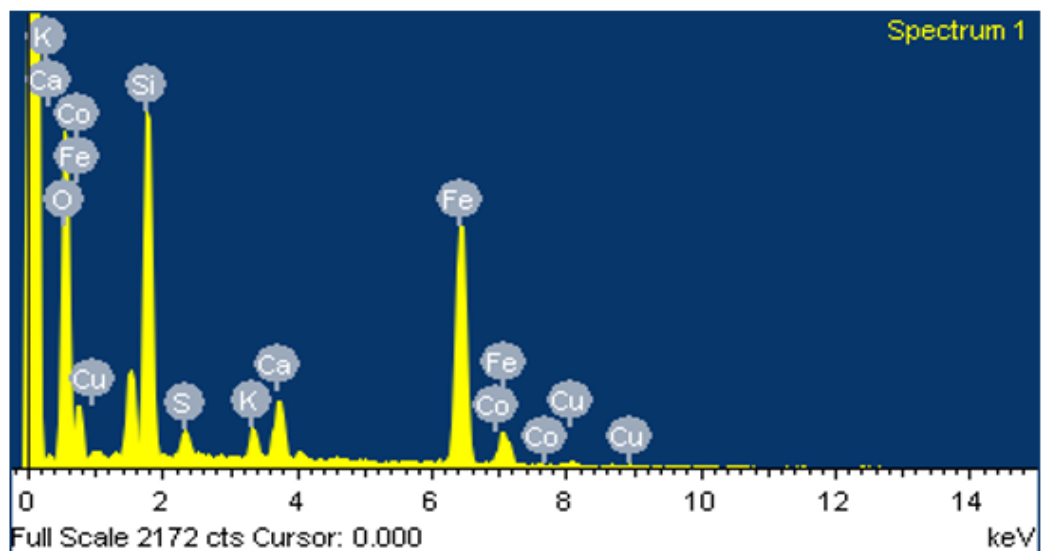
Figura 59. Análisis por elemento de la muestra PC.

Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.



INCA

Figura 60. Análisis por elemento de la muestra FLY ASH.
Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.



INCA

Figura 61. Análisis por elemento de la muestra Escoria.
Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

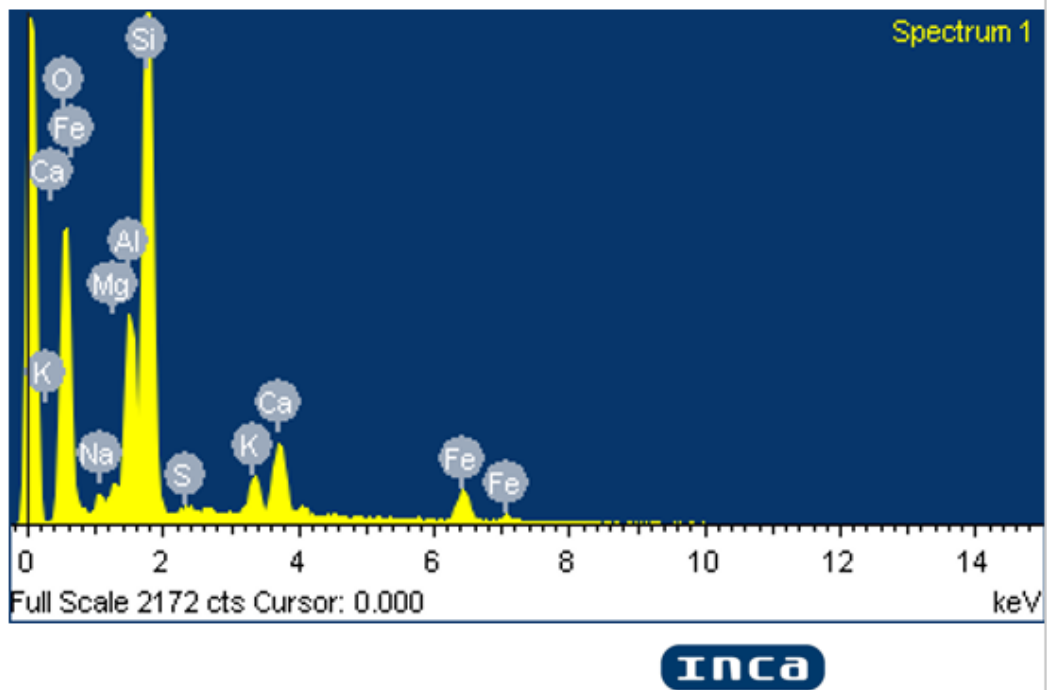


Figura 62. Análisis por elemento de la muestra RCD.
Fuente: Laboratorio de microscopia de la ESME.

ANEXO 3: Norma Técnica peruana Y ASTM revisados para la elaboración de la tesis

Las normas técnicas revisadas fueron las siguientes:

NTP 334.045:2010

Título:

CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la finura del cemento Portland por el tamiz de 45 μm (No. 325)

Publicado:2010/09/26

Resumen:

Establece la determinación de la finura del cemento por tamizado húmedo, mediante el empleo del tamiz normalizado N° 325 (45 μm).

NTP 334.051:2013

Título:

CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento Portland usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado

Publicado:2014/01/16

Resumen:

Establece el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión en morteros de cemento Portland, usando cubos de 50 mm de lado.

NTP 334.127:2012 (revisada el 2017)

Título:

CEMENTOS. Adiciones minerales del cemento y concreto: puzolana natural cruda o calcinada y ceniza volante. Métodos de ensayo. 2ª Edición

Publicado:2017/12/18

Resumen:

La presente Norma Técnica Peruana establece los procedimientos para el muestreo y ensayo de la puzolana natural cruda o calcinada y la ceniza volante empleadas como adición mineral del cemento y concreto.

NTP 334.104:2011 (revisada 2016)

Título:

CEMENTOS. Ceniza volante y puzolana natural cruda o calcinada para uso en concreto. Especificaciones. 2ª Edición (Basada ASTM C618-08a)

Publicado:2016/08/02

Resumen:

Esta Norma Técnica Peruana establece las especificaciones para la ceniza volante y la puzolana natural cruda o calcinada empleadas como adición mineral en concreto donde se requiere de su acción puzolánica o cementosa, o ambas, si se desea, o donde se requiere de otras propiedades normalmente atribuidas a cenizas volantes o puzolana, o donde se quiere alcanzar ambos propósitos. NOTA 1: Los materiales finamente divididos pueden tender a reducir el contenido de aire incorporado en el concreto. Por tanto, si se agregan cenizas volantes o puzolana natural a algún concreto que se le ha especificado aire incorporado, se deberían tomar medidas para asegurar que se mantiene el contenido de aire especificado sea mediante ensayos de contenido de aire y mediante el empleo de aditivo incorporador de aire adicional o mediante el uso de una adición incorporadora de aire en combinación con el cemento Pórtland con aire incorporado.

NTP 400.037:2018**Título:**

AGREGADOS. Agregados para concreto. Requisitos. 4ª Edición

Publicado:2018/02/08

Resumen:

Esta Norma Técnica Peruana establece los requisitos de granulometría y calidad de los agregados finos y gruesos para uso en concreto. Esta NTP es aplicable para uso del contratista, el proveedor del concreto u otros vendedores como parte del documento de venta en que se describe el material a proporcionar. NOTA 1: Esta especificación se considera adecuada para asegurar materiales adecuados en la mayoría de los concretos. Sin embargo, para algunos trabajos o en algunas regiones se pueden necesitar especificaciones más o menos restrictivas. Por ejemplo, cuando la estética es importante habrá límites más restrictivos en relación con las impurezas que pudiera disturbar el aspecto de la superficie del concreto. Esta NTP es aplicable para ser usada en especificaciones técnicas para el proyecto de construcción, definiendo la calidad y otras características específicas del agregado.

